Praca zbiorowa pod redakcją
Sebastiana **WERLE**
Joanny **FERDYN-GRYGIEREK**
Marcina **SZCZYGŁA**

MONOGRAFIA

OCHRONA KLIMATU I ŚRODOWISKA, NOWOCZESNA ENERGETYKA

Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka

PRIORYTETOWE OBSZARY BADAWCZE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Politechnika Śląska

UCZELNIA BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
GLIWICE 2021
UIW 48600

Praca zbiorowa pod redakcją
Sebastiana WERLE
Joanny FERDYN-GRYGIEREK
Marcina SZCZYGŁA

OCHRONA KLIMATU I ŚRODOWISKA, NOWOCZESNA ENERGETYKA

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
GLIWICE 2021
UIW 48600

Opiniodawcy
Prof. dr hab. inż. Robert SEKRET
Prof. dr hab. inż. Maria WŁODARCZYK-MAKUŁA

Kolegium redakcyjne
REDAKTOR NACZELNY – Dr hab. inż. Barbara KULESZ, prof. PŚ
REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Jolanta GUMIŃSKA, prof. PŚ
SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Jolanta NIDERLA-WITKOWSKA

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Projekt okładki
Maciej MUTWIL

ISBN 978-83-7880-790-2
e-ISBN 978-83-7880-802-2

© Copyright by
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
Gliwice 2021

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA 7

1. ZMIANY KLIMATU I ŚRODOWISKA ORAZ REDUKCJA ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA 9

Hanna Barchańska, Magdalena Danek, Mariusz Dudziak, Klaudiusz Fross, Marzena Kłusek, Edyta Kudlek, Anna Mainka, Sławomira Pawełczyk, Jacek Pawlyta, Natalia Piotrowska, Joanna Płonka, Barbara Słomka-Słupik, Leszek Szojda, Krzysztof Tomiczek, Elwira Zajusz-Zubek

2. GOSPODARKA WODNO-ŚCIEKOWA ORAZ BIOTECHNOLOGIA ŚRODOWISKOWA 43

Gabriela Kamińska, Sebastian Żabczyński, Józef Ober, Janusz Karwot, Aleksandra Kuzior, Ewa Puszczało, Barbara Pieczykolan, Krzysztof Barbusiński, Edyta Kudlek, Mariusz Dudziak, Izabela Płonka, Joanna Wyczarska-Kokot, Anna Banach-Wiśniewska, Grzegorz Cema, Magdalena Ćwiertniewicz-Wojciechowska, Filip Gamoń, Piotr Gutwiński, Joanna Surmacz-Górska, Mariusz Tomaszewski, Aleksandra Ziembińska-Buczyńska, Anna Gnida, Dorota Marciocha, Dariusz Choiński, Mieczysław Metzger, Witold Nocoń, Jakub Pośpiech, Piotr Skupin, Wioletta Przystaś, Joanna Willner, Agnieszka Fornalczyk, Marta Przypis, Agata Gruszka, Danuta Gillner

3. GOSPODARKA OBIEGU ZAMKNIĘTEGO 71

Joanna Willner, Agnieszka Fornalczyk, Mariola Saternus, Dawid Franke, Tomasz Suponik, Marian Turek, Piotr Dydo, Agata Jakóbik-Kolon, Joanna Kluczka, Krzysztof Mitko, Dorota Babilas, Andrzej Milewski, Sylwester Kalisz, Piotr Sakiewicz, Krzysztof Piotrowski, Szymon Ciukaj, Izabella Maj, Joanna Wnorowska, Mateusz Lis, Przemysław Garbacz, Jakub Sobieraj, Marcin Górski, Rafał Krzywoń, Szymon Dawczyński, Natalia Wielgus, Ewa Strzałkowska, Marcin Landrat, Waldemar Ścierski, Wojciech Hryb, Michał Kozioł, Andrzej J. Wandrasz, Aurelia Rybak, Aleksandra Rybak, Marcin Lutyński, Tomasz Siudyga, Małgorzata Hordyńska

4. ODNAWIALNE I ALTERNATYWNE ŹRÓDŁA ENERGII ORAZ ENERGETYKA PROSUMENCKA 103

Marek Szindler, Marcin Fice, Aleksandra Drygała, Magdalena Szindler, Krzysztof Lukaszkowicz, Mirosława Pawlyta, Małgorzata Musztyfaga-Staszuk, Paweł Jarka, Tomasz Tański, Błażej Tomiczek, Grzegorz Matula, Krzysztof Bodzek, Sebastian Werle, Sobek Szymon, Zuzanna Kaczor, Zbigniew Buliński

5. INNOWACYJNE TECHNOLOGIE I ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ 138
Tomasz Trawiński, Marcin Szczygieł, Dariusz Choiński, Piotr Skupin, Krzysztof Stebel, Andrzej Malcher, Krzysztof Dobosz, Erwin Maciak, Zbigniew Kaczmarczyk, Marcin Kasprzak, Mariusz Stępień, Krzysztof Bodzek, Krystian Frania, Kamil Kierepka, Krzysztof Przybyła, Piotr Zimoch, Ryszard Walentyński, Tomasz Krykowski, Agnieszka Padewska-Jurczak, Maciej Wiśniowski, Dawid Cornik, Sebastian Rulik, Włodzimierz Wróblewski, Krzysztof Rusin, Leszek Remiorz, Krzysztof Grzywnowicz, Grzegorz Wiciak

6. EDUKACJA DLA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU I KSZTAŁTOWANIE ŚWIADOMOŚCI EKOLOGICZNEJ..... 174
Aleksandra Kuzior, Krzysztof Rostański, Patrycja Hąbek, Izabela Marszałek-Kotzur, Grażyna Płaza, Katarzyna Midor, Małgorzata Hordyńska

7. PROBLEMY DEGRADACJI I REWITALIZACJA TERENÓW 209
Magdalena Żmudzińska-Nowak, Krzysztof Gasidło, Krzysztof Rostański, Michał Stangel, Rafał Jendruś, Tadeusz Mzyk, Jolanta Turek-Szytow, Hanna Barchańska, Joanna Płonka, Łukasz Gawor, Marek Marcisz, Zenon Różański

8. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA I ZARZĄDZANIE ENERGIĄ..... 232
Tomasz Steidl, Agnieszka Szymanowska-Gwiżdż, Janusz Belok, Joanna Ferdyn-Grygierek; Krzysztof Grygierek, Wojciech Skarka

9. MAGAZYNOWANIE ENERGII I ENERGETYKA WODOROWA 270
Łukasz Bartela, Tadeusz Chmielniak, Daria Katla, Wojciech Kosman, Sebastian Lepszy, Marcin Lutyński, Grzegorz Peczkis, Andrzej Rusin, Anna Skorek-Osikowska, Bartosz Stanek, Katarzyna Stolecka, Sebastian Werle, Karolina Zaik

10. KSZTAŁTOWANIE ŚRODOWISKA WEWNĘTRZNEGO I INTELIGENTNE BUDYNKI..... 305
Joanna Ferdyn-Grygierek, Ewa Brągoszewska, Piotr Ciuman, Leszek Dulak, Tomasz Grychowski, Krzysztof Grygierek, Barbara Kozielska, Andrzej Kozyra, Małgorzata Król, Aleksandra Lipczyńska, Artur Nowoświat, Karolina Szulc, Józef Wiora

11. STRATEGIA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU ENERGETYKI I ENERGETYKA GAZOWA 336
Dawid Buła, Grzegorz Jarek, Henryk Kocot, Wojciech Kosman, Roman Krok, Paweł Kubek, Henryk Łukowicz, Anna Manowska, Jarosław Michalak, Grzegorz Nowak, Maksymilain Przygrodzki, Andrzej Rusin, Martyna Tomala, Marcin Zygmanowski

STRESZCZENIE..... 358

CONTENTS

PREFACE 7

1. CLIMATE AND ENVIRONMENTAL CHANGES AND REDUCTION OF AIR POLLUTION 9

Hanna Barchańska, Magdalena Danek, Mariusz Dudziak, Klaudiusz Fross, Marzena Kłusek, Edyta Kudlek, Anna Mainka, Sławomira Pawełczyk, Jacek Pawlyta, Natalia Piotrowska, Joanna Płonka, Barbara Słomka-Słupik, Leszek Szojda, Krzysztof Tomiczek, Elwira Zajusz-Zubek

2. WATER AND WASTEWATER MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY 43

Gabriela Kamińska, Sebastian Żabczyński, Józef Ober, Janusz Karwot, Aleksandra Kuzior, Ewa Puszczało, Barbara Pieczykolan, Krzysztof Barbusiński, Edyta Kudlek, Mariusz Dudziak, Izabela Płonka, Joanna Wyczarska-Kokot, Anna Banach-Wiśniewska, Grzegorz Cema, Magdalena Ćwiertniewicz-Wojciechowska, Filip Gamoń, Piotr Gutwiński, Joanna Surmacz-Górska, Mariusz Tomaszewski, Aleksandra Ziembińska-Buczyńska, Anna Gnida, Dorota Marciocha, Dariusz Choiński, Mieczysław Metzger, Witold Nocoń, Jakub Pośpiech, Piotr Skupin, Wioletta Przystaś, Joanna Willner, Agnieszka Fornalczyk, Marta Przypis, Agata Gruszka, Danuta Gillner

3. CIRCULAR ECONOMY 71

Joanna Willner, Agnieszka Fornalczyk, Mariola Saternus, Dawid Franke, Tomasz Suponik, Marian Turek, Piotr Dydo, Agata Jakóbik-Kolon, Joanna Kluczka, Krzysztof Mitko, Dorota Babilas, Andrzej Milewski, Sylwester Kalisz, Piotr Sakiewicz, Krzysztof Piotrowski, Szymon Ciukaj, Izabella Maj, Joanna Wnorowska, Mateusz Lis, Przemysław Garbacz, Jakub Sobieraj, Marcin Górski, Rafał Krzywoń, Szymon Dawczyński, Natalia Wielgus, Ewa Strzałkowska, Marcin Landrat, Waldemar Ścierski, Wojciech Hryb, Michał Kozioł, Andrzej J. Wandrasz, Aurelia Rybak, Aleksandra Rybak, Marcin Lutyński, Tomasz Siudyga, Małgorzata Hordyńska

4. RENEWABLE AND ALTERNATIVE ENERGY SOURCES AND PROSUMER ENERGY 103

Marek Szindler, Marcin Fice, Aleksandra Drygała, Magdalena Szindler, Krzysztof Lukaszkowicz, Mirosława Pawlyta, Małgorzata Musztyfaga-Staszuk, Paweł Jarka, Tomasz Tański, Błażej Tomiczek, Grzegorz Matula, Krzysztof Bodzek, Sebastian Werle, Sobek Szymon, Zuzanna Kaczor, Zbigniew Buliński

5. INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT 138
Tomasz Trawiński, Marcin Szczygieł, Dariusz Choiński, Piotr Skupin, Krzysztof Stebel, Andrzej Malcher, Krzysztof Dobosz, Erwin Maciak, Zbigniew Kaczmarczyk, Marcin Kasprzak, Mariusz Stępień, Krzysztof Bodzek, Krystian Frania, Kamil Kierepka, Krzysztof Przybyła, Piotr Zimoch, Ryszard Walentyński, Tomasz Krykowski, Agnieszka Padewska-Jurczak, Maciej Wiśniowski, Dawid Cornik, Sebastian Rulik, Włodzimierz Wróblewski, Krzysztof Rusin, Leszek Remiorz, Krzysztof Grzywnowicz, Grzegorz Wiciak

6. EDUCATION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND SHAPING ENVIRONMENTAL AWARENESS 174
Aleksandra Kuzior, Krzysztof Rostański, Patrycja Hąbek, Izabela Marszałek-Kotzur, Grażyna Płaza, Katarzyna Midor, Małgorzata Hordyńska

7. PROBLEMS OF DEGRADATION AND REVITALIZATION OF AREAS 209
Magdalena Żmudzińska-Nowak, Krzysztof Gasidło, Krzysztof Rostański, Michał Stangel, Rafał Jendruś, Tadeusz Mzyk, Jolanta Turek-Szytow, Hanna Barchańska, Joanna Płonka, Łukasz Gawor, Marek Marcisz, Zenon Różański

8. ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY MANAGEMENT 232
Tomasz Steidl, Agnieszka Szymanowska-Gwiżdż, Janusz Belok, Joanna Ferdyn-Grygierek; Krzysztof Grygierek, Wojciech Skarka

9. ENERGY STORAGE AND HYDROGEN ENERGY 270
Łukasz Bartela, Tadeusz Chmielniak, Daria Katla, Wojciech Kosman, Sebastian Lepszy, Marcin Lutyński, Grzegorz Peczkis, Andrzej Rusin, Anna Skorek-Osikowska, Bartosz Stanek, Katarzyna Stolecka, Sebastian Werle, Karolina Zaik

10. SHAPING THE INTERNAL ENVIRONMENT AND INTELLIGENT BUILDINGS 305
Joanna Ferdyn-Grygierek, Ewa Brągoszewska, Piotr Ciuman, Leszek Dulak, Tomasz Grychowski, Krzysztof Grygierek, Barbara Kozielska, Andrzej Kozyra, Małgorzata Król, Aleksandra Lipczyńska, Artur Nowoświat, Karolina Szulc, Józef Wiora

11. STRATEGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENERGY AND GAS ENERGY 336
Dawid Buła, Grzegorz Jarek, Henryk Kocot, Wojciech Kosman, Roman Krok, Paweł Kubek, Henryk Łukowicz, Anna Manowska, Jarosław Michalak, Grzegorz Nowak, Maksymilain Przygrodzki, Andrzej Rusin, Martyna Tomala, Marcin Zygmanowski

ABSTRACT 361

PRZEDMOWA

W ramach realizacji programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza, Politechnika Śląska kumuluje potencjał oraz znacząco rozwija współpracę wewnętrzną i zewnętrzną w sześciu Priorytetowych Obszarach Badawczych. Jednym z nich jest szósty Priorytetowy Obszar Badawczy (POB6) „Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka". Sektor energetyczny to kluczowy przemysł, o dużym wpływie na system społeczno-gospodarczy, zaś ochrona środowiska oraz kontrola zmian klimatycznych są priorytetami w dążeniu do zrównoważonego rozwoju. Prezentowana Monografia przedstawia potencjał POB6 w zakresie osiągnięć naukowo-badawczych i opracowanych technologii.

Monografię podzielono na 11 rozdziałów:

- Zmiany klimatu i środowiska oraz redukcja zanieczyszczenia powietrza.
- Gospodarka wodno-ściekowa oraz biotechnologia środowiskowa.
- Gospodarka obiegu zamkniętego.
- Odnawialne i alternatywne źródła energii oraz energetyka prosumencka.
- Innowacyjne technologie i zrównoważony rozwój.
- Edukacja dla zrównoważonego rozwoju i kształtowanie świadomości ekologicznej.
- Problemy degradacji i rewitalizacja terenów.
- Efektywność energetyczna i zarządzanie energią.
- Magazynowanie energii i energetyka wodorowa.
- Kształtowanie środowiska wewnętrznego i inteligentne budynki.
- Strategia zrównoważonego rozwoju energetyki i energetyka gazowa.

Autorami rozdziałów są pracownicy Politechniki Śląskiej prowadzący badania naukowe w ramach POB6.

1. ZMIANY KLIMATU I ŚRODOWISKA ORAZ REDUKCJA ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA

1.1. Wprowadzenie

Zmiany klimatu, degradacja środowiska i zanieczyszczenie powietrza stanowią zagrożenie dla Europy i reszty świata. Przeciwdziałanie tym niekorzystnym zmianom jest kluczowym celem polityki Unii Europejskiej. W UE opracowano plan działań pod nazwą „Europejski Zielony Ład", opierając się na zasadach zrównoważonej gospodarki, zmierzający między innymi do zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów i zmniejszenia poziomu zanieczyszczeń.

Prace i badania prowadzone na Politechnice Śląskiej w ramach Podobszaru Badawczego 6.1 „Zmiany klimatu i środowiska oraz redukcja zanieczyszczenia powietrza" wpisują się w strategię działań UE. Są to badania interdyscyplinarne, prowadzone na różnych Wydziałach Politechniki Śląskiej, realizowane przez doświadczone zespoły naukowców z udziałem specjalistów z całego świata.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wybrane przykłady badań prowadzonych na Politechnice Śląskiej w zakresie przeciwdziałania niekorzystnym zmianom klimatu i środowiska oraz redukcji zanieczyszczenia powietrza. Są to badania i działania, m.in.:

- w zakresie energooszczędnych i ekologicznych rozwiązań architektonicznych uwzględniających wymogi ochrony środowiska,
- wpływu deformacji na terenach zdegradowanych eksploatacją podziemną na konstrukcje budowlane,
- zagospodarowania odpadów pogórniczych i wykorzystania ich do rekultywacji terenów,
- wpływu migracji gruntów na zachownie się zrekultywowanych składowisk odpadów poprzemysłowych,
- stosowania ekologicznych bezcementowych spoiw dla budownictwa,
- określenia stopnia zagrożenia wynikającego ze stosowania pestycydów na podstawie badań zmian metabolizmu wtórnego roślin,

- oceny efektywności oczyszczania wody w złożonych procesach utleniających, oceny zanieczyszczenia powietrza pierwiastkami i frakcjami pyłowymi szkodliwymi dla zdrowia, między innymi w sąsiedztwie zakładów energetycznych i koksowniczych,
- badań dedroklimatycznych w celu opisania i oceny zmian klimatycznych.

1.2. Wydział Architektury – 8 działań dla klimatu i środowiska

Wprowadzenie

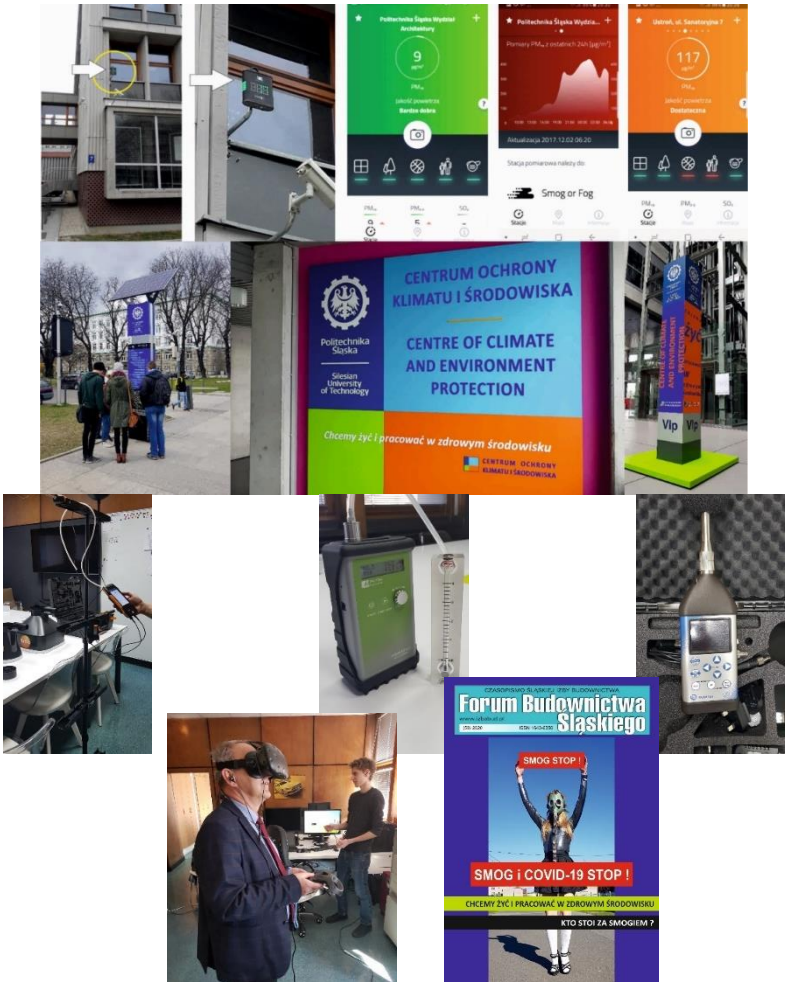
Wydział Architektury to innowacyjna jednostka Uczelni Badawczej Politechniki Śląskiej, najważniejszy ośrodek kształcenia architektów i urbanistów na Górnym Śląsku oraz jeden z najbardziej znaczących architektonicznych ośrodków naukowych i twórczych w Polsce. Na Wydziale prowadzi się innowacyjne przedsięwzięcia między innymi związane z Priorytetowymi Obszarami Badawczymi Politechniki Śląskiej, projektowaniem parametrycznym, projektowaniem uniwersalnym, architekturą senioralną, dla osób niewidomych i słabowidzących, ergonomią, konserwacją zabytków i rewitalizacjami obiektów poprzemysłowych, smart city, ochroną klimatu i środowiska, architekturą kosmiczną, propagowaniem sztuki i dizajnu w przestrzeni publicznej, wykorzystaniem technologii VR (virtual reality). Pracownicy badawczo-dydaktyczni powadzą także badania nad przyszłością architektury i urbanistyki – architektury spełniającej potrzeby użytkowników kolejnych pokoleń [1].

Osiem ważnych działań na rzecz ochrony klimatu i środowiska

W zakresie działań związanych z architekturą energooszczędną i ekologiczną, oraz na rzecz ochrony klimatu i środowiska, na Wydziale Architektury (rys. 1.1):

- Zapoczątkowano pionierskie w skali kraju, badania w propagowaniu dydaktyki i badań naukowych w zakresie architektury energooszczędnej i proekologicznej – Śląska Szkoła Architektury Energooszczędnej ma 25 lat (od 1995 r.).
- Wydano w 1995 roku pierwszy w Polsce skrypt o architekturze energooszczędnej.
- Rozpoczęto pionierskie badania jakościowe środowiska zbudowanego – Śląska Szkoła Badań Jakościowych ma 23 lata (od 1996 r.) – lansowanie projektowania z wykorzystaniem badań – Design by Research and Research by Design.

- Zorganizowano Pracownię Badań Jakości Środowiska Zbudowanego i VR (Virtual Reality) – Katedra RAr5 (Projektowania i Badań Jakościowych w Architekturze).
- W 2016 roku zainstalowano na budynku przy ul. Akademickiej 7 w Gliwicach, pierwszy czujnik smogu na Politechnice Śląskiej z aplikacją „Smog or Fog".
- Zainicjowano liczne wystąpienia i referaty w zakresie walki ze smogiem (Węgiel a Niska Emisja 2017, Forum Budownictwa 2019 i 2020, Salon Genius Loci 2020).
- Brano udział w działaniach tworzenia Centrum Ochrony Klimatu i Środowiska.
- Wspierano badania nad przyszłością architektury w kontekście zmian klimatycznych, nowych wyzwań i potrzeb ludzkości, między innymi badania jakościowe w samowystarczalnym habitacie kosmicznym LunAres (symulacja misji na Księżycu).



Rys. 1.1. Wybrane działania na rzecz architektury energooszczędnej oraz ochrony klimatu i środowiska
Fig. 1.1. Selected actions for energy-efficient architecture and climate and environmental protection
Źródło: Archiwum K. Fross.

Śląska Szkoła Architektury Energooszczędnej

Problem energooszczędności podjęto na Wydziale Architektury już w 1995 roku prowadzono zajęcia dla studentów z Projektowania Architektury Energooszczędnej oraz wydano pierwszy w Polsce skrypt pt. „Odnawialne źródła energii w architekturze" [2]. Śląska Szkoła Architektury Energooszczędnej działa od 26 lat (od 1995 r.), a Śląska Szkoła Badań Jakościowych posiada 25 lat doświadczeń (od 1996 r.) (twórcy i kontynuatorzy: A. Niezabitowski, E. Niezabitowska, K. Fross, J. Tymkiewicz, D. Winnicka-Jasłowska, A. Szewczenko, M. Bielak-Zasadzka, M. Tomanek, K. Gerlic, M. Sitek, I. Benek, A. Bugno-Janik, A. Gumińska, D. Masły, T. Szuliński). Zajęcia dla studentów dotyczą projektowania obiektów energooszczędnych, proekologicznych, ekonomicznych, efektywnych, spełniających potrzeby użytkowników. Natomiast oceny jakościowe środowiska zbudowanego stanowią podstawę do programowania i projektowania, bazę dobrych praktyk oraz popełnianych błędów np. [3]. W ramach Katedry RAr5 zorganizowano i wyposażono w nowoczesny sprzęt pomiarowy Pracownię Badań Jakości Środowiska Zbudowanego i VR. Pracownia dysponuje urządzeniami pomiarowymi do badań: mikroklimatu wnętrz (temperatura, wilgotność), sprawności wentylacji, jakość oświetlenia, termowizji obiektów, hałasu, zanieczyszczeń powietrza – smogu, wilgotności, zawilgocenia różnych materiałów, oświetlenia.

Chcemy tworzyć dobrą architekturę w zdrowym środowisku

Jest to hasło wprowadzone przez Dziekana Wydziału Architektury Politechniki Śląskiej, będące apelem o podawanie rzetelnych informacji nt. zanieczyszczenia powietrza oraz wezwaniem do popularyzacji wiedzy o ochronie środowiska. W 2016 roku na budynku Wydziału za sprawą Dziekana umieszczono pierwszy na Politechnice Śląskiej, a drugi w Gliwicach czujnik smogu [4]. Zadanie zrealizowano wspólnie z firmą Fulco, z osobistym wsparciem prezesa Łukasza Siódmoka. Jednocześnie udostępniono darmową aplikację „Smog or Fog" (do pobrania na www.smogorfog.pl) pozwalającą obserwować nie tylko odczyty z politechnicznego czujnika, ale także wszystkich czujników w Polsce. W 2020 roku na Politechnice zamontowano kolejny czujnik smogu na jednym z samowystarczalnych energetycznie pylonów informacyjnych. Zawsze od wiedzy i rzetelnej informacji należy rozpocząć wszelkie dalsze działania i jest to główny obowiązek każdego pracownika badawczo-dydaktycznego. Dlatego w 2020 roku otwarto na naszej Uczelni, o statucie Uczelni Badawczej – Centrum Ochrony Klimatu i Środowiska.

Samowystarczalne energetycznie pylony informacyjne w Kampusie

Połączenie LED i fotowoltaiki daje doskonałe rezultaty. Najważniejsze, jest to, że technologie oświetleniowe stale się rozwijają, a źródła światła są coraz to efektywniejsze, tańsze w zakupie o większej mocy i wydajności. W kampusie Politechniki Śląskiej w 2019 roku zrealizowano 12 szt. 300-watowych, samowystarczalnych energetycznie pylonów informacyjnych dużej mocy z panelem fotowoltaicznym. Pylony wyposażono w dodatkowe funkcjonalności, jak zegar, stację pogodową, czujnik smogu. Realizacja daje możliwość prowadzenia badań nad efektywnością fotowoltaiki w różnych okresach roku. W pylonach zastosowano zaawansowane technologie, algorytmy działania i czujniki ruchu (wykonawca zadania Fulco System Sp. z o.o., proj. K. Fross 2019).

Podsumowanie i wnioski

Naukowcy z Wydziału Architektury Politechniki Śląskiej są pionierami w skali kraju w propagowaniu dydaktyki i badań naukowych w zakresie architektury energooszczędnej i proekologicznej. Świadczy o tym wydany w 1995 roku pierwszy w Polsce skrypt o architekturze energooszczędnej. Pracownicy Wydziału są również pionierami w badaniach jakościowych środowiska zbudowanego i odbywali liczne wystąpienia i wygłaszali referaty w zakresie walki ze smogiem. Ponadto brali udział w działaniach tworzenia Centrum Ochrony Klimatu i Środowiska Politechniki Śląskiej. Misją Wydziału jest wspieranie badań nad przyszłością architektury w kontekście zmian klimatycznych, nowych wyzwań i potrzeb ludzkości, między innymi badania jakościowe w samowystarczalnym habitacie kosmicznym LunAres (symulacja misji na Księżycu).

1.3. Analiza numeryczna wpływu deformacji terenu pochodzenia górniczego na konstrukcje budowlane

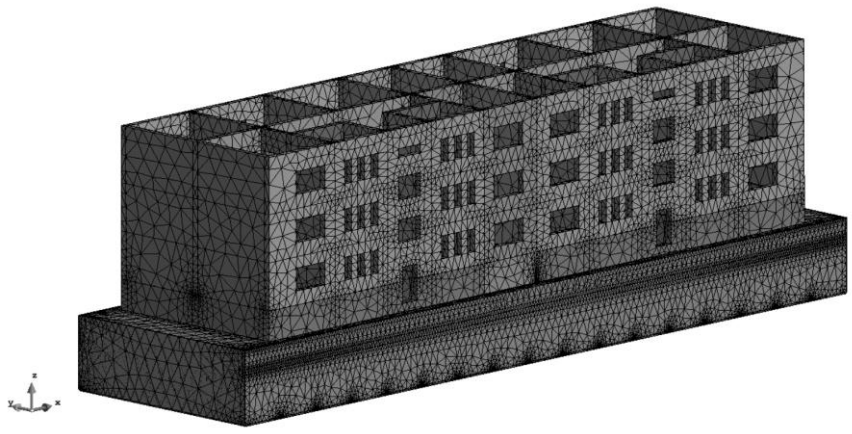
Wprowadzenie

Wpływ deformacji górniczych podłoża na obiekty budowlane jest w dalszym ciągu znaczący [5]. Pomimo ograniczania wydobycia węgla kamiennego, to nawet po całkowitym zamknięciu zakładów górniczych należy w dalszym ciągu spodziewać się deformacji terenu. Jest to spowodowane zaprzestaniem odwadniania i utrzymywania

wyrobisk, co doprowadzi do zachwiania równowagi w górotworze kolejnych deformacji terenu [6]. Z tego powodu temat zagrożenia obiektów budowlanych uszkodzeniami pochodzenia górniczego jest w dalszym ciągu aktualny. Przewidywanie zachowania się obiektów poddanych deformacjom terenu, zwłaszcza w kontekście niezabezpieczonych budynków jest szczególnie aktualne. Dokładność prowadzonych analiz zależna jest od uwzględnienia wielu czynników, do których między innymi można zaliczyć uwzględnienie szczegółowości prognoz deformacji podłoża, zastosowanego układu obliczeniowego budowla-podłoże górnicze, przyjętego modelu materiałowego analizy numerycznej, dokładności modelu numerycznego i siatki MES. Poniżej przedstawiono dwa przykłady przeprowadzonych analiz budynków poddanych deformacjom podłoża.

Murowany budynek wielorodzinny

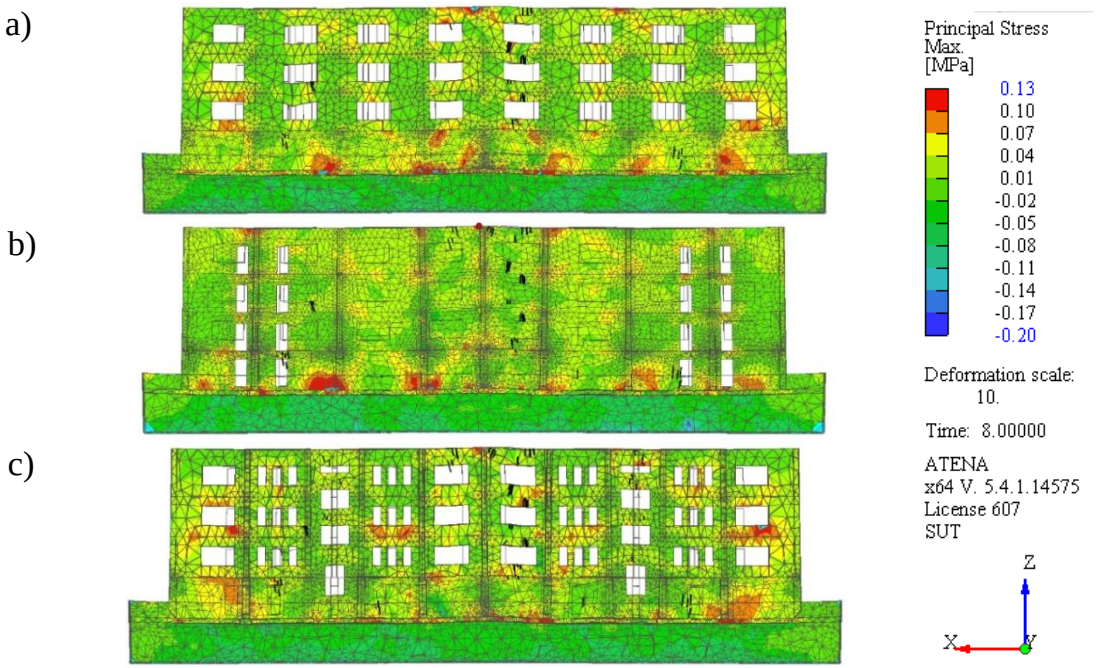
Przedmiotowy budynek został wzniesiony w początku XX wieku i wykonany jest w technologii tradycyjnej. Głównym elementem konstrukcyjnym są murowane ściany, które podpierają drewniane stropy i dach. Te ostatnie elementy nie zostały uwzględnione w obliczeniach numerycznych jako elementy mające bardzo mały wpływ na sztywność konstrukcji. Teren wraz z budynkiem był poddawany wielokrotnej eksploatacji górniczej, a ujawniające się deformacje miały charakter ciągły. Szczegółowy opis konstrukcji i sytuacji górniczej podano w [7]. Model numeryczny analizowanego układu pokazano na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Model analizowanego układu budowla-podłoże górnicze z elementami MES
Fig. 1.2. Model of the analyzed building-mining substrate with FEM elements

Analizę numeryczną wykonano dla konstrukcji murowej z warstwą podłoża, która była poddana wygięciu do pomierzonego promienia krzywizny terenu R=+33,0 km

oraz poziomego odkształcenia podłoża ε=+0,9 mm/m. W analizie wykorzystano przestrzenny model obiektu wraz z gruntem (rys. 1.2), a obliczenia wykonano programem Atena [8]. Obciążenia przykładano w kolejnych krokach, które odpowiadały charakterystycznym punktom brzegu niecki górniczej. Na rys. 1.3 przedstawiono mapę naprężeń głównych σ_{max} w ścianach podłużnych budynku przy największym wpływie krzywizny wypukłej $+K$ i dodatniego odkształcenia poziomego $+\varepsilon$.



Rys. 1.3. Naprężenia główne σ_{max} w ścianach podłużnych budynku przy największej krzywiźnie $+K$ i odkształceniu poziomym $+\varepsilon$: a) ściana w osi 1, b) ściana w osi 2, c) ściana w osi 3

Fig. 1.3. Principal stresses σmax in longitudinal walls of the building at the highest curvature $+K$ and horizontal deformation $+\varepsilon$: a) wall along axis 1, b) wall along axis 2, c) wall along axis 3

Podsumowanie i wnioski

Deformacje podłoża pochodzenia górniczego stanowią nadal zagrożenie dla obiektów budowlanych. Mają one szczególne znaczenie dla obiektów, które nie zostały zabezpieczone przed takimi wpływami w czasie ich wznoszenia w aspekcie dotychczasowej intensywnej eksploatacji węgla kamiennego w GZW. Umiejętność przewidywania uszkodzeń ujawniających się w budynkach będących następstwem prognozowanych deformacji górniczych jest szczególnie pożądana. Przedstawione, wybrane analizy numeryczne MES z uwzględnieniem układu budowla-podłoże są przykładami prognozowania i opisu potencjalnych zagrożeń dla budynków posadowionych na terenach poddanych eksploatacji podziemnej.

1.4. Zastosowanie geomechaniki oraz geotechniki do rozwiązywania problemów ochrony środowiska i zanieczyszczeń pogórniczych

Wprowadzenie

Wszystkie działania inżynierskie prowadzone w obrębie masywów skalnych i przypowierzchniowych warstw gruntu wymagają działań geoinżynierskich, opartych o wiedzę czerpaną z rozwiązań geomechaniki i geotechniki. Te z kolei, bazują na mechanice skał i mechanice gruntów. Analizy stateczności wszystkich budowli naziemnych, ziemnych i podziemnych wymagają użycia narzędzi analitycznych i/lub numerycznych, przeznaczonych dla geomoechaniki lub geotechniki, opisanych np. w publikacjach [9–11].

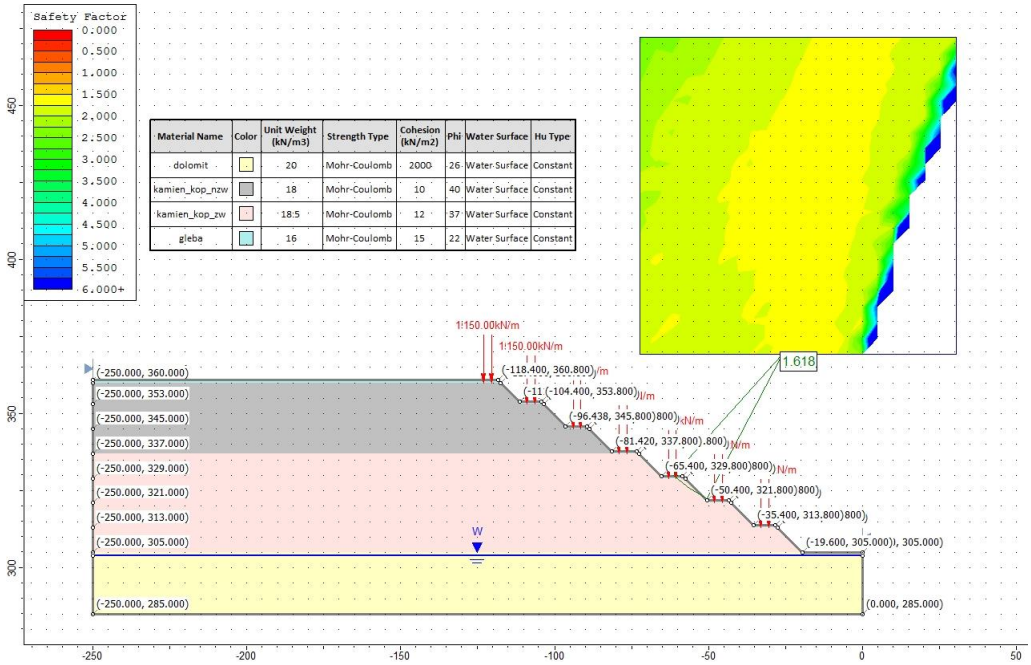
Rekultywacja terenu jako metoda składowania odpadów pogórniczych

Kopalnia odkrywkowa złoża wapieni, dolomitu i margli „Wapień" rozpoczęła swoją działalność w XIX wieku. Po II wojnie światowej oprócz cementu, zaczęto również wytwarzać kamień wapienny dla potrzeb przemysłu spożywczego i chemicznego, kruszywo budowlane i drogowe, sorbenty do instalacji odsiarczania spalin, mączkę bitumiczną oraz nawozy wapniowo-magnezowe. Obecnie rząpie III-go poziomu sięga +305 m n.p.m., przy jego głębokości do około 60 m. Teren kopalni „Wapień" przewidziany do rekultywacji obejmuje zarówno stare zwałowiska odpadów, jak i odsłonięte wyrobiska odkrywki. Materiałem budowlanym są odpady pochodzące z hałd odkrywki oraz odpady pogórnicze, posiadające aprobatę techniczną IBDiM i Atest Higieniczny PZH w Warszawie. Kopalnia wraz ze składowiskami zajmuje powierzchnię ok. 5 ha [12].

Prace projektowe na bazie rozwiązań geomechaniki i geotechniki polegały na: określeniu parametrów geomechanicznych odpadów pogórniczych, zarówno w toku badań laboratoryjnych, jak i prowadzenia analizy porównawczej metodą wsteczną oraz przeprowadzeniu wielowariantowej numerycznej analizy stateczności projektowanych zwałowisk z uwzględnieniem obciążenia wynikającego z transportu kamienia odpadowego, pokryciu powierzchni glebą i różnych poziomów wód gruntowych (rys. 1.4).

Na podstawie przeprowadzonych numerycznych analiz wstecznych przyjęto parametry kamienia kopalnianego: spójność c równa 10 kPa, kąt tarcia wewnętrznego φ równy 40° i ciężar objętościowy γ równy 18 kN/m^3. Dla tak wyznaczonych wartości współczynniki bezpieczeństwa k (F) dla hałd są zawsze większe od 1,5. Dlatego dla

obliczonych c i φ prognozowano utrzymanie stateczności nasypu dla kąta nachylenia stoku α równego 45° i półek o wysokościach h równych 8 m i szerokościach 6–7 m dla wysokości nasypu od poz. +305–+360 m. Przeprowadzone obliczenia i analizy znalazły swoje potwierdzenie w toku pomiarów geodezyjnych zrealizowanych prac budowlanych.



Rys. 1.4. Widok modelu hałdy po usypaniu ostatniej półki. Przypisano warunek wytrzymałościowy Coulomba-Mohra

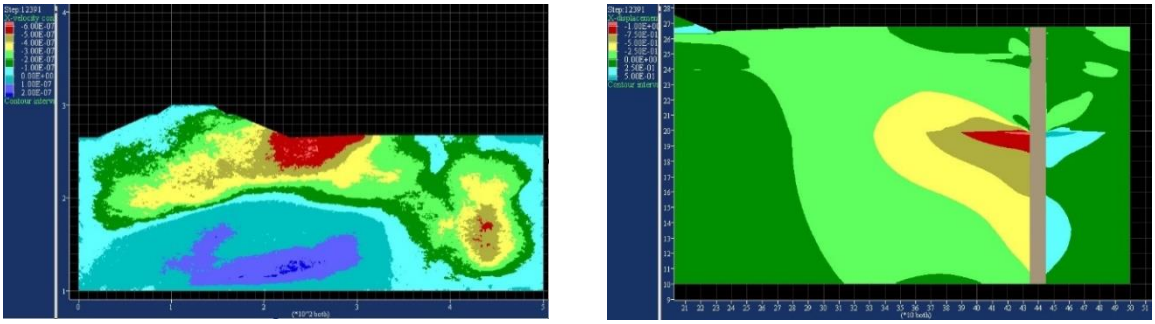
Fig. 1.4. View of the dump model after adding the last shelf. The Mohr-Coulomb failure criterion was assigned

Badanie migracji utworów plastycznych w sąsiedztwie wyrobiska szybowego i zwałowiska odpadów pogórniczych

Drugim przykładem jest opisanie zjawiska migracji utworów gruntowych o konsystencji plastycznej oraz płynnej w kontekście zachowania stateczności wyrobiska szybowego i zwałowiska odpadów pogórniczych o długości około 220 m oraz wysokości 30 m [13]. W tym celu po analizie własności wytrzymałościowych i odkształceniowych górotworu oraz materiału budującego zwałowisko zbudowano płaski numeryczny model fragmentu górotworu, stosując program różnic skończonych FLAC2D (*Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2D*, Itasca C.G., US).

Przeprowadzone symulacje numeryczne na płaskich modelach zwałowiska dla przypowierzchniowej warstwy górotworu w rejonie szybów wskazały na możliwość powstawania stref szczególnie silnych przemieszczeń gruntów w kierunku do rury szybowej na głębokości od około -60 m do -75 m od zrębu szybu, a poniżej tej

głębokości, do -115 m, wzmożonych przemieszczeń gruntów w kierunku do rury szybowej (rys. 1.5). Zgodnie z profilami geologicznymi na tej głębokości zlokalizowane są warstwy pyłu piaszczystego, piasku drobnoziarnistego i pylastego oraz piasku różnoziarnistego z warstewkami pyłu i żwiru. Całkowita miąższość tych warstw jest równa około 8 m.



Rys. 1.5. Rozkład prędkości przemieszczeń poziomych ε_{vel} wywołanych odkształceniem objętościowym w sąsiedztwie zwałowiska i szybu
Fig. 1.5. The distribution of the velocity of horizontal displacements ε_{vel} caused by the volumetric strain in the vicinity of the dump and the shaft

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono notki na temat rozwiązania dwóch wybranych problemów ochrony środowiska z zakresu geoinżynierii, tj.:

- oznaczania własności wytrzymałościowych i odkształceniowych odpadów pogórniczych w kontekście wykorzystania ich jako materiału budowlanego do rewitalizacji powierzchni terenu, a następnie obliczania metodami analitycznymi oraz numerycznymi stateczności budowli ziemnych wykonanych z tych odpadów;
- badania wpływu posadowienia budowli wykonanych z odpadów na przemieszczenia i rozkład naprężeń w gruncie oraz w przypowierzchniowych warstwach górotworu, ze szczególnym uwzględnieniem zachowania się warstw będących w stanach miękkoplastyczno-płynnych.

1.5. Bezcementowe ekologiczne spoiwa dla budownictwa z aktywowanego żużla wielkopiecowego

Wprowadzenie

W obecnym stanie wiedzy powszechnie stosowane są zaprawy budowlane lub betony w postaci mieszaniny co najmniej jednego spoiwa nieorganicznego, kruszywa,

wody, dodatków i domieszek. W grupie spoiw budowlanych wyróżnia się spoiwa wapienne, gipsowe, geopolimerowe i cementowe, jednak główne zastosowanie ma cement. Z produkcją cementu z kolei kojarzy się duża emisja CO_2. I choć w cementowniach prowadzi się działania zmierzające do jej ograniczania, to jednak obecna sytuacja na rynku cementowym w Polsce wydaje się być nieuregulowana w kwestii możliwości ograniczenia emisji CO_2. W związku z tym nie można przewidzieć, ile klinkieru będzie w naszym kraju wyprodukowane w najbliższych latach. Tak też badania w zakresie materiałów budowlanych koncentrują się obecnie, w myśl założeń gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), na poszukiwaniu rozwiązań pozwalających na uzyskanie tworzywa wykonanego z materiałów odpadowych, zwanych wtórnymi, głównie po procesach wysokotemperaturowych, tzw. UPS (uboczne produkty spalania). Jest to zgodne z modelem rozwoju gospodarczego kraju, co zapisano w dokumencie z 10 września 2019 roku przyjętego przez Radę Ministrów „Mapa drogowa transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym". I choć obecnie idee te są wdrażane z coraz większą intensywnością, to wspomniane już cementownie ograniczają emisję CO_2 do atmosfery poprzez wprowadzenie paliw alternatywnych oraz substytutów cementu, (najczęściej są nimi UPS). Obliczono przykładowe wartości emisji CO_2 w przypadku CEM I, CEM II i CEM III, które wyniosły odpowiednio 0,875, 0,715 i 0,578 kg CO_2/kg cementu, przy czym składy tych cementów były następujące: CEM I (klinkier – 92%), CEM II (klinkier – 69%, popiół – 11%, żużel – 8%, kamień wapienny 8%), CEM III (klinkier – 43%, żużel – 53%). Zatem jest wiele alternatyw w poszukiwaniu nowych spoiw dla budownictwa. Przykładową jest zastosowanie jedynie zmielonego granulowanego żużla wielkopiecowego, lecz w celu zapewnienia właściwości wiążących, żużel ten musi być aktywowany alkaliami. Używając wody nie uzyska się pożądanego efektu. Spoiwa AAS (Alkali Activated Slag) są z powodzeniem stosowane w Polsce już od lat 70-tych.

Metodyka

W tabeli 1.1 przedstawiono skład mieszanek zapraw, które przygotowano z zastosowaniem aktywowanego alkaliami żużla wielkopiecowego. Aktywatorem żużla był wodny roztwór metakrzemianu sodu. Pierwsza mieszanka zawierała jedynie AAS, do drugiej dodano zeolit, do trzeciej popiół i żużel z elektrowni a czwartą sporządzono dodając do AAS zeolit, popiół i żużel z elektrowni. Do mieszanki S2 dodano zeolit tworząc S3 aby sprawdzić jego wpływ na wytrzymałość [14].

W mieszankach ZK zeolit miał pełnić rolę absorbera metali, które były obecne w popiele i żużlu z elektrowni, dlatego został wstępnie nasączony wodą lub 45% wodnym roztworem azotanu wapnia [15].

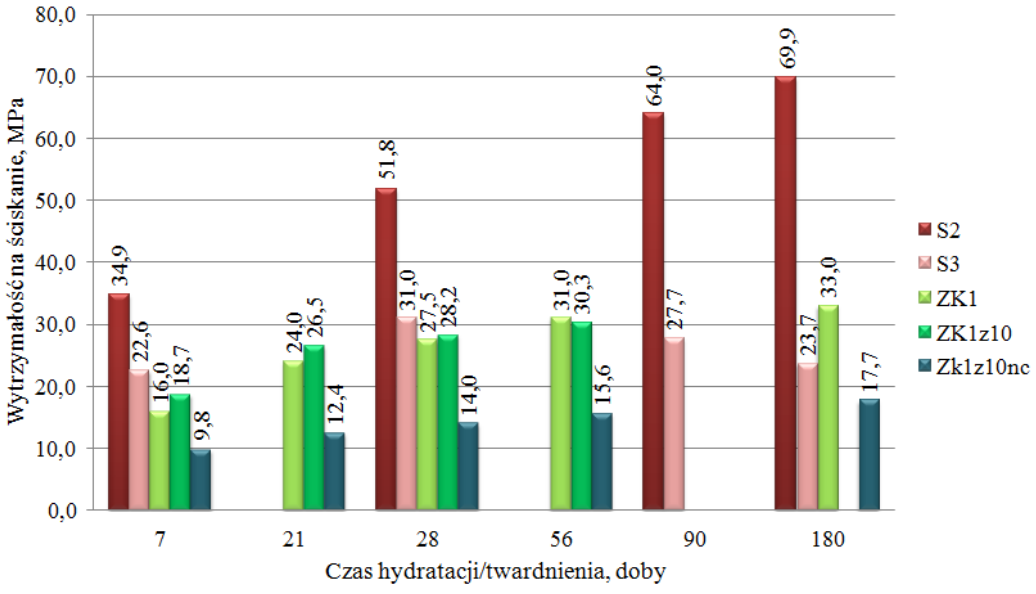
Tabela 1.1

Mieszanki zapraw serii żużlowych, w gramach

mieszanka	GGBFS	woda aktywująca	piasek	żużel paleniskowy z bloku na węgiel brunatny	popiół lotny z bloku biomasowego	zeolit	nasączenie zeolitu	
							NitCal	woda dejonizowana
S2	3000	1239	9000	-	-	-	-	-
S3	3000	1239	9000	-	-	300	-	-
ZK1	2700	1755	10530	540	270	-	-	-
ZK1z10	2700	1755	10530	540	270	270	-	126,9
ZK1z10nc	2700	1755	10530	540	270	270	216	-

Wyniki

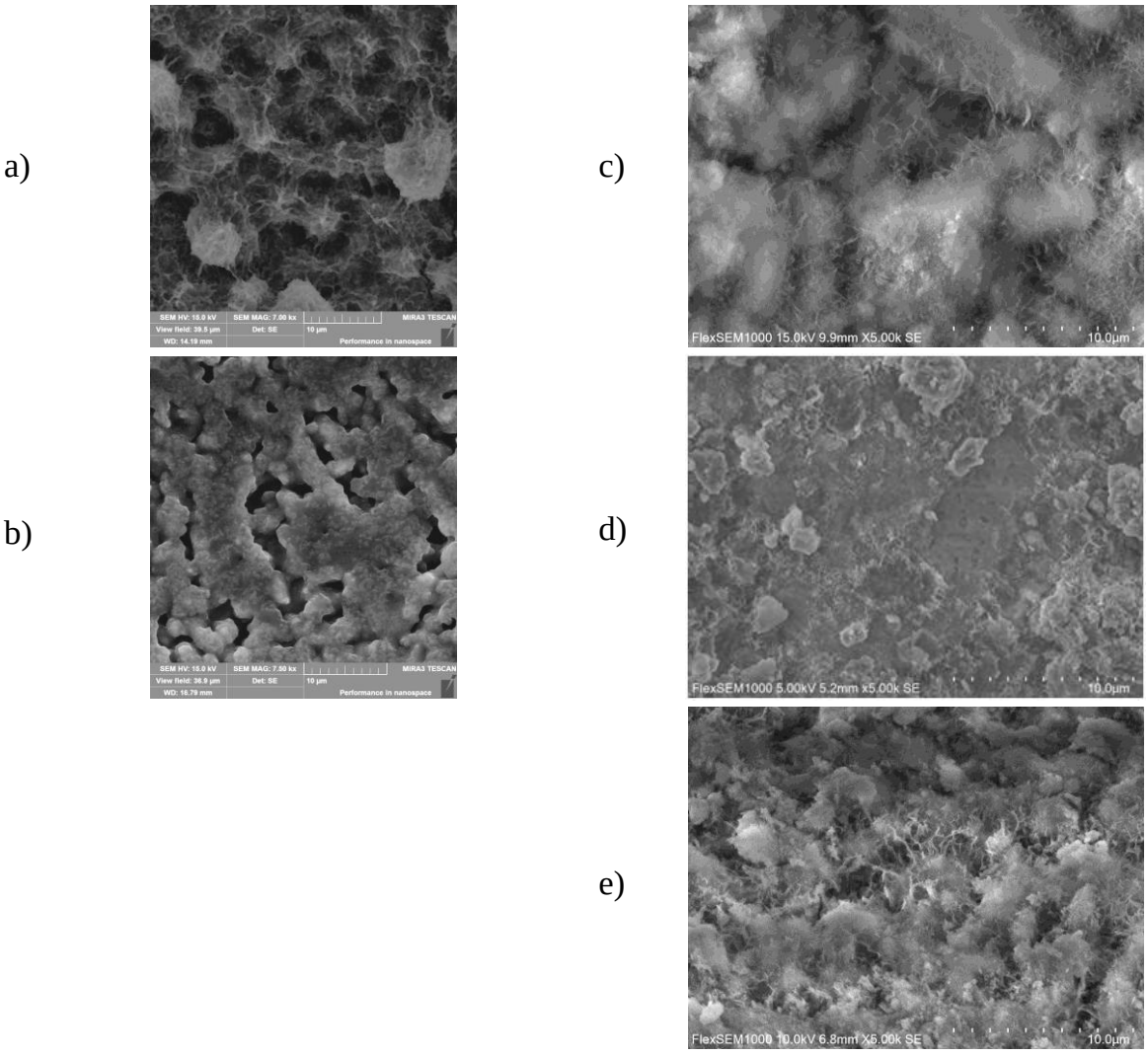
Na rys. 1.6 pokazano, jak kształtowały się wytrzymałości na ściskanie beleczek w kolejnych tygodniach twardnienia mieszanek zapraw. Jak można zauważyć, każdy dodatek zmniejszył wytrzymałość spoiwa żużlowego S2.



Rys. 1.6. Wartości wytrzymałości na ściskanie beleczek serii żużlowych w kolejnych tygodniach twardnienia mieszanek zapraw

Fig. 1.6. The values of the compressive strength of the beams of the slag series in the following weeks of hardening of the mortar mixtures

Dlatego też należy prowadzić dalsze badania w tym kierunku. Mikrostruktura zaczynu z aktywowanego żużla bez dodatku zeolitu charakteryzowała się niewielką porowatością, a na powierzchni ścianek porów można było zaobserwować liczne formy o budowie falistej i postrzępionej (rys. 1.7a). Próbka aktywowanego żużla z dodatkiem zeolitu nie zawierała dendrycznych form faz (rys. 1.7b), które prawdopodobnie stanowią mikro zbrojenie spoiwa. Stąd też mniejsza wytrzymałość serii S3. Natomiast dodatek zeolitu nasączonego wodą destylowaną w mieszankach z UPS spowodował zagęszczenie mikrostruktury (rys. 1.7d) w porównaniu z mieszankami bez zeolitu (rys. 1.7c). To spowodowało delikatną poprawę cech mechanicznych. Próbka z zeolitem nasączonym azotanem wapnia okazała się najsłabsza – porowata, z małą ilością fazy żelowej i włóknistej.



Rys. 1.7. Mikrostruktura zaczynu aktywowanego żużla wielkopiecowego (a) bez dodatku zeolitu S2 oraz (b) z dodatkiem zeolitu S3 [1.5.1] oraz próbek: (c) ZK1, (d) ZK1z10 oraz (e) ZK1z10nc wykonana w powiększeniu 5000x

Fig. 1.7. Microstructure of activated blast furnace slag (a) without addition of zeolite S2 and (b) with addition of zeolite S3 [1.5.1] and samples: (c) ZK1, (d) ZK1z10 and (e) ZK1z10nc

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona modyfikacja składu zapraw z wykorzystaniem ubocznych produktów spalania wpisuje się w zasady gospodarki o obiegu zamkniętym. Dzięki zastosowaniu spoiw z żużla wielkopiecowego aktywowanego alkaliami przyczynia się do ochrony powietrza poprzez eliminację stosowania cementu. Badania wytrzymałości na ściskanie pięciu mieszanek zapraw i porównanie ich z mikrostrukturą wykazały ścisłą korelację, a dodatek zeolitu obniżył właściwości mechaniczne zapraw, które w niczym nie odbiegają od tradycyjnie stosowanych materiałów.

1.6. Zmiany metabolizmu wtórnego roślin jadalnych jako źródło informacji o narażeniu na pestycydy

Wprowadzenie

Pestycydy przyczyniają się do zmian środowiska nie tylko poprzez eliminowanie patogenów i szkodników niszczących uprawy, ale również w wyniku zaburzania metabolizmu organizmów niebędących celem ich działania. Jako związki organiczne, mogą ulegać degradacji w środowisku oraz są metabolizowane w organizmach żywych. Zakres przemian pestycydów uwarunkowany jest wieloma czynnikami zewnętrznymi. W rezultacie powstaje wiele związków o nieznanej strukturze oraz właściwościach toksykologicznych. Identyfikacja i oznaczenie zarówno pestycydów, jak i produktów ich degradacji, wymaga opracowania metod analitycznych opartych na wzorcach – analiza celowana. Realizacja tego zadania często bywa niemożliwa z powodu trudności w określaniu struktury powstałych związków lub braku wzorców. Pestycydy stosowane przede wszystkim w celu ochrony rośliny przed szkodnikami mogą jednocześnie powodować stres roślinny. Efektem tego jest modyfikacja metabolizmu wtórnego rośliny, dzięki czemu możliwe jest jej przystosowanie się do nowych warunków środowiskowych.

Metodyka

W ramach prowadzonych badań podjęto próbę opracowania, z wykorzystaniem chromatografii cieczowej sprzężonej z tandemowym spektrometrem mas (LC-MS/MS), innowacyjnego narzędzia analitycznego opartego na profilach

metabolicznych, umożliwiającego ocenę narażenia rośliny na działanie pestycydów bez konieczności identyfikacji tych związków oraz produktów ich degradacji.

Badania realizowano w kilku etapach. W każdym z nich eksperyment prowadzono w warunkach uprawy modelowej. Jako roślinę modelową wybrano rzodkiew japońską (*Raphanus sativus var. longipinnatus*). Uprawy modelowe prowadzono w kontrolowanych warunkach, a po osiągnięciu odpowiedniej fazy rozwojowej roślinę narażono na działanie pestycydów o różnych mechanizmach działania. Wszystkie związki aplikowano na roślinę oddzielnie. Równocześnie prowadzono uprawy, które nie były poddane działaniu wymienionych związków (próbki kontorlne).

Wyniki i dyskusja

W pierwszym etapie określono wpływ mezotrionu (MES), najczęściej stosowanego herbicydu triketonowego, oraz jego głównych produktów degradacji: kwasu 2-amino-4-metylosulfonylobenzoesowego (AMBA), kwasu 4-metylosulfonylo--2-nitrobenzoesowego (MNBA) oraz 1,3-cykloheksanodionu (CHD) na profil metaboliczny rośliny oraz syntezę katecholamin: tyraminy (TYR), dopaminy (DA), epinefryny (E), norepinefryny (NE) i normetanefryny (NMN) oraz chlorofilu w tkankach roślinnych [16].

Wyniki wskazują, że zarówno MES, jak i produkty degradacji wpływają na zmianę profilu metabolicznego rzodkwi japońskiej. Ponadto zaobserwowano, że uzyskane profile metaboliczne rzodkwi narażonej na działanie tych związków różnią się między sobą, co może wskazywać na specyficzną odpowiedź rośliny na stres herbicydowy.

W kolejnym kroku oznaczono zawartość katecholamin (potencjalnych markerów stresu herbicydowego) w tkankach rośliny traktowanej MES, AMBA, MNBA oraz CHD. W tym celu zastosowano chromatografię cieczową połączoną z detektorem fluorescencyjnym do równoczesnego wydzielania i oznaczania amin biogennych [17]. Stwierdzono, że MES oraz produkty degradacji powodują zmiany zawartości katecholamin: TYR, DA oraz NMN. Najwyższy wzrost stężenia NMN w tkankach rośliny modelowej zaobserwowano dla MES. W tkankach rzodkwi traktowanej AMBA i MNBA nie stwierdzono statystycznie istotnych zmian w zawartości TYR, jednakże zaobserwowano wzrost zawartości DA i NMN. W przypadku CHD zaobserwowano wysoki wzrost TYR, DA oraz NMN.

Następnie badania poszerzono o określenie wpływu rimsulfuronu (RIM) oraz jego produktu degradacji 2-amino-4,6-dimetoksypirymidyny (2ADP) na metabolizm *Raphanus sativus var. longipinnatus* [18]. RIM jest herbicydem

sulfonylomocznikowym charakteryzującym się innym mechanizmem działania niż MES. Przeprowadzona analiza niecelowana wykazała, że istnieją różnice między profilami metabolicznymi roślin narażonych na RIM i 2ADP, a profilem rośliny, która nie była traktowana tymi związkami. Oznaczenia zawartości katecholamin w tkankach roślin uzyskanych z upraw traktowanych RIM i 2ADP wykazały, że niektóre katecholaminy: NMN, TYR (podobnie jak w przypadku MES i jego pochodnych) oraz E mogą stanowić markery narażenia rośliny na pestycydy lub produkty ich degradacji. W tkankach roślin narażonych na RIM oraz 2ADP zaobserwowano wyższą zawartość NMN oraz niższą TYR i E.

Dodatkowo dokonano oceny skażenia tkanek rzodkwi RIM i 2ADP z zastosowaniem metody LC-MS/MS [19]. Herbicyd i jego produkt degradacji nie zostały wykryte w tkankach roślin modelowych traktowanych RIM oraz 2ADP. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do poszerzenia badań o określenie wpływu związków należących do innych niż herbicydy grup pestycydów oraz produktów ich degradacji na metabolizm *Raphanus sativus var. longipinnatus* [20].

W kolejnym etapie roślinę narażono na działanie następujących związków: tiametoksamu (TMX), lambda-cyhalotryny (LCY), deltametryny (DM), należących do insektycydów, metalaksylu (MET) będącego fungicydem oraz głównych produktów ich degradacji: kwasu 3-fenoksybenzoesowego (pochodna LCY i DM, 3PBA), kwasu transchryzantemowego (pochodna LCY, tChA), 2-hydroksy-4-metoksybenzofenonu (pochodna DM, 2H4MBP) oraz pochodnej metalaksylu (MA).

Przeprowadzona analiza niecelowana (LC-MS/MS), podobnie jak w przypadku herbicydów MES i RIM oraz produktów ich degradacji, wykazała różnice pomiędzy profilami metabolicznymi roślin narażonych na TMX, LCY, DM, MET oraz produkty ich degradacji w porównaniu z ślepą próbą. Zaobserwowane różnice były podstawą do poszukiwania związków stanowiących potencjalne markery stresu roślinnego.

Leucyna (LEU) i tryptamina (TA) zostały zidentyfikowane jako niespecyficzne markery narażenia rośliny na wymienione związki. W przypadku insektycydów i produktów ich degradacji, jako specyficzny marker narażenia na te związki uznano E, natomiast DA została uznana jako marker ekspozycji rośliny na MET i MA. Ponadto stwierdzono, iż TYR i serotonina (5-HT) stanowią specyficzne markery narażenia rośliny na TMX.

Dodatkowo dokonano oceny skażenia tkanek *Raphanus sativus var. longipinnatus* na TMX, LCY, DM, MET, 3PBA, tChA, 2H4MBP oraz MA z zastosowaniem metody LC-MS/MS [21]. W tkankach rośliny narażonej na MET stwierdzono obecność zarówno związku macierzystego, jak i produktu degradacji MA. W przypadku rzodkwi

traktowanej DM, insektycyd nie został wykryty, jednak stwierdzono obecność jego pochodnej – 3PBA. Ponadto w tkankach rośliny narażonej na działanie TMX, tChA, 2H4MBP oraz MA stwierdzono obecność tych związków.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że oznaczanie pestycydów i produktów ich degradacji w tkankach roślinnych nie jest wystarczające do jednoznacznego stwierdzenia narażenia rośliny na pozostałości pestycydów, ponieważ nie stanowi jednoznacznej informacji o narażeniu rośliny na te związki. Dlatego też ocena modyfikacji metabolizmu rośliny eksponowanej na pestycydy lub produkty ich degradacji oraz identyfikacja markerów stresu roślinnego mogą stanowić innowacyjne narzędzie w realizacji tego zadania.

1.7. Ocena toksyczności strumieni wodnych oczyszczanych w złożonych procesach utleniających

Wprowadzenie

Woda będąca niezbędnym elementem gwarantującym występowanie życia na ziemi jest narażona na stały wzrost zanieczyszczenia w wyniku działalności antropogenicznej. Niezależnie od miejsca jej występowania (wody powierzchniowe czy też wody podziemne) identyfikowane są w niej różnego rodzaju mikrozanieczyszczenia organiczne, których stężenia sięgają od kilku femtogramów do kilkunastu mikrogramów na dm^3. Związki te ulegają w środowisku różnym przemianom i mogą niejednokrotnie mieć negatywny wpływ na faunę i florę wodną. Procesy oczyszczania wody skoncentrowane są na poprawienie jakości wody poprzez usuwanie zanieczyszczeń w niej występujących. Jednak duża grupa mikrozanieczyszczeń wymaga zastosowania bardziej złożonych procesów technologicznych, takich jak zaawansowane procesy utleniania. W trakcie prowadzenia tych procesów dochodzi do reakcji pomiędzy zanieczyszczeniami a utleniaczami i/lub reaktywnymi rodnikami, które prowadzą do rozerwania wiązań występujących pomiędzy atomami tworzącymi cząsteczkę mikrozanieczyszczenia, czego konsekwencją jest mineralizacja. Jednak niejednokrotnie zaawansowane procesy utleniania nie prowadzą do pełnej mineralizacji zanieczyszczeń, a powstałe

produkty uboczne rozkładu mikrozanieczyszczeń wpływają na pogorszenie jakości wody i wzrostu jej toksyczności.

Celem podjętych badań było określenie efektywności rozkładu związków z różnych grup mikrozanieczyszczeń organicznych w różnych konfiguracjach złożonych procesów utleniania oraz ocena toksyczności roztworów poprocesowych z wykorzystaniem trzech różnych biotestów opartych o organizmy wskaźnikowe z trzech poziomów troficznych.

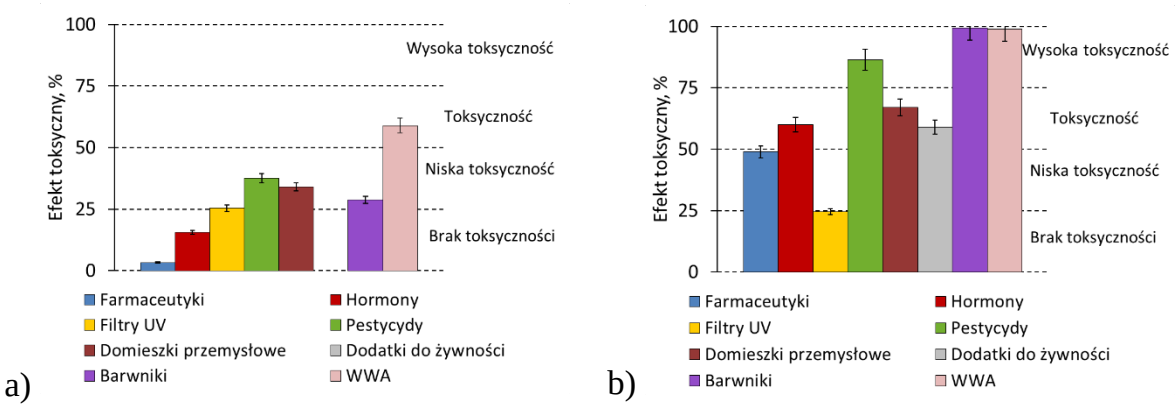
Metodyka

Badania prowadzono na rzeczywistych i modelowych strumieniach wodnych przygotowanych na bazie wody zdejonizowanej, powierzchniowej, odpływu z oczyszczalni ścieków oraz na ściekach przemysłowych zawierających mikrozanieczyszczenia organiczne z grupy: związków farmaceutycznych, hormonów, filtrów UV, pestycydów, domieszek przemysłowych, dodatków do żywności, barwników oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych WWA. Roztwory wodne poddano różnym konfiguracjom zaawansowanych procesów utleniania opartych o działanie ozonu, nadtlenku wodoru, chloru oraz naturalnego i sztucznego światła UV. W roztworach poprocesowych oceniono stopień usunięcia poszczególnych mikrozanieczyszczeń, zidentyfikowano uboczne produkty ich rozkładu oraz przeprowadzono analizę toksykologiczną przy wykorzystaniu następujących organizmów wskaźnikowych: bakterie słonowodne *Aliivibrio fischeri* – test Microtox®, skorupiaki słodkowodne *Daphnia magna* – DAPHTOXKIT F magna oraz rośliny naczyniowe *Lemna minor* L. – Lemna Minor Growth Inhibition Test. Szczegóły analizy stężeń i produktów ubocznych rozkładu zanieczyszczeń podano w pracy [22], natomiast opis wykonywania testów toksykologicznych przedstawiono w pracy [23]. System klasyfikacji toksyczności próbek przyjęto zgodnie wytycznymi zestawionymi w pracy [24].

Wyniki i dyskusja

Przeprowadzone dotychczas badania wykazały, że mikrozanieczyszczenia charakteryzują się różną toksycznością względem organizmów testowych [25]. Ponadto stopień dekompozycji mikrozanieczyszczeń zależy od ich rodzaju oraz stosowanego procesu utleniania, który wpływa również na rodzaj oraz liczbę generowanych ubocznych produktów rozkładu mikrozanieczyszczeń. Stopnie usunięcia oraz listę zidentyfikowanych pośrednich produktów dekompozycji

mikrozanieczyszczeń w pojedynczych procesach utleniania jak i w założonych procesach łączących działanie dwóch lub więcej czynników utleniających przedstawiono kolejno w pracach [23, 26–28]. Powstające uboczne produkty rozkładu mikrozanieczyszczeń organicznych nadal zaliczane są do związków aktywnych biologicznie i niejednokrotnie wykazują bardziej toksyczny charakter niż związki wyjściowe. Na rys. 1.8a przestawiono średnie wartości toksyczności roztworów wodnych zawierających różne grupy mikrozanieczyszczeń w stężeniu 100 µg/dm^3 przed poddaniem ich oczyszczaniu w zaawansowanych procesach utleniania, natomiast na rys. 1.8b przedstawiono te same roztwory po procesie ich naświetlania promieniami UV w obecności ozonu.



Rys. 1.8. Toksyczność roztworów wodnych zawierających różne grupy mikrozanieczyszczeń organicznych: a) przed i b) po procesie ich oczyszczania w procesie UV/O3

Fig. 1.8. Toxicity of water solutions containing various groups of organic micropollutants: a) before and b) after their treatment in the UV/O3 process

Zaobserwowano, że w trakcie prowadzenia procesów wykorzystujących działanie aktywnych czynników chlorujących dochodzi do przyłączenia się atomów chloru do cząsteczek mikrozanieczyszczeń występujących w roztworach wodnych. Obecność chlorowanych pochodnych zanieczyszczeń również przyczynia się do wzrostu toksyczności oczyszczanych roztworów wodnych. Szczegółowy mechanizm wytwarzania chlorowanych ubocznych produktów rozkładu wybranych mikrozanieczyszczeń przedstawiony został w pracy [29].

Podsumowanie i wnioski

Zaawansowane procesy utleniania są skuteczną metodą oczyszczania strumieni wodnych z mikrozanieczyszczeń organicznych. Jednak, stosowanie tego rodzaju procesów w ciągach technologicznych oczyszczania wody prowadzi bardzo często do wytwarzania nowych zanieczyszczeń wcześniej nieidentyfikowanych. Te nowo

powstałe związki są produktami utleniania i redukcji związków pierwotnie występujących w wodach. Ich obecność może powodować pogorszenie się jakości oczyszczanych strumieni wodnych, które mogą stać się toksyczne względem różnych organizmów, w tym również mogą negatywnie oddziaływać na zdrowie człowieka. Przeprowadzone badania pozwoliły na wytypowanie najbardziej wrażliwego organizmu wskaźnikowego reagującego na obecność ubocznych produktów rozkładu badanych mikrozanieczyszczeń organicznych, którymi są słonowodne bakterie *Aliivibrio fischeri*. Wykazano również, że stosowanie takich utleniaczy jak ozon i podchloryn sodu prowadzi do wytwarzania znacznie bardziej toksycznych ubocznych produktów rozkładu mikrozanieczyszczeń niż w przypadku procesów opartych o działanie nadtlenku wodoru czy też naturalnego jak i sztucznego światła UV. Przed wdrożeniem jakiegokolwiek zawansowanego procesu utlenienia mikrozanieczyszczeń należy ocenić możliwość wytwarzania niepożądanych ubocznych produktów na skutek reakcji ze związkami wchodzącymi w skład oczyszczanego strumienia wodnego. Istnieje więc potrzeba poszukiwania takiej konfiguracji zaawansowanych procesów utleniania, która w połączeniu z alternatywnymi metodami oczyszczania wody pozowali na uzyskanie oczyszczonego strumienia pozbawionego szkodliwych substancji pod względem aktywności biologicznej.

1.8. Biodostępność pierwiastków śladowych związanych z pyłem atmosferycznym w otoczeniu przemysłowych źródeł emisji opartych na przetwórstwie węgla

Wprowadzenie

Silne zanieczyszczenie powietrza przez pyły stanowi obecnie jeden z najważniejszych problemów dotyczących zdrowia publicznego. Dotychczasowe badania środowiska i ekspozycji na pył dotyczą głównie stężeń masowych oraz całkowitej zawartości pierwiastków śladowych w różnych frakcjach pyłu zawieszonego. Istotna część emisji tych pierwiastków pochodzi z energochemicznego przetwórstwa węgla (pirolizy, zgazowania) oraz z procesów jego energetycznego użytkowania [30, 31].

Biorąc pod uwagę średnicę aerodynamiczną cząstek pyłu, można dokonać podziału na pył całkowity TSP (ang. *total suspended particles*), pył inhalabilny PM10 (cząstki o średnicy aerodynamicznej do 10 μm), pył respirabilny PM2.5 (obejmujący cząstki

pyłu o średnicy aerodynamicznej do 2,5 μm) oraz pył submikronowy PM1 (cząstki o średnicy aerodynamicznej do 1 μm). Brakuje danych naukowych na temat realnego narażenia populacji drogą inhalacyjną na zanieczyszczenia powstające podczas procesów energochemicznego przetwórstwa węgla, a także badań uwzględniających chemiczne frakcjonowanie pierwiastków kancerogennych i toksycznych, w otoczeniu źródeł punktowych, tj. elektrowni oraz koksowni [32, 33].

Negatywne efekty zdrowotne nasilają się zwłaszcza w związku z narażeniem na respirabilne frakcje pyłu, co może wywoływać długoterminowe oraz skumulowane skutki powodujące zarówno wzrost zachorowalności na choroby układu oddechowego oraz układu krążenia, jak i śmiertelności. W skład cząstek pyłu PM2.5 wchodzą między innymi metale ciężkie, które są zawarte w cząstkach pyłu lub obecne na ich powierzchni. Do oceny potencjalnego wpływu na zdrowie ludzi pierwiastków śladowych, w tym kancerogennych, zawartych w pyle PM10 i PM2.5, kluczowe jest poznanie nie tylko całkowitych ich stężeń, ale także form chemicznych pierwiastków. Pierwiastki śladowe związane z pyłem atmosferycznym można podzielić na frakcje, które wykazują się różną biologiczno-chemiczną aktywnością podczas przyswajania przez organizmy. Identyfikacja form występowania metali ciężkich w pyłach pozwala na oszacowanie poziomu zagrożenia bezpieczeństwa zdrowotnego. Formy biodostępne pierwiastków niebezpiecznych, w szczególności rozpuszczalnych w wodzie, powinny podlegać wnikliwym badaniom ze względu na ich zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi. Frakcje biodostępne tych pierwiastków, zwłaszcza te dobrze rozpuszczalne w wodzie, łatwo migrują z powietrza do wody lub gleby. Cząstki pyłu i związane z nimi pierwiastki łatwo przenikają do organizmu człowieka głównie drogą oddechową. Pomimo mającej miejsce w ostatnich dekadach redukcji emisji obecność pierwiastków kancerogennych oraz prawdopodobnie kancerogennych w formach mobilnych potęguje zagrożenie dla ludzi zamieszkujących w pobliżu przemysłowych źródeł emisji opartych na przetwórstwie węgla. Wysokie stężenie aerozoli i obecność w nich określonych substancji chemicznych, w tym metali kancerogennych, może prowadzić do wystąpienia problemów zdrowotnych i zwiększenia śmiertelności ludzi zamieszkujących takie rejony [34].

Materiał i metody

Próbki pyłu PM10 i PM2.5 pobierane były przez okres 4 tygodni w każdym z wybranych punktów pomiarowych za pomocą impaktora kaskadowego Dekati® PM10 (rys. 1.9). Próbki pyłu grubego PM10 i frakcji respirabilnej PM2.5 pobierano

w punktach pomiarowych zlokalizowanych w otoczeniu pracujących elektrowni węglowych i koksowni w południowej części Polski. W celu ograniczenia do minimum tzw. niskiej emisji i wyeksponowania emisji z wybranych źródeł przemysłowych badania przeprowadzono w okresie letnim. Próbki pobierano na wysokości 1,5 m od powierzchni gruntu, czyli w strefie oddychania ludzi [32, 33, 35].

Rys. 1.9. Poborniki LVS i PNS-15 oraz impaktor Dekati® PM10: budowa, stopnie impaktora z filtrami, oraz sposób montażu wewnątrz pomieszczeń.
Fig. 1.9. LVS and PNS-15 samplers and Dekati® PM10 impactor: construction, impactor stages with filters, and indoor mounting method

W pobranych próbkach pyłów oznaczono stężenia pierwiastków, które zgodnie z Międzynarodową Agencją Badań Chorób Nowotworowych (IARC) są zaklasyfikowane do następujących kategorii:

- Grupa 1: pierwiastki kancerogenne dla ludzi – As, Cr, Cd i Ni,
- Grupa 2: pierwiastki prawdopodobnie kancerogenne dla ludzi – Co i Pb,
- Grupa 3: pierwiastek nieklasyfikowany jako kancerogenny dla ludzi – Se.

Ponadto została oznaczona również zawartość rtęci i manganu jako pierwiastków toksycznych oraz antymonu jako pierwiastka toksycznego i wykazującego prawdopodobnie właściwości rakotwórcze.

Frakcjonowanie chemiczne należy do jednej z ważniejszych metod oceny mobilności, biodostępności i potencjalnego ryzyka zdrowotnego grupy związków danego pierwiastka o określonych właściwościach, umożliwiającą przewidywanie warunków, w jakich może nastąpić wtórne zanieczyszczenie ekosystemów, niekorzystnie wpływające na bezpieczeństwo ekologiczne [36]. Przeprowadzając

chemiczne frakcjonowanie można określić ruchliwość pierwiastków (w tym metali ciężkich) w środowisku. W pracy został wykorzystany schemat chemicznego frakcjonowania pobranego pyłu na podstawie ekstrakcji sekwencyjnej. Schemat ten zaproponowany przez Tessiera i in. [37], zmodyfikowany między innymi przez Schleicher i in. [38] uwzględnia występowanie pierwiastków w następujących formach chemicznych:

- najbardziej biodostępnej – wymiennej (F1),
- związanej z węglanami i tlenkami (F2),
- związanej z materią organiczną (F3),
- trwale związanej z minerałami (F4).

Wyniki i dyskusja

W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono udziały pierwiastków śladowych: As, Cd, Co, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb i Se we frakcjach mobilnych i niemobilnych występujących w pyle drobnym i grubym w otoczeniu dużych źródeł emisji związanych z procesami energochemicznego przetwórstwa węgla w okresie letnim. Największy średni udział procentowy we frakcjach mobilnych (F1+F2+F3) odnotowano dla: As, Pb, Sb, Cd i Mn w badanych frakcjach pyłu zawieszonego zarówno w otoczeniu elektrowni, jak i koksowni.

W otoczeniu analizowanych elektrowni, jak i koksowni nie odnotowano przekroczeń standardów WHO oraz poziomów dopuszczalnych obowiązujących w polskim ustawodawstwie w odniesieniu do stężenia pyłu zawieszonego PM10, a także stężenia frakcji respirabilnej PM2.5, poziomów docelowych dla As, Cd, Pb i Ni oraz poziomu dopuszczalnego dla Pb w PM10.

Stwierdzono, że w otoczeniu elektrowni oraz koksowni, spośród oznaczonych pierwiastków śladowych, średnio ponad: 90% As, 50% Sb oraz 40% Cd występuje w najbardziej biodostępnej frakcji F1 zarówno w pyle PM10, jak i PM2.5. Pierwiastki występujące w tych frakcjach mogą wywoływać bezpośrednie efekty środowiskowe i zagrażać bezpieczeństwu zdrowotnemu mieszkańców żyjących w otoczeniu elektrowni i koksowni.

Podsumowanie i wnioski

Wyniki przeprowadzonej oceny ryzyka kancerogennego narażenia inhalacyjnego na pierwiastki zawarte we frakcjach (F1 i F2), tj. As, Cd, Co, Cr (VI), Ni i Pb, pobierane z pyłem PM10, wykazały, że na każdy milion dorosłych i dzieci

potencjalnie na chorobę nowotworową mogą zapaść około 4 osoby dorosłe i 1 dziecko w otoczeniu elektrowni oraz około 7 osób dorosłych i 2 dzieci w otoczeniu koksowni. W obu tych przypadkach ok. 80% stanowi ryzyko kancerogenne związane z wchłanianiem As i Cr (VI) występujących we frakcji respirabilnej (PM2.5). Potencjalne ryzyko kancerogenne pojawia się głównie ze względu na obecność tych pierwiastków w najbardziej mobilnych frakcjach (F1 i F2).

Wyniki tych badań mogą być pomocne przy ocenie potencjalnie negatywnego wpływu na zdrowie ludzi na podstawie dalszych badań toksykologicznych [32, 33, 35].

1.9. Ocena narażenia na zanieczyszczenia powietrza na przykładzie PM2.5 i wybranych metali

Wprowadzenie

Wśród związków wpływających na jakość powietrza, pył zawieszony (PM) został uznany za niebezpieczny i w 2016 r. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) wraz z Międzynarodową Agencją Badań nad Rakiem (IARC) zaklasyfikowały go do grupy 1 – związków rakotwórczych dla ludzi. Autorzy monografii IARC [39] podkreślają, że ekspozycja na PM z różnych źródeł charakteryzuje się działaniem mutagennym i kancerogennym dla człowieka. W wielu badaniach epidemiologicznych powiązano negatywne skutki zdrowotne z ekspozycją na PM. Przykładowo, zwiększenie stężenia masowego PM10 (cząstki o średnicy aerodynamicznej do 10 μm) o 10 $\mu g/m^3$ zwiększa śmiertelność o około 0,5%, podczas gdy taki sam wzrost masy pyłu drobnego (PM2.5) zwiększa śmiertelność o 8–18% [40]. Pośród składników chemicznych pyłu metale to jedynie 1–2% masy PM2.5 [41], jednakże stanowią poważne zagrożenie dla zdrowia człowieka. Nie są one degradowane chemicznie ani biologicznie, mają tendencję do kumulowania się w organizmach żywych powodując stany, które w zależności od poziomu toksyczności i stężenia w organizmie mogą negatywnie wpływać na zdrowie, a nawet prowadzić do śmierci [42]. Wśród metali wykrytych w PM2.5, niektóre ujawniają wysoką toksyczność i/lub potencjał rakotwórczy już przy niskich stężeniach, w tym As, Cd, Cr, Pb i Ni [39]. Inne metale są niezbędne dla rozwoju człowieka, jednak w wysokich stężeniach mogą powodować niekorzystne skutki zdrowotne, w tym Cu, Fe, Mn i Zn [43]. Natomiast inne metale są mniej szkodliwe dla zdrowia

ludzkiego, ale nadal mogą powodować pewne niekorzystne skutki, w tym Sb i Se, sklasyfikowane jako "możliwy czynnik rakotwórczy u ludzi" (grupa 2B) [39].

Pojawiają się pytania: jaki powinien być poziom stężenia pyłu, aby zminimalizować zagrożenie zdrowotne oraz które składniki pyłu charakteryzują się większym zagrożeniem dla wybranych populacji?

Cel i stosowane metody badań

Jako przykład badań obejmujących ocenę narażenia na zanieczyszczenia powietrza można podać wyniki pomiarów prowadzonych w budynkach przedszkolnych, gdzie analizowano jakość powietrza wewnętrznego określając stężenie lotnych związków organicznych (LZO), bioaerozoli, dwutlenku węgla (CO_2), pyłu (PM1, PM2.5, PM10 oraz całkowitego pyłu zawieszonego – TSP) [44]. Wśród wymienionych zanieczyszczeń powietrza, najwięcej uwagi skupiono na pyłach PM2.5, głównie ze względu na jego ostry i przewlekły wpływ na zdrowie dzieci, a także na poziomie dwutlenku węgla wskazującym na wydajność systemów wentylacji [45].

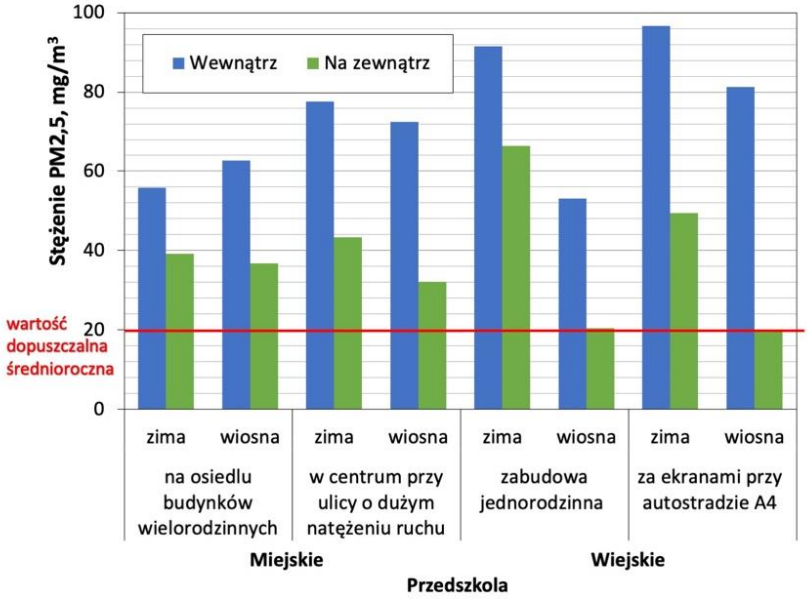
Próbki całkowitego pyłu zawieszonego (TSP) oraz frakcji PM1, PM2.5 i PM10 wewnątrz pobierano przy użyciu impaktora kaskadowego Dekati® PM10 (wyprodukowany w Finlandii). Równolegle, na zewnątrz mierzono stężenie pyłu PM10 oraz frakcji respirabilnej PM2.5 za pomocą poborników Atmoservice LVS i PNS-15 (produkowanych w Polsce na licencji poborników LVS 3.1, Comde-Derenda GmbH, Germany). Impaktor oraz poborniki stanowią wyposażenie Katedry Ochrony Powietrza. Na rys. 1.9 zaprezentowano poborniki marki Atmoservice oraz budowę impaktora Dekati® PM10 wraz z filtrami, a także sposób umieszczenia impaktora w salach przedszkolnych.

W pyle PM2.5 oznaczono stężenia 11 pierwiastków śladowych (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Se i Zn). Analizę tych pierwiastków przeprowadzono przy użyciu spektrometrów absorpcji atomowej z płomieniem acetylenowo-powietrznym (Avanta PM) i piecem grafitowym (Avanta GM; GBC Scientific Equipment Pty Ltd, Melbourne, Australia) [45]. Aby określić dokładność i precyzję protokołu ekstrakcji, użyto SRM NIST 1649a Urban Dust i NIST 1648 Urban Particulate.

Przykładowe wyniki badań

Stężenia PM2.5 wewnątrz i na zewnątrz wybranych przedszkoli mierzone w okresie zimowym i wiosennym (rys. 1.10) wahały się od 19,37 $\mu g/m^3$ do 66,36 $\mu g/m^3$ w powietrzu zewnętrznym i od 53,09 $\mu g/m^3$ do 96,67 $\mu g/m^3$ w powietrzu

wewnętrznym. Stężenia średnie dla próbek PM2.5 wewnątrz i na zewnątrz wynosiły odpowiednio 73,90 µg/m^3 i 38,36 µg/m^3. Średnie stężenia PM2.5 w powietrzu zewnętrznym są typowe dla regionu górnośląskiego [41] i przekraczają zarówno średnioroczny poziom dopuszczalny 20 µg/m^3 wg rozporządzenia dotyczącego jakości powietrza w Polsce [46] jak i zalecenia WHO dla 24 h stężeń PM2.5 wynoszące 25 µg/m^3 [47]. Tymczasem w szwedzkich przedszkolach wyposażonych w wentylację mechaniczną stężenia PM2.5 były znacznie niższe i wynosiły od 3,2 µg/m^3 do 9,3 µg/m^3 [48].



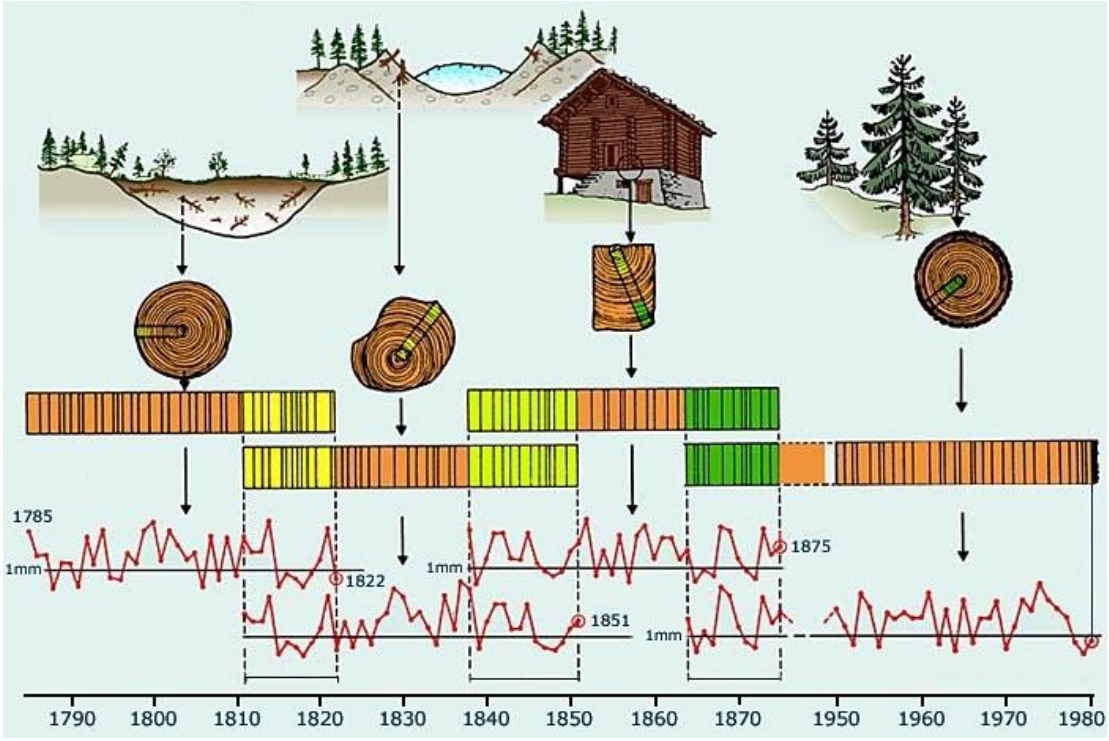
Rys. 1.10. Stężenia PM2.5 mierzone wewnątrz i na zewnątrz budynków przedszkoli
Fig. 1.10. PM2.5 concentrations measured indoors and outdoors kindergarteners

Porównanie bezpośredniego wpływu PM2.5 na zdrowie dzieci z wpływem na zdrowie wszystkich rozważanych metali, wskazuje na znaczące różnice. W przypadku PM2.5 obliczenia opierają się na zintegrowanym modelu (IER) zaimplementowanym przez Global Burden of Disease [49], gdzie zakłada się, że toksyczność różni się tylko w odniesieniu do wdychanej masy PM2.5, a podejście do metali jest zgodne z metodologią modelu USEtox [50], który ocenia narażenie na metale, rozróżniając między skutkami nowotworowymi i nienowotworowymi. Dla przykładowych danych stwierdzono, że średni wpływ na zdrowie wynikający z narażenia na pył PM2.5 wynosi 7,51 min/rok (od 6,81 min/rok do 45,63 min/rok) i jest prawie 40-krotnie niższy od wpływu skumulowanego ładunku metali we frakcji PM2.5, który wynosi 265,95 min/rok (od 37,76 min/rok do 759,53 min/rok), a wśród oznaczonych metali największy wpływ ma Cr(VI) od 232,62 min/rok do 539,87 min/rok.

1.10. Rekonstrukcja warunków paleoklimatycznych na podstawie badań przyrostów rocznych drzew

Wprowadzenie

Rekonstrukcje dendroklimatyczne są jedną z najdokładniejszych metod pozwalających na odtworzenie klimatu w przeszłości. Opierają się na badaniach drewna w obrębie poszczególnych przyrostów rocznych. Do badań dendroklimatycznych wykorzystywane są skale dendrochronologiczne. Chronologie tworzone są poprzez wzajemne dopasowanie sekwencji pomiarowych uzyskanych dla coraz starszych drzew. Ta procedura pozwala na budowę chronologii obejmujących setki, a nawet tysiące lat (rys. 1.11).



Rys. 1.11. Konstrukcja wielowiekowej skali dendrochronologicznej polegająca na wzajemnym dopasowywaniu sekwencji przyrostowych mierzonych dla coraz starszych prób drewna. Źródło:https://www.geo.uzh.ch/microsite/alpecole/static/course/lessons/28/28c.htm, [data dostępu: 05.05.2021] (zmienione)

Fig. 1.11. Construction of a multi-century dendrochronological scale based on mutual matching of growth-ring sequences measured for increasingly older wood samples. Source: https://www.geo.uzh.ch/microsite/alpecole/static/course/lessons/28/28c.htm, [accessed 05.05.2021] (changed)

Konstrukcja chronologii posiadającej silny sygnał klimatyczny wymaga odpowiedniego materiału oraz stanowisk badawczych zlokalizowanych na obszarach jednorodnych klimatycznie, na których wzrost drzew limitowany jest w głównej

mierze przez jeden wskaźnik pogodowy [51]. Tego typu terenem są Alpy, gdzie temperatura determinuje czas trwania sezonu wegetacji oraz decyduje o przebiegu i intensywności procesów fizjologicznych roślin [52].

Materiał i metodyka

Do badań wykorzystana została chronologia pochodząca z rejonu Gór Dachstein, znajdujących się na obszarze północnych Alp Wapiennych. Próby drewna subfosylnego wchodzące w skład chronologii wycięte zostały w formie krążków z pni wydobytych z dna jeziora Schwarzensee (47°31′N, 13°49′E, 1450 m n.p.m.). Natomiast próby drewna współczesnego pobrane zostały w postaci wywiertów z drzew żyjących rosnących na stromych stokach górskich wokół jeziora Schwarzensee.

Pośród prób wydobytych z dna jeziora znajdowało się w większości drewno świerka (*Picea abies (L.) Karst.*) – 66%, obecne było również drewno modrzewia (*Larix decidua Mill.*) – 21% oraz sosny (*Pinus cembra L.*) – 13%. Jednak do badań dendroklimatycznych wybrano wyłącznie drewno świerka, co pozwoliło wyeliminować różnice pomiędzy poszczególnymi gatunkami wynikające z ich odmiennych reakcji na czynniki środowiskowe.

Szerokość przyrostów rocznych pomierzono przy użyciu urządzenia LINTAB oraz programu komputerowego TSAP [53]. Poprawność dopasowania sekwencji pomiarowych sprawdzono za pomocą programu COFECHA [54].

Do badań densytometrycznych wyselekcjonowano 237 prób (promieni) drewna subfosylnego i 50 prób drewna współczesnego. Odpowiednio wycięte listewki płukano w wodzie dejonizowanej, suszono, a następnie aklimatyzowano w pomieszczeniu o stałej temperaturze oraz wilgotności. Do wykonania i obróbki zdjęć rentgenowskich zastosowano urządzenie Seifert ISO-DEBYEFLEX, dendrodensytometr oraz program komputerowy AUSWERT. Chronologia maksymalnej gęstości drewna późnego złożona została za pomocą programu CRUST [55], natomiast chronologia szerokości przyrostów w programie ARSTAN [56].

Analizy izotopowe przeprowadzono dla 51 prób drewna subfosylnego i 5 prób drewna współczesnego. Poszczególne przyrosty odseparowano, pocięto i dla każdego roku uśredniono w równym stosunku wagowym. Do badań przeznaczona została wyekstrahowana α-celuloza. Pomiary izotopowe wykonano przy użyciu spektrometru masowego IsoPrime EA-CF-IRMS, połączonego z analizatorem elementarnym EuroVector.

Otrzymane chronologie zestawiono z danymi klimatycznymi pochodzącymi ze stacji pomiarowych położonych w niewielkiej odległości od jeziora Schwarzensee. Współczynniki korelacji dla poszczególnych miesięcy obliczano w okresie 1780–2000. Analizy odbywały się w programie DENDROCLIM 2002 [57]. Rekonstrukcje warunków paleoklimatycznych prowadzono w oparciu o model regresji liniowej.

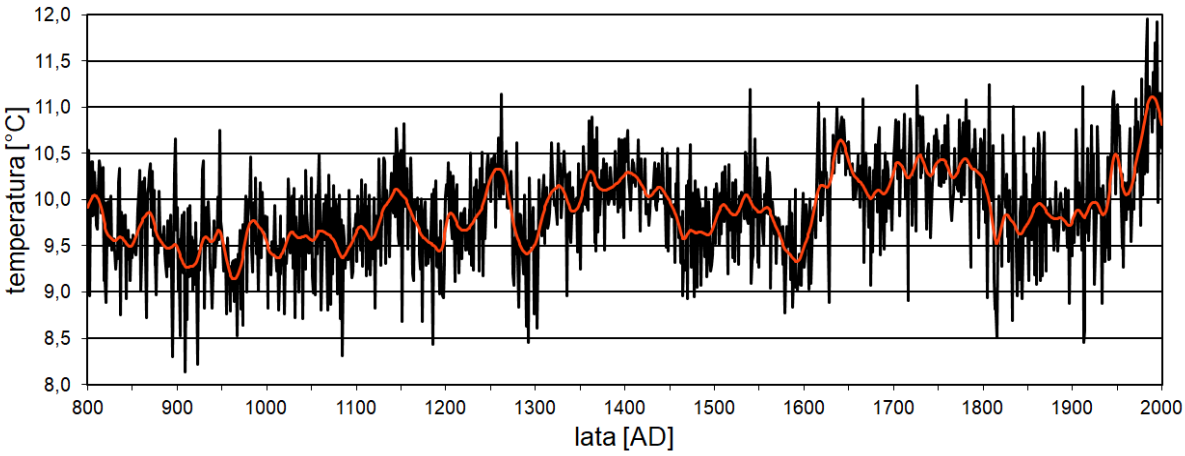
Wyniki

Rezultatem wykonanych badań było stworzenie czterech nowych chronologii na podstawie drewna pochodzącego z okolic jeziora Schwarzensee. Poszczególne chronologie obejmowały różne przedziały czasowe, lecz pełne rekonstrukcje paleoklimatyczne przeprowadzono dla okresu 800–2000 AD. Wszystkie wskaźniki dobrze korelowały z temperaturą kolejnych miesięcy sezonu wegetacyjnego. W sezonie maj–wrzesień współczynniki korelacji liniowej były statystycznie istotne i wynosiły 0,471 0,466, 0,533 i 0,359, odpowiednio dla chronologii izotopów stabilnych węgla, tlenu, maksymalnej gęstości i szerokości przyrostów.

Uzyskana rekonstrukcja temperatury (rys. 1.12), wskazuje na istnienie wyraźnych faz ochłodzeń i ociepleń na obszarze jeziora Schwarzensee. Epizody charakteryzujące się wzrostem temperatury wystąpiły około roku 1150, 1250, oraz w latach 1325–1425, 1625–1775. Globalne ocieplenie w XX wieku było wyraźnie widoczne w rejonie jeziora Schwarzensee. Jego początek zaobserwowano około 1925 r., a nasilenie postępowało od 1975 r. Z kolei spadek temperatury na tym obszarze dominował w przedziałach czasowych 900–1100, 1275–1325, 1450–1600 i 1800–1890.

Podsumowanie i wnioski

Otrzymane wyniki wskazują, że czynniki klimatyczne – a zwłaszcza temperatura sezonu wegetacji (miesiące maj–wrzesień) – wywierały silny wpływ na poszczególne parametry fizykochemiczne drewna, mierzone w obrębie kolejnych przyrostów rocznych. Dzięki temu parametry te dobrze odzwierciedlają warunki pogodowe istniejące w trakcie trwania życia drzew. To z kolei pozwoliło na precyzyjne odtworzenie wartości temperatury badanego rejonu, na przestrzeni czasu obejmującej swoim zasięgiem 1200 lat.



Rys. 1.12. Rekonstrukcja temperatury sezonu wegetacyjnego (maj–wrzesień) w latach 800–2000 na obszarze Gór Dachstein

Fig. 1.12. Reconstruction of the growing season temperature (May–September) temperature in the years 800–2000 AD in the Dachstein Mountains area

Prowadzeniu rekonstrukcji paleoklimatycznej sprzyjało kilka faktów, które złożyły się na ostateczny rezultat badań. Pierwszym z nich był wysokogórski charakter obszaru, który chociaż położony jest na stosunkowo małej wysokości, równocześnie znajduje się blisko górnej granicy lasu i cechuje się niskimi wartościami temperatury oraz dużą ilością opadów. Kolejną korzystną okolicznością był niewielki zasięg terytorialny tego obszaru. Zapewnił on jednorodność warunków siedliskowych i klimatycznych istniejących na stanowisku, z którego pochodziło przeznaczone do badań drewno. Wyjątkowo długi zasięg czasowy uzyskanych chronologii również predysponował je do badań denroklimatycznych, dzięki wykorzystaniu drewna wydobytego z dna jeziora Schwarzensee. Drewno to charakteryzowało się bardzo dobrym stanem zachowania, ponieważ sedymentacja materiału w warunkach wodnych ograniczała dostępność tlenu i hamowała rozwój mikroorganizmów odpowiedzialnych za procesy rozkładu. Istotne znaczenie dla prowadzenia badań dendroklimatycznych miał również długi zapis meteorologiczny, pochodzący ze stacji pogodowych położonych w sąsiedztwie badanego obszaru i sięgający końca osiemnastego wieku. Zwiększył on precyzję procedur kalibracji i weryfikacji, które stosowane są w trakcie badań dendroklimatycznych.

Bibliografia

1. Fross K.: Tendencje i nowoczesność we współczesnej architekturze. Top Builder, 2020.
2. Lisika A. (red.): Odnawialne źródła energii w architekturze. Wyd. Politechniki Śląskiej, s. Skrypty Uczelniane, 1944, Gliwice 1995, s. 237.

3. Fross K.: Knowledge as a Way to Architecture. Designing with the Use of Research – Design by Research – Wiedza drogą do architektury. Projektowanie z wykorzystaniem badań – Design by Research, [w:] Gyurkovich M. (red.): Definiowanie przestrzeni architektonicznej, Politechnika Krakowska, Kraków, 2018.
4. Fross K.: Czujnik smogu na budynku Wydziału Architektury. Biul. Pol. Śl., 5, 2017 s. 29.
5. Kulczycki Z., Piątkowski W.: Naprawa szkód powodowanych ruchem zakładów górniczych w 2009 r. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie. WUG, 9(193), 2010.
6. Dudek M.: Prognozowanie deformacji powierzchni wywołanych zatapianiem wyrobisk podziemnych oraz ocena ich oddziaływania na obiekty budowlane. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica. Wydział Górnictwa i Geoinżynierii. Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki. Rozprawa doktorska, s. 130, Kraków 2020.
7. Szojda L., Kapusta Ł.: Evaluation of the elastic model of a building on a curved mining ground based on the result of geodetic monitoring. Archives of Mining Sciences, 65(2), 2020; p. 213–224, DOI 10.24425/ams.2020.13318.
8. Červenka V., Jendele L., Červenka J.: ATENA Program documentation, Part 1, Theory, Prague 2016, p. 330.
9. Riley S.J., East T.J.: Investigation of the erosional stability of waste rock dumps under simulated rainfall. A proposal. Technical Memorandum 31, Australian Government Publishing Service, Canberra 1990.
10. Charanpreet S.F.: Evaluation of slope stability for waste rock dumps in a mine. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Technology in Mining Engineering. Department of Mining Engineering National Institute of Technology, No. 769008, Rourkela 2009.
11. Качурин Н.М.: Хмелевский М.В. и Волоков Д.А., Оценка физико-механических свойств материалов из отходов производства для укрепления пород в отвалах известняковых карьеров. Журнал, Известия Тульского Государственного Университета “Науки о земле”, 2015, 13–22.
12. Tomiczek K.: Analysis of the possibility of using stone post-mining waste with unknown properties to make a multi-level embankment and land reclamation. In: Sustainable development of resource-saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph, Petrosani: Universitas Publishing, 2019, p. 60–81.
13. Tomiczek K.: Short numerical analysis of the possibilities of the plastic rocks made stresses influence on the pit shaft near the waste dump. In: Traditions and innovations of resource-saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph, Petrosani: Universitas Publishing, 2019, p. 63–76.
14. Słomka-Słupik B., Podwórny J.: Wpływ dodatku zeolitu na mikrostrukturę zaczynu aktywnego żużla wielkopiecowego, [w:] Energia i środowisko w technologiach materiałów budowlanych, ceramicznych i ogniotrwałych. VIII Konferencja naukowa, 25-27.09, Szczyrk. Streszczenia. Wyd. Instytut Śląski, Opole 2017.
15. Słomka-Słupik B.: Self-immobilizing metals binder for construction made of activated metallurgical slag, slag from lignite coal combustion and ash from biomass combustion (submitted to the editorial office of the journal).
16. Płonka J., Górny A., Kokoszka K., Barchańska H.: Metabolic profiles in the course of the shikimic acid pathway of Raphanus sativus var. longipinnatus exposed to mesotrione and its degradation products. Chemosphere, 245, 2020.
17. Płonka J., Michalski A.: The influence of processing technique on the catecholamine and indolamine contents of fruits. Journal of Food Composition and Analysis, 57, 2017.

18. Barchańska H., Tang J., Fang X., Danek M., Płonka J., Sajdak M.: Profiling and fingerprinting strategies to assess exposure of edible plants to herbicides. Food Chemistry, 335, 202, 127658.
19. Danek M., Sajdak M., Płonka, J., Barchańska H.: Rapid MSPD-LC–MS/MS procedure for determination of pesticides in potato tubers. Journal of Chromatographic Science, 58, (9), 2020.
20. Danek, M., Płonka, J., Barchańska, H.: Metabolic profiles and non-targeted LC-MS/MS approach as a complementary tool to targeted analysis in assessment of plant exposure to pesticides. Food Chemistry, 356, 2021, 129680.
21. Danek M., Fang X., Tang J., Płonka J., Barchańska H.: Simultaneous determination of pesticides and their degradation products in potato tubers by MSPD-LC-MS/MS, (unpublished results).
22. Kudlek E.: Decomposition of contaminants of emerging concern in advanced oxidation processes. Water, 10, 2018, 955.
23. Dudziak M., Kudlek E., Burdzik-Niemiec E.: Decomposition of micropollutants and changes in the toxicity of water matrices subjected to various oxidation processes. Desalination and Water Treatment, 117, 2018, p. 181–187.
24. Dudziak M.: Substancje aktywne biologicznie w środowisku człowieka. Wybrane problemy. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2018.
25. Kudlek E., Dudziak M.: Wpływ wybranych mikrozanieczyszczeń organicznych na ekosystemy wodne. Inżynieria Ekologiczna, 18, 2017, s. 83–90.
26. Kudlek E.: Formation of micropollutant decomposition by-products during oxidation processes supported by natural sunlight. Desalination and Water Treatment, 186, 2020, p. 361–372.
27. Dudziak M., Kudlek E.: Degradation pathways of pentachlorophenol and benzo(a)pyrene during heterogeneous photocatalysis. Water Science and Technology, 77, 2018, p. 2407–2414.
28. Studziński W., Gackowska A., Kudlek E.: Determination of environmental properties and toxicity of octyl-dimethyl-para-aminobenzoic acid and its degradation products. Journal of Hazardous Materials, 403, 2021, 123856.
29. Kudlek E.: Transformation of contaminants of emerging concern (CECs) during UV-catalyzed processes assisted by chlorine. Catalysts, 10, 2020, 1432.
30. Zajusz-Zubek E., Konieczyński J.: Dynamics of trace elements release in a coal pyrolysis process. Fuel 82(10), 2003, p. 1281–1290.
31. Zajusz-Zubek E., Konieczyński J.: Coal cleaning versus the reduction of mercury and other trace elements' emissions from coal combustion processes. Archives of Environmental Protection, 40, 2014, p. 115–127.
32. Zajusz-Zubek E.: Ocena form występowania pierwiastków śladowych w pyle zawieszonym (PM10) i we frakcji respirabilnej (PM2.5) w otoczeniu pracujących elektrowni węglowych i koksowni w okresie letnim. Monografia nr 617, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
33. Zajusz-Zubek E., Radko T., Mainka A.: Fractionation of trace elements and human health risk of submicron particulate matter (PM1) collected in the surroundings of coking plants. Environmental Monitoring and Assessment, 189(8), 2017, p. 1–19.
34. Zajusz-Zubek E.: Zanieczyszczenia powietrza w Polsce: stan, przyczyny, skutki, koncepcja niezbędnych badań. Zanieczyszczenia powietrza w Polsce: stan, przyczyny, skutki. Raport. Red.: Lucjan Pawłowski, [Komitet Inżynierii Środowiska. Polska Akademia Nauk], Lublin 2019, s. 24–30.
35. Zajusz-Zubek E., Kaczmarek K., Mainka A.: Trace elements speciation of submicron particulate matter (PM1) collected in the surroundings of power plants. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12(10), 2015, p. 13085–13103.

36. Rueda-Holgado F., Palomo-Marín M.R., Calvo-Blázquez L., Cereceda-Balic F., Pinilla-Gil E.: Fractionation of trace elements in total atmospheric deposition by filtrating-bulk passive sampling. Talanta, 125, 2014, p. 125–130.
37. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M.: Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry, 51(7), 1979, p. 844–851.
38. Schleicher N.J., Norra S., Chai F., Chen Y., Wang S., Cen K., Yu Y., Stüben D.: Temporal variability of trace metal mobility of urban particulate matter from Beijing – A contribution to health impact assessments of aerosols. Atmospheric Environment., 45, 2011, p. 7248–7265.
39. IARC International Agency for Research on Cancer: Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Published by the International Agency for Research on Cancer: Lyon, France, 2015.
40. Taner S., Pekey B., Pekey H.: Fine particulate matter in the indoor air of barbeque restaurants: Elemental compositions, sources and health risks. Science of the Total Environment, 454–455, 2013, p. 79–87.
41. Rogula-Kozłowska W., Klejnowski K., Rogula-Kopiec P., Ośródka L., Krajny E., Błaszczak B., Mathews B.: Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM2.5 in Poland. Air Quality, Atmosphere & Health, 7, 2014, p. 41–58.
42. Bolognin S., Messori L., Zatta. P.: Metal ion physiopathology in neurodegenerative disorders. NeuroMolecular Medicine, 11, 2009, p. 223–238.
43. Tong S.T.Y., Lam, K.C.: Are nursery schools and kindergartens safe for our kids? The Hong Kong study. Science of the Total Environment, 216, 1998, p. 217–225.
44. Mainka A., Brągoszewska E., Kozielska B., Pastuszka J. S., Zajusz-Zubek, E.: Indoor air quality in urban nursery schools in Gliwice, Poland: Analysis of the case study. Atmospheric Pollution Research, 6, 2015, p. 1098–1104.
45. Mainka A., Zajusz-Zubek E.: Indoor air quality in urban and rural preschools in Upper Silesia, Poland: particulate patter and carbon dioxide. International Journal of Environmental Research and Public Health ,12, 2015, p. 7697–7711.
46. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, Nr. 1031, Warszawa 2012.
47. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide; 2006.
48. Wichmann J., Lind T., Nilsson M.A.M., Bellander T.: PM2.5, soot and NO_2 indoor-outdoor relationships at homes, pre-schools and schools in Stockholm, Sweden. Atmospheric Environment, 44, 2010, p. 4536–4544.
49. GBD Global Burden of Disease Results Tool GHDx http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool [data dostępu: 10.05.2021].
50. Rosenbaum R.K., Huijbregts M.A.J., Henderson A.D., Margni M., McKone T.E., Van De Meent D., Hauschild M.Z., Shaked S., Li D.S., Gold L.S., Jolliet O.: USEtox human exposure and toxicity factors for comparative assessment of toxic emissions in life cycle analysis: Sensitivity to key chemical properties. The International Journal of Life Cycle Assessment, 16, 2011, p. 710–727.
51. Fritts H.C.: Tree rings and climate. Academic Press, New York 1976, p. 567.
52. Leal S., Melvin T., Grabner M., Wimmer R., Briffa, K.: Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate. Boreas, 36, 2007, p. 426–440.
53. Rinn F.: TSAP-Win Professional Timeseries Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications, Version 0.3. User reference, p. 1–91, Heidelberg [Germany] 2003.

54. Holmes R.L.: Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. Tree Ring Bulletin 43, 1983, p. 69–78.
55. Melvin T.M., Briffa K.R.: CRUST: software for the implementation of Regional Chronology Standardisation: Part 1, Signal-Free RCS, 2014. Dendrochronologia, 32, p. 7–20.
56. Cook E.R., Holmes R.L.: Users manual for program ARSTAN. In: Holmes R.L., Adams R.K., Fritts, H.C.: Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin. Chronology Series 6. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona 1984, p. 50–56.
57. Biondi F., Waikul, K.: 2004. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers & Geosciences, 30, 2004, p. 303–311.

2. GOSPODARKA WODNO-ŚCIEKOWA ORAZ BIOTECHNOLOGIA ŚRODOWISKOWA

2.1. Wprowadzenie

Racjonalna gospodarka wodno-ściekowa jest tematem bardzo ważnym z punktu widzenia przyszłości Planety Ziemi. Wynika to między innymi z rosnącego niedoboru wody na świecie. Stały wzrost zużycia wody i zmiany klimatyczne, takie jak zmiana wzorców pogodowych (w tym susze lub powodzie), wylesianie, zwiększona emisja ścieków są głównymi przyczynami malejących zasobów wody. Poszukiwanie nowych efektywnych metod oczyszczania wód i ścieków, a także podejmowanie działań w zakresie oszczędzania wody w życiu codziennym jest ważnym krokiem w kierunku poprawy sytuacji rosnącego globalnego niedoboru wody. W rozdziale zawarto przegląd wybranych zagadnień z zakresu gospodarki wodno-ściekowej, które są przedmiotem badań pracowników Politechniki Śląskiej.

Biotechnologia jako interdyscyplinarna dziedzina nauk została podzielona na różnokolorowe sfery (zielona, biała, czerwona, niebieska i fioletowa) przypisane do różnych dziedzin życia. Problemy poruszane w tym rozdziale można przyporządkować do biotechnologii białej, czyli zajmującej się wykorzystaniem rozmaitych procesów biologicznych w przemyśle oraz inżynierii i ochronie środowiska oraz do niebieskiej, związanej z ogólną problematyką biotechnologii wód.

Poniżej zaprezentowano zagadnienia dotyczące metod usuwania związków azotu z różnego rodzaju ścieków, problematykę sterowania w procesach biotechnologicznych, bioługowanie umożliwiające odzysk pierwiastków należących do grupy surowców krytycznych, a także przedstawiono znaczenie grzybów w usuwaniu zanieczyszczeń organicznych.

2.2. Gospodarka wodna

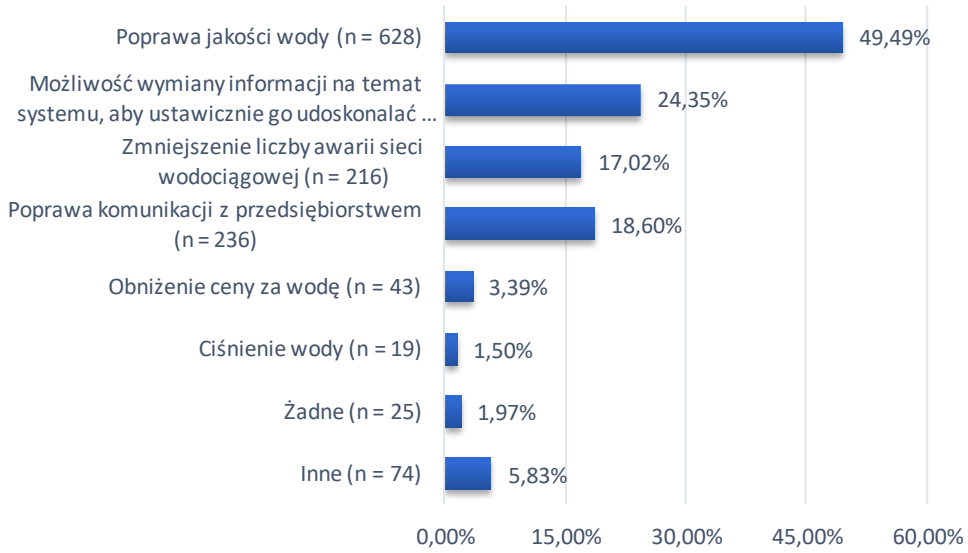
W ramach pracy badawczej dotyczącej obszaru POB6-2 w dniach od 25 września do 31 października 2020 r. przeprowadzono badania ankietowe, których celem była weryfikacja opinii mieszkańców Rybnika i okolic wobec jakości życia i potrzeb mieszkańców względem usług świadczonych przez PWiK Rybnik Sp. z o.o. W badaniu wzięło udział 1269 mieszkańców Rybnika i okolicznych miejscowości, w tym 566 kobiet (M_{wiek}=47,34; SD_{wiek}=48,56) i 703 mężczyzn (M_{wiek}=48,04; SD_{wiek}=49,18).

Zdecydowana większość badanych (81,09%) deklarowała, że oszczędza wodę, głównie korzystając z wody opadowej (30,42%) oraz biorąc prysznic zamiast kąpieli w wannie (18,76%) (inne sposoby wskazało 42,18% respondentów). Ponadto respondenci w większości nie napełniali wodą basenu kąpielowego w ogrodzie (65,80%), a także nie używali wody z sieci wodociągowej w celu podlewania ogrodu (58,87%). Dodatkowo, badani klienci przeważnie (42,55%) używali wodę z kranu bezpośrednio do picia bez przegotowywania. Badani w większości nigdy nie korzystali z wodomatu ustawionego w mieście w ramach akcji „Sięgnij po orzeźwienie", jednak mimo to oceniali tę inicjatywę pozytywnie (31,13% ocen jako bardzo potrzebna i 40,03% odpowiednio jako czasami przydatna). Podobnie pozytywnie oceniano kurtyny wodne działające w czasie upałów w Rybniku (30,58% ocen jako bardzo przydatne i 41,06% odpowiednio jako dość przydatne).

Strona internetowa PWiK Rybnik była odwiedzana regularnie przez większość respondentów (58,63%), głównie w celu zapoznania się z bieżącymi komunikatami (54,84%) i pozyskania informacji Biura Obsługi Klienta służących do kontaktu (38,44%). W przypadku awarii badani wykorzystywali w większości (65,80%) telefoniczny sposób zgłaszania. Z kolei e-mail był dla badanych najbardziej odpowiednim rodzajem kontaktu do otrzymywania informacji związanych z osobistym użytkowaniem wody (71,55%).

Jako najbardziej interesujące informacje związane z osobistym użytkowaniem wody badani wymieniali najczęściej: przerwy w dostawach wody (74,39%), awarie (52,32%), bieżące parametry chemiczne wody (49,57%) oraz alarm w przypadku niewłaściwych przepływów wody w domu klienta (46,26%) i charakterystyka własnego zużycia wody (41,37%). Ponad połowa badanych (51,69%) wyrażała gotowość do przekazywania informacji na temat planowanego wysokiego zużycia wody.

Pod względem oczekiwań dotyczących zmiany w zarządzaniu dystrybucją wody okazało się, że blisko połowa badanych (49,49%) oczekiwała poprawy jakości wody, z czego większość miała zastrzeżenia do kwestii czystości (61,46%). Ponadto znaczący odsetek badanych oczekiwał poprawy jakości wody pod względem twardości (48,73%) i smaku (44,11%). Niemal co czwarty respondent (24,35%) oczekiwał zmiany w zarządzaniu dystrybucją wody w postaci możliwości wymiany informacji na temat systemu, aby ustawicznie go udoskonalać. Rysunek 2.1 przedstawia szczegółowy rozkład wybranych odpowiedzi badanych na pytania ankietowe dotyczące jakości życia i potrzeb mieszkańców względem usług wodociągowych.



Rys. 2.1. Oczekiwania badanych wobec zmian w zarządzaniu dystrybucją wody
Fig. 2.1. Expectations of respondents towards changes in water distribution management

2.3. Zastosowanie dzbanków filtracyjnych do uzdatniania wody

W ostatnim czasie, coraz większym zainteresowaniem cieszy się dodatkowe uzdatnianie wody wodociągowej, ponieważ wzrasta świadomość społeczeństwa dotycząca zdrowego odżywiania. Jednym ze sposobów doczyszczania wody pitnej jest zastosowanie filtrów przelewowych. Głównym ich zadaniem jest usunięcie wszelkich substancji, które pogarszają smak, zapach czy barwę wody.

Celem badań prowadzonych w Katedrze Inżynierii Wody i Ścieków było określenie możliwości usuwania podstawowych zanieczyszczeń fizykochemicznych oraz związków żelaza i manganu w procesie filtracji wody w dzbankach filtracyjnych.

Substancje te mogą znajdować się w wodach podziemnych. Jeśli odbiorca posiada własną studnię, pobierana woda może być zanieczyszczona tymi związkami. Żelazo stwarza również duży problem w starszych budynkach, w których instalacja wodna nie była wymieniana dłuższy czas.

Filtracji zostały poddane wody modelowe zawierające mangan i żelazo. Przebadane zostały 3 rodzaje filtrów przelewowych wiodących firm, które są ogólnodostępne na rynku krajowym. Badania każdego filtra były prowadzone przez okres 2 miesięcy i zostały powtórzone 4-krotnie. Próbki były pobierane 2-krotnie w tygodniu. Codziennie przefiltrowano 5 dm^3 wody. Na rys. 2.2 przedstawiono wodę wodociągową, z punktu czerpalnego w jednym z budynków w centrum Gliwic w lipcu 2020 r. oraz wodę po filtracji w dzbanku.

Rys. 2.2. Woda przed i po filtracji
Fig. 2.2. Water before and after filtration in jugs

Woda modelowa zawierała 1,55 mg Mn/dm^3. W ciągu pierwszych trzech dni filtracja pozwoliła na usunięcie znacznej ilości manganu. Następnie w przypadku filtra „A" poziom manganu nadal malał, natomiast w przypadku filtra „D" utrzymywał się w stałym poziomie a na filtrze „B" wzrastał i osiągnął do ok 1 mg Mn/dm^3. Wszystkie filtry znanych marek w podobnym stopniu zatrzymały żelazo (do wartości ok. 0,1 mg Fe/dm^3). Ponadto wraz ze zużyciem filtrów nie odnotowano zmian w ilości przenikającego żelaza. Jednakże należy nadmienić, że z każdym kolejnym litrem filtrowanej wody, czas filtracji zwiększał się. Twardość wody w pierwszych dniach filtracji była bardzo niska, jednak w ciągu pierwszych 2 tygodni filtracji wartość ta wróciła do stanu pierwotnego. Warto odnotować, że filtr „D" utrzymywał obniżoną twardość przez 4 tygodnie i dopiero po tym czasie odnotowany został jej wzrost. Woda poddana filtracji w ciągu pierwszych trzech dni obniżyła swój poziom absorbancji z 0,116 do ± 0,008, co świadczy o wysokiej skuteczności procesu filtracji. Po procesie filtracji wodę poddano również analizie mikrobiologicznej. Przebadano

wodę po filtracji w dzbankach przechowywanych w lodówce oraz w temperaturze pokojowej. Stwierdzono, że na filtrach przechowywanych w temperaturze pokojowej namnażały się bakterie i ogólna liczba mikroorganizmów była w zakresie 160–180 jtk/1ml, natomiast w wodzie filtrowanej w dzbankach przechowywanych w lodówce, liczba mikroorganizmów była znacznie mniejsza – 10–45 jtk/1 ml.

Podsumowując, stwierdzono, że zastosowanie filtrów dzbankowych do uzdatniania wody zawierającej duże ilości żelaza i manganu jest wskazane, jednak wkłady filtracyjne należy zmieniać częściej niż zalecają producenci a dzbanki należy przechowywać w lodówce.

2.4. Usuwanie barwników z roztworów wodnych za pomocą procesu adsorpcji

Barwniki syntetyczne znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle tekstylnym, spożywczym, farbiarskim i włókienniczym. W związku z procesami produkcyjnymi powstają ścieki, które zawierają resztkowe barwniki. Oczywiste jest, że nieoczyszczonych ścieków tego rodzaju nie można wprowadzić bezpośrednio do środowiska, gdyż barwniki przede wszystkim niekorzystnie wpływają na barwę i przejrzystość wód, co w konsekwencji powoduje również negatywny wpływ na procesy fotosyntezy. Ponadto wiele barwników wykazuje właściwości mutagenne i kancerogenne, alergiczne lub też zaburzające funkcje życiowe organizmów zwierzęcych i roślinnych.

Istnieje aktualnie wiele różnych metod fizyczno-chemicznych służących do oczyszczania ścieków barwnych. Wymienić tutaj można procesy takie jak: koagulacja, utlenianie, separacja membranowa i sorpcja.

W przypadku sorpcji najczęściej stosowany jest węgiel aktywny w postaci granulowanej lub pylistej. Jest to sorbent bardzo skuteczny, aczkolwiek drogi, ze względu na substraty, z których klasyczny węgiel aktywny jest wytwarzany. Z tego też względu poszukiwane są aktualnie inne źródła substratów do wytworzenia sorbentów pod kątem możliwości wykorzystania odpadów takich jak np.: chityna, skorupki jaj, makulatura, kukurydza, zużyte opony, odpady z bananów, łuski ryb oraz popioły po spalaniu lub osady ściekowe.

W badaniach wykorzystywane były osady ściekowe do adsorpcji różnego rodzaju barwników syntetycznych (między innymi Acid Red 18, Acid Green 16, Acid Yellow 36). W eksperymentach stosowano zarówno osad czynny nadmierny jak i osad po

beztlenowej stabilizacji będący mieszaniną osadu nadmiernego z osadem wstępnym. Osady były poddawane procesom termicznej i/lub chemicznej modyfikacji/aktywacji. Do chemicznej modyfikacji/aktywacji wykorzystywano między innymi utlenianie nadtlenkiem wodoru i odczynnik Fentona.

W badaniach procesu adsorpcji określano wpływ pH środowiska, czasu kontaktu oraz wyznaczane są izotermy adsorpcji. W oparciu o wyniki izoterm adsorpcji analizowane są różne modele i wyznaczane parametry poszczególnych modeli, wykorzystując estymację liniową i nieliniową. W oparciu o uzyskane parametry określa się między innymi typ adsorpcji, ciepło adsorpcji, pojemność adsorpcyjną sorbentu itp.

2.5. Zastosowanie żelazianu (VI) potasu do degradacji zanieczyszczeń

Coraz większe wymagania odnośnie efektywności oczyszczania wód i ścieków, jak również przewidywania związane z koniecznością usuwania z nich w przyszłości mikrozanieczyszczeń zmuszają do poszukiwania nowych rozwiązań technologicznych oraz stosowania innowacyjnych reagentów o szerokim spektrum działania. Jednym z nich jest żelazian (VI) potasu. W I części badań nad klasycznymi i zmodyfikowanymi metodami pogłębionego utleniania dokonano przeglądu literaturowego dotyczącego zastosowania żelazianu (VI) potasu (K_2FeO_4) do degradacji wybranych zanieczyszczeń (związków endokrynnych, EDCs; surfaktantów, SPC; produktów higieny osobistej PCP; farmaceutyków i ich metabolitów) z wód oraz ścieków [1]. Efektywność usunięcia EDCs była w zakresie od 53% do 99,8% (tab. 2.1). Żelazian (VI) potasu dawał także dobre efekty degradacji SPC. Przykładowo, zastosowanie K_2FeO_4 do degradacji chlorku cetylopirydyniowego (CPC) o stężeniu 80,7 μM (metodą pośrednią, przez pomiar OWO) wykazało, że przy stosunku molowym K_2FeO_4: CPC=1:1 (czas 30 min; stężenie jonów Fe(VI) 80,8 μM; pH 9,2), spadek wartości OWO wynosił 78%, co świadczy o dobrym stopniu degradacji tego surfaktantu. Po zastosowaniu K_2FeO_4 (dawka 100 μM, pH 9, 10 min. reakcji) do usuwania PCP, uzyskano degradację glicyny i glicyloglicyny w 99% przy ich stężeniu początkowym 200 μM. Żelazian (VI) potasu wykazywał również wysoką reaktywność w stosunku do farmaceutyków, takich jak diklofenak (89% redukcji) oraz fluorochinolony – antybiotyki o szerokim spektrum działania. Wyniki badań podatności na utlenianie przy pomocy K_2FeO_4 pięciu różnych antybiotyków fluorochinolonowych (FQs): Enrofloksacyna, Norfloksacyna, Ofloksacyna,

Marbofloksacyna oraz Flumechina wykazały, że dla optymalnych stosunków molowych Fe(VI):FQs uzyskano całkowite usunięcie antybiotyków FQs.

Tabela 2.1
Procentowe usunięcie EDCs podczas utleniania za pomocą K_2FeO_4 [2]

EDCs	Usunięcie EDCs [%]			
Czas reakcji, min	1	5	30	180
Bisfenol A (BPA)	99,8	99,8	99,8	99,8
Testosteron	53,0	78,9	81,4	85,7
17 α-etynyloestradiol (EE2)	99,0	99,0	99,0	99,0
15 β-estradiol (E2)	98,0	98,0	98,0	98,0
Estron (E1)	99,3	99,3	99,3	99,3

Ze względu na silne właściwości utleniające i koagulujące, wysoką stabilność, powstawanie nietoksycznych produktów ubocznych i nieselektywność K_2FeO_4 nazywany jest „utleniaczem przyjaznym dla środowiska". Z tego też powodu żelazian (VI) potasu może być efektywnym reagentem do uzdatniania wody i oczyszczania ścieków oraz stanowić alternatywę dla procesów pogłębionego utleniania (AOP) stosowanych do oczyszczania zawierających trudnorozkładalne zanieczyszczenia ścieków przemysłowych. Potwierdzono to w badaniach własnych, których celem była ocena możliwości wykorzystania K_2FeO_4 do efektywnego oczyszczania odcieków ze starego składowiska odpadów komunalnych (>10 lat) i wybór najkorzystniejszych parametrów technologicznych (pH, stężenie K_2FeO_4 oraz czas reakcji) [3]. W badaniach wykorzystano techniczny żelazian (VI) potasu (Envifer®) o zawartości 40% K_2FeO_4. Do optymalizacji procesu oczyszczania odcieków zastosowano plan centralny kompozycyjny (Central Composite Design; CCD) oraz metodę powierzchni odpowiedzi (Response Surface Methodology; RSM).

Wykazano, że w optymalnych warunkach przy zastosowaniu żelazianu (VI) potasu następowała degradacja zanieczyszczeń organicznych w odciekach oraz inaktywacja mikroorganizmów, co było związane z działaniem dezynfekującym. Zastosowanie K_2FeO_4 w warunkach optymalnych określonych na podstawie CCD/RSM (stosując K_2FeO_4=0,390 g/l, przy pH=2,3 oraz czasie reakcji 25 min), pozwoliło na obniżenie ChZT, OWO, azotu całkowitego, fosforu całkowitego, całkowitej ilości bakterii Coli (TCC), najbardziej prawdopodobnej liczby (MPN) enterokoków kałowych i całkowitej ilości bakterii (TPC) odpowiednio o 76,2%, 82,6%, 68,3%, 91,6%, 99,0%, 95,8% oraz 99,3%. Natomiast zastosowanie konwencjonalnych koagulantów w postaci soli żelaza (II) i (III) pozwoliło jedynie na częściowe usunięcie zanieczyszczeń z badanych

odcieków. Wysoka skuteczność działania żelazianu wynikała nie tylko z jego właściwości utleniających, ale także koagulujących oraz częściowo adsorpcji zanieczyszczeń na kłaczkach powstającego wodorotlenku żelaza. Tym samym potwierdzono, że K_2FeO_4 można traktować jako skuteczny, wielofunkcyjny i przyjazny dla środowiska reagent do oczyszczania odcieków z miejskich składowisk odpadów. Przytoczone wyniki badań wskazują na znaczny charakter aplikacyjny żelazianu (VI) potasu do zastosowania w oczyszczaniu wód i ścieków.

2.6. Wytwarzanie i ocena nowych katalizatorów fotokatalitycznych

Zaawansowane procesy utleniania (ang. *Advanced Oxidation Processes*) oparte o proces heterogenicznej fotokatalizy pozwalają na dekompozycję szerokiej gamy mikrozanieczyszczeń organicznych. Proces fotokatalizy obok użycia źródła promieniowania UV wymaga wprowadzenia do mieszaniny reakcyjnej odpowiedniego katalizatora wspomagającego generowanie reaktywnych rodników zdolnych do dekompozycji zanieczyszczeń. Obecnie szerokim zainteresowaniem cieszą się półprzewodniki aktywne drugiej generacji, które mogą pochłaniać promieniowanie w zakresie światła widzialnego o długości fali większej od 400 nm. Dlatego wiele prac badawczych koncentruje się na modyfikacji nanocząstek powszechnie stosowanego ditlenku tytanu w celu zwiększania jego aktywności fotokatalitycznej i skuteczności adsorpcyjnej. Konieczne jest również poszukiwanie modyfikacji fotokatalizatorów pozwalających na zmniejszenie liczby powstających ubocznych produktów utleniania zanieczyszczeń.

Celem prowadzonych badań było wytwarzanie nowych kompozytów o właściwościach fotokatalitycznych mogących znaleźć zastosowanie w procesie fotokatalitycznego rozkładu mikrozanieczyszczeń organicznych obecnych w roztworach wodnych. Przedmiot badań stanowiły modelowe roztwory bisfenolu A (BPA), które poddano procesowi fotokatalizy w obecności fotokatalizatorów wytworzonych na bazie komercyjnego ditlenku tytanu-P25 (TiO_2) firmy Evonik Degussa GmbH (Hanau, Niemcy), węgla aktywnego CWZ-30 (AC) firmy Gryfskand Sp. z o.o. (Gryfino, Polska), dekstranu 110 000 o czystości 98,5% firmy Polfa KUTNO (Kutno, Polska) oraz metanolu lub etanolu firmy Avantor Performance Materials Poland (Gliwice, Polska). Fotokatalizatory wytwarzano tzw. metodą hybrydową łączącą mieszanie mechaniczne składników, proces kalcynacji i impregnacji. Charakterystykę metod przygotowania kompozytów zestawiono

w tabeli 2.2. Do naświetlania mieszanin reakcyjnych wykorzystano lampę UV o mocy 150 W, umieszczoną w płaszczu chłodzącym. Przed rozpoczęciem procesu naświetlania mieszaniny wodne umieszczano na 15 min w ciemni w celu oceny stopnia zaadsorbowania się BPA na powierzchni katalizatora. Naświetlanie prowadzono w czasie od 5 do 45 min. Kompozyty po zakończonym procesie separowano przy użyciu filtrów strzykawkowych o wielkości porów równej 0,2 μm. Obniżenie stężenia bisfenolu A w próbkach poprocesowych oceniono na podstawie analizy GC-MS poprzedzonej ekstrakcją analitów do fazy stałej.

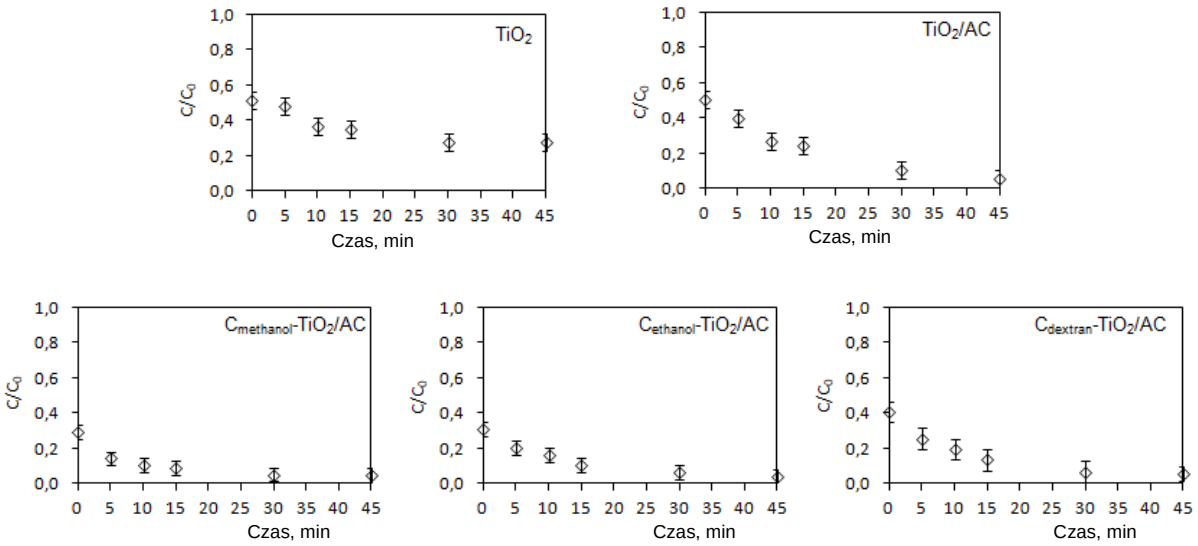
Tabela 2.2

Charakterystyka metod przygotowania fotokatalizatorów

Kompozyt	Źródło węgla	Przygotowanie
TiO_2/AC	komercyjny AC	mieszanie TiO_2 z AC, kalcynacja – 300°C, czas 8 h
$C_{methanol}TiO_2$/AC	komercyjny AC, metanol	mieszanie TiO_2 z AC, kalcynacja – 300°C, czas 8 h
$C_{ethanol}TiO_2$/AC	komercyjny AC, etanol	dodanie etanolu do mieszaniny TiO_2-AC, kalcynacja – 300°C, czas 8 h
$C_{dextran}TiO_2$/AC	komercyjny AC, dekstran	rozpuszczenie dekstranu w mieszaninie TiO_2-AC, kalcynacja – 300°C, czas 8 h

Wyznaczony stopień zaadsorbowania się BPA na powierzchni wytworzonych kompozytów zaznaczono na rys. 2.3, jako wyniki w czasie 0 min. Zaobserwowano, że stężenie PBA na skutek adsorpcji zostało obniżone w zakresie od 50% do 97%. Najwyższy stopień obniżenia stężenia odnotowano dla procesu prowadzonego w obecności TiO_2/AC. Wysoko rozwinięta powierzchnia węgla aktywnego odgrywa kluczową rolę w sorpcji BPA. Należy jednak zaznaczyć, że mikrozanieczyszczenie w tym procesie zostaje jedynie przeniesione z fazy wodnej do fazy stałej. Proces dekompozycji BPA rozpoczyna się w chwili poddania mieszaniny reakcyjnej działaniu promieniowania UV. Odnotowano, że rozkład bisfenolu A przebiega znacznie szybciej i efektywniej w mieszaninach naświetlanych w obecności wytwarzanych kompozytów w porównaniu z komercyjnym TiO_2. Dla przykładu stopień usunięcia mikrozanieczyszczenia w procesie prowadzonym w obecności komercyjnego TiO_2 osiągnął jedynie wartość 70% po 45 min naświetlania. Natomiast stopień usunięcia BPA w mieszaninach zawierających kompozyty mieścił się w zakresie od 65% do 96% już po 15 min prowadzenia procesu. Modyfikowanie katalizatorów węglem elementarnym wprowadzanym do kompozytu w postaci metanolu, etanolu lub

dekstranu pozwoliło na uzyskanie stopnia usunięcia zanieczyszczenia plasującego się na poziomie 95% po 45 min prowadzenia procesu. Wykazano, że wraz ze wzrostem liczby wprowadzanych atomów węgla do cząsteczki kompozytu obniża się stopień usunięcia związku. Dla przykładu stopień usunięcia BPA w procesie wspomaganym katalizatorem modyfikowanym metanolem $C_{methanol}$-TiO_2/AC (jeden atom węgla) był wyższy w porównaniu ze stopniem obserwowanym dla mieszaniny naświetlanej w obecności kompozytu zawierającego dekstran $C_{dextran}$-TiO_2/AC (sześć atomów węgla). Kinetyka reakcji rozkładu BPA, wyznaczona w oparciu o model Langmuira-Hinshelwooda, potwierdziła, że modyfikowanie nanocząsteczek TiO_2 węglem aktywnym pozwala na wzrost efektywności i szybkości rozkładu związku. Wykonana analiza chromatograficzna GC-MS wskazała, że zastosowanie modyfikowanych katalizatorów wpływa na obniżenie liczby generowanych ubocznych produktów rozkładu BPA.



Rys. 2.3. Obniżenie stężenia BPA w procesie fotokatalizy prowadzonej w obecności różnych fotokatalizatorów

Fig. 2.3. Reduction of BPA concentration in the process of photocatalysis carried out in the presence of various photocatalysts

2.7. Unieszkodliwianie oraz przeróbka wód popłucznych i osadów pochodzących z procesów uzdatniania wody

W technologicznych procesach oczyszczania wody powstają wody popłuczne z płukania filtrów oraz osady pokoagulacyjne. Osady stanowią od 0,1% do 0,4% dobowej wydajności stacji uzdatniania wody. Ilość powstających osadów zależy od

wielu czynników, do których należą ilość i jakość ujmowanej wody oraz stosowane procesy uzdatniania (w tym rodzaj i dawka koagulantu). Osady pokoagulacyjne stanowią mieszaninę usuniętych z wody zanieczyszczeń oraz dodanych do niej koagulantów i wykazują charakter hydrofilowo-koloidalny. Charakteryzują się wysokim uwodnieniem, przy okresowym odprowadzaniu ich z osadników, na poziomie od 97% do 99,5%, natomiast przy kilkutygodniowym przetrzymywaniu w osadniku – 96%. Osady pokoagulacyjne z udziałem wodorotlenku glinowego posiadają dużą powierzchnię właściwą, w związku z tym charakteryzują się małą podatnością na zagęszczanie. Ponadto ze względu na dużą ściśliwość i wysoką wartość oporu właściwego wykazują słabe właściwości filtracyjne i są trudne do odwodnienia. W ich skład wchodzą również mikroorganizmy pochodzące bezpośrednio z procesów oczyszczania wody. Liczebność bakterii i organizmów planktonowych wzrasta podczas zakwitów. Zawartość mikroorganizmów w osadzie oraz jego kłaczkowata struktura wpływają na udział wody związanej biologicznie i fizycznie, a tym samym na ich podatność na zagęszczanie i odwadnianie. Głównym zadaniem procesów przeróbki osadów jest zmniejszenie objętości w procesach zagęszczania i mechanicznego odwadniania oraz ostateczne zagospodarowanie. Zagęszczanie i odwadnianie stanowią ciąg procesów jednostkowych, których rodzaj i parametry zależą od rodzaju osadu, jego charakterystyki oraz oczekiwanego efektu odwodnienia. Poprawę właściwości filtracyjnych osadów można uzyskać poprzez zastosowanie dezintegracji, która umożliwia zniszczenie ścian komórkowych mikroorganizmów i uwolnienie wody związanej. Zakres prowadzonych badań wód popłucznych i osadów pokoagulacyjnych obejmował:

- badania wykorzystania wód popłucznych z procesów odżelaziania i odmanganiania do wiązania fosforu w komunalnych osadach ściekowych,
- badania doboru rodzaju i dawki polielektrolitów przed procesem zagęszczania i odwadniania,
- badania procesu zagęszczania i odwadniania osadów pokoagulacyjnych,
- badania procesu dezintegracji osadów pokoagulacyjnych,
- badania unieszkodliwiania osadów pokoagulacyjnych w procesie zestalania,
- badania wykorzystania wód popłucznych z procesów odżelaziania i odmanganiania do usuwania fosforu z filtratu z odwadniania komunalnych osadów ściekowych,
- badania oczyszczania wód popłucznych z płukania filtrów na drodze sedymentacji.

2.8. Analiza zawartości wybranych DBPs (ubocznych produktów dezynfekcji) w wodzie basenowej w zależności od funkcji basenu

Analizę przeprowadzono dla próbek wody pobranych z 9 basenów o różnych funkcjach, w tym z 8 basenów krytych i 1 basenu odkrytego (zewnętrznego). Próbki pobrano z basenu sportowego (BS), basenu do nauki pływania (BNP), basenu rekreacyjnego (BR), odkrytego basenu rekreacyjnego (OBR), basenu typu laguna, tj. z licznymi atrakcjami wodnymi (BL), basenu dla małych dzieci (BD), basenu do nurkowania (BN) i z dwóch wanien z hydromasażem (WH1 i WH2). Zaplanowany harmonogram badań pozwolił zapewnić różnorodność pomiarów pod względem parametrów technologicznych (czas pełnej wymiany wody w niecce, PW) i eksploatacyjnych (objętość wody przypadająca na jedną osobę, VB/os.) instalacji basenowych. W rozpatrywanych basenach duże obciążenie oznaczało małą objętość wody przypadającą na osobę (0,6–9,7 m^3/os.), natomiast małe obciążenie – dużą objętość wody przypadająca na osobę (23,9–67,5 m^3/os.) [4].

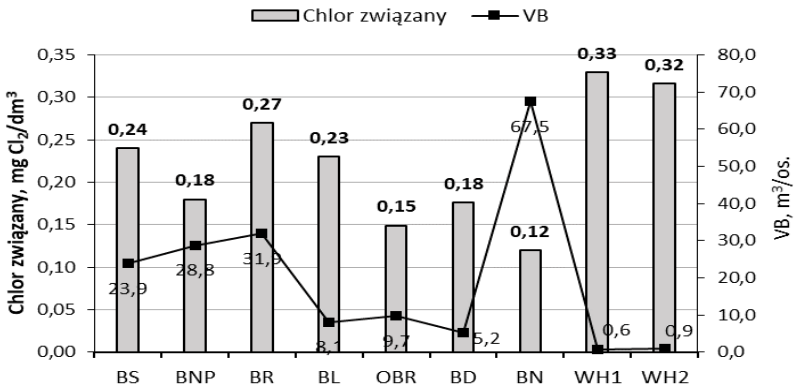
Z zakresu DBPs analizowane były stężenia chloru związanego oraz suma THM (trihalogenometanów). Zawartości chloru związanego w próbkach wód basenowych wynosiły od 0,05 mg Cl_2/dm^3 w BN do 1,13 mg Cl_2/dm^3 w BL. Test istotności różnic median wykazał istotne różnice między stężeniami chloru związanego w analizowanych basenach. Najmniejsze stężenia chloru związanego odnotowano w basenie dla nurków (BN), czyli o największej VB przypadającej na osobę przy jednocześnie najdłuższym czasie PW. Z kolei największe stężenie chloru związanego odnotowano w basenach WH1 (0,33 mg Cl_2/dm^3) i WH2 (0,32 mg Cl_2/dm^3), czyli o najmniejszej VB przypadającej na osobę przy jednocześnie najkrótszym czasie PW (rys. 2.4).

Najwyższe dopuszczalne stężenie sumy THM w wodzie basenowej według wytycznych wynosi 0,1 mg/dm^3 [5, 6]. W badanych nieckach basenowych stężenia sumy THM wynosiły od 0,013 mg/dm^3 w BD do 0,053 mg/dm^3 w WH1 (rys. 2.5). Podobnie jak w przypadku stężeń chloru związanego, wysokie obciążenie kąpiącymi się, wyrażone pośrednio w m^3/osobę oraz specyficzna funkcja basenu WH1, pomimo szybkiej wymiany wody (0,1 h), skutkowały największymi stężeniami sumy THM (0,038–0,058 mg/dm^3), oznaczonymi we wszystkich pobranych próbkach. Porównanie zawartości sumy THM w nieckach WH1 i WH2 o podobnej funkcji, ale w przypadku WH1 – niecki o znacznie mniejszej pojemności (2,4 m^3) w porównaniu z WH2 (5,6 m^3) i tym samym mniejszej objętości wody przypadającej na osobę, wykazało

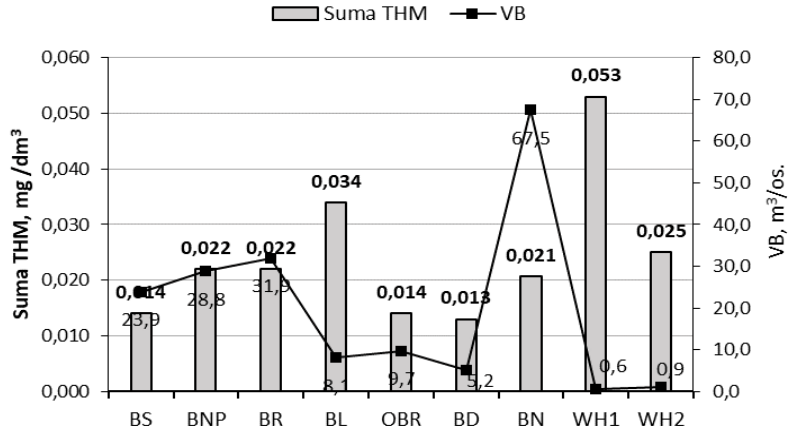
istotną różnicę zawartości sumy THM. W WH1 była ona ponad dwukrotnie większa niż w WH2 (0,053 mg/dm^3 w WH1 i 0,025 mg/dm^3 w WH2), rys. 2.5.

W przypadku typowych basenów rekreacyjnych (wyposażonych w urządzenia do hydromasażu, fontanny i zjeżdżalnie – BR, BL, OBR i BD) można było stwierdzić, że krótki czas pełnej wymiany wody w basenie (0,3–1,3 h) przy stosunkowo dużym obciążeniu kąpiącymi się (szczególnie w BL i BD) zapewniał niski poziom chloru związanego i THM. Nie bez znaczenia jest tutaj fakt, że wyposażenie tych basenów w atrakcje wodne sprzyjało uwalnianiu z wody do powietrza chloramin (zwłaszcza trichloramin) i chloroformu [7, 8].

Dodatkowo stwierdzono, że czynnikami wpływającymi na zawartość wybranych DBPs były temperatura wody basenowej, absorbancja, indeks nadmanganianowy, OWO oraz chlor wolny. Wzrost wartości tych wskaźników powodował również zwiększenie zawartości badanych DBPs.



Rys. 2.4. Stężenie chloru związanego w zależności od funkcji basenu z uwzględnieniem VB
Fig. 2.4. Concentration of combined chlorine depending on the function of the pool, taking into account VB



Rys. 2.5. Stężenie sumy THM w zależności od funkcji basenu z uwzględnieniem VB
Fig. 2.5. Concentration of total THM depending on the function of the pool, taking into account VB

2.9. Anammox – innowacyjna metoda usuwania związków azotu ze ścieków

Do lat 70. ubiegłego wieku naukowcy byli przekonani, że zostały wyjaśnione wszystkie elementy biogeochemicznego obiegu azotu w przyrodzie. Uznano, że nitryfikatory to te bakterie, które utleniają azot amonowy do azotanów (V), a denitryfikatory to jedyne mikrobiologiczne ogniwo tego cyklu, które pozwala odtwarzać wolny azot w przyrodzie. Jednak w 1977 roku Engelbert Broda w oparciu o badania termodynamiczne stwierdził, że istnieje takie ogniwo tego cyklu, które polega na utlenianiu azotu amonowego w warunkach anoksycznych w obecności z azotanów (III) lub (V) jako akceptorów elektronów. Jego hipoteza została potwierdzona w latach 90. XX wieku odkryciem w bioreaktorze denitryfikującym bakterii, które prowadziły taki proces. Nazwano je bakteriami anammox (ang. *anaerobic ammonium oxidation*) i to odkrycie zapoczątkowało erę nowych badań w dziedzinie mikrobiologii przemian azotu. Bakterie anammox są niezwykle ciekawym ogniwem przemian azotowych zarówno z technologicznego, jak i mikrobiologicznego punktu widzenia. Jako technologia, proces Anammox jest metodą bardzo efektywną, która w oczyszczalni ścieków pozwala na oszczędności w zakresie napowietrzania, które jest niezbędne nitryfikatorom, oraz na dozowaniu zewnętrznego źródła węgla organicznego, potrzebnego bakteriom denitryfikacyjnym. Jednak optymalna temperatura ich wzrostu przekracza 30°C. Dlatego w przypadku oczyszczania ścieków komunalnych, o temperaturze znacznie niższej, niezbędne byłoby dogrzewanie procesu, co powoduje, że Anammox staje się nieopłacalny.

W prezentowanych badaniach skupiono się na technologicznej możliwości obniżenia temperatury procesu bez uszczerbku na jego efektywności, z jednoczesnymi badaniami mikrobiologicznymi, pozwalającymi scharakteryzować bakterie prowadzące proces oraz zmiany w ich zbiorowisku pod wpływem zmian parametrów technologicznych. Wykazano możliwość prowadzenia procesu w temperaturze znacznie niższej niż optymalna (poniżej 30ºC) z jednoczesnym badaniem wpływu pH na efektywność procesu, ponieważ w niskich temperaturach proces jest bardziej wrażliwy na zmiany odczynu [9, 10]. Dodanie katalizatorów np. zredukowanego tlenku grafenu stymuluje proces Anammox w niskich temperaturach [11, 12]. W celu ochrony wrażliwej na czynniki środowiskowe, biomasy anammox i zintensyfikowania procesu w niskiej temperaturze można immobilizować bakterie z użyciem mieszaniny alginianiu sodu i alkoholu poliwinylowego [13, 14] (rys. 2.6). Badania nad wpływem

metali ciężkich na proces Anammox wykazały, że cynk jest wyraźnie toksyczny dla bakterii, podczas gdy kadm, chrom i ołów nie wpływały toksycznie [15].

Rys. 2.6. Biomasa anammox immobilizowana PVA-SA po absorbcji błękitu metylenowego w środowisku zasadowym (a) i kwaśnym (b) [17]
Fig. 2.6. Immobilized anammox biomass with PVA-SA after methylene blue absorption under alkaline (a) and acidic (b) conditions [17]

Bakterie anammox rosną dużo wolniej niż większość bakterii, dlatego start-up procesu jest stosunkowo długi. W badaniach wykazano, że można go znacznie skrócić (z ok. 250 do 85 dni) zaszczepiając reaktor osadem z dominacją bakterii anammox, co pozwoli na szybsze uruchomienie procesu w skali półtechnicznej i technicznej [6]. Badania technologiczne procesu Anammox mają znaczenie nie tylko dla prowadzenia efektywnego oczyszczania ścieków, ale również jako proces autotroficzny pozwalają zmniejszać pulę gazów cieplarnianych w atmosferze. Ma to duży wpływ na zmiany klimatu. Bakterie przemian azotowych, w tym anammox preferują bytowanie w złożonych zbiorowiskach. Dotychczas nie wyizolowano ich w postaci czystych kultur, co jest charakterystyczne dla ponad 95% bakterii badanych w próbkach środowiskowych. Dlatego bakterie anammox bada się metodami biologii molekularnej, które uniezależniają analizy od metod hodowlanych. Wyniki badań ilościowych i jakościowych wskazują, że zbiorowisko bakteryjne ulega przebudowie w dużej mierze niezależnie od parametrów technologicznych, a wszystkie grupy bakterii przemian azotowych są obecne w układzie technologicznym w zmieniającej się proporcji z dominacją bakterii anammox [13, 16].

Dozowanie do układu ścieków rzeczywistych, jakimi były odcieki składowiskowe zmieniło strukturę genotypową zbiorowiska, powodując zmniejszenie udziału bakterii anammox. Zbiorowisko powróciło jednak szybko do równowagi po zmianie pożywki na syntetyczną [17]. Badania oparte na sekwencjonowaniu nowej generacji wykazały, że prócz bakterii anammox (w dużej części niezidentyfikowanych Planctomycetes)

w bioreaktorze dominują również bakterie z typu Nitrospirae, niedawno uznane za mikroorganizmy zdolne do prowadzenia pełnej nitryfikacji (comammox) [13].

Badania technologiczne pozwoliły wykazać możliwość efektywnego prowadzenia procesu Anammox w temperaturach poniżej optymalnej dzięki wspomaganiu nanomateriałami i immobilizacji biomasy. Badania mikrobiologiczne pozwoliły na identyfikację czynników, które mogą wpływać negatywnie na proces, a wiedza dotycząca takiego wpływu na proces pozwala ustalić jego warunki w taki sposób, aby równowaga ekologiczna zbiorowiska nie ulegała zmianom. Pozwala to efektywnie i tanio prowadzić proces oczyszczania ścieków.

Badania wykonano w ramach projektów: Charakterystyka fizjologiczna i ekologiczna bakterii zdolnych do prowadzenia beztlenowego utleniania amoniaku (Anammox) (UMO-2013/09/D/NZ9/02438), Wspomaganie procesu Anammox w niskich temperaturach za pomocą wybranych nanomateriałów (UMO-2017/25/N/NZ9/01159), Charakterystyka i aktywność immobilizowanej biomasy bakteryjnej podczas prowadzenia procesu Anammox w niskich temperaturach (UMO-2016/N/NZ9/02147), Wpływ metali ciężkich na proces Anammox (NCN-2014-13-N-NZ9-00590).

2.10. Oczyszczanie ścieków urynowych na drodze naprzemiennej nitryfikacji-denitryfikacji

Głównym celem oczyszczania ścieków jest usuwanie z nich substancji biogennych. Szczególnie trudne do oczyszczania są ścieki o wysokim stężeniu azotu amonowego. Przykładem takich ścieków jest ludzka uryna, którą zaleca się separować od innych ścieków miejskich [18]. Do oczyszczania uryny testowano różne typy bioreaktorów, jednakże nie uzyskano zadowalającego, a tym bardziej całkowitego usunięcia azotu i fosforu [19]. Z tego względu badano także połączone metody biologiczno-chemiczne [19]. Badania przeprowadzone nad nitryfikacją azotu amonowego zawartego w moczu [20] wskazują na trudności z nitryfikacją i jej hamowaniem, co może być powodem dążenia do skrócenia nitryfikacji. Aby nie dopuścić do inhibicji nitryfikacji przez akumulację azotanów, podjęto próby wykorzystania przerywanego napowietrzania [21].

Badanie miało zatem na celu oszacowanie możliwości zastosowania naprzemiennego napowietrzania-mieszania do oczyszczania syntetycznego ludzkiego moczu w procesach częściowej nitryfikacji-denitryfikacji. Proces prowadzono za

pomocą osadu czynnego w reaktorze typu SBR. Czas trwania pojedynczego cyklu pracy tego reaktora wynosił 12 h. Przetestowano trzy serie różnych sekwencji czasowych naprzemiennych faz napowietrzania i mieszania (brak napowietrzania). Czas trwania poszczególnych faz przedstawiono w tabeli 2.3. Czas trwania pojedynczej serii wynosił 4–5 tygodni.

Tabela 2.3

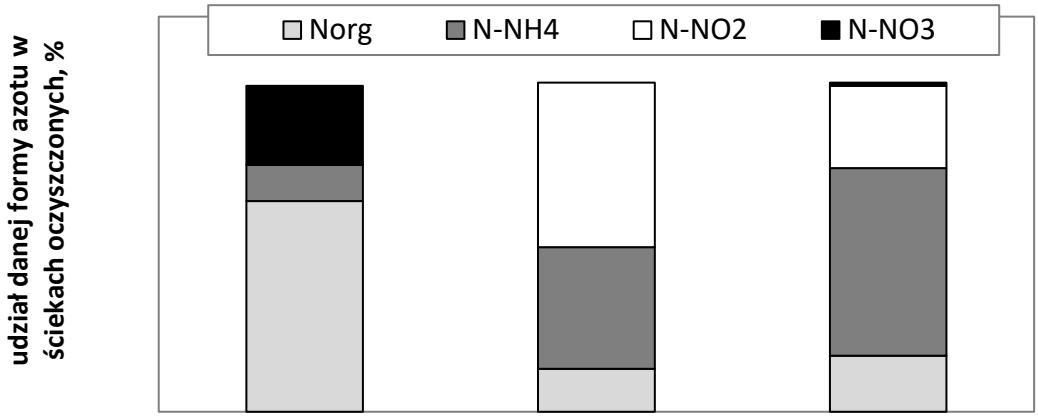
Czas i liczba faz napowietrzania i mieszania w cyklu pracy reaktora SBR

Nazwa serii	Czas pojedynczej fazy napowietrzania, min		Liczba pojedynczych faz	
	napowietrzania	mieszania	napowietrzania	mieszania
A	30	30	11	11
B	30	15	7	7
C	15	30	8	7

W celu monitorowania pracy reaktorów, w dopływie i odpływie analizowano stężenie form azotu, węgla organicznego oraz wartość pH ścieków.

Obciążenie osadu związkami organicznymi było podobne we wszystkich seriach i wynosiło około 180 mg OWO/gsmod. Obciążenie związkami azotu (w formie mocznika) wynosiło około 450 mg N/gsmo·d. Odczyn pH ścieków syntetycznych mieścił się w zakresie 6,5–7,5.

Podczas serii A, uzyskano zaledwie 24% usunięcie OWO. Podczas tej serii można było zaobserwować wzrost stężenia azotu organicznego, amonowego i azotanów. Stężenie azotanów (III) w całej serii nie przekroczyło poziomu 1,6 mg/l. Podczas serii B, ogólny węgiel organiczny był usuwany z większą skutecznością (91%). Stężenie azotu organicznego zmniejszyło się ze względu na lepszą amonifikację, jednak nitryfikacja przebiegała gorzej, powodując kumulację zarówno azotu amonowego, jak i azotanów (III) (ok. 400 mg/l). Zaobserwowano wzrost pH w reaktorze do poziomu 7,5–8. Podczas serii C, skuteczność usuwania OWO spadła do 71%. Proces amonifikacji azotu organicznego był lepszy niż w serii B. Nagromadzenie azotanów (III) w tej serii było mniejsze niż w serii B. Nie obserwowano drugiej fazy nitryfikacji. Wartość pH ścieków była w zakresie 7,5–8. Usunięcie azotu całkowitego wyniosło dla serii A, B i C odpowiednio 23, 27 i 41%. Udział różnych form azotu w ściekach oczyszczonych (wyliczony na podstawie danych z ostatnich 10 dni danej serii) przedstawiono na rys. 2.7. Ścieki oczyszczone podczas serii A były zdominowane przez azot organiczny, w serii B obfitowały w azotany (III), podczas gdy w serii C odwrotnie – więcej było azotu amonowego.



Rys. 2.7. Udział form azotu w ściekach oczyszczonych reaktorów SBR
Fig. 2.7. Nitrogen forms in the treated wastewater by SBR

Wyniki badań wykazały, że nie uzyskano pełnej amonifikacji, a następnie nitryfikacji (lub częściowej nitryfikacji) i denitryfikacji podczas ustalonych warunków pracy reaktora SBR. Akumulacja azotu amonowego i azotanów (III) spowodowała zahamowanie rozwoju bakterii utleniających azotany (III) oraz skrócenie nitryfikacji do azotanów (III) i następnie ich denitryfikacji. Wyższą efektywność usuwania azotu uzyskano w układzie, w którym łączny czas faz bez napowietrzania był dłuższy. W serii o jednakowej długości faz napowietrzania i mieszania zaobserwowano częściową nitratację. W przeciwieństwie do tego, w dwóch pozostałych systemach (B i C) nie było nitratacji lub była ona znikoma.

W żadnym przypadku jakość ścieków oczyszczonych nie była zadowalająca, dlatego konieczne byłoby dodatkowe oczyszczanie. W szczególności w przypadku odpływu uzyskanego podczas serii C proponuje się deamonifikację autotroficzną [20].

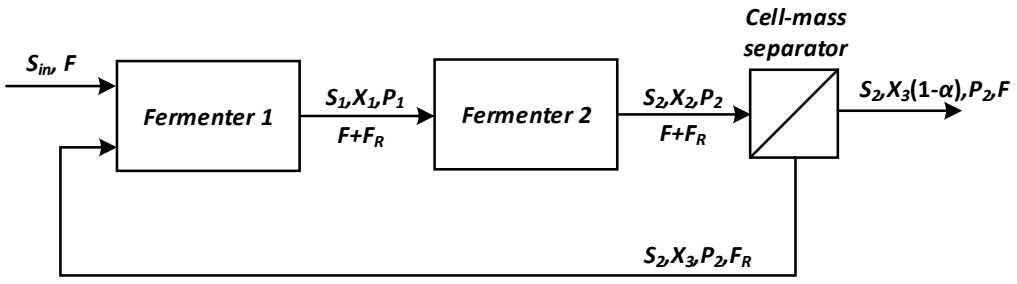
2.11. Sterowanie w Biotechnologii Środowiskowej

W laboratoriach Katedry Automatyki i Robotyki od wielu lat prowadzone są prace związane z biotechnologią środowiskową. Wyposażenie laboratoriów obejmuje między innymi utrzymywaną w trybie ciągłej pracy instalację z osadem czynnym w pełni zautomatyzowaną. Ciągła praca instalacji umożliwia dostęp do materiału biologicznego bez patogenów. W laboratorium oprócz pełnego wyposażenia w aparaturę do pomiarów ciągłych, znajduje się aparatura do analiz laboratoryjnych oraz mikroskopowych wliczając technikę FISH. Dodatkowo laboratorium wyposażone jest w zespół sterowanych bioreaktorów umożliwiających realizację złożonych procesów biotechnologicznych. Prowadzone są także badania z wykorzystaniem

energii ultradźwięków, a w szczególności badania nad wymianą ciepła w warunkach kawitacji dla urządzeń ultradźwiękowych. Celem jest sterowanie procesami wykorzystującymi ultradźwięki za pomocą pomiaru temperatury.

Reaktory porcjowe wykorzystano w badaniach nad bioróżnorodnością osadu czynnego w procesie aerobowej eliminacji substratu lipidowego. Sprawdzono przydatność wyspecjalizowanego konsorcjum mikroorganizmów do usuwania substratu lipidowego obecnego w ściekach oraz zaproponowano model eksperymentalny umożliwiający predykcję wymaganego czasu trwania cyklu reaktora porcjowego. Model ten może zostać wykorzystany do nadzoru nad procesem i sterowania cyklami pracy reaktora porcjowego. Opracowana została również metoda automatycznego wykonywania testu sedymentacyjnego osadu czynnego, wykorzystująca rejestrację obrazu oraz metody przetwarzania obrazu umożliwiające uzyskanie poprawnych wyników niezależnie od rodzaju osadu i barwy cieczy nadosadowej.

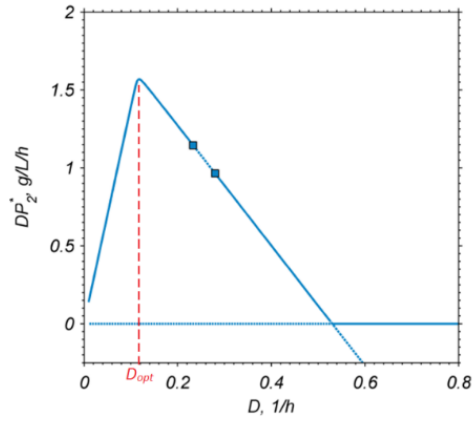
W Katedrze Automatyki i Robotyki prowadzona jest także analiza ciągłych procesów fermentacji etanolowej. Badania te mają szczególne znaczenie, gdyż bioetanol uważa się za jedno z alternatywnych źródeł energii w stosunku do paliw kopalnych. Stąd też, bardzo ważnym aspektem jest wydajność procesu. Można rozpatrywać pojedynczy bioreaktor lub bardziej wydajny system będący kaskadą bioreaktorów z separatorem biomasy oraz recyklem. Niezależnie od struktury układu, optymalizacja wydajności procesu oraz synteza odpowiedniego algorytmu regulacji musi być poprzedzona analizą dynamiki tego procesu, co dokonuje się w oparciu o model matematyczny układu. Na rys. 2.8 przedstawiono strukturę kaskadową dwóch bioreaktorów z recyklem i separatorem biomasy.



Rys. 2.8. Schemat kaskadowego procesu fermentacji etanolowej z separatorem biomasy i recyklem
Fig. 2.8. Scheme of the cascade process of ethanol fermentation with biomass separator and recycling

Diagram bifurkacyjny (rys. 2.9) przedstawia zależność produktywności tego układu w funkcji szybkości rozcieńczania D (wielkość proporcjonalna do natężenia przepływu F przez bioreaktory). Linią ciągłą, niebieską zaznaczono stabilne punkty

równowagi, natomiast przerywaną – punkty niestabilne. Uzyskane rezultaty przedstawiają możliwość optymalizacji układu i w dalszym kroku, zaprojektowanie odpowiedniego algorytmu regulacji, np. regulatora ekstremalnego.

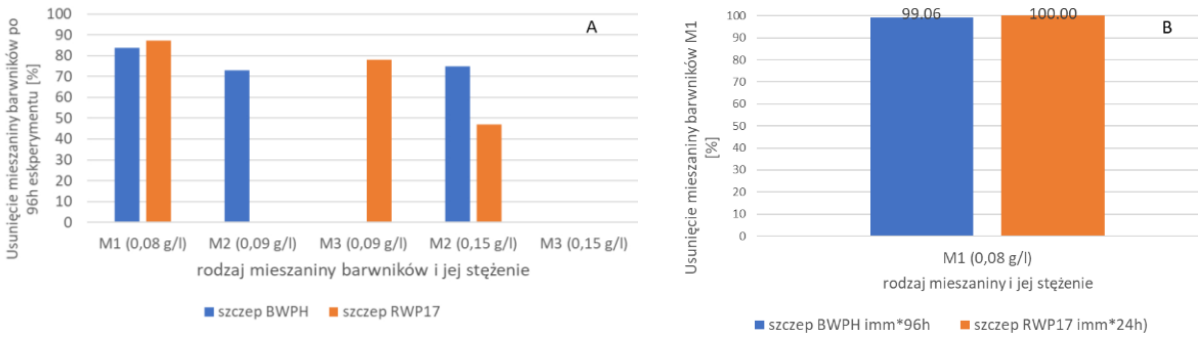


Rys. 2.9. Produktywność w kaskadowym układzie dwóch bioreaktorów
Fig. 2.9. Productivity in a cascade system of two bioreactors

2.12. Znaczenie grzybów w wybranych procesach usuwania zanieczyszczeń organicznych

Grzyby, szczególnie grzyby białej zgnilizny drewna, posiadają duży potencjał do efektywnego usuwania różnego rodzaju zanieczyszczeń o charakterze aromatycznym. Wynika to z ich zdolności do rozkładu martwej materii organicznej (w tym słabo podatnej na rozkład ligniny) dzięki wydzielaniu do środowiska enzymów o niskiej specyficzności, takich jak lakazy, peroksydazy ligninowe, peroksydaza Mn-zależna czy wiele innych. Punktem wyjścia do prowadzonych w Katedrze Biotechnologii Środowiskowej badań z wykorzystaniem tej grupy organizmów było stwierdzenie faktu, że jednymi z najtrudniej usuwalnych zanieczyszczeń są związki o strukturze pierścieniowej. Jednocześnie tego typu ksenobiotyki stanowią jedno z podstawowych zanieczyszczeń środowiska. Badania rozpoczęto od analizy możliwości zastosowania tej grupy organizmów do dekoloryzacji, czyli usuwania barwy, w hodowlach płynnych. Powszechność wykorzystania barwników w przemyśle, niedoskonałość procesów wybarwiania różnych materiałów, trudność w usuwaniu tych substancji w procesach oczyszczania ścieków związana z ich aromatyczną budową większości z nich, zdecydowała o wykorzystaniu tej grupy grzybów w badaniach. Wyizolowano szereg grzybów białej zgnilizny drewna i stwierdzono, że część z nich wykazuje zdolność do efektywnej dekoloryzacji czystych barwników o zróżnicowanej

charakterystyce. Szczególnie dobre wyniki dekoloryzacji uzyskano dla szczepu BWPH zaliczanego do gatunku *Pleurotus ostreatus* i szczepu RWP17 zaliczanego do *Polyporus picipes*. Wykorzystanie immobilizowanej grzybni tych szczepów pozwoliło całkowicie usunąć barwę powodowaną przez barwnik azowy o nazwie błękit Evansa (po 24 h) czy antrachinonowy brylantowy błękit remazolowy R (RBBR) po 48 h, a także w ponad 95% zieleń brylantową. Szczepy te były również bardzo efektywne w usuwaniu mieszanin barwników (rys. 2.10A). Immobilizowana grzybnia szczepu RWP17 usunęła całkowicie mieszaninę błękitu Evansa i zieleni brylantowej w 24 h (rys. 2.10B) [22]. Dla dwóch innych mieszanin barwników uzyskano również wysoką efektywność procesu dekoloryzacji po 96h eksperymentu (rys. 2.10A). I tak efektywność przekraczała 70% dla mieszaniny czerwieni Kongo i RBBR przez szczep RWP17, a dla mieszaniny czerwieni Kongo i zieleni brylantowej – przez szczep BWPH. Należy podkreślić jednak, że w przypadku tych badań grzybnia nie była immobilizowana, a wcześniejsze doświadczenia wskazują na większą efektywność usuwania barwników, gdy grzybnia jest immobilizowana [23, 24].



Rys. 2.10. Maksymalna efektywność dekoloryzacji mieszanin barwników przez wybrane szczepy grzybów zgnilizny drewna (A na podstawie [22, 23]; B na postawie [24])
Fig. 2.10. Maximal efficiency of dyes mixture decolorization by selected strains of white rot fungi (A on the base of [22, 23]; B on the base of [24])

Duży potencjał wykazany dla barwników był podstawą do rozpoczęcia badań nad usuwaniem innych zanieczyszczeń o strukturze pierścieniowej. Przeanalizowano możliwości wykorzystania tej grupy organizmów do usuwania cytostatyków takich jak winkrystyna i bleomycyna. Ta grupa zanieczyszczeń jest słabo do chwili obecnej przebadana pod kątem możliwości usuwania przez grzyby. Jest to również grupa zanieczyszczeń, która sprawia ogromne trudności w eliminacji ze ścieków. Wyniki badań potwierdzają możliwości wykorzystania tych organizmów do usuwania obu ksenobiotyków. Usunięcie winkrystyny przekraczało 50% przez szczep BWPH, a dla innych szczepów grzybów – 94% w ciągu zaledwie 4 dni (*Fomes fomentarius* (CB13),

Hypholoma fasciculare (CB15) i *Trametes versicolor* (CB8)). Druga substancja była usuwana wolniej i dopiero po 14 dniach efektywność usunięcia przekroczyła 50% dzięki zastosowaniu szczepów CB8 i CB15 [25].

2.13. Bioługowanie indu z odpadów elektronicznych

Ind zaliczany jest do grupy surowców krytycznych (CRM – Critical Raw Materials) jako jeden z pierwiastków o wysokim ryzyku dostaw dla Unii Europejskiej i istotnym wpływie na rozwój sektorów strategicznych UE (energia odnawialna, mobilność elektryczna, lotnictwo czy technologie cyfrowe) [26]. W tabeli 2.4 zestawiono najważniejsze kierunki zastosowania indu w różnych dziedzinach gospodarki. Większość In (60%) jest wykorzystywana do produkcji tlenku indu i cyny (ITO: Indium-Tin-Oxide), komponentu ekranów dotykowych LCD (Liquid-Crystal Display), telewizorów, komputerów i innych elementów elektronicznych, których roczna produkcja sięga setki milionów sztuk. W zależności od producenta zawartość indu w ekranach LCD mieści się w zakresie 100–300 mg In/kg, podczas gdy w źródłach pierwotnych, typu rudy sfalerytowe czy chalkopirytowe, wynosi ona od 10 mg In/kg do 20 mg In/kg [27]. Pomimo licznych badań, nie opracowano pełnego cyklu recyklingu ekranów LCD, odzysk indu nie jest prowadzony, a recykling zużytych ekranów LCD stał się prawdziwym wyzwaniem. Poszukiwania rozwiązań, obok klasycznych metod mechanicznych, hydrometalurgicznych i pirometalurgicznych, obejmują również metody biometalurgiczne – wykorzystujące potencjał mikroorganizmów. Opierające się na przyjaznej dla środowiska zdolności mikroorganizmów do przekształcania odpadów w cenny surowiec, bioługowanie jest uważane za jeden z najbardziej obiecujących procesów w ostatnich latach. Mikroorganizmy są zdolne do przekształcania (w naturalnym cyklu biochemicznym) metali o różnej konfiguracji elektronów walencyjnych poprzez katalizowanie reakcji redoks. Dlatego ługowanie biologiczne może stać się w niedalekiej przyszłości ważnym procesem przetwarzania ZSEE (Zużyty Sprzęt Elektryczny i Elektroniczny) ekonomicznie uzasadnionym, stanowiącym atrakcyjną alternatywę dla obecnie stosowanych konwencjonalnych metod odzysku metali. Interesującą grupą mikroorganizmów istotnie uczestniczących w procesach przekształcania metali są mikroorganizmy chemolitoautotroficzne. Ich metabolizm zależy wyłącznie od obecności związków nieorganicznych, dzięki czemu mogą żyć w niekorzystnych często ekstremalnych środowiskach. Obecnie prowadzone są prace nie tylko nad

kompleksowym określeniem warunków fizykochemicznych i technicznych bioługowania ZSEE, ale także nad wyodrębnieniem nowych, nieodkrytych lub mało znanych gatunków mikroorganizmów, które mogą posiadać możliwości zastosowania w odzysku metali z odpadów elektronicznych, w tym indu z zużytych ekranów LCD. Badania nad możliwościami zastosowania mikroorganizmów w bioługowaniu indu i cyny (z ITO) znajdują się w początkowej fazie. Izolacja nowych mikroorganizmów ze środowiska, o wyjątkowych cechach, stwarza szansę na podniesienie efektywności bioługowania metali, a w przyszłości wpłynie na rozwój bardziej wydajnych i przyjaznych dla środowiska technologii recyklingu odpadów.

Tabela 2.4

Wybrane zastosowania indu [28, 29]

Zastosowanie indu (udział)	Charakterystyka
Płaskie wyświetlacze LCD (60%)	Ind wchodzi w skład powłoki ITO stosowanej do produkcji wyświetlaczy ciekłokrystalicznych (LCD); skład ITO: 90% In_2O_3, 10% SnO_2.
Luty na osnowie indu (11%)	Stosowane do łączenia części szklanych i kwarcowych z metalami (urządzenia próżniowe) oraz części metalowych pracujących w ośrodkach zasadowych, np.: 37,5% Sn, 37,5% Pb i 25% In lub 97% In i 3% Ag.
Panele fotowoltaiczne (9%)	In wchodzi w skład materiału warstwy absorbującej w panelach CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), CIS (Copper Indium Selenide).
Baterie (5%)	Ind używany do produkcji baterii alkalicznych. Cienką warstwą indu powlekane są elementy cynkowe katody.
Półprzewodniki, diody LED (3%)	Ind jest składnikiem złożonych materiałów półprzewodnikowych: InAs, InGaAs i InGaN do zastosowań elektronicznych i elektrooptycznych (układy scalone, lasery, diody LED).

Przedstawiony projekt był współfinansowany przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej (PPN/BIL/2018/1/00026/U/00001) „Nowe mikroorganizmy wyizolowane ze środowiska górniczego do zastosowań w bioługowaniu metali z wybranych odpadów”.

2.14. Chemoenzymatyczne przetwarzanie biomasy lignocelulozowej do użytecznych produktów

Wysokie tempo rozwoju technologicznego i związany z tym znaczący wzrost zapotrzebowania na energię powoduje, że coraz częściej bada się możliwości zastępowania wyczerpujących się zasobów paliw kopalnych surowcami ze źródeł odnawialnych. Należy podkreślić, że trend ten nie dotyczy jedynie produkcji energii, ale także otrzymywania polimerów biodegradowalnych i cennych chemikaliów, szczególnie typu Fine Chemicals. Takie działania wpisują się w ogólnie promowaną politykę zrównoważonego rozwoju, zwiększenia świadomości ekologicznej konsumentów, a także zasady „Zielonej Chemii". Biomasa lignocelulozowa, jako odnawialny, szeroko rozpowszechniony materiał roślinny, budzi w tym zakresie ogromne zainteresowanie. Zaliczają się do niej między innymi odpady drzewne, pozostałości rolnicze, trawy, odpady z ogrodów i inne. Tkanka roślinna zbudowana jest głównie z celulozy (ok. 35–83% suchej masy), hemiceluloz (ok. 0–30% suchej masy) i ligniny (ok. 0–43% suchej masy) [30], oraz mniejszej ilości pektyn, substancji ekstrakcyjnych, białek, tłuszczy lub substancji mineralnych [31, 32]. Zawartość poszczególnych składników zależy od gatunku oraz wieku rośliny, fragmentu/typu tkanki oraz warunków środowiskowych, w których roślina wzrastała [33, 34].

Badania prowadzone w tym zakresie koncentrują się na zastosowaniu kwaśnych cieczy jonowych, a także DES (ang. *Deep Eutectic Solvents*) i/lub enzymów zarówno w przetwarzaniu celulozy mikrokrystalicznej, biomasy lignocelulozowej (m.in. liści, łupin i odpadów z drewna orzecha włoskiego, trawy i zrębków tartacznych o różnym stopniu rozdrobnienia) jak i w dalszych przemianach otrzymanych związków (głównie estryfikacji kwasu lewulinowego do lewulinianów).

Przeprowadzono wstępne badania nad delignifikacją słomy żytniej wobec DES składających się z chlorku choliny i kwasu szczawiowego lub chlorku choliny i kwasu malonowego. Zbadano wpływ stopnia rozdrobnienia biomasy i temperatury. Stwierdzono, że niezależnie od stopnia rozdrobnienia biomasy, najlepsze wyniki otrzymano wobec DES składającego się z chlorku choliny i kwasu szczawiowego w temperaturze 100°C. Stopień delignifikacji był znacznie wyższy niż w przypadku powszechnie stosowanej hydrolizy zasadowej. Zastosowanie rozpuszczalników głęboko eutektycznych jest bardziej ekologiczne (są zaliczane do tzw. „zielonych rozpuszczalników"), niż wodorotlenku sodu. Wykazano również, że wstępna delignifikacja biomasy za pomocą DES, powoduje uzyskanie wyższych wydajności

glukozy w następczym procesie enzymatycznej hydrolizy wobec celulazy z *Aspergillus Niger*.

Wykonano także badania, w których zastosowano kwaśne ciecze jonowe, o ogólnym wzorze [Hmim][$(HSO_4)(H_2SO_4)x$] (gdzie [Hmim] – kation 1-metyloimidazoliowy). Okazało się, że w wyniku transformacji wobec tych cieczy jonowych, można bezpośrednio otrzymać kwas lewulinowy, który przez Departament Energii Stanów Zjednoczonych został uznany za jeden z najważniejszych związków pochodzenia naturalnego, z grupy tzw. „platform chemicals" [35].

Przeprowadzone zostały również badania nad możliwością zastosowania kwaśnych cieczy jonowych w procesie otrzymywania estrów kwasu lewulinowego. Badania prowadzono we współpracy z zespołem prof. Anny Chrobok z Katedry Technologii Chemicznej Organicznej i Petrochemii, Wydziału Chemicznego. W przeciwieństwie do znanych i opisanych wcześniej metod, reakcja przebiega w temperaturze pokojowej, pod ciśnieniem atmosferycznym, co eliminuje konieczność ogrzewania mieszaniny reakcyjnej i stosowania skomplikowanego sprzętu. Dla większości przypadków całkowite przereagowanie substratu obserwuje się już po pięciu godzinach prowadzenia reakcji. W razie konieczności skrócenia czasu reakcji możliwe jest podwyższenie temperatury, co nie wpływa na wydajność wydzielonego produktu. Wynikiem badań była opracowana i opatentowana wydajna metoda otrzymywania całej gamy lewulinianów (tab. 2.5).

Tabela 2.5

Wydajności estrów kwasu lewulinowego otrzymanych w reakcji estryfikacji kwasu lewulinowego wobec [Hmim][$(HSO_4)(H_2SO_4)_2$]

Lewulinian	Wydajność (%)*
Metylu	90
Etylu	81
Propylu	86
n-butylu	85
n-pentylu	91
2-etyloheksylu	87
Oktylu	82

* Wydajność czystego estru; Kwas lewulinowy (LA): alkohol 1:2 mol/mol; ciecz jonowa 1 mol/mol LA temperatura 25°C; czas 5 h

Największą zaletą opracowanego układu jest sposób wydzielania produktu (lewulinianu). Ze względu na to, że produkt tworzy osobną fazę, wydzielanie ogranicza się do zdekantowania estru znad warstwy cieczy jonowej. Ciecz jonowa

może być ponownie wykorzystana w kolejnych reakcjach. Możliwość wielokrotnego zawracania cieczy jonowej z zachowaniem wysokich wydajności estrów (nawet do 10 cykli) oraz metoda wydzielania produktów, która nie wymaga stosowania dodatkowych procedur i odczynników powoduje, że jest to atrakcyjna alternatywa do stosowanych wcześniej rozwiązań.

Zastosowanie nowych, ekologicznych rozpuszczalników i katalizatorów jakimi są ciecze jonowe, rozpuszczalniki głęboko eutektyczne i enzymy, w procesach transformacji biomasy lignocelulozowej pozwala na uzyskanie cennych związków chemicznych z odnawialnych źródeł, z dobrymi wydajnościami. Liczne z omawianych tu związków chemicznych znajdują już teraz szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia.

Bibliografia

1. Kliś S., Barbusiński K., Thomas M., Mochnacka A.: Application of potassium ferrate (VI) in the treatment of selected water and wastewater pollutants – short review. ACEE Architecture Civil Engineering Environment, 13(1), 2020, p. 129–138.
2. Yang B., Ying G., Zhao J., Zhou L., Chen F.: Removal of selected endocrine disrupting chemicals (EDC's) and pharmaceuticals and personal care products (PPCP's) during ferrate (VI) treatment of secondary wastewater effluents. Water Research, 46 (7), 2012, p. 2194–2204.
3. Thomas M., Kozik V., Barbusiński K., Sochanik A., Jampilek J., Bąk A.: Potassium ferrate (VI) as the multifunctional agent in the treatment of landfill leachate. Materials, 13, 2020, 5017.
4. Wyczarska-Kokot J.: Wieloaspektowa analiza parametrów wpływających na jakość wód basenowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020.
5. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dn. 9 listopada 2015 r. w sprawie wymagań, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach, Dz.U. 2015, poz. 2016.
6. Guidelines for safe recreational water environments. Volume 2: Swimming pools and similar, WHO, Geneva 2006.
7. Schmalz C., Frimmel F.H., Zwiener C.: Trichloramine in swimming pools – Formation and mass transfer. Water Research, 45, 2011, p. 2681–2690.
8. Bai Y.E.H., Lian L., Li J., Blatchley E.R.: Effect of chloride on the formation of volatile disinfection byproducts in chlorinated swimming pools. Water Research 105, 2016, p. 413–420.
9. Tomaszewski M., Cema G., Ziembińska-Buczyńska A.: Significance of pH control in anammox process performance at low temperature. Chemosphere, 185, 2017, p. 439–444.
10. Tomaszewski M., Cema G., Ziembińska-Buczyńska A.: Influence of temperature and pH on the anammox process: A review and meta-analysis. Chemosphere, 182, 2017, p. 203–214.
11. Tomaszewski M., Cema G., Ciesielski S., Łukowiec D., Ziembińska-Buczyńska A.: Cold anammox process and reduced graphene oxide – varieties of effects during long-term interaction. Water Research, 156, 2019, p. 71–81.

12. Tomaszewski M., Cema G., Ziembińska-Buczyńska A.: Short-term effects of reduced graphene oxide on the anammox biomass activity at low temperatures. Science of The Total Environment, 646, 2019, p. 206–211.
13. Banach-Wiśniewska A., Tomaszewski M., Hellal S.M., Ziembińska-Buczyńska A.: Effect of biomass immobilization and reduced graphene oxide on the microbial community changes and nitrogen removal at low temperatures. Scientific Reports, 12 11(1), 2021, 840.
14. Banach-Wiśniewska A., Ćwiertniewicz-Wojciechowska M., Ziembińska-Buczyńska A.: Effect of temperature shifts and anammox biomass immobilization on sequencing batch reactor performance and bacterial genes, abundance. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, https://doi.org/10.1007/s13762-020-02957-w.
15. Gutwiński P., Cema G., Ziembińska-Buczyńska A., Wyszyńska K., Surmacz-Górska J.: Long-term effect of heavy metals Cr(III), Zn(II), Cd(II), Cu(II), Ni(II), Pb(II) on the anammox process performance. Journal of Water Process Engineering, 2021, 101668.
16. Ziembińska-Buczyńska A., Banach-Wiśniewska, A., Tomaszewski, M., Poprawa I., Student S., Cema G.: Ecophysiology and dynamics of nitrogen removal bacteria in a sequencing batch reactor during wastewater treatment start-up. International Journal of Environmental Science and Technology, 16 (8), 2019, p. 4215–4222.
17. Banach-Wiśniewska A., Tomaszewski M., Cema G., Ziembińska-Buczyńska A.: Medium shift influence on nitrogen removal bacteria: Ecophysiology and anammox process performance. Chemosphere, 238, 2020, 124597.
18. Udert K.M., Fux C., Münster M., Larsen T.A., Siegrist H., Gujer W.: Nitrification and autotrophic denitrification of source-separated urine. Water Science and Technology, 48(1), 2003, 119.
19. Udert K., Wachter M.: Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. Water Research, 46 (2), 2012, 453.
20. Udert K., Larsen T., Biebow M., Gujer W.: Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. Water Research, no. 37 (11), 2003, 2571.
21. Zhang M., Lawlor P., Wu G., Lynch B., Zhan X.: Partial nitrification and nutrient removal in intermittently aerated sequencing batch reactors treating separated digestate liquid after anaerobic digestion of pig manure. Bioprocess and Biosystems Engineering, 34 (9), 2011, 049.
22. Przystaś W., Zabłocka-Godlewska E., Grabińska-Sota E.: Efficacy of fungal decolorization of a mixture of dyes belonging to different classes. Brazilian Journal of Microbiology, 46 (2), 2015, p. 415–424.
23. Przystaś W.: Dekoloryzacja barwników syntetycznych przez grzyby białej zgnilizny drewna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
24. Przystaś W., Zabłocka-Godlewska E.: Mixture of dyes – study of zootoxicity and removal by selected fungal strains. Ecological Chemistry and Engineering A. 26, (1/2), 2019, p. 99–112.
25. Jureczko M., Przystaś W., Karwczyk T., Gonciarz W., Rudnicka K.: White-rot fungi-mediated biodegradation of cytostatic drugs – bleomycin and vincristine. Journal of Hazardous Materials, 407, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124632.
26. 2020-Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability Brussels, 3.9.2020 COM, 2020.
27. Willner J., Fornalczyk A., Gajda B., Saternus M. Physicochem. Probl. Miner. Process doi: 10.5277/ppmp1878.

28. http://magma-metale.pl/lutowanie/luty-na-osnowie-indu/
29. Elrouby M., El-Shafy Shilkamy H.A., Elsayed A.: Development of the electrochemical performance of zinc via alloying with indium as anode for alkaline batteries application. Journal of Alloys and Compounds, DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157285.
30. Ponnusamy V.K., Nguyen D.D., Dharmaraja J., Shobana S., Banu R., Saratale R.G., Chang S.W., Kumar G.: A review on lignin structure, pretreatments, fermentation reactions and biorefinery potential. Bioresource Technology, 2019, 271, p. 462–272.
31. Magniont C., Escadeillas G.: Chemical composition of bio-aggregates and their interactions with mineral binders. Bio-aggregates based building materials state-of-the-art report of the RILEM technical committee 236-BBM. Sofiane Amziane, F.C., Ed.; Springer: Clermont-Ferrand, 2017, p. 4.
32. Credou J., Berthelot T.: Cellulose: from biocompatible to bioactive material. Journal of Materials Chemistry B , 2014, 2, p. 4767–4788.
33. Sluiter J.B., Ruiz R.O., Scarlata C.J., Sluiter A.D., Templeton D.W.: Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and desciption of methods. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58, p. 9043–9053.
34. Biswal A.K., Tan L., Atmodjo M.A., Demartini J., Albersheim I.G., Hunt K., Black I.M., Mohanty S.S., Ryno D., Wyman C.E., et al.: Biotechnology for biofuels comparison of four glycosyl residue composition methods for effectiveness in detecting sugars from cell walls of dicot and grass tissues. Biotechnology Biofuels, 2017, 10.
35. Bozell J.J., Petersen G.R.: Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates-the US Department of Energy's "top 10" revisited. Green Chemistry, 2010, 12, p. 539–554.

3. GOSPODARKA OBIEGU ZAMKNIĘTEGO

3.1. Wprowadzenie

Przemysłowa specyfika, uwarunkowania historyczne oraz profil społeczny Górnego Śląska sprawiły, że zasady Gospodarki Obiegu Zamkniętego (GOZ) od wielu dekad wprowadzano w życie, pomimo że sam termin jest stosunkowo nowy. Politechnika Śląska jako lider innowacji i technologii w regionie, od początku aktywnie uczestniczy w tworzeniu bezodpadowych technologii, wykorzystaniu odpadów przemysłowych i komunalnych, recyklingu oraz odzysku surowców i materiałów rzadkich.

Badania naukowe wspierające GOZ prowadzone były i są na wszystkich Wydziałach Politechniki Śląskiej. W drugiej połowie XX wieku naukowcy Politechniki Śląskiej opracowywali między innymi technologie podsadzania wyrobisk górniczych Ubocznymi Produktami Wydobycia (UPW) oraz materiały budowlane wykorzystujące Uboczne Produkty Spalania (UPS) ze śląskich hut i elektrowni. Wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej i rozpoczęcia zintensyfikowanych działań na rzecz ochrony środowiska grupa naukowców Politechniki Śląskiej zajmujących się GOZ rozszerzyła się znacząco. W ostatniej dekadzie prace naukowe zespołów Politechniki Śląskiej zostały wsparte przez dedykowane GOZ projekty Komisji Europejskiej w ramach Horizon 2020, Erasmus +, KIC Raw Materials i KIC Innoenergy oraz przez projekty polskich agencji takich jak NCN, NCBiR, FNP i NAWA.

Silny impuls do intensyfikacji prac na rzecz szerokopojętej ochrony środowiska dała Mapa Drogowa Transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym przyjęta przez Radę Ministrów RP w 2019 roku wyznaczająca najważniejsze kierunki transformacji, w tym reprezentowane w Politechnice Śląskiej:

a) zrównoważona produkcja przemysłowa:
   - odpady z górnictwa, przemysłu przetwórczego i energetyki,
   - rozszerzona odpowiedzialność producenta,
   - środowiskowa ocena cyklu życia;

b) zrównoważona konsumpcja:
   - odpady komunalne,
   - edukacja;
c) biogospodarka;
d) nowe modele biznesowe;
e) wdrażanie i monitorowanie GOZ [1].

Niniejszy rozdział prezentuje główne osiągnięcia zespołów naukowych Politechniki Śląskiej w zakresie GOZ, które koncentrują się między innymi na odzysku i recyklingu surowców oraz sterowaniu procesami produkcyjnymi w celu osiągnięcia optymalnych cech ubocznych produktów w kontekście ich późniejszego wykorzystania np. w budownictwie, medycynie, przemyśle paliwowym i innych. Politechnika Śląska przywiązuje ogromną uwagę do aktywnego kształtowania postaw proekologicznych wśród wszystkich grup społecznych i wiekowych poprzez inicjatywy, badania i projekty edukacyjne.

3.2. Recykling metali o krytycznym znaczeniu dla rozwoju technologii

Wraz z rozwojem nowych technologii, grupa surowców krytycznych (CRMs – Critical Raw Materials) jest systematycznie rozszerzana o kolejne pierwiastki. W pierwszej ocenie (2011 r.) Komisja Europejska przedstawiła listę zidentyfikowanych 14 CRMs a obecnie na liście wpisanych jest 30 surowców, zdefiniowanych jako surowce o wysokim ryzyku dostaw dla Unii Europejskiej i istotnym wpływie na rozwój sektorów strategicznych (energia odnawialna, mobilność elektryczna, lotnictwo czy technologie cyfrowe) [2]. Lawinowy rozwój technologii cyfrowych, wzrost produkcji i sprzedaży sprzętu elektrycznego i elektronicznego, czy też konieczność zmiany na technologie zielonej energii w kolejnych dekadach, rozwój rynku ogniw litowych, technologii wiatrowych oraz fotowoltaicznych przyniosą wzrost globalnego zapotrzebowania na wszystkie metale krytyczne. Przykładowo, scenariusze wysokiego popytu zakładają 6-krotny wzrost zapotrzebowania na dysproz, neodym, prazeodym i terb (stosowane w magnesach trwałych turbin wiatrowych) w 2030 roku i nawet 15-krotny w 2050 roku w porównaniu z wartościami z 2018 roku [3]. „Przejście” UE na gospodarkę neutralną dla klimatu wiąże się ze zwiększeniem produkcji poszczególnych komponentów wyposażenia sektorów strategicznych, ich wprowadzeniem na rynek, wykorzystaniem,

a następnie wycofaniem z eksploatacji i recyklingiem w kolejnych latach. Pomimo licznych badań, nie opracowano pełnego cyklu recyklingu wielu elementów będących nośnikami metali krytycznych. Przykładem są baterie Li-ion, dla których recykling litu w UE jest znacznie ograniczony, a ilość odzyskiwanych pozostałych metali istotnych ekonomicznie, które są wykorzystywane do produkcji baterii, jest niewielka. Tylko 12% Al, 22% Co, 8% Mn i 16% Ni używanych w UE jest poddawana recyklingowi [4]. Wśród pierwiastków metali ziem rzadkich, zwłaszcza magnesy trwałe zawierające neodym i dysproz czy panele solarne, zawierające ind, gal, tellur, znajdują się na liście pilnych potrzeb poprawy wskaźników recyklingu tych metali. Recykling surowcowy wielu metali krytycznych, między innymi galu germanu, indu czy metali ziem rzadkich, jest utrudniony ze względu na ich małe stężenie i rozproszenie w podzespołach elektronicznych, mnogość produktów o różnych stężeniach czy heterogeniczność materiałową. Wyzwaniem jest opracowanie efektywnych ekonomicznie rozwiązań w zakresie recyklingu materiałów zintegrowanych ze stopami, kompozytami lub ciasno upakowanych w strukturach materiałowych, utrudniających demontaż. W masie Zużytego Sprzętu Elektronicznego i Elektrycznego (ZSEE), obok składników podstawowych (zawartość >1%) występujących w największej ilości (szkło, plastik, ceramika), metale krytyczne często są składnikami o charakterze drugorzędnym i zawartości w zakresie 0,1–1,0% lub są zaliczane do mikroskładników występujących w ilościach śladowych (<0,1%) [5]. Dlatego odzysk tych metali jest trudny, np. magnesy trwałe stanowią tylko 3% wagi komputera (dysku twardego lub napędu optycznego) i mniej niż 0,5% wagi telefonu komórkowego [6]. Rozważając jednak recykling tych metali, należy wziąć pod uwagę fakt, że miliony ton zużytego sprzętu elektronicznego znajdującego się w obiegu, są źródłem tysięcy ton wartościowych metali możliwych do odzysku. W Europie rocznie zbiera się około 4 milionów ton ZSEE. Oznacza to, że około 370 ton neodymu i 15 ton dysprozu jest potencjalnie dostępnych z recyklingu [6]. W tabeli 3.1 przedstawiono zawartość wybranych metali w komponentach ZSEE. Stężenia metali różnią się w zależności od rodzaju elementu elektronicznego/komponentu. Głównymi nośnikami germanu są fotorezystory, natomiast telluru – ogniwa słoneczne. Najwyższa zawartość talu występuje w ogniwach fotowoltaicznych. Wśród pozostałych metali dominującymi są miedź, kadm, nikiel. Główną przeszkodą w prowadzaniu procesów recyklingu np. germanu są niewielkie stężenia tego metalu rozproszonego w drobnych elementach elektroniki. Natomiast możliwość odzysku telluru z ogniw słonecznych (CdTe) jest ograniczona z uwagi na fakt, że fotowoltaika jest stosunkowo nową dziedziną techniki,

a większość ogniw słonecznych jest w czasie eksploatacji. Obecnie straty wielu metali krytycznych w łańcuchu zbierania i przetwarzania są dość wysokie. Istnieje pilna potrzeba opracowania nowych strategii recyklingu, aby umożliwić bardziej wydajny oraz ekonomiczny recykling metali krytycznych.

Tabela 3.1
Zawartość metali w podzespołach i elementach sprzętu elektronicznego [5]

Metal, mg/kg	Ogrodowe lampy solarne	Panele solarne	Fotorezy-story	Fotodiody
Tl	0,07	0,01	0,006	0,001
Ge	0,40	0,04	0,93	0,26
Te	0,07	1,47	0,34	0,03
Ni	227,7	241,3	2685	114,4
Cu	91,4	78863	1093	347505
Zn	37,2	82,4	31,6	506,2
Cd	0,85	340,4	1789	98,88

3.3. Odzysk metali z płyt obwodów drukowanych

Szybki postęp technologii komputerowych przyczynił się do zmiany wzorców konsumpcji, której skutkiem jest masowa wymiana urządzeń na nowe, o znacznie wyższych wydajnościach. W jej wyniku ilość odpadów elektronicznych i elektrycznych (WEEE, ang. *Waste of Electrical and Electronic Equipment*) wzrasta w szybkim tempie. Jedynie w 2019 roku wygenerowano 53,6 milionów ton tych odpadów w świecie, co w porównaniu z 2014 rokiem było wyższe o 9,2 milionów ton [7]. Szacuje się, że w roku 2019 wartość surowców wtórnych zawartych w e-odpadach wynosiła 57 miliardów USD, przy czym dotyczyła ona tylko około 17% udokumentowanej ilości tych materiałów [7]. Duża ich część jest przetwarzana w sposób nieodpowiedni lub jest, ze względu na brak proekologicznych i wysokowydajnych metod recyklingu, tymczasowo magazynowana [7]. Obecnie niemal w każdym odpadzie elektronicznym występują bogate w metale płyty odwodów drukowanych (PCBs, ang. *Printed Circuit Boards*) [8]. Ich zwartości są znacznie wyższe niż w naturalnych rudach [8, 9]. Ze względu na przeznaczenie, datę produkcji i producenta, zawartość metali w PCBs, mogą być różne. Szacunkowa ilość metali szlachetnych (Au, Ag, Pd) i półszlachetnych (Cu) w PCB wynosi odpowiednio 0,05%, 0,03%, 0,01%, oraz 16%. W PCB występują również inne metale

w niewielkich stężeniach: 3% Fe, 3% Sn, 2% Pb, 1% Zn oraz w śladowych ilościach Al, Ni, Cr, Na, Cd, Mo, Ti, Co [8]. Pozostałą część PCBs stanowi głównie żywica epoksydowa wzmacniana włóknami szklanymi [8].

Tematyka odzysku metali z płyt obwodów drukowanych wpisuje się w politykę gospodarki o obiegu zamkniętym, która z definicji zmierza do racjonalnego wykorzystania wszelkich zasobów i ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko wytwarzanych produktów. Wykorzystując zasoby metali obecne w odpadach elektronicznych ich produkcja tradycyjnymi, nieekologicznymi technikami może być w dużym stopniu ograniczona. Rudy metali nie muszą być pozyskiwane ze złóż, jak również nie muszą być przetwarzane z zastosowaniem typowych chemicznych i termicznych technologii.

Poprawny recykling PCBs jest jednak potrzebny nie tylko z powodu ochrony środowiska przyrodniczego i naturalnych zasobów, ale również z powodów ekonomicznych oraz tworzenia nowych miejsc pracy. Wśród metod odzysku metali z PCBs wyróżnia się metody chemiczne i fizyczne. Stosowanie metod chemicznych często wiąże się z ingerencją w środowisko przyrodnicze poprzez odprowadzanie zanieczyszczeń do wód i powietrza [8] oraz powstawanie odpadów. Głównie stosuje się metody pirometalurgiczne, hydrometalurgiczne, biohydrometalurgiczne oraz z wykorzystaniem plazmy. Dwie ostatnie można zaliczyć do przyjaznych dla środowiska przyrodniczego, jednak w przypadku biohydrometalurgii wadą jej jest długotrwały czas oddziaływania mikroorganizmów na składniki PCBs podczas katalizowania procesu odzysku metali.

Analizowane w ramach przedstawionych prac badawczych metody separacji fizycznej i fizykochemicznej, wykorzystujące wiedzę i osiągnięcia inżynierii mineralnej, należą, ze względu na swoją naturę, również do przyjaznych dla środowiska przyrodniczego. Wśród nich dotychczas przeanalizowano separację elektrostatyczną [8, 9, 10] oraz grawitacyjną [11], natomiast obecnie prowadzone są prace nad oceną sprawności odzysku metali przy zastosowaniu flotacji. W przypadku zastosowania wszystkich tych metod konieczne jest dostosowanie stopnia rozdrobnienia PCB i uwolnienia substancji użytecznej, czyli metali w stanie wolnym. Optymalizacje procesu rozdrabniania, ale również demontażu PCBs zostały przedstawione w pracach [8, 10], chociaż wciąż są one głównym obszarem prowadzonych analiz laboratoryjnych.

Dotychczas najlepszy efekt rozdziału metali od pozostałej części nazywanej tworzywami sztucznymi uzyskano przy zastosowaniu separacji elektrostatycznej [8] dla schładzanej do temperatury kriogenicznej nadawy rozdrobnionej za pomocą młyna

nożowego z perforacją sita o wielkości 1 mm. Szacunkową wartość otrzymanych w ten sposób metali dla 100 g koncentratu otrzymanego z PCB przedstawiono w tabeli 3.2. Odnosi się ona do czystych metali i nie uwzględnia kosztów niezbędnych do przetwórstwa PCB. Jak widać na podstawie tej tabeli decydujący udział w wartości końcowej mają złoto i miedź, które stanowią odpowiednio 39% i 37% całości, a następnie cyna 15,5% oraz srebro 6%. Ze względu na niewielkie zawartości złota w PCB, należy dostosować proces odzysku by zminimalizować straty tego metalu.

Odrębną kwestią jest zagospodarowanie otrzymanej z separacji części niemetalicznej (tworzyw sztucznych). Planuje się by tę substancję wykorzystać do produkcji prefabrykatów, takich jak na przykład deski kompozytowe, by w ten sposób, zgodnie z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego, nie pozostawały żadne odpady.

Tabela 3.2

Wartość metali możliwych do odzyskania z PCB przy wykorzystaniu separacji elektrostatycznej dla rozdrabniania z zastosowaniem temperatur kriogenicznych oraz perforacji w sicie 1mm [8]

Metal	Cena*, ($/Mg)	Zawartość metalu w koncentracie, %	Poziom odzysku metali odniesiony do początkowej masy PCB (po demontażu), %	Cena metalu dla 100 g otrzymanego koncentratu, $
Cu	7635	68,5	17,95	1,4
Al	1986	6,82	1,79	0,035
Pb	2063	1,5	0,39	0,008
Zn	2762	2,5	0,66	0,018
Ni	16390	0,75	0,20	0,032
Fe	553	0,95	0,25	0,001
Sn	19128	11,5	3,01	0,576
Ag	7,91×105	0,1074	0,0281	0,223
Au	6,01×107	0,0092	0,0024	1,4
			Suma, $	3,7

*na podstawie London Metal Exchange (grudzień 2020)

3.4. Odzysk surowców ze ścieków przemysłowych

Podstawową zasadą gospodarki obiegu zamkniętego jest maksymalne wykorzystanie dostępnych surowców oraz minimalizacja odpadów. Dotychczas nie opracowano całkowicie bezodpadowych technologii produkcji, stąd konieczność opracowania metod ponownego wykorzystania odpadów lub przetworzenia ich w surowce dla innych gałęzi przemysłu. W pracy przedstawiono przegląd badań

wykonywanych w Katedrze Chemii Nieorganicznej, Analitycznej i Elektrochemii Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej nad odzyskiem surowców ze ścieków przemysłowych.

Odzysk surowców z solanek kopalnianych

Węgiel kamienny, wydobywany w 11 krajach UE, jest strategicznym surowcem ze względu na duże znaczenie węgla koksującego w przemyśle metalurgicznym. Podczas odwadniania kopalń powstają zasolone wody odpadowe i rocznie do polskich rzek zrzucanych jest w wodach kopalnianych około 3,5–4 mln ton soli. Zasolone wody odpadowe zawierają cenne dla innych gałęzi przemysłu surowce, jak woda demineralizowana, sól, magnez oraz inne minerały.

Możliwość odzysku materiałów z solanek kopalnianych przetestowano w instalacji pilotowej działającej w kopalni „Bolesław Śmiały" w Łaziskach Górnych. Woda kopalniana poddawana była nanofiltracji, która rozdziela nadawę na dwa strumienie: bogaty w chlorek sodu permeat oraz bogaty w wapń i magnez retentat. Z retentatu wytrącano wodorotlenek magnezu a roztwór poreakcyjny, bogaty w chlorek wapnia, może być stosowany do zapobiegania obladzania dróg. Permeat z nanofiltracji był kierowany do hybrydowego systemu odwrócona osmoza-elektrodializa, produkującego wodę demineralizowaną o jakości zbliżonej do wody destylowanej oraz zatężony roztwór soli, zasilający krystalizację soli. Dzięki proponowanej technologii możliwy był odzysk ponad 92% soli, 90% wody oraz 94% magnezu zawartych w solankach kopalnianych.

Odzysk metali ze ścieków z przemysłu galwanotechnicznego

Przemysł galwanotechniczny zużywa znaczne ilości wody i surowców kopalnych takich jak metale ciężkie. Ścieki z przemysłu galwanotechnicznego mają złożony skład: kąpiele galwaniczne i wody popłuczne oprócz metali zawierają również dodatki przeciwnaprężeniowe, blaskotwórcze i buforujące zróżnicowane chemicznie. Aby możliwy był odzysk metali, konieczne jest opracowanie technologii selektywnego rozdziału składników ścieków.

W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabiera zastosowanie elektrodializy do odzysku oraz zatężania soli metali z odpadowych roztworów przemysłu galwanotechnicznego. Zastosowanie elektrodializy pozwala na zatężanie metalu, a gdy w roztworze obecne są związki niejonowe, może umożliwić ich częściowe oddzielenie od soli metalu. Elektrodializa z kompleksowaniem pozwala nie tylko na zatężenie

metali w kąpielach, ale także na efektywne oddzielenie innych metalicznych zanieczyszczeń jonowych, pozwala więc na utylizację odpadów przez zawrócenie surowców wprost do procesu.

Proponowana metoda elektrodialitycznego odzysku metali z odpadowych roztworów przemysłu galwanotechnicznego ma wyjątkowe znaczenie ze względu na możliwość wdrożenia w przedsiębiorstwach prowadzących działalność gospodarczą w obszarze galwanotechniki, a także ze względu na możliwości aplikacyjne w przedsiębiorstwach zajmujących się utylizacją odpadów.

Odzysk boru ze ścieków z elektrowni

Bor występuje naturalnie w wodach morskich, oceanicznych oraz niektórych źródłach geotermalnych. Jest on także istotnym składnikiem ścieków pochodzących z różnych gałęzi przemysłu, między innymi energetycznego (instalacje mokrego odsiarczania spalin), wydobywczego (zasolone wody kopalniane), galwanicznego (czynnik buforujący), jądrowego (moderator neutronów), szklarskiego (szkło borokrzemowe), optoelektronicznego oraz ceramicznego. Bor jako mikroelement jest pierwiastkiem niezbędnym do prawidłowego rozwoju człowieka, roślin i zwierząt. W wyższych stężeniach jest jednak toksyczny i jego zawartość w wodzie użytkowej jest ściśle limitowana.

Do usuwania boru z wód i ścieków stosuje się selektywne sorbenty. Roztwór z desorpcji boru z sorbentu, stanowiący mieszaninę kwasu borowego oraz solnego lub siarkowego z dodatkiem różnych jonów, w zależności od źródła ścieków, wymaga zagospodarowania. W autorskim rozwiązaniu roztwór ten poddawany jest elektrodializie, a następnie oczyszczony roztwór kwasu borowego jest zatężany, po czym następuje krystalizacja kwasu borowego. Otrzymywany jest kwas borowy o czystości powyżej 99,9%, spełniający wymogi Farmakopei. Skuteczność opracowanego rozwiązania została potwierdzona w instalacji pilotowej, gdzie odzyskano ponad 20 kg kwasu borowego farmaceutycznej czystości ze ścieków z mokrego odsiarczania spalin pochodzących z elektrowni.

Podsumowanie

Obróbka ścieków przemysłowych nie tylko zmniejsza zużycie wody i surowców, ale może stanowić również nowe źródło przychodu. Opracowanie zintegrowanych i hybrydowych systemów obróbki ścieków, pozwalających na odzysk surowców, pozwoli na wdrożenie zasad gospodarki obiegu zamkniętego i ograniczy negatywny wpływ przemysłu na środowisko.

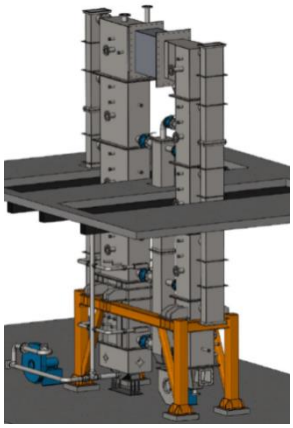
3.5. Waloryzacja ubocznych produktów spalania dla wypełnienia założeń gospodarki o obiegu zamkniętym (UPS-PLUS)

Prezentowane badania realizowane są w projekcie pt. „Optymalizacja procesu spalania i waloryzacja ubocznych produktów spalania dla wypełnienia założeń gospodarki o obiegu zamkniętym" (UPS-Plus) i finansowane w ramach programu Team-Tech Core Facility Fundacji na rzecz Nauki Polskiej współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (www.ccf.polsl.pl). Projekt obejmuje pełen zakres badań identyfikujących właściwości paliw niskojakościowych (biomasa, odpady) i ubocznych produktów ich spalania (UPS-ów). Badane są zjawiska żużlowania, zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych kotła, korozji wysokotemperaturowej, a także emisje substancji szkodliwych, takich jak: Hg, HCl, HF. Proces spalania podlega optymalizacji poprzez ulepszanie właściwości paliwa za pomocą dodatków ukierunkowanych na redukcję tych niekorzystnych zjawisk. Ostatecznym celem optymalizacji jest wytworzenie określonych produktów ubocznych spalania, które mogą zostać poddane funkcjonalizacji termicznej i chemicznej dla uzyskania przydatnych materiałów wtórnych zawracanych do gospodarki, np. napełniaczy (dodatków) do polimerów i materiałów ceramicznych, geomat czy materiałów sorpcyjnych.

Możliwości badawcze i wyniki badań eksperymentalnych

Badania optymalizacji spalania paliw niskojakościowych prowadzone są z wykorzystaniem między innymi technologii rusztu wibracyjnego (rys. 3.1) i mają na celu identyfikację oraz rozwiązanie problemów związanych z termiczną utylizacją odpadów oraz biomasy. Stanowisko pozwala między innymi na badanie zależności między właściwościami (granulacja, skład chemiczny) paliw a charakterystykami powstających UPS-ów, określenie wpływu procesu spalania na osadzanie się popiołu na powierzchniach ogrzewalnych oraz emisję substancji szkodliwych. Do waloryzacji paliw oraz optymalizacji procesu spalania wykorzystuje się dodatki paliwowe na bazie glinokrzemianów (np. haloizyt), które absorbują metale lekkie i metale ciężkie, np. rtęć, a także przyczyniają się do zmniejszenia zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych. UPS-y otrzymane w procesie spalania zostały zagospodarowane w materiałach inżynierskich i budowlanych, takich jak tworzywa sztuczne (rys. 3.2), geokompozyty czy materiały ceramiczne. Materiały wytworzone z dodatkiem UPS-ów

są poddawane próbom wytrzymałościowym, sprawdzeniu właściwości chemicznych i mechanicznych. Ponadto potencjał zastosowania profilowanych UPS-ów jest analizowany z użyciem nowoczesnych narzędzi, takich jak sieci neuronowe (SSN). Kolejne cykle przetwórcze materiałów zawierających UPS-y są analizowane i projektowane zgodnie z założeniami idei Gospodarki Obiegu Zamkniętego.



Rys. 3.1. Stanowisko badawcze Core Combustion Facility z rusztem wibracyjnym
Fig. 3.1. Core Combustion Facility (vibrating grate technology)

Rys. 3.2. Recykling polietylenu odzyskanego z odpadów
Fig. 3.2. Recycling of PE collected from waste

Podsumowanie

Przedstawione badania pozwalają na identyfikację i rozwiązanie problemów związanych z termiczną utylizacją paliw odpadowych i biomasowych oraz projektowanie przemysłowego wykorzystania ubocznych produktów ich spalania. Badania charakteryzujące szereg własności UPS-ów są kluczowe dla określenia ich zastosowania komercyjnego i wybór odpowiedniej ścieżki przetwarzania. Kolejnym etapem będzie potwierdzenie słuszności koncepcji (proof of concept) polegające na predykcji własności regranulatów na bazie polietylenu i polipropylenu wytwarzanych

z niehomogenicznego strumienia surowców poużytkowych modyfikowanych ubocznymi produktami spalania w oparciu o model opracowany na bazie sztucznych sieci neuronowych i badania w skali technicznej.

3.6. Materiały aktywowane alkalicznie na bazie odpadów przemysłowych

Materiały aktywowane alkalicznie (AAM), a w tej grupie geopolimery, uznawane są jako ekologiczna alternatywa betonu, ze względu na brak cementu (odpowiedzialnego za emisję CO_2) i mniejsze zapotrzebowanie na wodę technologiczną. Do produkcji AAM wykorzystuje się również odpady przemysłowe, bezpiecznie immobilizując niepożądane substancje. Niniejsze opracowanie przedstawia kierunki prac zespołu Katedry Inżynierii Budowlanej i osiągnięcia badań realizowanych w ramach europejskiego projektu H2020 REMINE.

Wykorzystanie odpadów kopalnianych do produkcji geopolimerów

Pierwsze badania zespołu dotyczyły możliwości wykorzystania odpadów z portugalskiej kopalni wolframu do produkcji geopolimeru, który mógłby zastąpić w zastosowaniach konstrukcyjnych tradycyjny beton na bazie spoiwa cementowego. Opracowano recepturę oraz technologię wykonania mieszanki, która charakteryzowała się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi [12]. Obiecujące wyniki skłoniły zespół do opracowania materiałów na bazie ubocznych produktów wydobycia (UPW) ze śląskich kopalni. Prace te są kontynuowane we współpracy z firmą Tauron.

Wykorzystanie UPS do produkcji geopolimerów

Z uwagi na skład chemiczny, uboczne produkty spalania potencjalnie mogą zostać wykorzystane jako prekursory w reakcji geopolimeryzacji. W tym celu pozyskano do badań popioły lotne (lub suspensję popiołu) z elektrowni wykorzystujących w procesie spalania węgiel brunatny (Bełchatów, Turów) lub węgiel kamienny (Jaworzno). Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły możliwość wykorzystania UPS do produkcji geopolimerów (przy czym lepsze parametry wytrzymałościowe uzyskiwano dla popiołów ze spalania węgla kamiennego) [13, 14].

Szkło kineskopowe i laminaty CFRP

Impulsem do badań nad zastosowaniem szkła kineskopowego (CRT) w AAM stała się współpraca z firmą Thornmann. Duża ilość zużytych kineskopów stanowi wyzwanie, zwłaszcza z uwagi na wysoką zawartość ołowiu. Badania wykazały, że CRT może pełnić rolę innowacyjnego kruszywa w mieszankach geopolimerowych na bazie metakaolinu, a wysoka wytrzymałość powstałego materiału umożliwia wykorzystanie go w budownictwie. Szkło nie wymaga specjalnych obróbek, co pozytywnie wpływa na prostotę i koszt rozwiązania. AAM z immobilizowanym CRT są, jak zbadano, bezpieczne dla środowiska [15]. Nowy materiał stanowi potencjalne rozwiązanie problemu recyclingu szkła kineskopowego, immobilizacji zawartego w nim ołowiu oraz nadmiernego wykorzystania naturalnych kruszyw [16].

Materiały organiczne jako domieszki do geopolimerów

Przedmiotem badań był również wpływ domieszek organicznych w postaci granulowanego korka, na parametry wytrzymałościowe geopolimerów. Zgodnie z oczekiwaniami, wraz ze zwiększaniem ilości granulatu korkowego w objętości próbek, malał ich ciężar objętościowy, malała wytrzymałość na zginanie i ściskanie, ale rosła termoizolacyjność [17].

Badania możliwości syntezowania geopolimerów z wykorzystaniem osadów ściekowych

Osady ściekowe coraz częściej przetwarza się i wykorzystuje w produkcji materiałów budowlanych [18]. Badania wykazały dość istotny wpływ dodatku popiołu ze spalania osadów na właściwości mechaniczne geopolimeru i dlatego istnieje możliwość wykorzystania tego materiału, ale tylko w drugorzędnych aplikacjach w budownictwie.

Podsumowanie

Prowadzone od wielu lat badania nad materiałami AAM w Katedrze Inżynierii Budowlanej Politechniki Śląskiej pozwoliły na opracowanie atrakcyjnych z punktu widzenia konstruktora mieszanek i technologii bazujących na różnych odpadach przemysłowych, w tym UPW, UPS, złomowane szkło CRT i laminaty CFRP. Badania prowadzone są w nowym kierunku, między innymi, wykorzystania osadów ściekowych oraz tworzenia tanich, ekologicznych i innowacyjnych nanogeopolimerów funkcjonalnych do wzmacniania i monitorowania konstrukcji.

3.7. Wykorzystanie odpadów jako kruszywa w technologii betonu w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym

Beton to druga najczęściej wykorzystywana przez człowieka substancja na Ziemi [19]. Kruszywo jest jednym z jego głównych składników (do 70% objętości) i ma zasadnicze znaczenie dla właściwości betonu. Ponieważ użycie naturalnego kruszywa powoduje zubożenie zasobów naturalnych, prowadzi się badania związane z zastosowaniem odpadów jako kruszywa. Wykorzystanie odpadów w technologii betonu jest szerokie w zakresie osiągnięcia celów gospodarki o obiegu zamkniętym, a tym samym do zrównoważonego rozwoju gospodarczego. Dlatego celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości wykorzystania różnych odpadów jako substytutu kruszyw naturalnych.

Wykorzystania odpadów w technologii betonu

Materiały odpadowe są stosowane głównie jako spoiwa [20–22], dodatki do betonu [22] oraz kruszywa. Jednym z podstawowych rodzajów kruszywa z odzysku jest kruszywo z recyklingu betonowego, otrzymywane w wyniku kruszenia gruzu betonowego po usunięciu z niego stali zbrojeniowej, innych materiałów i innych zanieczyszczeń [23]. Tak przygotowany materiał może być segregowany na odpowiednie frakcje i dodawany do mieszanki jako zamiennik części kruszywa naturalnego. Głównym problemem stosowania tego materiału jest zmienność właściwości, które zależą od betonu z jakiego został pozyskany. Oprócz tego gruz betonowy charakteryzuje się wysoką wodożądnością, co przekłada się na problemy z urabialnością i trwałością [24]. W betonach stosowane jest też kruszywo z recyclingu cegieł, i podobnie jak w przypadku gruzu betonowego, obserwuje się znacznie większą porowatość i kilkukrotnie większą absorpcję wody niż w przypadku kruszywa naturalnego [25, 26].

Wykorzystywanym w betonie odpadem rozbiórkowym jest też kruszone szkło [27, 28]. Kruszywa z tworzyw sztucznych są też szeroko badane nie tylko w kontekście utylizacji odpadów i oszczędności naturalnych kruszyw, ale także niewielkiej wagi tworzyw sztucznych, co może być wykorzystane do projektowania betonów lekkich [29, 30]. Problemem jest jednak obniżenie wytrzymałości betonu względem betonów z kruszywem naturalnym, oraz możliwe zmniejszenie trwałości [31]. Granulowane odpady gumowe, w szczególności pozyskane z opon, stosowane jako kruszywo, wykazują natomiast potencjał podwyższenia odporności betonu na cykle zamrażania –

rozmrażania [32]. Wyniki badań między innymi Fattuhi i in. [32] oraz Eldina i in. [33] wskazują jednak na znaczący spadek wytrzymałości na ściskanie, dochodzący do 70% przy zawartości kruszywa gumowego na poziomie 13% masy. Prowadzone są też badania nad możliwością zastosowania odpadów przemysłu metalurgicznego [34, 35] lub piasku formierskiego [22] jako kruszywa.

Podsumowanie

Od dłuższego czasu prowadzone badania wskazują na możliwość zastosowania odpadów w technologii produkcji betonu w celu poprawy ich właściwości mechanicznych jak również ochrony środowiska i surowców naturalnych.

3.8. Gospodarcze wykorzystanie ubocznych produktów spalania węgla (UPS)

W Polsce wytwarza się około 130 mln Mg odpadów mineralnych rocznie, z czego około 77% to odpady pochodzące z energetyki oraz górnictwa [36]. Odpady energetyczne określane są często jako Uboczne Produkty Spalania czyli UPS. W światowej nomenklaturze najczęściej określane są jako Coal Combustion Products (CCPs). Powstają one w wyniku spalania węgla kamiennego oraz brunatnego. Zalicza się do nich żużle z kotłów konwencjonalnych i piaski denne z kotłów fluidalnych, popioły lotne i popioło-żużle, reagipsy oraz produkty odsiarczania spalin.

Najczęściej wykorzystywanymi UPS-ami są popioły lotne. Można je podzielić na dwie grupy: popioły niskowapienne (LCFA) oraz wysokowapienne (HCFA) [37]. Innym kryterium podziału może być rodzaj paleniska, w którym one powstają. Dwa główne typy palenisk w których spalany jest węgiel kamienny to: kotły konwencjonalne i kotły fluidalne. Tak więc można wyróżnić trzy rodzaje popiołów: popiół bez produktów odsiarczania spalin (10 01 02) oraz popiół z produktami odsiarczania spalin (10 01 82) pochodzący z kotłów konwencjonalnych i popiół z produktami odsiarczania spalin (10 01 82) pochodzący z kotłów fluidalnych. Popioły o kodzie 10 01 02 to materiał niskowapienny tzw. krzemionkowy (LCFA), a popioły o kodzie 10 01 82 generalnie to materiały wysokowapienne (HCFA). Popioły wapienne zwierają produkty odsiarczania spalin. Proces odsiarczania spalin może być prowadzony metodą suchą, półsuchą i mokrą. Ze względu na systematyczne wprowadzanie w energetyce zawodowej mokrej metody odsiarczania spalin, charakteryzującej się najwyższą sprawnością, ilość wytwarzanych popiołów

z produktami odsiarczania spalin maleje na rzecz popiołów bez produktów (10 01 02) oraz tzw. reagipsu (kod 10 01 05). Obecnie na terenie Polski popioły z produktami odsiarczania spalin zwykle powstają w elektrowniach opartych o węgiel brunatny oraz w elektrowniach wykorzystujących kotły fluidalne.

Klasyfikację odpadów energetycznych można znaleźć w starej normie branżowej BN-79/6722-09. Jednakże norma ta nie uwzględnia odpadów z kotłów fluidalnych czy też powstających przy współspalaniu oraz tzw. reagipsów.

Odpady energetyczne mają zróżnicowany skład chemiczny, fazowy i morfologiczny, co wpływa na ich właściwości fizyko-chemiczne [38]. Skład chemiczny popiołów niskowapiennych (krzemionkowych) i wysokowapiennych (wartości graniczne) przedstawiono w tabeli 3.3 [39].

Tabela 3.3

Skład chemiczny popiołów niskowapiennych (krzemionkowych) i wysokowapiennych (wartości graniczne) [40]

Składnik	Popiół niskowapienny (krzemionkowy), % masy	Popiół wysokowapienny, % masy
SiO_2	41–57	30–50
Al_2O_3	18–35	5–9
Fe_2O_3	7–20	4–6
CaO	2–10	18–48
MgO	0,1–5	1–4
SO_3	0,5–3,5	5–10
$Na_2O + K_2O$	0,1–3	0,2 (ślady)

Popioły lotne niskowapienne (krzemionkowe) charakteryzują się znaczną ilością substancji bezpostaciowej pochodzącej z rozkładu substancji ilastej [37]. Popioły te składają się w większości (50–70%) z fazy szklistej. Faza krystaliczna to przede wszystkim mulit ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), β-kwarc, hematyt (Fe_2O_3), magnetyt (Fe_3O_4) oraz rutyl (TiO_2) [39]. Podstawowymi składnikami fazy krystalicznej popiołów wapiennych jest anhydryt, glinian trójwapniowy, siarczano-glinian czterowapniowy, gelenit, anortyt, kwarc, CaO wolne. Natomiast popiół wapienny z kotła fluidalnego zawiera w swoim składzie fazowym przede wszystkim metakaolin o dużej powierzchni właściwej oraz anhydry, a faza szklista występuje w nieznacznej ilości [37]. Ponadto popioły lotne różnią się uziarnieniem oraz zawartością części palnych, co w głównej mierze jest zależne od warunków lokalnych ich wytwarzania.

Zarówno właściwości chemiczne jak i fizyczne determinują kierunki gospodarczego wykorzystania UPS. Gospodarcze wykorzystanie UPS w pełni wpisuje się w gospodarkę o obiegu zamkniętym, tym bardziej, że są to odpady masowo

wytwarzane. Obecnie na składowiskach znajduje się około 320 mln Mg odpadów energetycznych, a co roku wytwarza się ich około 20 mln Mg. Szacuje się, że obecnie gospodarczo wykorzystuje się około 60% UPS-ó tj. około 12 mln Mg [41].

UPS pochodzące z energetyki od wielu lat są wykorzystywane w inżynierii lądowej: głównie w drogownictwie, budownictwie oraz rekultywacji terenów. Znalazły one masowe zastosowanie również i w górnictwie, gdzie stosuje się je z powodzeniem w profilaktyce pożarowej jako doszczelnienie zrobów zawałowych [42]. Ponadto znalazły one szerokie zastosowanie w likwidacji różnego rodzaju wyrobisk korytarzowych, komorowych, szybów oraz innych pustek znajdujących się w górotworze [43, 44]. Popioły lotne są stosowane w likwidacji poeksploatacyjnych pustek płytko zalegających. Z ich wykorzystaniem w górnictwie podziemnym buduje się korki izolacyjne i przeciwwybuchowe. Ponadto są wykorzystywane do rekonsolidacji gruzowisk zawałowych do wykonywania sztucznych stropów. Niejednokrotnie stanowią one składnik betonów natryskowych stosowanych w wyrobiskach podziemnych kopalń [45]. W warunkach polskiego górnictwa ograniczenie w zastosowaniu mają żużle oraz tzw. reagipsy [46]. Natomiast w Chinach reagips jest wykorzystywany do likwidacji wyrobisk górniczych.

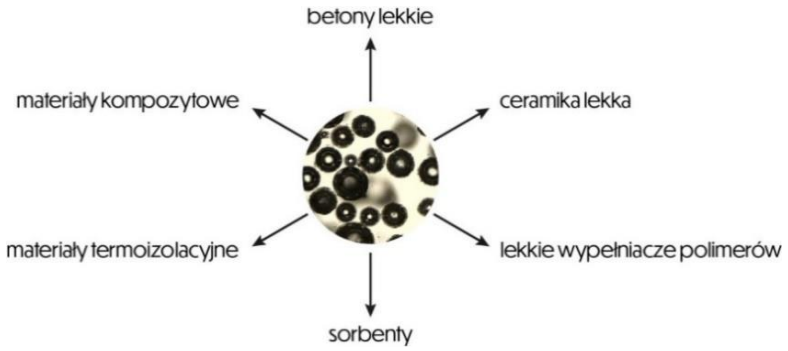
Generalnie reagipsy znajdują zastosowanie przede wszystkim w przemyśle cementowym, betoniarskim i budowlanym do produkcji gipsu i takich wyrobów jak płyty kartonowo-gipsowe czy kleje. Stosowane są także w rolnictwie jako nawóz lub środek odkwaszający glebę. Można go również brykietować i stosować jako kruszywo. Reagips stosowany był jako powłoka ognioodporna konstrukcji stalowych.

Popioły lotne stanowią jeden z najefektywniejszych dodatków do cementu. Powszechnie wykorzystuje się je w budownictwie jako dodatek do betonu. W drogownictwie wykonuje się przede wszystkim stabilizacje gruntów oraz ich osuszanie. Na bazie popiołów lotnych oraz żużli wytwarza się mieszanki betonowe stanowiące podbudowę drogową zasadniczą lub pomocniczą. Popioły lotne stanowią również składnik spoiw drogowych, które znajdują między innymi zastosowanie w ulepszaniu gruntów. W ostatnim czasie Rząd RP dostrzegł potencjał Ubocznych Produktów Spalania (UPS) przyjmując projekt „Mapa drogowa gospodarki o obiegu zamkniętym”, dając w ten sposób wyraz co do kierunku polityki surowcowej państwa polskiego.

3.9. Mikrosfery – cenny surowiec wtórny

Wzrost zapotrzebowania na energię wiąże się z wytwarzaniem coraz większych ilości ubocznych produktów spalania, głównie popiołów lotnych i żużli paleniskowych. Jednym z cenniejszych składników popiołów są mikrosfery glinokrzemianowe, cząstki sferyczne wypełnione gazami generowanymi podczas spalania węgla. Dzięki niskiej gęstości (znacznie poniżej 1 g/cm^3), łatwo gromadzą się na powierzchni wody w odstojnikach, co ułatwia ich separację. Formowanie się mikrosfer zależne jest od temperatury, czasu i atmosfery panującej w kotle. Dobór odpowiednich parametrów spalania może zatem przyczynić się do powstania większej ilości tego cennego składnika [47]. Średnica mikrosfer na ogół nie przekracza 500 μm, przy czym zaobserwowano, że wraz ze wzrostem średnicy maleje ich sferyczność [48]. Na podstawie badań ustalono, że w składzie chemicznym mikrosfer największy udział ma krzemionka SiO_2 (45–60%) i glinka Al_2O_3 (20–30%). Łączna zawartość tych składników może przekroczyć nawet 90% [49]. Udział tych składników zapewnia wysoką wytrzymałość mechaniczną mikrosfer [50]. Pozostałe składniki: Fe_2O_3 i CaO, MgO, SO_3, K_2O, Na_2O i TiO_2 występują w mniejszych ilościach przy czym zauważono, że ich zawartość wyraźnie koreluje z wielkością mikrosfer [51, 52]. Badania pojedynczych cząstek z wykorzystaniem analizy EDS ujawniły natomiast dużą zmienność składu chemicznego, nawet w obrębie tej samej cząstki [52]. Mikrosfery z węgla brunatnego wzbogacone są dodatkowo w tlenki wapnia (CaO) i magnezu (MgO). Mniejsza zawartość mikrosfer w tych popiołach wynika z faktu, że faza stopiona, powstająca w wysokiej temperaturze, z węgla brunatnego ma charakter zasadowy, przez co ma mniejszą lepkość [52]. Ścianki mikrosfer zbudowane są głównie z fazy amorficznej z wtrąceniami krystalicznymi. Głównymi składnikami krystalicznymi mikrosfer są kwarc i mullit [48, 50, 53]. Udział ostatniego składnika korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne i odporność chemiczną materiałów produkowanych na bazie mikrosfer. Podczas ogrzewania mikrosfery pękają uwalniając uwięzione w ich wnętrzu gazy tj. CO_2 i N_2 [niepublikowane badania własne autorki], co pozwala sądzić, że mikrosfery będą również dobrym materiałem przeciwpożarowym. Dzięki swoim wyjątkowym właściwościom tj. niskiej gęstości nasypowej, niskiej nasiąkliwości, wysokiej ogniotrwałości i odporności na czynniki chemiczne, mikrosfery mogą znaleźć zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu między innymi jako surowiec do wykorzystania w produkcji materiałów termoizolacyjnych, przy produkcji betonów i ceramiki lekkiej, czy jako proszek

odlewniczy. Coraz częściej w literaturze można znaleźć informacje o zastosowaniu mikrosfer jako różnego rodzaju sorbentów, jako wypełniacz polimerów, czy składnik zaawansowanych materiałów kompozytowych (rys. 3.3) [51].



Rys. 3.3. Przykłady zastosowań mikrosfer
Fig. 3.3. Examples of the use of microspheres

Przyjęcie modelu gospodarki o obiegu zamkniętym, wymusza na nas zmianę podejścia do zarządzania odpadami, które należy przekształcać w produkty. W przypadku mikrosfer ta zasada jest możliwa do realizacji, gdyż wykazano, że te uboczne produkty spalania dzięki wyjątkowym właściwościom, mogą zostać wykorzystane jako surowiec w wielu dziedzinach gospodarki. Może to przynieść korzyści zarówno dla środowiska naturalnego jak i dla gospodarki.

3.10. Termiczne zagospodarowanie „problematycznych" frakcji odpadów komunalnych

Odpady stanowią realne zagrożenie dla środowiska naturalnego. W szczególności składowanie odpadów powoduje szereg negatywnych skutków (skażenie gleby i wód, emisja gazu składowiskowego, utrata cennych surowców). Przyjęty przez UE pakiet dotyczący gospodarki obiegu zamkniętego wyznacza ambitne cele w zakresie recyklingu i składowania odpadów [54]. Jednak nadal w Europie ponad jedna czwarta odpadów jest składowana. W przypadku Polski to wciąż ponad 40% [55], a regulacje unijne zakładają ograniczenie składowania do 2035 roku do poziomu 10%. Problemem są frakcje odpadów komunalnych po procesach biologiczno-mechanicznej obróbki, które zazwyczaj są składowane, mimo że ich właściwości fizykochemiczne wskazują na możliwość zastosowania metod termicznych.

W wielu krajach członkowskich UE termiczna utylizacja odpadów stanowi duży udział w postępowaniu z odpadami komunalnymi. Wynika to z faktu, że biomasa

(która obejmuje ulegającą biodegradacji część odpadów komunalnych) jest jednym z odnawialnych źródeł energii określonych w dyrektywie UE. Włączenie organicznej części odpadów komunalnych do definicji potencjalnych źródeł energii odnawialnej umożliwiło państwom członkowskim osiągnięcie krajowych celów w zakresie energii odnawialnej za pośrednictwem odzysku energetycznego. Odzysk energetyczny może również stać się ważną częścią polskiego „zielonego" rynku energii, szczególnie w zakresie produkcji ciepła [56, 57].

Opisane zalecenia unijnego prawodawstwa pozwalają na wykorzystanie energetyczne odpadów „problematycznych", które nie nadają się do recyklingu, ale decyzje związane z przyszłym zagospodarowaniem winny być poprzedzone odpowiednimi badaniami właściwości paliwowych.

Wyniki badań eksperymentalnych

Badaniom poddano końcowe produkty obróbki mechaniczno-biologicznej odpadów kierowanych na składowisko, a mianowicie frakcji podsitowej 0–80 mm i balastu z produkcji paliwa RDF. Badane frakcje pochodziły z zakładu kompleksowej obróbki mechaniczno-biologicznej odpadów komunalnych (MBP).

Tabela. 3.4
Wyniki badań właściwości paliwowych balastu posortowniczego i frakcji podsitowej

Lp.	Parametr	Jednostka	Balast	Frakcja podsitowa
1	Węgiel C	% m.s.	41,18	16,57
2	Wodór H	% m.s.	5,66	3,38
3	Siarka S	% m.s.	0,08	0,06
4	Chlor Cl	% m.s.	0,71	0,08
5	Popiół P	% m.s.	20,82	30,52
6	Wilgotność W	%	35,62	55,07
7	Ciepło spalania W_g	kJ/kg	15 449	9 908
8	Wartość opałowa W_d	kJ/kg m.s.	14 227	9 147

Zakres badań obejmował oznaczenia takich właściwości paliwowych, jak: zawartość węgla, zawartość wodoru, zawartość siarki, zawartość chloru, zawartość popiołu, wilgotność całkowita, ciepło spalania oraz wartość opałowa. Badania przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi normami, a ich wyniki przedstawiono w tabeli 3.4.

Podsumowanie

Właściwości paliwowe badanych frakcji odbiegają od poziomów wymaganych dla paliw RDF, głównie ze względu na wysokie zawilgocenie odpadów, ale zawartość części palnych oraz wysokie ciepło spalania wykluczają ich deponowanie na składowisku. Rozwiązaniem może być z jednej strony podsuszenie, a z drugiej wzbogacenie o inne frakcje odpadów takie, jak wysokokaloryczne, o niskiej zawartości wilgoci (np. zabrudzone, nienadające się do recyklingu tworzywa sztuczne). Taka metoda może być wskazana w przypadku dodatku odpadów, które charakteryzują się niską zawartością popiołu i wysoką kalorycznością, a jednocześnie jako samodzielne paliwo dyskwalifikuje je wysoka zawartość chloru lub siarki [58].

3.11. Energia z odpadów a GOZ

Zgodnie z hierarchią zagospodarowania odpadów, ich energetyczne wykorzystanie powinno stanowić przedostatni element systemu zagospodarowania odpadów. Pomimo tego, procesy energetycznego odzysku stanowią istotny i niezbędny element gospodarki o obiegu zamkniętym. O roli metod termicznych może świadczyć fakt, że obecnie w przypadku krajów które już osiągnęły poziom gospodarki „0" składowiskowej w zakresie zagospodarowania odpadów komunalnych, metody termiczne są stosowane w odniesieniu do ponad 30% masy generowanych odpadów. Udziały te wynosiły w 2018 roku: w Finlandii – 57%, Szwecji – 53%, Danii – 49%, Holandii i Belgii – 43%, Austrii – 39%, a w Niemczech – 31% [59]. Stosunkowo duży udział metod energetycznego wykorzystania odpadów, wynika między innymi ze stosunkowo wysokiej kaloryczności cechującej niektóre frakcje odpadów, jak i braku innych, konkurencyjnych ekonomicznie rozwiązań pozwalających wykorzystać niejednorodne i najczęściej zanieczyszczone frakcje odpadów. Badania pracowników Katedry Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów (dalej KTiUZO), wykazały na przykład, że 12% masy tworzyw sztucznych wytwarzanych w gospodarstwach domowych nie nadaje się do recyklingu, a na 47% masy jest bardzo ograniczony popyt. Tak więc, te nadające się do recyklingu, na które istnieje rozwinięty rynek zbytu, stanowią jedynie około 41% ich całkowitej masy.

Wdrażanie GOZ wymusi w najbliższej przyszłości, intensyfikację procesów selektywnej zbiórki i segregacji odpadów, a także rozwój technologii recyklingu odpadów. To z kolei spowoduje, że procesom odzysku energetycznego poddawane

będą mniejsze ilości odpadów oraz doprowadzi do eliminacji procesów spalania odpadów zmieszanych. Odzyskowi energetycznemu będą więc poddawane jedynie wybrane frakcje odpadów lub paliwa wytworzone na ich bazie. Paliwa takie określane są najczęściej jako RDF (ang. *Refuse Derived Fuel*) lub SRF (ang. *Solid Recovered Fuels*).

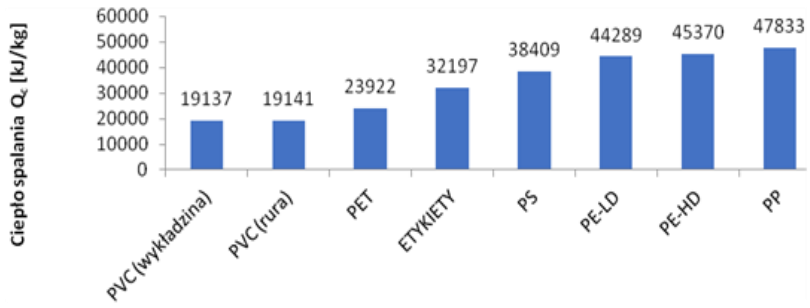
W Polsce od wielu lat występuje nadprodukcja paliw z odpadów, szacowana na 1,5 mln Mg rocznie. Wynika ona głownie z faktu ograniczonego grona krajowych odbiorców RDFu, którymi są głównie cementownie. Należy zauważyć, że już obecnie ok. 70% zapotrzebowania na energię do produkcji klinkieru w Polsce, jest pokrywane z RDFu. Zwiększenia zużycia paliw formowanych można obecnie upatrywać w upowszechnieniu w polskich elektrociepłowniach, wielopaliwowych kotłów fluidalnych. Dodatkowym argumentem przemawiającym za tymi konstrukcjami jest fakt, że umożliwiają one wykorzystanie nawet paliw gorszej jakości, które nie spełniają wymagań cementowni.

Pracownicy KTiUZO już od dziesięcioleci zajmują się problematyką gospodarki odpadami ze szczególnym uwzględnieniem szeroko rozumianych zagadnień ich energetycznego odzysku. Działania wynikające ze wdrożenia GOZ postawiły nowe problemy konieczne do rozwiązania w zakresie energetycznego odzysku. Wśród obecnie badanych zagadnień można wymienić między innymi badania właściwości paliwowych poszczególnych frakcji odpadów i RDF-u; badania procesów odgazowania i zgazowania poszczególnych frakcji odpadów, odpadów zmieszanych, jak i RDF-u; badania procesów spalania i współspalania odpadów w paleniskach rusztowych różnych typów.

W dalszej części, przedstawiono przykładowe wyniki cząstkowe badań wykonanych w ramach jednego z wymienionych powyżej zagadnień.

Ciepło spalania wybranych tworzyw sztucznych

Na rys. 3.4 przedstawiono wyniki oznaczeń ciepła spalania różnych gatunków tworzyw sztucznych. Jak widać na rysunku, część z badanych tworzyw charakteryzuje się wartościami ciepła spalania wyższymi od wartości stwierdzanych w przypadku węgli kamiennych. Należy również pamiętać, że np. PVC nie może być składnikiem paliw alternatywnych ze względu na wysoką zawartość chloru (zawartość chloru w badanym PVC była na poziomie około 40%) [60].



Rys. 3.4. Ciepło spalania badanych tworzyw sztucznych [60]
Fig. 3.4. Combustion heat of tested plastics [60]

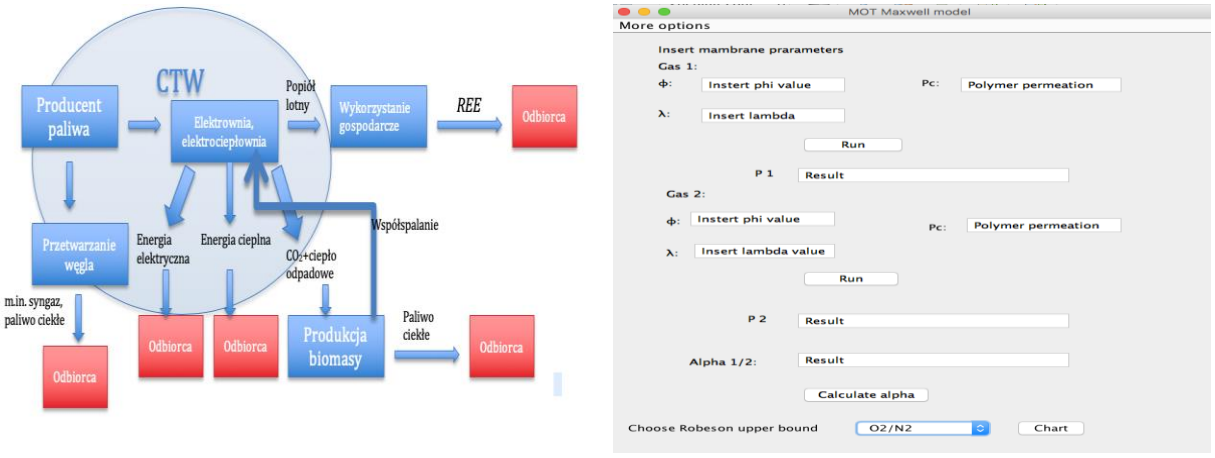
3.12. Gospodarka o obiegu zamkniętym a wpływ spalania paliw na środowisko naturalne

Przemysł wydobywczy oraz energetyczny posiadał do tej pory bardzo stabilną pozycję i koncentrował się wokół pojedynczych zakładów. Ich przedmiotem działania było tworzenie wyłącznie jednego produktu, węgla kamiennego, bądź energii elektrycznej. Jednakże obawy o środowisko naturalne prowadzą do niezbędnych modyfikacji. Powinno się rozważyć tworzenie tak zwanych fabryk energii. Koncentrują one swoją działalność już nie tylko na samym produkcie finalnym, ponieważ zaciera się granica pomiędzy półproduktem, a wyrobem gotowym. Rozpatrując zintegrowany system wykorzystania węgla jako całości należy zauważyć, iż węgiel kamienny stanowi półprodukt poddawany dalszej obróbce poprzez kolejne ogniwa łańcucha dystrybucji. Dodatkowo wytworzona energia, także nie jest ostatecznym produktem w tym łańcuchu dostaw, ponieważ powstaje ona w powiązaniu z innymi procesami oraz produktami, które maksymalizują wartość półproduktów takich jak węgiel kamienny, czy energia elektryczna. Dodatkowo pozyskane substancje chemiczne stanowią podstawę wytwarzania koproduktów i gwarantują stosowanie technologii umożliwiającej wyeliminowanie negatywnego wpływu na środowisko przyrodnicze.

Zasada działania

Zasady gospodarki obiegu zamkniętego mogą być stosowane w przemyśle energetycznym. Autorzy publikacji pracowali nad wyznaczeniem metod zarówno organizacyjnych, jak i technicznych w zakresie zbudowania oraz optymalizacji funkcjonowania zintegrowanych systemów produkcji energii i koproduktów na bazie

paliw kopalnych. Autorzy zaproponowali tworzenie klastrów energetyczno-chemicznych. Łańcuch dystrybucji produktów i półproduktów w obrębie klastra energetyczno-chemicznego prezentuje rys. 3.5a. Rozpoczyna go producent (bądź dostawca) paliwa. Ciepło i energia elektryczna są wytwarzane z wykorzystaniem czystych technologii węglowych. Następnie powstałe odpady są przemieszczane w łańcuchu do kolejnego etapu, w którym stanowią surowiec do dalszej obróbki. Autorzy prowadzili badania nad czystą technologią węglową, która umożliwiłaby rozdzielenie mieszaniny gazów powstających podczas spalania paliw kopalnych. W tym celu zastosowano techniki membranowe. W celu zaprojektowania membran selektywnych względem gazów zawartych w spalinach paliw kopalnych opracowano aplikację komputerową MOT 3.0., której jedno z okien prezentuje rys. 3.5b. O skuteczności zastosowanej membrany zadecydują jej parametry. Aby zatem ułatwić i przyspieszyć ocenę jej właściwości można zastosować utworzony przez autorów program komputerowy.



(a) (b)

Rys. 3.5. Łańcuch dystrybucji w obrębie klastra (a), okno programu MOT 3.0. (b) [61, 62]
Fig. 3.5. Distribution chain within cluster (a), MOT 3.0 program window (b) [61, 62]

Podsumowanie

Rośnie zapotrzebowanie na surowce energetyczne na świecie. Ponieważ ich dostępność jest zróżnicowana, a złoża – ograniczone, należy poszukiwać rozwiązań umożliwiających: po pierwsze jak najbardziej efektywne ich wykorzystanie, po drugie wykorzystanie także odpadów powstałych podczas przetwarzania surowców. Dlatego też rozwiązaniem jest zastosowanie modelu gospodarki o obiegu zamkniętym w przemyśle wydobywczym i energetycznym. Aby sprostać temu wyzwaniu, a także wymaganiom Unii Europejskiej konieczne jest podjęcie działań w zakresie rozwoju odpowiednich technologii oraz metod organizacyjnych.

3.13. Promowanie idei gospodarki obiegu zamkniętego w programach studiów związanych z przemysłem wydobywczym

Idea gospodarki obiegu zamkniętego jest szczególnie istotna w przemyśle wydobywczym, który pod względem ilościowym generuje 28% odpadów w Unii Europejskiej [63]. Projekt pt. „Strategic partnership for fostering circular economy approach in extractive industry related study programme 2020-1-PL01-KA203-082089" (Partnerstwo strategiczne na rzecz promowania podejścia opartego na gospodarce o obiegu zamkniętym w programach studiów związanych z przemysłem wydobywczym) jest realizowany w ramach Akcji 2 ERASMUS+ „Współpraca na rzecz innowacji i wymiany dobrych praktyk" – Partnerstwa Strategiczne. Jest odpowiedzią na potrzebę poszerzania wiedzy przyszłej kadry inżynierskiej i zarządzającej dotyczącej kwestii gospodarki odpadami. Głównym celem projektu jest opracowanie kompleksowej platformy szkoleniowej, która będzie pomocna w modyfikacji i aktualizacji programów edukacyjnych związanych z przemysłem wydobywczym o najnowszą i praktyczną wiedzę związaną z efektywnym zastosowaniem zasad gospodarki odpadami w obiegu zamkniętym (circular economy). Pomysłodawcą programu była Politechnika Śląska (koordynator projektu) oraz firmy JSW Innowacje SA i COBANT Group SA.

Partnerami w projekcie są renomowane uczelnie europejskie tj. Montanuniversitaet Leoben (Austria), TU Delft (Holandia), Universidad Politecnica de Madrid (Hiszpania) oraz Technical University of Tallin (Estonia). Niezmiernie istotnym wsparciem projektu jest udział dwóch partnerów przemysłowych JSW Innowacje SA oraz COBANT Group SA, a także organizacji pozarządowej Polskiego Towarzystwa Gospodarki Obiegu Zamkniętego. Skład konsorcjum pozwala na bardzo szerokie podejście do problematyki gospodarki odpadami w przemyśle wydobywczym zaczynając od kopalin energetycznych, w tym ropy, gazu, łupków bitumicznych i węgla, a kończąc na kopalinach pospolitych oraz metalicznych.

Realizacja projektu pozwoli utworzyć Europejską platformę, której efekty będą mogły być łatwo transponowane do programów nauczania uczelni wyższych i zacieśnić współpracę Politechniki Śląskiej z uczelniami europejskimi o podobnym profilu nauczania przy jednoczesnym wsparciu firm stosujących innowacyjne rozwiązania procesowe. W przyszłości pozwoli to na kształcenie inżynierów, którzy będą mieli wiedzę na temat koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym i umiejętność zastosowania tej koncepcji w praktyce.

W projekcie, którego realizacja trwa w latach 2020–2023, przewidziane są cztery główne zadania (tzw. Rezultaty Intelektualne). Pierwsze zadanie dotyczy opracowania modelowego programu nauczania w oparciu o odpowiedzi na ankiety skierowane do kadry uczelni, przedsiębiorstw, a także studentów. Zadanie to koordynowane jest przez Montanuniversitaet Leoben. W drugim zadaniu opracowany zostanie krótki kurs podyplomowy dla kadry inżynierskiej i zarządzającej firm wydobywczych, dzięki któremu będzie możliwe zapoznanie się z ideą gospodarki obiegu zamkniętego i nowoczesnymi technologiami odzysku surowców. Kurs ten będzie prowadzony na Politechnice Śląskiej. Na podstawie dwóch pierwszych zadań zostanie utworzony ogólnodostępny kurs na platformie MOOC (Massive Open Online Courses), którego zawartość będzie tworzona przez wszystkich partnerów projektu w ramach zadania trzeciego. Koordynatorem tego zadania jest Uniwersytet w Tallinie. Czwarte zadanie koordynowane przez Politechnikę w Madrycie będzie dotyczyć analizy obowiązujących regulacji prawnych w zakresie gospodarki obiegu w przemyśle wydobywczym. Projekt uzupełniony jest międzynarodowymi spotkaniami partnerów, a także jednym wydarzeniem upowszechniającym, które odbędzie się w Madrycie na początku 2022 roku.

Całkowite dofinansowanie projektu z Fundacji Rozwoju Systemu Nauki wynosi 239 140,00 EUR. Koordynatorem projektu jest dr hab. inż. Marcin Lutyński, prof. PŚ z Wydziału Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej.

3.14. Opracowanie efektywnych technologii wzbogacania grawitacyjnego z przetwórstwa węgli kamiennych w celu wytwarzania hybrydowego paliwa zawiesinowego

Porto Palo Sp. z o.o. w konsorcjum z Politechniką Śląską (Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej) realizuje projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Inteligentny Rozwój. Projekt realizowany w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: Działanie 4.1.1 – Wspólne Przedsięwzięcie z Województwem Śląskim „Silesia pod błękitnym niebem". Projekt pt. „Prace B+R nad opracowaniem unikatowej technologii przetwarzania drobnoziarnistych odpadów z przetwórstwa węgli kamiennych w celu wytwarzania hybrydowego paliwa zawiesinowego" realizowany jest w latach 2020–2021. Całkowita wartość projektu wynosi 3 063 116,01 zł natomiast dofinansowanie

projektu z UE to 2 525 706,01 zł. Celem projektu jest przeprowadzenie prac badawczo-rozwojowych zmierzających do opracowania technologii przetwarzania drobnoziarnistych odpadów z przetwórstwa węgli kamiennych, umożliwiającej wytwarzanie dwóch rodzajów paliwa hybrydowego – paliwa zawiesinowego węglowo-wodnego oraz paliwa zawiesinowego węglowo-olejowego. Rezultat projektu, czyli nowe paliwo zostanie wdrożone do działalności gospodarczej firmy poprzez rozpoczęcie produkcji i wprowadzenie wyrobów na rynek branży energetycznej.

Politechnika Śląska jest odpowiedzialna za przeprowadzenie badań przemysłowych w etapie 2, które dotyczyć będą wzbogacania grawitacyjnego w urządzeniach takich jak hydrocyklony, wzbogacalniki spiralne (spirale), stoły koncentracyjne. Przeprowadzenie badań właściwości wykorzystywanych węgli kopalnych, drobnoziarnistych odpadów przeróbczych (mułów węglowych i odpadów poflotacyjnych) i frakcji palnych pochodzących z procesów grawitacyjnego wzbogacania tych odpadów oraz wytworzonych z nich paliw hybrydowych pozwoli na określenie wpływu rodzaju surowca na właściwości uzyskiwanych paliw hybrydowych.

3.15. Rola strategii czystszej produkcji w procesie edukacyjnym w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym

Nowa hierarchia postępowania z odpadami oraz wprowadzenie zaleceń w postaci „Mapy drogowej transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ)" [64] wymuszają zmiany w funkcjonowaniu firm. Te spośród nich, które funkcjonują w oparciu o strategię Czystszej Produkcji (CP) w ciągu kilku lat wprowadziły na tyle znaczące zmiany w swojej organizacji, że moment przejścia na model GOZ był płynny. Wprowadzenie zmian w kulturze organizacji poprzez wdrożenie strategii CP pozwala firmom wykazać efekty w trzech aspektach: ekonomicznym, środowiskowym i społecznym, motywując pracowników do podejmowania kolejnych działań pro-środowiskowych.

Rozwój oferty edukacyjnej

Uczestnictwo w Akademii CP i realizacja w 2018 roku projektu CP, pt. „Minimalizacja odpadów oraz strat energii dla Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej" [65], (obecnie – Wydział Inżynierii Materiałowej),

było dla autorki szeregiem doświadczeń. W realizację Projektu włączył się Samorząd Studencki oraz studenckie koła naukowe. Efektem był przede wszystkim cel edukacyjny podnoszący świadomość ekologiczną studentów i pracowników Wydziału dotyczącą głównie potrzeby recyklingu odpadów. Współpraca ze Stowarzyszeniem Polski Ruch Czystszej Produkcji, zaoowocowała otwarciem w Politechnice Śląskiej nowatorskich studiów podyplomowych: „Gospodarka o obiegu zamkniętym i czystsza produkcja w praktyce", jak również szeregu autorskich przedmiotów. Zaliczyć należy do nich: Ekologistyka, Zagospodarowanie odpadów produkcyjnych, czy Ekosystemy produkcyjne, w ramach których studenci zapoznają się z zasadami zrównoważonego rozwoju i metodami wdrażania ich w każdym aspekcie funkcjonowania nowoczesnego przedsiębiorstwa w dobie transformacji w kierunku GOZ. Efektem zainteresowań autorki tematyką GOZ jest autorstwo podręcznika [66] i innych publikacji oraz promotorstwo prac dyplomowych z tego zakresu.

Projekt edukacyjny

Dalszy rozwój autorki i poszukiwanie nowych form edukacyjnych zaowocowały współautorstwem i uczestnictwem w projekcie: „Kampania edukacyjna na temat zapobiegania zanieczyszczeniom oraz Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, z wykorzystaniem doświadczeń Czystszej Produkcji i EMAS". Jest to projekt realizowany przez Stowarzyszenie Polski Ruch CP w latach 2019–2022, z dofinansowaniem Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, w ramach programu priorytetowego Edukacja Ekologiczna. Autorka w ramach projektu realizuje takie formy edukacyjne jak współautorstwo broszur [67], animacji edukacyjnych, a także współorganizuje webinaria, warsztaty i konferencje [68], a jako Ekspert CP uczestniczy w kolejnych edycjach Akademii CP, zdobyte doświadczenie wykorzystując do tworzenia nowych przedmiotów, takich jak np. Green Lean.

Podsumowanie

W swojej działalności naukowo-badawczej autorka zapoznaje się z innowacjami w przedsiębiorstwach, które wdrożyły strategię CP, a która jest pierwowzorem GOZ. Autorka analizuje zmiany w firmach pod kątem dostosowania działań do zgodnych z modelem ReSOLVE oraz filozofią Zero Waste [67], które to wyznaczają kierunek ewolucji modeli biznesowych na drodze do GOZ [69]. Dalsze, pogłębione badania w analizowanym obszarze pozwolą określić standardy działania dla firm i organizacji

w przekształcaniu modelu biznesowego w kierunku GOZ, stanowiąc jednocześnie zbiór dobrych praktyk motywujących do podejmowania działań w kierunku zmiany przez kolejne podmioty. Efektem badań będzie kolejny podręcznik akademicki i inne publikacje w czasopismach naukowych.

3.16. Podsumowanie

Rozwijane od początku istnienia Politechniki Śląskiej kierunki badań wspierających przemysł oraz środowisko w naturalny sposób wpasowały się w potrzeby dzisiejszego społeczeństwa i gospodarki o obiegu zamkniętym. Wiele z tych kierunków można uznać za pionierskie nie tylko w skali krajowej.

Badania naukowców Politechniki Śląskiej nad odzyskiem i recyklingiem surowców krytycznych, materiałami budowlanymi na bazie UPS, UPW i innych produktów ubocznych z produkcji, biomasą, odpadami komunalnymi, sterowaniem i optymalizacją procesów przemysłowych, energią z odpadów i paliwami wpisują się w działania na rzecz zmian modelu gospodarczego w Unii Europejskiej oraz polskiej Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju.

Wielką rolę w tym zakresie mają również inicjatywy i projekty Politechniki Śląskiej w zakresie edukacji i kształtowania odpowiedzialnych postaw tak producentów jak i konsumentów.

Gospodarka Obiegu Zamkniętego stanowi również ważny element prac nowopowstałego w Politechnice Śląskiej Centrum Ochrony Klimatu i Środowiska oraz w realizowanym od 2020 roku międzynarodowym, prestiżowym projekcie European University EURECA-PRO: The European University on Responsible Consumption and Production [70].

Bibliografia

1. Mapa Drogowa Transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Uchwała Rady Ministrów RP z dnia 10.09.2019 r.
2. European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report, 2020.
3. Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B., Pavel C.: Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, EUR 30095 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2020.

4. New EU regulatory framework for batteries Setting sustainability requirements. BRIEFING EU Legislation in Progress, 2021.
5. Fornalczyk A., Willner J., Jabłońska-Czapla M., Grygojć K., Rachwał M.: Analysis of the content of germanium, tellurium and thallium in the grounded waste of electronic equipment. 16th International Conference on Environmental Science and Technology CEST2019, 4-7 September 2019, Rhodes, Greece.
6. https://recyclinginternational.com/non-ferrous-metals/innovative-rare-earth-pilot-heralds-bright-recycling-future/32509/ [dostęp: 01.04.2021 r.].
7. Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. The Global E-Waste Monitor 2020: Quantities Flows and the Circular Economy Potential. United Nations University, 2020, p. 1–120.
8. Suponik T., Franke D.M., Nuckowski P.M., Matusiak P., Kowol D., Tora B.: Impact of Grinding of Printed Circuit Boards on the Efficiency of Metal Recovery by Means of Electrostatic Separation. Minerals, 11, 2021, 281.
9. Franke D., Suponik T., Nuckowski P., Gołombek K., Hyra K.: Recovery of Metals from Printed Circuit Boards By Means of Electrostatic Separation. Management Systems in Production Engineering, 28(4), 2020, p. 213–219.
10. Suponik T., Franke D., Nuckowski P.M.: Electrostatic and magnetic separations for the recovery of metals from electronic waste. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 641(1), 2019, 012017.
11. Franke D., Suponik T., Nuckowski P.M., Dubaj J.: Evaluation of the efficiency of metal recovery from printed circuit boards using gravity processes. Physicochemical Problems of Mineral Processing, (złożone do opublikowania).
12. Dawczyński S., Cieśla P., Górski M., Krzywoń R.: Research on strength properties of geopolymer based on tungsten mine waste and recycled ground glass. Millenium, 2(8), 2019, p. 13–20.
13. Dawczyński S., Kajzer A., Górski M.: Investigation on strength development in geopolymer made of power plant fly ash suspension. SynerCrete18, 24–26 October 2018, Funchal, Portugal. Vol. 1 & 2. RILEM Publications, 2018.
14. Dawczyński S., Soczyński M., Górski M.: Feasibility and strength properties of the geopolymeric binder made of fly ash suspension. Krynica'2018, Poland, September 16–20, 2018, DOI: 10.1051/matecconf/201926206001.
15. Górski M. et al.: Characteristics of Metakaolin-Based Geopolymer with Cathode Ray Tube Glass. Polymers, 13, 2021, p. 21, doi: 10.3390/polym13071149.
16. Wielgus M., Górski M., Kubica J.: Discarded Cathode Ray Tube Glass as an Alternative for Aggregate in a Metakaolin-Based Geopolymer. Sustainability, 13(2), 2021, p. 479, doi: 10.3390/su13020479.
17. Dawczyński S., Górski M., Krzywoń R.: Granulated cork as a component of geopolymer preliminary studies. Ann. Wars. Univ. Life Sci. - SGGW, For. Wood Technol., 94, 2016, p. 124–128.
18. Szala K., Cichoń M., Wilde A., Sobczak K., Stefanko M., Knap M., Krzywoń R., Cema G., Ziembińska-Buczyńska A.:Use of the sewage sludge in construction engineering EXCO'20, Valencia, 2020, p. 275–284.
19. Gastaldi D., Bertola F., Irico S., Paul G., Canonico F.: Hydration behavior of cements with reduced clinker factor in mixture with sulfoaluminate binder. Cem. Concr. Res., 139, 2021, p. 106261.
20. PN-EN 197-1:2012 Cement -- Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
21. Gołaszewski J., Ponikiewski T., Kostrzanowska-Siedlarz A., Miera P.: The Influence of Calcareous Fly Ash on the Effectiveness of Plasticizers and Superplasticizers. Materials (Basel), 13(10), 2020, 2245. DOI: 10.3390/ma13102245.

22. Siddique R.: Waste Materials and By-Products in Concrete. Springer, Springer-Verlag Berlin – Heidelberg, 2008.
23. Hansen T.C.: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985. Mater. Struct., 19, 1986, p. 201–246.
24. Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M.: Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cem. Concr. Res., 37, 2007, p. 735–742.
25. Khalaf F.M., DeVenny A.S.: Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review. J. Mater. Civ. Eng, 16, 2004, p. 331–340.
26. Shohana S., Hoque M., Sobuz M.H.: Experimental investigation on hardened properties of recycled coarse aggregate concrete. Adv. Concr. Constr, 10, 2020, p. 369–379.
27. Meyer C., Egosi N., Andela C.: Concrete with waste glass as aggregate. J. Chem. Inf. Model, 53, 2001, p. 1689–1699.
28. Nassar R.U.D., Soroushian P.: Use of milled waste glass in recycled aggregate concrete. Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater., 166, 2013, p. 304–315.
29. Akçaözoğlu S., Ulu C.: Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends. Constr. Build. Mater., 58, 2014, p. 31–37.
30. Choi Y.W., Moon D.J., Kim Y.J., Lachemi M.: Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. Constr. Build. Mater., 23, 2009, p. 2829–2835.
31. Umasabor R.I., Daniel S.C.: The effect of using polyethylene terephthalate as an additive on the flexural and compressive strength of concrete. Heliyon, 6, 2020, p. e04700.
32. Fattuhi N.I., Clark L.A.: Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. Constr. Build. Mater., 10, 1996, p. 229–236.
33. Eldin N.N., Senouci A.B.: Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. J. Mater. Civ. Eng., 5, 1993, p. 478–496.
34. Pizoń J., Gołaszewski, J., Alwaeli, M., & Szwan, P.: Properties of Concrete with Recycled Concrete Aggregate Containing Metallurgical Sludge Waste. Materials, 13, 2020, 1448.
35. Alwaeli M., Gołaszewski J. Niesler M., Pizoń J., Gołaszewska M.: Recycle option for metallurgical sludge waste as a partial replacement for natural sand in mortars containing CSA cement to save the environment and natural resources. Journal of Hazardous Materials, 398, 2020, p. 123101.
36. Drobek L., Kanafek J., Pierzyna P.: Zagospodarowanie UPS w kopalniach węgla kamiennego – stan aktualny, prognoza zużycia na lata 2016–2020, aspekty technologiczne i środowiskowe Popioły z energetyki : XXIII Międzynarodowa konferencja, Zakopane, 19–21 October 2016, p. 225–237.
37. Giergiczny Z.: Popiół lotny aktywnym składnikiem cementu, 4 Sympozjum Naukowo--Techniczne: Reologia w technologii betonu, Gliwice 2002.
38. Szponder D.K., Trybalski K.: Określanie właściwości popiołów lotnych przy użyciu różnych metod i urządzeń badawczych. Gór. Geoinżynieria, 33(4), 2009, s. 287–98.
39. Zapotoczna-Sytek G.: AAC based on fly ash in the strategy of sustainable development 4th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. Innovation and Development, ed. MC Limbachiya, JJ Roberts. London, 2005, p. 257–64.
40. Rajczyk K.: Popioły lotne z kotłów fluidalnych i możliwości ich uszlachetniania, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2012.
41. Stępień M., Białecka B.: Inwentaryzacja innowacyjnych technologii odzysku odpadów energetycznych, Syst. Wspomagania W Inż. Prod., 6(8), 2017.

42. Pierzyna P.: The influence of the type of fly ash on selected physical properties of their water mixtures (multiphase mixtures) IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 545, 2019, 012004.
43. Pierzyna P.: Liquidation of shafts workings with the use of the mobile installation Mining – prospects and threats: Coal – cheap, clean energy and workplaces, 8–10 May 2018, Rybnik, Poland, 2018, art. no. 012011, p. 1–8.
44. Pierzyna P.: Use of after-rinse waste (slurry) in underground mining technologies Modern mining – selected issues, 2019, p. 84–104.
45. Drobek L., Borecki T., Pierzyna P.Z.: Ochrona środowiska. Część 5. Możliwości zastosowania w podziemnych technologiach górniczych pyłów z by-passa CBPD. Część 2 – aspekty technologiczne. Wiad. Gór., 66(6), 2015.
46. Pierzyna P.: Disposal of coal combustion wastes in the hydraulic backfill process IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 268, 2017, 012011.
47. Łączny M.J., Wałek T.: Modelowanie procesu powstawania cenosfer w kotłach pyłowych. Popioły z energetyki, Zakopane 2011, s.191–203.
48. Strzałkowska E.: Wybrane właściwości mikrosfer z popiołów lotnych. Przegląd Górniczy, 73(11), 2017, s. 37–43.
49. Strzałkowska E., Adamczyk Z.: Influence of chemical composition of fly-ash cenospheres on their grains size. Int. J. Environ. Sci. Technol., 17, 2019, p. 809–818.
50. Żyrkowski M., Rui Costa N., Santos F.L., Witkowski K.: Characterization of fly-ash cenospheres from coal-fired power plant unit. Fuel, 174, 2016, p. 49–53.
51. Haustein E., Quant, B.: Charakterystyka wybranych właściwości mikrosfer – frakcji popiołu lotnego – ubocznego produktu spalania węgla kamiennego. Mineral Resources Management (Gospodarka Surowcami Mineralnymi), 27(3), 2011, s. 95–111.
52. Strzałkowska E.: Morphology and chemical composition of mineral matter present in fly ashes of bituminous coal and lignite. Int. J. Environ. Sci. Technol., 2020, p.1–12.
53. Kapuściński T., Strzałkowska E.: Cenospheres from fly ashes of Łaziska Power Plant. Mineralogia – Special Papers. 32, 2008, 83.
54. Rocznik statystyczny – Ochrona Środowiska, Warszawa 2020.
55. Krajowy plan gospodarki odpadami 2022.
56. Ścierski W., Landrat M., Bogacka M., Pikoń K.: Badanie migracji chloru w procesie pirolizy niskotemperaturowej. Przemysł Chemiczny, t. 98, nr 9, 2019, p. 1448–1450.
57. Sztangret I., Setlak K. (red.): Gospodarka zrównoważona w działaniach przedsiębiorstw sektora usług komunalnych, MASTER – Odpady i Energia, Katowice 2018.
58. Circular economy package. Four legislative proposals on waste.
59. CEWEP e.V.: Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2018. https://www.cewep.eu/municipal-waste-treatment-2018/ [dostęp: 04.2021].
60. Hryb W.: Wpływ wybranych właściwości tworzyw sztucznych na możliwości ich odzysku. Przemysł Chemiczny, 95(8), 2016, p. 1479–1481.
61. Rybak Au.: Rola i przyszłość węgla w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego Polski, Monografia 865, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020.
62. Rybak Au., Rybak A., Sysel P.: Modeling of Gas Permeation through Mixed-Matrix Membranes Using Novel Computer Application MOT. Applied Science, 8(7), 2018, p. 1–20.
63. https://ec.europa.eu/eurostat [dostęp: 11.04.2021].
64. https://www.gov.pl/web/rozwoj-praca-technologia/rada-ministrow-przyjela-projekt-mapy-drogowej-goz [dostęp: 10.04.2021].
65. https://www.cp.org.pl/p/projekty-cp.html [dostęp: 10.04.2021].
66. Hordyńska M.: Ekologistyka i zagospodarowanie odpadów. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2017.

67. Bachorz M., Hordyńska M.: Gospodarka o obiegu zamkniętym: co oznacza dla nas jako producentów i konsumentów, Opole: Stowarzyszenie Polski Ruch Czystszej Produkcji, 2019 (http:// https://www.cp.org.pl/search/label/Publikacje).
68. https://www.cp.org.pl/p/kampania-goz.html [dostęp: 10.04.2021].
69. Hordyńska M.: Kooperacja przedsiębiorstw jako podstawa logistyki powtórnego zagospodarowania odpadów. Gospodarka Materiałowa & Logistyka, 73(2), 2021, p. 2–7.
70. Strona www projektu European University EURECA-PRO „The European University on Responsible Consumption and Production": www.eurecapro.eu [dostęp: 01.05.2021].

4. ODNAWIALNE I ALTERNATYWNE ŹRÓDŁA ENERGII ORAZ ENERGETYKA PROSUMENCKA

4.1. Wprowadzenie

Realizowane w ramach podobszaru 4. badania, łącząc ze sobą wiedzę z dziedzin fizyki (mechanika, optoelektronika), chemii, matematyki i ekonomii oraz inżynierii materiałowej i technologii produkcyjnych, ukierunkowane są przede wszystkim na poprawę jakości i stylu życia przez efektywną produkcję i wykorzystanie energii elektrycznej z uwzględnieniem ochrony środowiska. Badania te mają charakter interdyscyplinarny i w ich realizację zaangażowane są wszystkie Wydziały Politechniki Śląskiej.

Od lat nieprzerwanie prowadzone są badania związane z fotowoltaiką, o czym świadczą liczne publikacje i realizowane projekty badawcze. Badania nad ogniwami fotowoltaicznymi rozwijane są w kierunku podniesienia sprawności ogniw i obniżenia kosztów produkcji, a także rozszerzenia możliwości aplikacji przez ich integrację z budownictwem lub opracowanie wersji elastycznych. Postęp realizowany jest przez doskonalenie złączy, kontaktów i cech geometrycznych ogniw, metod obróbki ich powierzchni oraz stosowanie nowych materiałów inżynierskich o unikatowych własnościach. Stąd stałe poszukiwanie nowych materiałów i rozwiązań technologicznych, które pozwolą wytworzyć wysokowydajne ogniwo fotowoltaiczne.

W zakresie szeroko pojętych technologii, w szczególności nakierowanych na zastosowanie w ochronie środowiska i energetyce prowadzone są badania nad udoskonaleniem ogniw paliwowych np. przez użycie do ich budowy nowych materiałów. Badania te obejmują opracowanie nanokatalizatorów, w tym syntezę nanocząstek metalicznych o określonym rozmiarze, kształcie i składzie chemicznym oraz modyfikację struktury nośnika węglowego. Główną barierą w powszechnym zastosowaniu katalizatorów są ich ograniczone zasoby i wysoka cena. Barierę tę można pokonać właśnie dzięki zastosowaniu katalizatorów w postaci nanocząstek. W ramach badań realizowanych na Politechnice Śląskiej, w celu zwiększenia trwałości katalizatorów stosowanych w ogniwach paliwowych modyfikuje się strukturę nośnika

węglowego i w miejsce powszechnie stosowanej sadzy technicznej wprowadzane są materiały węglowe o wysokim stopniu uporządkowania struktury krystalicznej, odporne na działanie korozji elektrochemicznej.

Prowadzone są również badania w kierunku konwersji i wykorzystania CO_2. Redukcja emisji gazów cieplarnianych, a także rozwój alternatywnej czystej energii staje się jednym z najważniejszych wyzwań, przed jakimi stoi ludzkość, stąd trwające badania nad opracowaniem nowych nanokatalizatorów do zastosowań w procesie metanizacji. Badania te obejmują opracowanie nanokatalizatorów bimetalicznych w kombinacji nikiel-metal szlachetny (złoto, platyna, pallad itp.) z wykorzystaniem nośników w postaci niklowych pianek i sit molekularnych. Celem jest zwiększenie wydajności procesu metanizacji, a także przeskalowanie technologii do zastosowań komercyjnych.

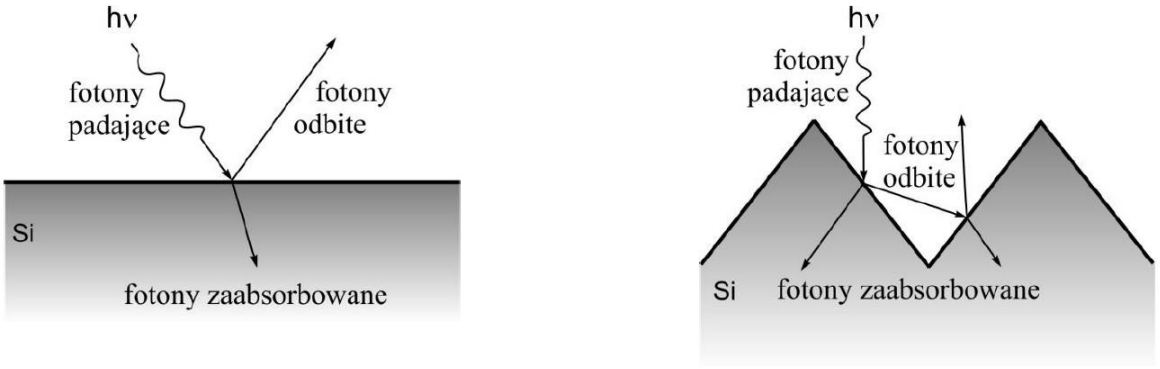
Europejski Zielony Ład oraz gospodarka obiegu zamkniętego to obszar działań związanych z energetycznym zagospodarowaniem odpadów i zarządzaniem energią w celu uzyskania neutralności klimatycznej. W tym zakresie prowadzone są prace nad procesami pirolizy biomasy odpadowej i wykorzystania mikroźródeł biogazowych do zasilania rejonów energetycznie autonomicznych. Prowadzone są badania oraz eksperymenty związane z zarządzaniem energią w mikroinfrastrukturach prosumenckich indywidualnych jak i zbiorowych (wirtualnych sieciach energetycznych). Opracowywane są rozwiązania i technologie referencyjne dla różnych grup odbiorców/prosumentów w kontekście zmiennej ceny energii i świadczenia usług systemowych na rozproszonym rynku energii elektrycznej.

4.2. Minimalizacja strat optycznych i elektrycznych w krzemowym ogniwie słonecznym

Obecnie, krzem ma największy udział w produkcji ogniw fotowoltaicznych, a konieczność zmniejszania kosztów produkcji spowodowała zainteresowanie krzemem polikrystalicznym. Zastosowanie krzemu polikrystalicznego pozwala na wytwarzanie ogniw fotowoltaicznych o relatywnie wysokich sprawnościach przetwarzania promieniowania słonecznego, przekraczających 20%, oraz dobrej stabilności pracy przy niższych kosztach produkcji w porównaniu z ogniwami na bazie krzemu monokrystalicznego [1]. Ogniwa fotowoltaiczne o wysokiej sprawności wymagają daleko idącej minimalizacji strat optycznych poprzez zmniejszenie współczynnika odbicia promieniowania słonecznego od naświetlanej powierzchni.

Współczynnik odbicia światła od powierzchni „surowej” płytki krzemowej waha się w zakresie 35–50% dla długości fali w granicach 400–1100 nm [2]. Dzięki teksturowaniu powierzchni krzemu polikrystalicznego oraz naniesieniu odpowiedniej warstwy antyrefleksyjnej odbicie można zmniejszyć do poniżej 5%, w konsekwencji uzyskując znaczny wzrost sprawności ogniwa fotowoltaicznego.

W wyniku teksturowania powierzchni ogniwa fotowoltaicznego odbity od powierzchni foton ma szansę po raz drugi być zaabsorbowany (rys. 4.1) [3, 4].



Rys. 4.1. Schemat oddziaływania fotonów z krzemem (a) oraz schemat przedstawiający wpływ teksturowania powierzchni na odbicie i absorpcję promieniowania (b)
Fig. 4.1. Thermal sensation in the function of the body mass index (BMI)

Chemiczna metoda teksturowania powierzchni przez trawienie w wodnych roztworach wodorotlenków stosowana dla krzemu monokrystalicznego jest nieefektywna w przypadku krzemu polikrystalicznego z uwagi na przypadkową orientację krystaliczną poszczególnych ziaren. Oprócz alkalicznych metod teksturowania krzemu polikrystalicznego stosuje się [2, 5]:

- trawienie w roztworach kwasowych,
- teksturowanie mechaniczne,
- reaktywne trawienie jonowe RIE.

Jedną z obiecujących i konkurencyjnych metod teksturowania jest laserowa obróbka powierzchni [3, 4]. Laser jest wzmacniaczem promieniowania świetlnego działającym na zasadzie wymuszonej emisji. Silna, nierozszerzająca się wiązka światła laserowego jest doskonałym narzędziem służącym do obróbki różnych materiałów w tym także krzemu. Powierzchniowa obróbka laserowa jest złożonym procesem obejmującym nagrzewanie, topienie, parowanie, osadzanie, ablację, stygnięcie i krzepnięcie materiału [4]. Zaletą tej metody jest bezkontaktowość oraz selektywność.

Cienkie warstwy optyczne stosuje się w celu nadania bądź poprawy określonych własności, na powierzchnie elementów optycznych, optoelektronicznych oraz urządzeń fotowoltaicznych. Wymaga się od nich niskich kosztów produkcji, trwałości,

łatwości stosowania oraz braku negatywnego wpływu na środowisko [6]. Podstawowym zadaniem cienkich warstw optycznych jest nadanie pożądanej emisji, odbicia i charakterystyki transmisji światła w określonym przedziale spektralnym. Warstwy optyczne, z uwagi na ilość i zakres absorbowanego, odbijanego lub przepuszczanego światła dzielą się na aktywne i pasywne [7]. Warstwy aktywne umożliwiają zmianę emisji, odbicia i transmisji światła przez czynniki zewnętrzne w sposób całkowicie kontrolowany i odwracalny. Działanie warstwy pasywnej jest z góry określone. Wśród warstw pasywnych wyróżnia się odbijające światło, antyrefleksyjne i w postaci filtrów. Do najpopularniejszych warstw optycznych należą: SiO_2, TiO_2, a-SiN_x:H, a-Si:C:H, ZnS, Ta_2O_5, Sn_xO_x, SiN_x, MgF_2 [8]. Pokrycia optyczne 1-warstwowe są łatwe do wytworzenia i są stosowane w wielu przyrządach optycznych. Mają jednak dwa istotne ograniczenia [7–8]:

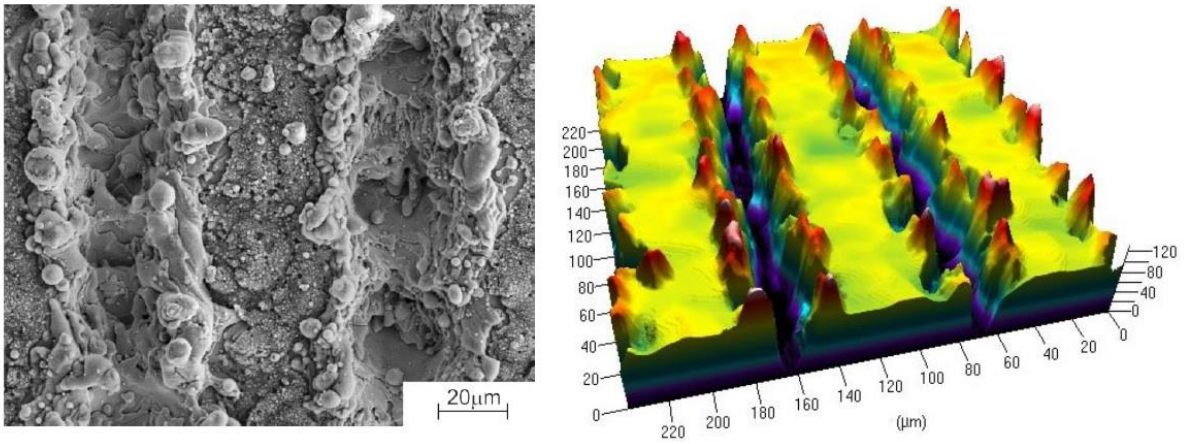
- dla pokryć na szkle lub kwarcu nie można uzyskać odbicia mniejszego niż ok. 1,3%, gdyż wybór materiałów o współczynniku załamania: $1,0<n<1,5$ jest dość ograniczony;
- dla pokryć antyrefleksyjnych na półprzewodnikach (materiałach o wysokim współczynniku załamania) można uzyskać odbicie bliskie zeru przy λ_{min}, jednak odbicie szybko rośnie zarówno dla $\lambda<\lambda_{min}$, jak i dla $\lambda>\lambda_{min}$.

Powyższe ograniczenia można wyeliminować stosując pokrycia wielowarstwowe. W przypadku krzemowych struktur fotowoltaicznych około 8% strat w energii jest związana z odbiciem światła, a dzięki wielowarstwowym pokryciom nisko absorpcyjnym można zredukować te straty do 3–5% [7–8].

W ramach prowadzonych prac badawczych wykorzystywana jest metoda atomowego osadzania warstw (ALD) ze względu na swoją uniwersalność, wysoką powtarzalność i stabilność pracy oraz możliwość kontrolowania grubości i równomierności osadzanych powłok w skali nanometrycznej. Realizacja badań, wytworzonych metodą ALD wielowarstwowych powłok Al_2O_3/TiO_2, umożliwiła rozwiązanie problemu badawczego, polegającego na otrzymaniu cienkiej warstwy charakteryzującej się jednocześnie wysokim współczynnikiem przepuszczalności promieniowania elektromagnetycznego w zakresie światła widzialnego, oraz własnościami pasywującymi podłoże krzemowe.

Badania nad teksturowaniem krzemu oraz wykorzystaniem metody ALD do nanoszenia wielowarstwowych powłok Al_2O_3 są poszerzeniem wieloletnich prac realizowanych na Politechnice Śląskiej, dotyczących kształtowania powierzchni materiałów inżynierskich. Otrzymane wyniki prac własnych stwarzają obiecujące perspektywy do prowadzenia badań i wskazują, że jest to dobry kierunek poszukiwań.

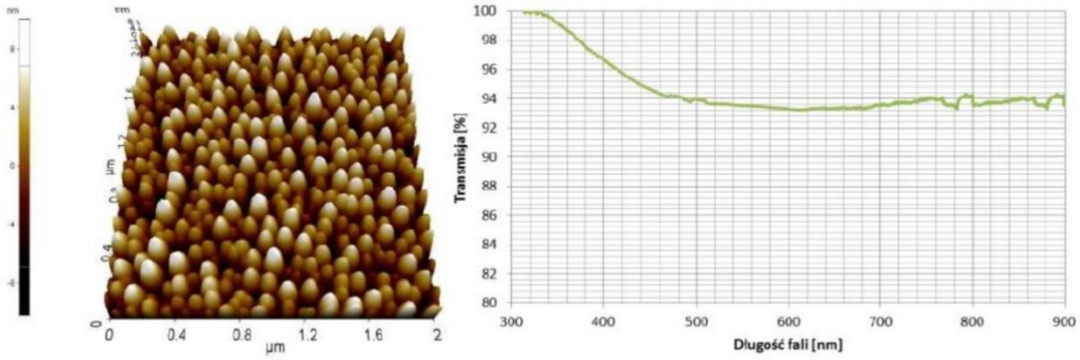
Teksturowanie wykonano przy użyciu lasera Nd:YAG pracującego w trybie impulsowym. Topografia powierzchni krzemu polikrystalicznego poddanego oddziaływaniu wiązki laserowej zależy w istotny sposób od warunków obróbki. Wyniki badań topografii powierzchni wykazują występowanie zagłębienia usytuowanego wzdłuż osi oddziaływania wiązki laserowej (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Tekstura laserowa odpowiadająca równoległym rowkom (obrazy SEM/CLSM)
Fig. 4.2. Laser texture corresponding to parallel grooves (SEM/CLSM image)

Kształt rowków jest nieregularny, a wzdłuż obu ich brzegów występują wypływki. W trakcie obróbki wiązka laserowa powoduje miejscowe przejście materiału do fazy ciekłej. Występujące w materiale naprężenie powierzchniowe powoduje wyrzucenie ciekłego materiału z obszaru oddziaływania wiązki laserowej na obrzeże obu krawędzi rowka, gdzie dochodzi do jego szybkiego krzepnięcia co skutkuje powstaniem wypływki. Podejmowano próby wytworzenia cienkich warstw optycznych Al_2O_3 metodą atomowego osadzania warstw z potencjalnym wykorzystaniem w ogniwach fotowoltaicznych. Chropowatość powierzchni wytworzonych warstw nie przekraczała 8 nm, natomiast przepuszczalność światła (przy grubości warstwy około 90 nm) w całym zakresie pomiarowym utrzymuje się powyżej 92% (rys. 4.3).

Wyniki badań wskazują, że metoda atomowego osadzania warstw jest potencjalnie dobrą techniką mogącą posłużyć do osadzania transparentnych warstw przewodzących, w których niezbędne jest zachowanie wysokiej transparentności oraz równomiernych, na całej powierzchni, własnościach elektrycznych, a co za tym idzie niezbędna jest kontrola grubości i równomiernego wzrostu powłoki w skali nanometrycznej.



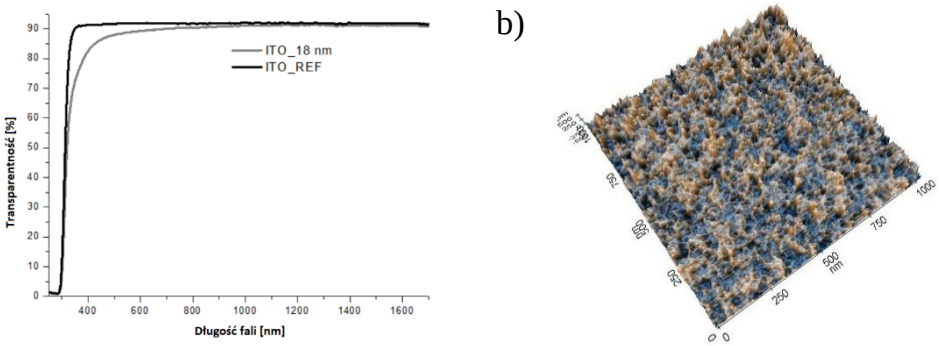
Rys. 4.3. Warstwa Al_2O_3 wytworzona metodą ALD na podłożu szklanym: a) obraz AFM topografii powierzchni; b) transmisja światła w funkcji długości fali
Fig. 4.3. Al_2O_3 layer prepared by the ALD method on a glass substrate: a) AFM image of the surface topography; b) light transmission as a function of wavelength

Laserowe teksturowanie i wielowarstwowe pokrycia optyczne wpływają pozytywnie na własności optoelektryczne krzemowych ogniw słonecznych. Dzięki zastosowaniu obu technologii zmniejszono odbicie do poniżej 0,5%, w konsekwencji uzyskując znaczny wzrost sprawności ogniwa fotowoltaicznego.

Ponadto prowadzone są prace naukowe nad wytworzeniem i zbadaniem wpływu podwójnej warstwy ITO na parametry optyczne i elektryczne ogniwa słonecznego [9]. Do wytworzenia proponowanych warstw ITO wybrano metodę rozpylania magnetronowego. Wspomniana metoda jest znana i stosowana w inżynierii materiałowej od lat, aczkolwiek nadal posiada duży potencjał w zastosowaniu do wytwarzana cienkich wielofunkcyjnych warstw o innowacyjnych parametrach. W procesach nanoszenia warstw ITO o grubości w przedziale 20–170 nm na płytki Cz-Si oraz szkiełka, na stanowisku napylarki stosowano stałą wartość prądu warunkującą zadaną moc, która wynosiła 100 W. Szybkość wzrostu warstw monitorowano z pomocą mikrowagi kwarcowej. Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że współczynnik transmisji dla wszystkich spośród testowanych materiałów (In_2O_3, SnO_2, ITO) kształtuje się na poziomie 90% w zakresie spektralnym ogniwa słonecznego (rys. 4.4a). Wytworzone warstwy charakteryzują się strukturą drobnokrystaliczną i niską chropowatością powierzchni (rys. 4.4b) o wartości współczynnika Haze na poziomie 0,3–6,5%.

Prace naukowo-badawcze były realizowane w ramach współpracy z Katedrą Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych (KMIiB) Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytutem Metalurgii i Inżynierii Materiałowej (IMIM) PAN w Krakowie, Instytutem Katalizy i Fizykochemii Powierzchni (IKFP) PAN w Krakowie oraz Centrum Badań i Rozwoju Technologii dla Przemysłu SA (CBRTP) w Warszawie i Instytutem Fizyki (IF) PAN w Warszawie.

a) b)



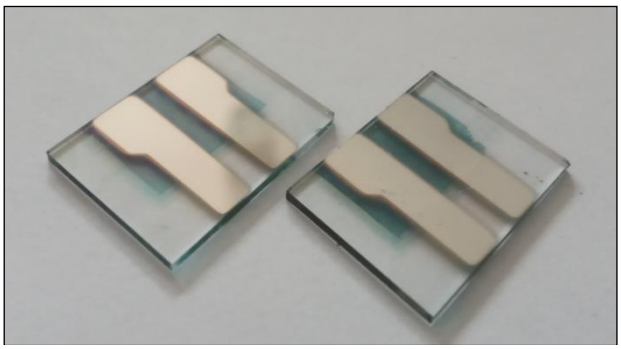
Rys. 4.4. Przykładowe widmo transmisyjne warstwy ITO w zakresie długości fali od 250 do 1700 nm (a) oraz obraz AFM topografii powierzchni 3D

Fig. 4.4. An example of the transmission spectra of ITO layer in the wavelength range from 250 to 1700 nm (a) and the AFM image of the 3D surface topography

4.3. Półprzewodnikowe warstwy polimerowe do zastosowań w ogniwach słonecznych

W przypadku związków organicznych tworzonych przez atomy węgla o hybrydyzacji sp2 zawierających elektrony na orbitalu pz, tworzony w ich strukturze układ skoniugowany elektronów π decyduje o ich własnościach półprzewodnikowych i przydatności do organicznych urządzeń optoelektronicznych [10]. Dlatego zastosowanie materiałów organicznych w optoelektronice i fotowoltaice zapewnia łatwiejszą i tańszą produkcję urządzeń optoelektronicznych zbudowanych na materiałach organicznych w porównaniu z urządzeniami zbudowanymi na półprzewodnikach nieorganicznych. Materiały organiczne pozwalają na wytwarzanie elastycznych źródłeł światła i wyświetlaczy o dużej powierzchni, tanich zintegrowanych obwodów drukowanych i elastycznych ogniw słonecznych. Stąd od wielu lat prowadzone są intensywne badania nad ogniwami fotowoltaicznymi opartymi na materiałach polimerowych i molekularnych. Od 2000 roku kiedy przyznana została Nagroda Nobla H. Shirakawie oraz A. Heegerowi i A. MacDiarmidowi, w zakresie przewodzących polimerów nastąpił znaczny wzrost zainteresowania tematyką wykorzystania polimerów w elektronice. Pierwsze organiczne ogniwa słoneczne typu Schotky'ego o architekturze warstwowej opracowane przez Harimę i in. [11] i Tanga [12] tworzyły warstwowe układy nanoszone na podłoża szklane. Przełomowym rezultatem badań było osiągnięcie 1% sprawności w 1986 roku w organicznym ogniwie słonecznym w którym heterozłącze p-n pełnił układ dwuwarstwowy CuPc/(PTCBI). Od tej pory badania nad

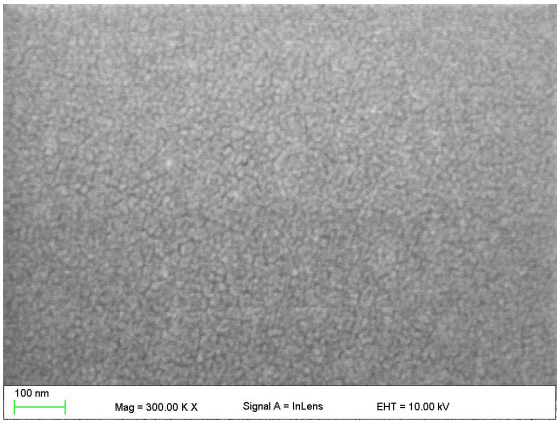
zwiększeniem sprawności ogniw organicznych fotowoltaicznych są stale rozwijane, przyczyniając się do rozwoju w dziedzinie poznania i zrozumienia struktury elektronowej tych materiałów oraz mechanizmów przejść optycznych. Badania te wykazały, że materiały organiczne odznaczają się silnymi oddziaływaniami typu elektron-fonon i każdemu przejściu elektronowemu towarzyszy przebudowa strukturalna. Przejścia elektronowe generują silne oddziaływania ekcytonowe między wzbudzonym, do pasma przewodnictwa, elektronem a ekwiwalentem elektronu (dziurą) po wzbudzonym elektronie w paśmie walencyjnym. Stąd organiczne złącze p-n tworzone jest przez dwa materiały których pasmo przewodnictwa donora jest położone wyżej od pasma przewodnictwa akceptora. Przejawia się to w mniejszej energii jonizacji donora w porównaniu do akceptora oraz mniejszym powinowactwem elektronowym materiału donorowego. Obecnie sprawność ogniw fotowoltaicznych opartych na materiałach organicznych oscyluje wokół 5%. Jednakże najwyższe wartości sprawności uzyskiwane są dla ogniw z układami organicznymi w połączeniu z węglowymi oraz nieorganicznymi nanododatkami. Zespół Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych prowadzi badania nad urządzeniami fotowoltaicznymi zawierającymi heterozłącza z materiałów molekularnych (ftalocjaniny niklu NiPc, tytanylo TiOPc) polimerowych (P3HT, PCPDTBT (rys. 4.5)) oraz kompozytowych o osnowie polimerowej (hybrydowymi).



Rys. 4.5. Organiczne ogniwa fotowoltaiczne ze heterozłączem PCPDTBT/fulleren
Fig. 4.5. Organic photovoltaic cells with a PCPDTBT / fullerene heterojunction

Szczególne zainteresowanie Autorów skupia się na wytworzeniu tzw. objętościowego złącza p-n. Idea złącza objętościowego (BHJ – bulk heterojunction) polega na równomiernym rozprowadzeniu materiałów donora i akceptora w jednowarstwowym układzie. To zapewnia uzyskanie bardzo dużej linii styku tych materiałów co przekłada się na intensyfikację powstawania i rozdziału ładunku. Dodatkowo nanokompozytowa struktura pozwala ograniczyć wpływ niskiej wartości drogi dyfuzji elektronu w materiale organicznym na sprawność ogniwa. Stąd Autorzy

z zespołu Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych skupili się na wytwarzaniu organicznego ogniwa fotowoltaicznego ze złączem objętościowym z półprzewodnikowych materiałów polimerowych np. PCPDTBT, P3HT oraz fullerenów PC61BM. Złącze objętościowe wytwarzane jest w postaci cienkiej warstwy (ok. 100 nm) nanoszonej z zastosowaniem metody rozwirowania obrotowego (spin--coating). Materiałem wyjściowym warstwy jest roztwór zawierający materiały zmieszane w zoptymalizowanej proporcji oraz szybko parujący rozpuszczalnik (np. chloroform). Metoda rozwirowania pozwala na szybkie uzyskanie warstwy jednolitej pod względem grubości i jednorodności materiałowej. Badania morfologii powierzchni przeprowadzone przy użyciu mikroskopii elektronowej skaningowej (SEM) dowodzą iż uzyskane warstwy posiadają jednorodną strukturę granularną (rys. 4.6).

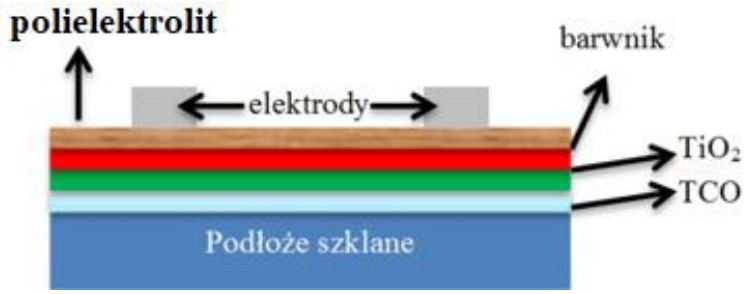


Rys. 4.6. Obraz morfologii powierzchni warstwy P3HT/PC61BM uzyskany przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM)
Fig. 4.6. Image of the surface morphology of the P3HT / PC61BM layer obtained using scanning electron microscopy (SEM)

Dodatkowo badania wykonane przy użyciu spektroskopii UV-Vis dowodzą iż warstwy heterozłącza cechują się intensywną absorpcją promieniowania słonecznego w zakresie światła widzialnego 400–650 nm. Badania podstawowych własności elektrycznych sugerują iż wytworzone ogniwa wykazują efekt fotowoltaiczny na poziomie 2%. Uzyskane wyniki stanowią podstawę rozwoju ogniw organicznych poprzez optymalizację parametrów wytwarzania jak również uzupełnienie finalnych ogniw o warstwy transportujące elektrony i dziury (odpowiednio ETL-electron transport layer, HTL- hole transport layer).

Polimerowe warstwy półprzewodnikowe mogą również znaleźć zastosowanie w barwnikowych ogniwach słonecznych. Na Politechnice Śląskiej prowadzone są badania nad możliwością zastąpienia ciekłego elektrolitu w barwnikowym ogniwie

fotowoltaicznym cienką warstwą materiału polimerowego przewodzącego prąd elektryczny. Ciekły elektrolit w budowie barwnikowych ogniw fotowoltaicznych ulega wyciekom i odparowaniu, a także prowadzi do korozji elektrody, co obniża sprawność konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Badania skupiają się na odpowiednim domieszkowaniu materiału polimerowego, w celu poprawy jego przewodnictwa elektrycznego oraz opracowaniu technologii osadzania cienkich warstw pod kątem stosowania w ogniwach fotowoltaicznych. W ramach prowadzonych badań dokonano optymalizacji warunków osadzania cienkich warstw polimerowych oraz składu chemicznego nanoszonych roztworów, a także wykonano badania struktury i własności optycznych cienkich warstw polimerowych wytworzonych metodą zol-żel. Wytworzono serię barwnikowych ogniw fotowoltaicznych o strukturze: ITO/TiO_2/barwnik/warstwa aktywna/Al (rys. 4.7) z warstwą aktywną wykonaną z dwóch wytypowanych materiałów polimerowych MEH-PPV – poli[2-metoksy-5-(2-etylheksyloksy)-1,4-fenylenowinylenu] oraz PVDF--HFP – poli (fluorku winylidenu-heksafluoropropylenu), w tym z dodatkiem jodku potasu. Własności tych ogniw porównano ze standardowym ogniwem barwnikowym z ciekłym elektrolitem [13].

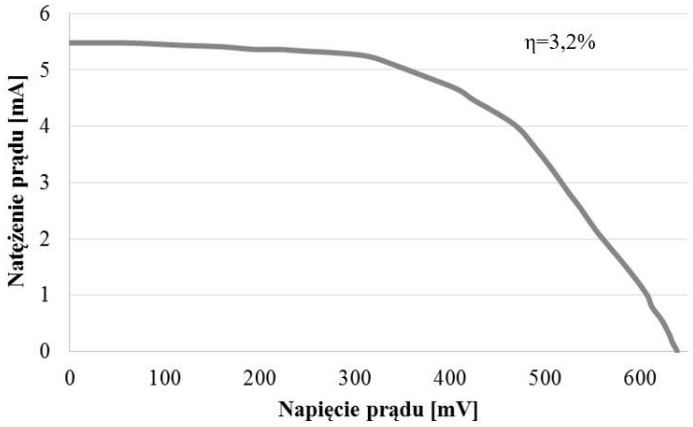


Rys. 4.7. Schemat nowoopracowanego barwnikowego ogniwa słonecznego
Fig. 4.7. Diagram of a newly developed dye sensitized solar cell

Wykazano, że w barwnikowym ogniwie fotowoltaicznym ciekły elektrolit można zastąpić cienką warstwą materiału polimerowego PVDF-HFP lub MEH-PPV a dodatek jodku potasu KI wpływa na poprawę sprawności i polepszenie własności elektrycznych nowo opracowanych ogniw (rys. 4.8).

Opracowana technologia wytwarzania barwnikowych ogniw fotowoltaicznych o budowie: ITO/TiO_2/barwnik/warstwa aktywna/Al stanowi atrakcyjną alternatywę dla ogniwa barwnikowego z ciekłym elektrolitem. Jest to wynikiem wyeliminowania problemów związanych z wyciekaniem i odparowaniem ciekłego elektrolitu, a także zmniejszenia kosztów wytwarzania przez zastąpienie drogiej warstwy platyny

elektrodą aluminiową przy zachowaniu zbliżonej sprawności w stosunku do ogniwa z ciekłym elektrolitem. Uzyskane wyniki badań oraz sformułowane wnioski mają dużą wartość poznawczą oraz nadają się do praktycznego wykorzystania.



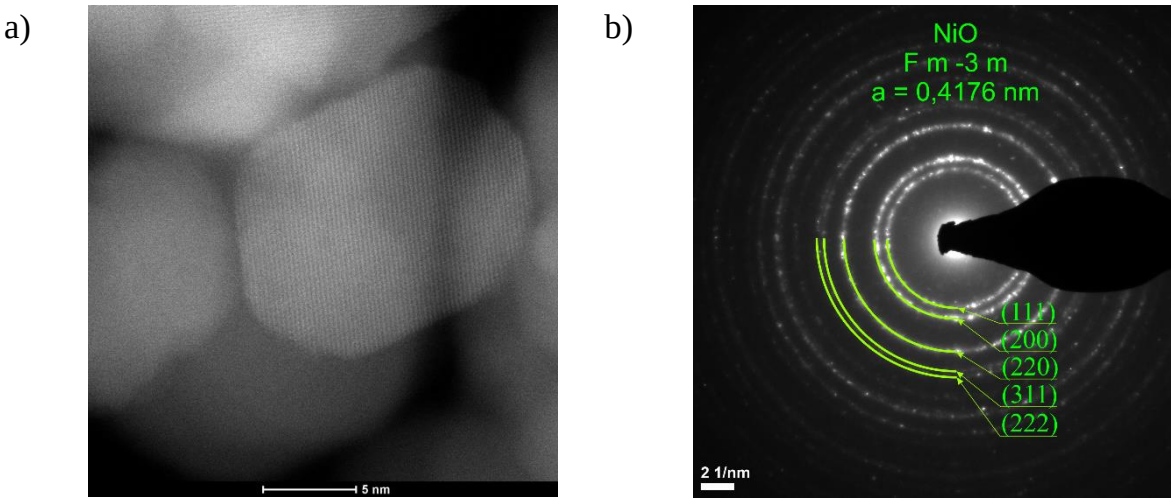
Rys. 4.8. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa zawierającego warstwę polimeru PVDF-HFP z dodatkiem 10% KI
Fig. 4.8. Current-voltage characteristics of a solar cell containing a layer of PVDF-HFP polymer with the addition of 10% KI

4.4. Modyfikacja struktury barwnikowego ogniwa słonecznego z zastosowaniem nanomateriałów

Spośród czterech generacji ogniw fotowoltaicznych najciekawsze wydają się być barwnikowe, wykorzystujące, do konwersji energii słonecznej w elektryczną, podobne procesy do tych zachodzących w przyrodzie. Różnica polega na tym, że stosowane w nich układy donorowo-akceptorowe, energię światła przekształcają w prąd elektryczny, a nie w energię chemiczną, jak ma to miejsce w procesie fotosyntezy. Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne charakteryzują się przede wszystkim prostotą wytwarzania i niewielką wrażliwością na zmiany temperatury, a materiały używane do ich produkcji są nietoksyczne. Potwierdzona wysoka sprawność ogniw słonecznych uczulanych barwnikiem (ang. *dye-sensitized solar cel* – DSSC) przy rozproszonym świetle słonecznym może w sposób istotny wpływać na możliwość aplikacji systemów działających wewnątrz budynków, w często zmieniających się warunkach atmosferycznych lub w rejonach o znacznym zanieczyszczeniu powietrza [13]. Dzisiejsze konstrukcje DSSC wymagają udoskonalenia urządzeń, zwłaszcza pod względem poprawy wydajności ogniw. Poprawa działania ogniw wymaga w szczególności podniesienia właściwości elektrycznych elementów optycznych

ogniwa poprzez zastosowanie nowoczesnych materiałów oraz modyfikacji ich struktury i morfologii powierzchni. Intensywne prace na Politechnice Śląskiej trwają nad optymalizacją składu i struktury elektrod DSSC (fotoanody i przeciwelektrody).

W układzie DSSC fotoanoda odpowiada za pochłanianie promieniowania słonecznego i transport elektronów, toteż niezwykle istotna jest jej powierzchnia właściwa oraz własności elektryczne. Najbardziej rozpowszechnioną strukturą fotoanody jest porowata warstwa nanocząstek TiO_2. Na Politechnice Śląskiej prowadzone są badania na opracowaniem nowych nanostruktur tlenków metali do zastosowań w fotoanodzie. W strukturze ogniwa wykorzystano między innymi syntezowane metodą zol-żel nanocząstki tlenku niklu (rys. 4.9) i cynku o różnym udziale procentowym (ZnO:NiO) [14].



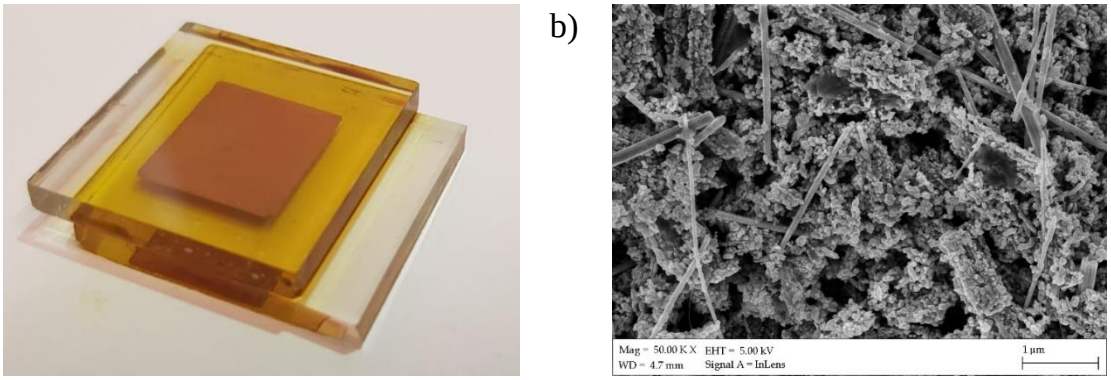
Rys. 4.9. Obraz HAADF nanocząstek NiO (a) oraz dyfraktogram SAED (b) (uzyskane mikroskopie STEM)

Fig. 4.9. The HAADF image of the NiO nanoparticles (a) and the SAED pattern (b) (Obtained on a STEM microscope)

Ponadto badania podejmowane przez badaczy z Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych mają na celu zwiększenie wydajności układu fotoanody z hybrydową warstwą półprzewodnikową o dużej powierzchni właściwej co uzyskano przez zastosowanie nanocząstek i ich aglomeratów oraz nanododatków jednowymiarowych (nanodruty, nanorurki). Wprowadzenie dodatków w postaci nanostruktur 1D miało na celu zwiększenie transportu elektronów przy jednoczesnym zmniejszeniu rekombinacji elektronów. Struktury półprzewodnikowe zostały wytworzone przy użyciu techniki sitodruku zapewniającej szybki, energooszczędny proces produkcji oraz wysoką powtarzalność strukturalną i wymiarową nanoszonych warstw. Układy DSSC zostały wykonane z zastosowaniem konwencjonalnego

barwnika N719 (barwnik kompleksu rutenowego (di-tetrabutyloamonium cis-bis (izotiocyjaniano) bis (2,2'-bipirydylo-4,4'-dikarboksylato) ruten (II)), komercyjnego elektrolitu i przeciwelektrody platynowej (rys. 4.10).

a) b)



Rys. 4.10. Obraz eksperymentalnego barwnikowego ogniwa słonecznego (a) oraz obraz SEM powierzchni wykorzystanych do jego budowy nanostruktur
Fig. 4.10. Image of the experimental dye sensitized solar cell (a) and SEM surfaces image of the used nanostructures to build it

Z przeprowadzonych badań wynika, że hybrydowa nanostruktura odznacza się dużą powierzchnią właściwą porównywalną z konwencjonalnym materiałem nano-$-TiO_2$. Jednakże badania wykazują również zwiększone niebezpieczeństwo powstawania aglomeratów nanostruktur 1D, co może mieć negatywny wpływ na adsorpcję barwnika na powierzchni fotoanody oraz utrudnić transport elektronów [15]. Z tego powodu właściwe przygotowanie półprzewodnikowego materiału wyjściowego (np. mechaniczne rozbicie aglomeratów) stanowi niezwykle istotny etap wytwarzania układu DSSC.

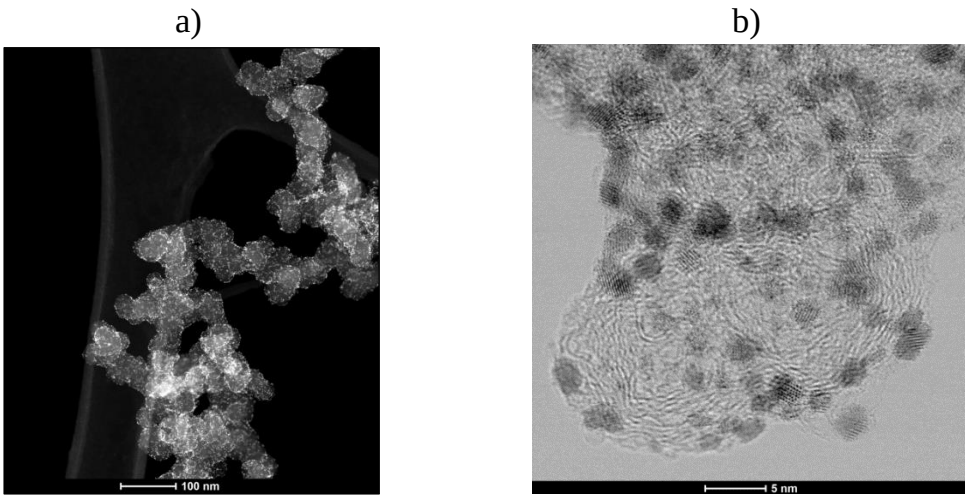
Właściwości optyczne warstw fotoanod wskazują na wysoką absorpcję promieniowania słonecznego po adsorpcji barwnika oraz efektywne przenoszenie ładunku. Testy wydajności wytwarzanych DSSC osiągają wartość ok. 5% i wskazują iż zastosowanie kombinacji nanostruktur jest interesującym kierunkiem rozwoju DSSC. W ramach prowadzonych prac zbadano również wpływ warstw powierzchniowych z nanomateriałów węglowych osadzonych na podłożu z materiałów konstrukcyjnych na własności przeciwelektrody nowo opracowanych zintegrowanych barwnikowych ogniw fotowoltaicznych. Opracowano warstwy powierzchniowe, zawierające nanomateriały węglowe (w tym nanorurki węglowe lub grafen) na podłożu twardym i elastycznym, stanowiące przeciwelektrodę w zintegrowanych barwnikowych ogniwach fotowoltaicznych, wytwarzane metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej oraz alternatywnie metodami natryskową lub wirową w celu zapewnienia wymaganych własności optycznych, elektrycznych i wytrzymałościowych [16].

4.5. Opracowanie nowych nanokatalizatorów do zastosowań w procesach magazynowania i konwersji energii

Procesy konwersji energii w ogniwach paliwowych są kontrolowane przez działanie katalizatorów [17]. Najlepszym katalizatorem jest platyna, stosowana w ogniwach alkalicznych (AFC – Alkaline Fuel Cell), z kwasem fosforowym (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell) i ogniwach z membraną do wymiany protonów (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Ze względu na duże znaczenie społeczno-gospodarcze problemu deficytu energii, naukowcy podejmują szeroko zakrojone i bardzo intensywne poszukiwania nowych katalizatorów, które następnie poddawane są ocenie, w tym ich trwałości. Wysoka cena i ograniczone zasoby platyny stanowią obecnie największą barierę upowszechnienia ogniw paliwowych. Z tego względu w ostatnich latach podejmowane są intensywne badania, zmierzające do opracowania katalizatorów, które nie zawierają metali szlachetnych [18]. Pomimo systematycznego postępu, wyniki są ciągle niezadawalające. Bardziej skuteczne okazuje się podejście polegające na wykorzystaniu nanocząstek osadzonych na odpowiednim nośniku o dużej powierzchni właściwej. Dla wydajności katalizatorów decydujący jest fakt, że tylko odsłonięte atomy powierzchniowe mogą służyć jako centra aktywne, podczas gdy atomy znajdujące się wewnątrz cząstki nie uczestniczą bezpośrednio w reakcji katalitycznej. Dlatego, aby umożliwić udział większej liczby atomów, proponuje się zmniejszenie rozmiarów katalizatora [19]. Wraz ze stałym zmniejszaniem rozmiaru materiału aktywnego, udział atomów odsłoniętych na powierzchni znacznie wzrasta, a dodatkowo zmianie ulegają własności elektronowe, wpływając na ich aktywność chemiczną. Zmiana struktury katalizatora może radykalnie zmienić energie aktywacji podstawowych etapów procesu katalitycznego, powodując zwiększenie lub zmniejszenie szybkości reakcji. Ponadto konkurujące ze sobą niskoenergetyczne ścieżki reakcji mogą prowadzić do powstawania różnych produktów obniżających selektywność katalizatorów. Aby osiągnąć wysoką selektywność w procesie chemicznej konwersji żądanych produktów, powierzchnię katalizatora należy kontrolować tak, aby oddziaływania adsorbatu były kierowane wzdłuż żądanej ścieżki reakcji. Dlatego wyjaśnienie związku między strukturą powierzchni a aktywnością katalityczną ma kluczowe znaczenie dla projektowania lepszych katalizatorów dla określonych reakcji.

W Laboratorium Badania Materiałów Politechniki Śląskiej badane są układy katalityczne z wykorzystaniem zaawansowanych technik mikroskopii elektronowej. Odmiennie niż w przypadku innych technik charakteryzacji, które zwykle dostarczają

uśrednionych informacji o badanych nanomateriałach, transmisyjny mikroskop elektronowy (TEM) jest jedynym narzędziem o rozdzielczości atomowej, które umożliwia bezpośrednie obrazowanie morfologii i struktury pojedynczych nanocząstek rozproszonych na nieregularnym podłożu o dużej powierzchni (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Struktura katalizatora platynowego na nośniku węglowym. Obraz STEM-HAADF (a). Obraz STEM-BF (b). Zdjęcia otrzymane przy użyciu mikroskopu S/TEM Titan 80-300 (Laboratorium Badań Materiałów Politechniki Śląskiej)

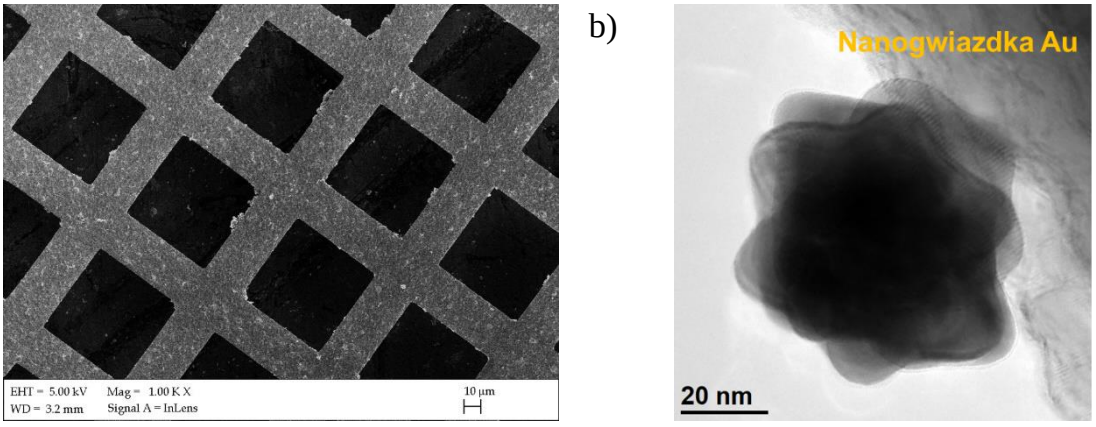
Fig. 4.11. Structure of a platinum catalyst on a carbon support. STEM-HAADF image (a). STEM-BF image (b). Photos obtained using the S/TEM Titan 80-300 microscope (Materials Research Laboratory of the Silesian University of Technology)

Bezpośrednia obserwacja umożliwia zdefiniowanie zależności między budową i aktywnością układów katalitycznych, a następnie projektowanie trwałych i wydajnych ogniw paliwowych. Szczególna uwaga poświęcona jest modelowym układom nanocząstek Pt na podłożu węglowym pod kątem analizy ich zachowania w warunkach zbliżonych do warunków pracy ogniwa paliwowego. Monitorowanie zmian struktury w wyniku cyklicznie powtarzanych reakcji chemicznych z atomową rozdzielczością (metoda IL-TEM) służy do analizy mechanizmu degradacji katalizatorów. Analizowane układy katalityczne są również kompleksowo charakteryzowane pod względem strukturalnym (XRD, RS, XPS, TEM, EELS) oraz elektrochemicznie. Uzupełniającym źródłem informacji będzie pomiar ilości rozpuszczonej platyny techniką ICP-MS. Te dane w połączeniu z informacją o stopniu degradacji nośnika węglowego uzyskaną metodą spektroskopii Ramana i EELS, dają obraz zmian struktury katalizatora wynikających z przeprowadzonych badań elektrochemicznych.

Prowadzone są również badania nad opracowaniem nowych nanokatalizatorów do zastosowań w procesie metanizacji. Metanizacja dwutlenku węgla jest reakcją dobrze znaną i wykorzystywaną nie tylko w przemyśle chemicznym, ale także przy

magazynowaniu energii pozyskanej z odnawialnych źródeł energii [20]. Procesy metanizacji CO i CO_2 odkryte w 1902 roku przez Paula Sabatiera i Jean-Baptiste Senderensa stanowią obiecujące rozwiązanie w zakresie redukcji emisji gazów szkodliwych dla środowiska. Egzotermiczny charakter reakcji metanizacji powoduje problemy w odniesieniu do dokładnej kontroli temperatury reakcji. Stąd kluczowe są badania nad opracowaniem skutecznego katalizatora [20]. Ponadto zastosowanie odpowiedniego katalizatora umożliwia przeprowadzenie reakcji chemicznej pomiędzy niereagującymi ze sobą w stanie wolnym substratami gazowymi.

a) b)



Rys. 4.12. Obraz SEM nanocząstek PD na podłożu niklowym (a) oraz obraz STEM nanocząstki złota o rozwiniętej powierzchni

Fig. 4.12. SEM image of PD nanoparticles on nickel substrate (a) and STEM image of gold nanoparticles with developed surface

Na Politechnice Śląskiej prowadzone badania dotyczą opracowania nanokatalizatorów metalicznych i bimetalicznych w kombinacji nikiel-metal szlachetny (złoto, platyna, pallad itp.) [21]. Do tego celu użyto nośników w postaci niklowych pianek i sit molekularnych.

4.6. Badania procesu solarnej pirolizy biomasy odpadowej

W myśl postanowień Europejskiego Zielonego Ładu oraz obowiązujących pakietów i postanowień klimatycznych, odnawialne źródła energii ciągle zyskują na znaczeniu [22]. Obok energetyki zawodowej celującej w zapewnianie stabilnych dostaw energii pozyskanej ze źródeł odnawialnych przy jednoczesnym odchodzeniu od spalania paliw kopalnych ogromny potencjał różnorodnej biomasy odpadowej czeka na zagospodarowanie. Odnotowane problemy spalania i współspalania biomasy w kotłach węglowych wraz z uwzględnieniem dążenia do neutralności klimatycznej

pod względem emisji CO_2 determinują rozwój alternatywnych sposobów wykorzystania energii chemicznej biomasy odpadowej np. w procesie pirolizy. Piroliza jest procesem termicznego rozkładu substancji bogatej w węgiel w atmosferze pozbawionej tlenu, którego efektem jest wydzielenie trzech użytecznych frakcji produktów: gazu pirolitycznego, ciekłego bio-oleju bogatego w węglowodory, w tym związki aromatyczne, oraz pozostałości stałej – bogatego w węgiel karbonizatu. Wykorzystanie energii solarnej do zasilania procesu stwarza oryginalne możliwości przeprowadzania procesu pirolizy bez generowania pośrednich emisji gazów cieplarnianych związanych z pozyskaniem ciepła.

W projekcie „Badania procesu solarnej pirolizy biomasy odpadowej", realizowanym w ramach programu OPUS Narodowego Centrum Nauki dokonano analizy eksperymentalnej oraz numerycznej procesu solarnej pirolizy drewna odpadowego, słomy odpadowej oraz osadów ściekowych. Na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym (rys. 4.13) określono rozkład poszczególnych frakcji produktów procesu, ich kaloryczność oraz końcowe wskaźniki konwersji energii chemicznej paliwa. Stanowisko zasilała lampa ksenonowa o parametrach emisyjnych promieniowania, wiernie oddających naturalne promieniowanie słoneczne [23]. Równocześnie określona została metodyka wyznaczania parametrów kinetyki pirolizy, w oparciu o najnowsze metody wyznaczania parametrów kinetycznych (ang. *isoconversional kinetics*) oraz metody numerycznej (ang. *deconvolution*).

Rys. 4.13. Stanowisko laboratoryjne do badań procesu solarnej pirolizy biomasy odpadowej
Fig. 4.13. Research stand for investigation of the solar pyrolysis process of waste biomass

W ramach projektu wykonano kilka modeli matematycznych obejmujących różne aspekty procesu solarnej pirolizy biomasy. Modele CFD opracowano w programie Ansys Fluent, zaś model numeryczny w programie MatLab.

2-wymiarowy model CFD koncentratora solarnego

Model ten posłużył zweryfikowaniu pierwszych koncepcji budowy układu eksperymentalnego. Celem było sprawdzenie działania koncentratorów rurowych (ang. *parabolic trough*) w warunkach nasłonecznienia charakterystycznych dla Polski oraz zbadanie wpływu modyfikacji krzywizny zwierciadła na jego zdolności do skupiania promieni słonecznych. Przygotowano geometrię obejmującą zwierciadło, przestrzeń nad nim i nieboskłon. Analizie poddano 27 różnych krzywizn zwierciadła w warunkach wyidealizowanych oraz średnich warunkach nasłonecznienia w Polsce. Zaobserwowano między innymi podobieństwa rozkładów intensywności promieniowania w domenie obliczeniowej dla kolejnych krzywizn, a w przypadku niektórych krzywizn uzyskano podwójny obszar skupiania promieniowania [24].

2-wymiarowy osiowosymetryczny model CFD reaktora koncepcyjnego

Model reaktora pirolitycznego uproszczony do prostej zaizolowanej rury miedzianej posłużył do sprawdzenia dalszych założeń dotyczących konstrukcji i parametrów pracy reaktora laboratoryjnego oraz identyfikacji parametrów mających największy wpływ na przebieg procesu. W ten sposób za pomocą jednego modelu sprawdzono założenia kluczowe dla badań eksperymentalnych i symulacyjnych. Analizowano rozkład oraz przebiegi temperatur reaktora i złoża dla różnych przyjętych wartości mocy cieplnej zasilającej proces oraz różnych wartości własności fizycznych złoża (gęstość, pojemność cieplna właściwa, przewodność cieplna i porowatość) oraz różnych wartości parametrów modelu kinetyki reakcji pirolizy. Stwierdzono, że zwiększenie strumienia ciepła ma niewielki wpływ na końcową średnią temperaturę złoża, ale powoduje szybsze osiągnięcie stanu ustalonego i większe gradienty temperatury w złożu. Zweryfikowano również ideę wydłużenia reaktora od strony napływu azotu celem jego wstępnego podgrzania. Największy wpływ na wyniki symulacji mają przyjęte wartości własności fizycznych biomasy (a spośród nich gęstość i pojemność cieplna właściwa) oraz wartości energii aktywacji reakcji chemicznych (zwłaszcza dla reakcji rozkładu biomasy do gazu i bio-oleju) [25].

0-wymiarowy model numeryczny i 3-wymiarowy model CFD reaktora pirolitycznego

Modele te posłużyły wyznaczeniu nieznanych, niemierzalnych eksperymentalnie parametrów transportu ciepła w reaktorze pirolitycznym, tj. współczynników wymiany ciepła reaktora na wewnętrznych i zewnętrznych jego ścianach oraz emisyjności

powierzchni oświetlanej lampą ksenonową. Określono je na drodze rozwiązania problemu odwrotnego, gdzie połączono badania eksperymentalne (dla pozyskania danych referencyjnych), trójwymiarowe symulacje CFD (celem zwalidowania działania algorytmów optymalizacyjnych) oraz 0-wymiarowe obliczenia numeryczne (dla finalnego rozwiązania problemu odwrotnego). Analiza pozwoliła określić wszystkie trzy poszukiwane wielkości, a także porównać ze sobą zastosowane metody obliczeniowe: modelowanie 0- i 3-wymiarowe tego samego procesu [26].

Wyniki badań i wnioski

W badaniach eksperymentalnych dla wszystkich rodzajów biomasy pośród produktów procesu wykazano dominujący udział frakcji ciekłej. Pomimo różnic w udziałach masowych produktów pirolizy poszczególnych paliw rozkłady energii chemicznej w produktach były bardzo zbliżone ze stosunkiem 5:4:1 odpowiednio dla frakcji ciekłej, stałej i gazowej [27]. Dzięki przyjętej metodyce pomiarów, uzyskano gaz pirolityczny bogaty w wodór, jednakże o niskich jego udziałach (poniżej 12% w ujęciu masowym). Potwierdzono tezę, że piroliza solarna może być metodą produkcji karbonizatów o dużej porowatości zależnej od parametrów prowadzenia procesu oraz rodzaju surowca wsadowego z wartościami powierzchni właściwej BET nawet do 150 m^2/g (dla drewna odpadowego). W przypadku słomy przekroczenie temperatur topnienia popiołu w trakcie pirolizy spowodowało spadek porowatości. Odnotowano również wzrost kaloryczności stałych produktów pirolizy solarnej biomasy lignocelulozowej w stosunku do pierwotnej energii chemicznej biomasy. Analiza wskaźników konwersji energii chemicznej biomasy pozwoliła stwierdzić, że jedynie piroliza solarna drewna zaowocowała znaczącym wzrostem zawartości energii chemicznej w produktach (+12%).

Badania numeryczne wykazały, że modelowanie procesów wymaga w pierwszym kroku krytycznej, obiektywnej oceny rzeczywistych potrzeb w danym problemie badawczym skonfrontowanych z koniecznym nakładem pracy i czasu. Zastosowane uproszczenia geometrii modeli umożliwiły wykonanie wysokiej jakości siatek, zapewniły dobrą zgodność wyników symulacji i eksperymentów oraz wykluczyły modelowanie dodatkowych elementów, co przyspieszyło obliczenia i proces przygotowania modeli. Analiza czasu obliczeń poszczególnych modeli pozwala prognozować, że kompleksowy model trójwymiarowy ujmujący wszystkie najważniejsze zjawiska składowe procesu pirolizy wymagałby prawdopodobnie co najmniej kilku tygodni na dostarczanie wyników, co właściwie wykluczałoby przeprowadzenie analizy wrażliwości, walidacji i wieloparametrowych badań

w racjonalnym czasie. Kluczowe dla symulacji i jednocześnie najtrudniejsze do określenia okazują się parametry podstawowe tj. własności fizyczne złoża biomasy. Różnice temperatur w złożu biomasy zmierzone eksperymentalnie można uznać za stosunkowo niewielkie, dlatego wskazanym kierunkiem działań jest dążenie do upraszczania modeli numerycznych, gdyż pozwoli to na wielopłaszczyznową walidację i szeroki zakres badań.

4.7. Bilansowanie energii w prosumenckich systemach elektroenergetycznych

Bilansowanie energii jest największym wyzwaniem w każdym systemie elektroenergetycznym. W klasycznym podejściu zapotrzebowanie pokrywane jest przez jednostki wytwórcze centralnie dysponowane (JWCD) kontraktujące energię na Towarowej Giełdzie Energii (TGE) oraz rynek techniczny (bilansujący) odpowiedzialny za utrzymanie częstotliwości w sieci i obejmuje regulację pierwotną oraz wtórną charakteryzującą się czasami reakcji poniżej 30 s oraz od 30 s do 5 min odpowiednio (regulacja trójna w KSE już została zunifikowana z bilansowaniem na TGE). Model ten dedykowany jest dla dużych źródeł (niezbyt licznych) oraz przepływowi energii w kierunku odbiorcy.

W ostatnich latach prowadzone są prace dotyczące transformacji krajowej energetyki, wpisujące się w Europejski Zielony Ład, którego celem jest przejście na czystą gospodarkę obiegu zamkniętego i osiągnięcie neutralności klimatycznej w horyzoncie 2050. Plany takie przygotowywane i wdrażane są przez wszystkie kraje europejskie. W tym kontekście do analizy horyzontu transformacji, wykorzystuje się koncepcję elektroprosumeryzmu [28]. Koncepcja ta nie skupia się jedynie na wytwarzaniu energii, ale koncentruje się na zmianie sposobu jej użytkowania. Zaproponowane w koncepcji działania wykorzystują analizę egzergetyczną technologii i systemów, uwzględniających sprawność globalną, zasoby surowcowe i jakość energii.

Realizacja celów Europejskiego Zielonego Ładu (elektroprosumeryzmu) wymaga znacznego zwiększenia udziału źródeł OZE z produkcją wymuszoną (źródła PV, elektrownie wiatrowe). Dlatego istotne staje się wprowadzenie mechanizmów użytkowania energii elektrycznej, które pomogą zmaksymalizować wykorzystanie energii w czasie, gdy jest ona dostępna i ograniczyć gdy występują deficyty. Dodatkowo koncentracja mikroinstalacji powoduje, że instalacje te nie mogą być

dysponowane przez operatora OSD, lecz zarządzane lokalnie i to w sposób zautomatyzowany. Podstawą koncepcji takiego bilansowania jest wprowadzenie nowej architektury rynku obejmującej pięć osłon [29]. Osłona OK1 jest osłoną na przyłączu nN (prosumenci); osłona OK2 jest osłoną przecinającą pola liniowe stacji transformatorowej SN/nN (spółdzielnie energetyczne); osłona OK3 jest wirtualną osłoną przecinającą pola przyłączeniowe źródeł oraz prosumentów/odbiorców (klaster); osłona OK4 jest osłoną przecinającą pola liniowe SN stacji transformatorowej 110 kV/SN; osłona OK5 przecina połączenia transgraniczne łączące KSE z UCTE. Koncepcja bilansowania polega na tworzeniu profili niezbilansowania na osłonach kontrolnych od osłon OK1 aż po osłonę OK5.

W ogólnym przypadku bilans dla każdej osłony kontrolnej można opisać za pomocą równania:

$$E_{OK}\big|_t = \sum E_P\big|_t \pm \sum E_M\big|_t + \sum E_O\big|_t \tag{4.1}$$

gdzie: $\sum E_P\big|_t$ to energia generowana w źródłach, $\sum E_M\big|_t$ to energia magazynowana (pobierana lub oddawana), a $\sum E_O\big|_t$ to energia odbiorów/odbiorników.

Bilans może być modelowany w różnych okresach w zależności od potrzeb. Okres sekundowy (milisekundowy) konieczny jest dla stabilizowania napięcia i częstotliwości, minutowy (5-minutowy lub 15-minutowy) dla handlu energią pomiędzy podmiotami osłony OK, a roczny w zagadnieniach związanych z analizą kosztów funkcjonowania.

Metodyka badań

Do badań bilansu energetycznego oraz alternatywnych technologii wykorzystuje się symulator pozwalający na wykonanie obliczeń bilansu energii elektrycznej, które bazują na rocznych profilach (podstawowo 15-minutowych) produkcji i zapotrzebowania. W modelowaniu przyjęto następujące założenia:

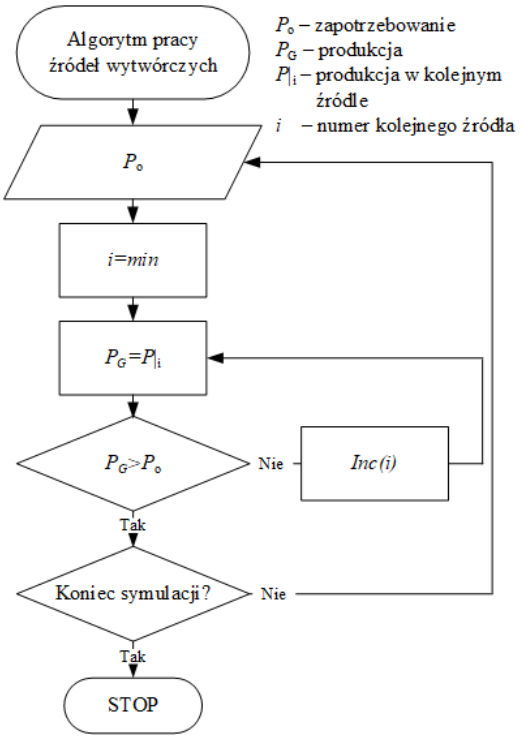
a) nie uwzględnia się w modelach obliczeniowych struktury sieci oraz związanych z nią rozpływów prądu;
b) modele są modelami statycznymi; 15-minutowy krok obliczeń oznacza, że wszystkie obiekty są modelowane w stanie ustalonym;
c) sposób pracy poszczególnych źródeł w badaniach symulacyjnych wynika z ich właściwości energetyczno-ruchowych (możliwości bilansujących).

   W szczególności uwzględnia zasadę *dispatch priority* (gwarantowane pierwszeństwo odbioru energii ze źródeł OZE) w wypadku wszystkich źródeł OZE

z wymuszoną produkcją. Badania symulacyjne nie uwzględniają natomiast sieciowych ograniczeń rozpływowych (analiza na miedzianej płycie);

d) profile kształtowane są za pomocą sygnału z Rynku Czasu Rzeczywistego (RCR) z podatnością 15%. Dodatkowym założeniem jest ograniczenie przesuwania obciążenia w horyzoncie 24 godzin, tzn. pobór energii można przesunąć, ale nie dłużej niż o 24 godziny;
e) w badaniach nie uwzględnia się wielkiego potencjału wymiany międzynarodowej a wykorzystanie magazynów energii jest ograniczone jedynie do prosumentów ze źródłami PV;
f) modele symulacyjne opisują poziom technologiczny charakterystyczny dla źródeł wytwórczych i magazynów energii w latach 2017–2021. Dalszy szybki postęp technologiczny może spowodować, że użyte modele (w szczególności sprawność) będą się zmieniać i wpływać na wyniki.

Aktualnie, bilansowanie energii odbywa się za pomocą grafikowanej produkcji jednostek JWCD. W prowadzonej analizie bilansowanie będzie odbywać się lokalnie, tworząc znaną już koncepcję lokalnych obszarów bilansowania (osłon OK). Dla każdego poziomu osłon, należy posługiwać się innym zestawem profili.



Rys. 4.14. Kaskadowy algorytm pracy źródeł wytwórczych OZE
Fig. 4.14. Cascade algorithm of RES source generation

Do modelowania pracy źródeł wykorzystano kaskadowy algorytm przedstawiony na rys. 4.14. W pierwszej kolejności wykorzystuje się energię ze źródeł z produkcją

wymuszoną, a następnie w źródłach bilansujących. Należy jednak podkreślić, że algorytm nie uwzględnia ograniczeń źródeł. Ograniczenia te uwzględniane są w modelach poszczególnych źródeł i działają niezależnie. Wynikiem działania symulatora, z kaskadowym algorytmem pracy źródeł wytwórczych, jest roczny bilans energii dla analizowanego obszaru.

W analizie wprowadzono dodatkowo mechanizmy kształtowania profili. Mechanizmy te wymagają wprowadzenia operatora, który na podstawie pomiarów oraz modeli matematycznych wykorzystujących sztuczną inteligencję (szczególnie do prognozowania popytu [30]) będzie mógł zarządzać wirtualnym magazynem. W przeprowadzonej analizie zakłada się, że profil produkcji źródeł jest możliwy do prognozowania z dużą dokładnością w okresie 24 h (mniej dokładnie nawet w okresie 2, 3 dni) [31, 32]. Do prognozowania użyto heurystycznych metod wykorzystujących bazowe profile. Wynikiem metody jest godzinowy wektor energii pobieranej:

$$E_O\big|_h = \left[E_O^1, E_O^2, ..., E_O^{24} \right] \tag{4.2}$$

w którym dla każdej godziny obliczane są wartości obciążenia na podstawie profili bazowych osłon:

$$E_O^{T_h} = \sum_{h=1}^{T_h} O_i^{(h)}, \; T_h = \left[1, 2, ..., 24\right] \tag{4.3}$$

W taki sposób sterowana jest praca akumulatorów w trybie wirtualnego magazynu oraz zmiana sposobu użytkowania energii elektrycznej w przypadku kształtowania profili.

Osiąganie neutralności klimatycznej

Osiągniecie neutralności klimatycznej analizowane jest w kolejnych stanach osiągnięcia elektroprosumeryzmu poprzez zastosowanie odpowiednich technologii. Analiza obrazuje wpływ poszczególnych technologii na poziom niezbilansowania. W rzeczywistym procesie transformacji zwiększenie udziału poszczególnych technologii i mechanizmów będzie następowało równolegle.

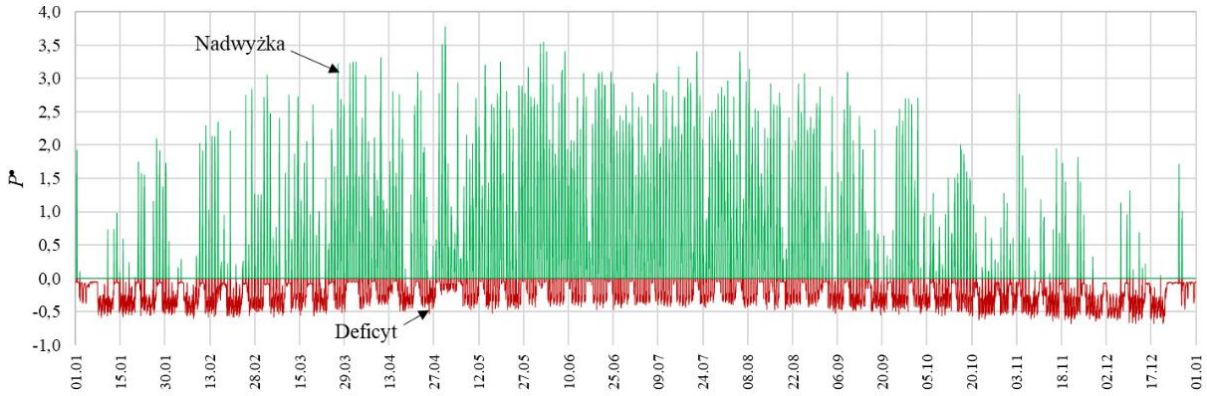
Rozważmy osiągnięcie zbilansowania na pięciu poziomach technologicznych:

a) poziom 1 – wykorzystanie źródeł PV;
b) poziom 2 – struktura wytwórcza charakterystyczna dla obszarów miejsko-wiejskich i obejmująca technologie OZE takie jak źródła PV, elektrownie wiatrowe (pojedyncze) oraz mikroelektrownie i elektrownie biogazowe;
c) poziom 3 – wykorzystanie magazynów energii (akumulatorów) pracujących indywidualnie;

d) poziom 4 – pracujący oraz wirtualny magazyn energii;
e) poziom 5 – zmiana sposobu użytkowania energii (reakcja na sygnał cenowy).

Każdy kolejny poziom jest rozwinięciem poprzedniego, tzn. wprowadza nowe funkcjonalności do już istniejących. Zakłada się dodatkowo, że na każdym poziomie saldo rocznego bilansu jest równe zero (możliwa jest nadwyżka i deficyt energii). Analizę uogólnia się wprowadzając wielkości względne energii oraz mocy odnosząc je do maksymalnej wartości energii i mocy (15-minutowej) zapotrzebowania bez źródeł OZE.

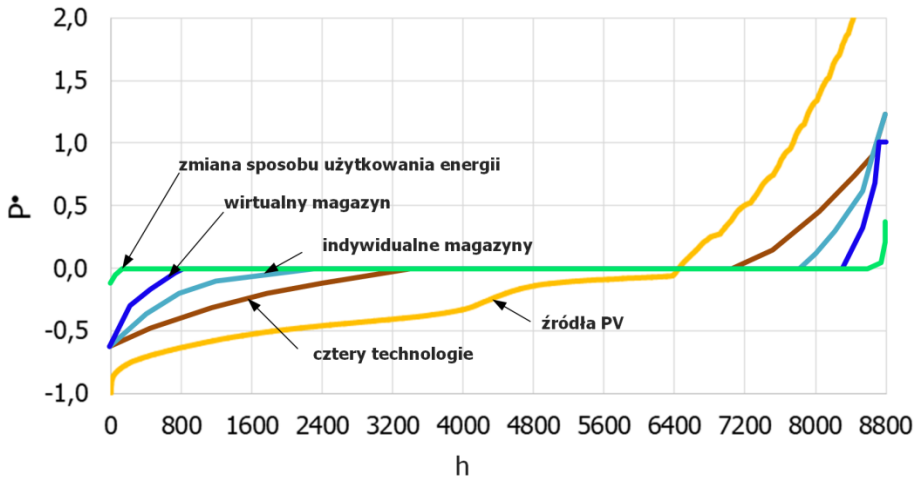
Na rys. 4.15 przedstawiono bazowy profil niezbilansowania uzyskany (roczne zapotrzebowanie 120 GWh, czas wykorzystanie mocy szczytowej CWMS=3500 h – charakterystyczny dla klastra obejmującego powiat) oraz produkcji w źródłach PV, dla pełnego rocznego zbilansowania.



Rys. 4.15. Względny profil niezbilansowania klastra
Fig. 4.15. Cluster imbalance relative profile

Na rys. 4.16 przedstawiono kolejne poziomy bilansowania klastra. Pierwszy poziom pokrywania potrzeb nie pozwala na wyeliminowanie deficytu (pomimo rocznego zbilansowania energii), a dodatkowo powoduje, że moc na osłonie jest ponad trzykrotnie wyższa od mocy zapotrzebowania.

Na każdym kolejnym poziomie ogranicza się deficyt i nadwyżkę energii. Zastosowanie zmiany sposobu użytkowania energii pozwala na zbilansowanie w taki sposób, że występujący deficyt nie przekracza 1%. Maksymalna moc deficytu to 20% mocy pobieranej, a czas trwania nie przekracza 20 h (tab. 4.1).



Rys. 4.16. Względne uporządkowane profile niezbilansowania dla pięciu stanów klastra
Fig. 4.16. Ordered imbalance relative profile for the five cluster states

Tabela 4.1

Zestawienie uzyskanych wyników bilansów energetycznych dla analizowanych poziomów technologicznych

	Stan				
	1	2	3	4	5
źródła PV	1,00	0,32	0,32	0,32	0,32
elektrownie wiatrowe	0,00	0,38	0,38	0,38	0,38
elektrownie i mikroelektrownie biogazowe	0,00	0,30	0,30	0,30	0,30
suma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
bilans energetyczny					
saldo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
nadwyżka	0,70	0,22	0,12	0,06	0,01
deficyt	-0,70	0,22	0,12	0,06	0,01

Podsumowanie

Przedstawione możliwości bilansowania dla pięciu poziomów technologicznych (tu na przykładzie klastra, ale ogólnie spółdzielni energetycznej, lokalnego obszaru bilansowania …) pokazują, że osiągnięcie neutralności klimatycznej jest możliwe, ale wymaga lokalnego bilansowania energii elektrycznej oraz wdrożenia mechanizmów kształtowania profilu niezbilansowania.

4.8. Prosumencki model systemu elektroenergetycznego z mikroelektrownią biogazową

Energetyka prosumencka w szczególny sposób wpisuje się w gospodarkę obiegu zamkniętego. W gospodarce obiegu zamkniętego niezwykle istotne staje się energetyczne zagospodarowanie odpadów, przy czym generacja odpadów odbywa się w rozproszeniu zależnym od np. gęstości zaludnienia, lokalizacji zakładów przemysłowych (w tym szczególnie sektora spożywczego). Dlatego transport odpadów do miejsc utylizacji lub składowania jest kosztowny. Rozsądnym jest zagospodarowanie energetyczne odpadów w miejscu ich powstawania. Jednakże takie rozwiązanie pociąga za sobą konieczność rozproszenia infrastruktury energetycznej, dopasowanej wielkością do podaży odpadów. Utylizacyjne mikroźródło biogazowe (klasy 10–50 kW) jest takim rozwiązaniem, elastycznym pod względem dopasowania do podaży i rodzaju odpadów. Jest też źródłem regulacyjnym, umożliwiającym bilansowanie mocy w lokalnej sieci elektroenergetycznej, dopasowującym się do profilu niezbilansowania mocy czynnej z innymi źródłami OZE z generacją wymuszoną (szczególnie fotowoltaiką) [33].

Mikroźródło biogazowe jest tym elementem łańcucha gospodarki obiegu zamkniętego, czym są instalacje oczyszczania spalin w elektrowniach węglowych, oczyszczalnie ścieków dla sieci kanalizacyjnej czy domowe instalacje fotowoltaiczne w Kalifornii (od 2020 r.). Mikroźródło biogazowe wykorzystuje biogaz jako paliwo zasilające silnik spalinowy napędzający prądnicę (najczęściej indukcyjną) o mocy znamionowej w zakresie 10–50 kW. Dodatkowo źródło to może pracować (i najczęściej tak jest) w układzie kogeneratora wykorzystując ciepło do podgrzewania komory fermentacyjnej oraz do innych celów.

Potencjał sektora rolno-spożywczego w kontekście generacji odpadów organicznych

Obszary wiejskie są szczególnie podatne na elektryfikację OZE z wykorzystaniem mikroźródła biogazowego ze względu na dostęp do „paliwa” w postaci odpadów rolniczych i hodowlanych. Jest to również pewnego rodzaju tradycja w tworzeniu spółdzielni rolniczych, szczególnie nieformalnych, pozwalających np. na ograniczanie kosztów utrzymania infrastruktury technicznej. Analizy techniczno-ekonomiczne możliwości wykorzystania mikroźródła biogazowego w łańcuchu gospodarki odpadami koncentrują się na wymiarze mikroekonomicznym. W tabelach 4.2–4.4 przedstawiono oszacowania w zakresie podaży odpadów.

Gospodarstwa rolne. W Polsce jest ponad 1,4 mln gospodarstw rolnych (wg danych GUS) a wyróżnikiem tych gospodarstw jest powierzchnia decydująca o potencjale produkcji rolnej. Ogólna powierzchnia użytków rolnych w Polsce, to: grunty pod zasiew – 10 mln ha, uprawy trwałe (głównie sady) – 0,4 mln ha, łąki i pastwiska trwałe – 3 mln ha.

Gospodarstwa hodowlane. W Polsce są to: obory (hodowla bydła, przede wszystkim mlecznego, ale także mięsnego), chlewnie (hodowla świń, na potrzeby mięsne) oraz kurniki (brojlery oraz produkcja jaj).

Tabela 4.2

Charakterystyka polskich gospodarstw rolnych w kontekście energetycznego potencjału odpadów

Powierzchnia, ha	Liczba gospodarstw, tys.	Hasłowa charakterystyka
do 5	750	gospodarstwa socjalne, ogółem 2 mln ha
5–20	500	gospodarstwa niskotowarowe, ogółem 5 mln ha – gospodarstwa z potencjałem podażowym na rynku substratów
20–100	125	gospodarstwa średnio-towarowe, ogółem 4,5 mln ha – gospodarstwa z potencjałem transformacji w gospodarstwa przemysłowe z mikroelektrowniami μEB
powyżej 100	12	gospodarstwa przemysłowe, ogółem 3 mln ha – z potencjałem inwestycji w elektrownie biogazowe klasy 0,5–1 MW

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych GUS.

Tabela 4.3

Charakterystyka polskich gospodarstw hodowlanych w kontekście energetycznego potencjału odpadów

Obsada krajowa, szt.	Liczba gospodarstw	Roczna ilość odpadów oraz ich wartość energetyczna
obory		
bydło: 6 mln, w tym 2,1 mln krów mlecznych	350 tys., w tym: 10 tys. obór krów mlecznych, 50 ferm wielkoprzemysłowych	odpady pohodowlane: obornik – 40 mln t, gnojowica – 40 mln t, 20 TWh (2 mld m^3 CH_4)
chlewnie		
trzoda chlewna: 11 mln	170 tys., w tym: 150 ferm wielkoprzemysłowych	odpady pohodowlane: obornik – 15 mln t, gnojowica – 20 mln t, 10 TWh (1 mld m^3 CH_4)
kurniki		
brojlery: 130 mln, kury nioski: 50 mln	500 tys., w tym: 2000 ferm przemysłowych, 1300 ferm jaj konsumpcyjnych, 600 ferm wielkoprzemysłowych	odpady pohodowlane: obornik/pomiot kurzy – 7 mln t, 4 TWh (400 mln m^3 CH_4)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych GUS i Głównego Inspektoratu Weterynarii.

Zakłady przetwórstwa rolno-spożywczego. W Polsce są to głównie: mleczarnie, ubojnie, zakłady wędliniarskie, wytwórnie mrożonek i konserw, wytwórnie soków pitnych. Wyróżnikiem zakładów przetwórstwa rolno-spożywczego w kontekście ich transformacji energetycznej w zakresie biogazowych źródeł utylizacyjnych jest ilość odpadów poprodukcyjnych.

Tabela 4.4
Charakterystyka polskich zakładów przetwórstwa rolno-spożywczego w kontekście energetycznego potencjału odpadów

Produkcja, ton	Liczba zakładów	Roczna ilość odpadów oraz ich wartość energetyczna
Zakłady mleczarskie		
12 mld	300	produkcja serwatki: 4 mln t, 600 GWh (60 mln m^3 CH_4)
Ubojnie		
1300 rzeźni i zakładów rozbioru, (zakłady wieloprofilowe):		
żywiec wieprzowy: 3300 tys.	1200 w tym rzeźnie: 600	odpady poubojowe: 500 tys. t, 160 GWh (16 mln m^3 CH_4)
żywiec drobiowy: 2400 tys.	600 w tym rzeźnie: 170	odpady poubojowe: 300 tys. t, 100 GWh (10 mln m^3 CH_4)
żywiec wołowy: 1100 tys.	1000 w tym rzeźnie: 350	odpady poubojowe: 200 tys. t, 60 GWh (6 mln m^3 CH_4)
Zakłady wędliniarskie		
1 mln	1000	200 tys. t, 80 GWh (8 mln m^3 CH_4)
Wytwórnie mrożonek i konserw		
1 mln	2200	200 tys. t, 80 GWh (8 mln m^3 CH_4)
Wytwórnie soków pitnych		
900 tys.	500	300 tys. t, 650 GWh (65 mln m^3 CH_4)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych GUS i Głównego Inspektoratu Weterynarii.

Komunalne oczyszczalnie ścieków. Do ok. 1700 komunalnych oczyszczalni ścieków w Polsce doprowadzanych jest rocznie ok. 1,3 mld m^3 ścieków (ok. 44 m^3 na osobę, dotyczy 30 mln mieszkańców oraz obiektów usługowych i zakładów przyłączonych do komunalnej sieci kanalizacyjnej) [34]. Roczna ilość osadów powstających w komunalnych oczyszczalniach ścieków w sposób naturalny zależy od liczby ludności i stopnia skanalizowania. Obecnie, przy dostępie do kanalizacji wynoszącym około 80%, ilość osadów dochodzi do 1 mln ton s.m. (sucha masa organiczna). Potencjał energetyczny osadów ściekowych w Polsce w przeliczeniu na czysty metan (wytworzony w procesie fermentacji osadów) wynosi 600 mln m^3 CH_4, co daje wartość energii chemicznej 6 TWh. Oczyszczalnie tworzące potencjalny rynek mikroźrodeł biogazowych klasy 10–50 kW obejmuje obiekty przetwarzające

600–6000 m^3 ścieków/dobę, w których rocznie powstają osady w ilości 600–3000 ton. Są to oczyszczalnie w gminach liczących 10–100 tys. mieszkańców a takich gmin jest w Polsce ok. 1000. Ilość osadów, mimo ujemnego przyrostu naturalnego (prognozowana liczba ludności w horyzoncie 2040–2050, to około 33–35 mln ludności) ma jeszcze tendencję wzrostową, ale bardzo niewielki.

Oszacowany potencjał, z wykorzystaniem różnorodnych danych statystycznych, pozwala zakładać, że w Polsce może być 50 tys. mikroźródeł biogazowych (klasy 10–50 kW). Taka liczba, adekwatna do zasobów odpadów na obszarach wiejskich, oznacza roczny potencjał wytwórczy energii elektrycznej równy 10 TWh. Oznacza również sumaryczną moc znamionową wynoszącą około 1200 MW (moc zainstalowana około 1800 MW). Potencjał pasma regulacji mocy wynosi 1200 MW. Wartość ta wynika z dolnych ograniczeń techniczno-ekonomicznych pracy silnika spalinowego (50%) oraz możliwości przeciążeń zespołu silnik-generator (150%). Zatem zakres regulacyjny pojedynczego mikroźródła wynosi 50–150% mocy znamionowej. Sumaryczne pasmo regulacji mocy wynosi natomiast ±600 MW. Potencjał produkcji pozwala na pokrycie ok. 25% energii zużywanej na obszarach wiejskich obecnie, oraz prawie 15% w horyzoncie do roku 2040 (około 60 TWh/rok).

Ekonomia spółdzielni utworzonej wokół mikroźródła biogazowego

Inwestycję w mikroelektrownię biogazową należy traktować jak inwestycję w maszynę rolniczą, przetwórczą czy pojazd. Efektywność ekonomiczna stosowania mikroźródła biogazowego jest zależna od wielu czynników, a głównie od kosztów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych, między innymi kosztu substratu (są to jednak czynniki przewidywalne) oraz cen energii elektrycznej i ciepła (koszty uniknięte zakupu energii elektrycznej). Koszty substratu dla mikroelektrowni μEB są zerowe lub ujemne w zakresie dostarczanych odpadów.

Charakterystyczną cechą mikroelektrowni utylizacyjnej jest jej uniwersalność w stosunku do stosowanych substratów, a także uproszczona obsługa (personel nie musi być wykwalifikowany). Gospodarstwo średnio-towarowe, wykorzystujące głównie własny potencjał pracowniczy, jest szczególnie podatne na zmiany kosztów eksploatacyjnych, dlatego też założeniem jest brak konieczności zatrudniania wykwalifikowanego personelu do obsługi mikroelektrowni μEB. Z drugiej strony mikroelektrownia staje się dodatkowym źródłem dochodu w postaci oszczędności w zakupie energii elektrycznej i ciepła, a także oszczędności na kosztach utylizacji odpadów. Mikroźródło biogazowe μEB wyposażone jest w komponenty takie jak

w maszynach rolniczych (np. silniki spalinowe, maszyny indukcyjne lub prądnice synchroniczne doczepiane do wałka odbioru mocy ciągnika). Dzięki rozwiązaniom standardowym koszty eksploatacyjne mogą być znacznie obniżone do 1–2 zł/mth. Koszt budowy mikroźrodła biogazowego o mocy 10 kW_{el} wynosi ok. 250 tys. PLN, a o mocy 50 kW_{el} – ok. 800 tys. PLN (ceny bez podatku VAT). Koszty te uwzględniają budowę kogeneratora, komory fermentacyjnej, zbiornika na poferment, magazyn biogazu, a także układy sterowania i przyłącza.

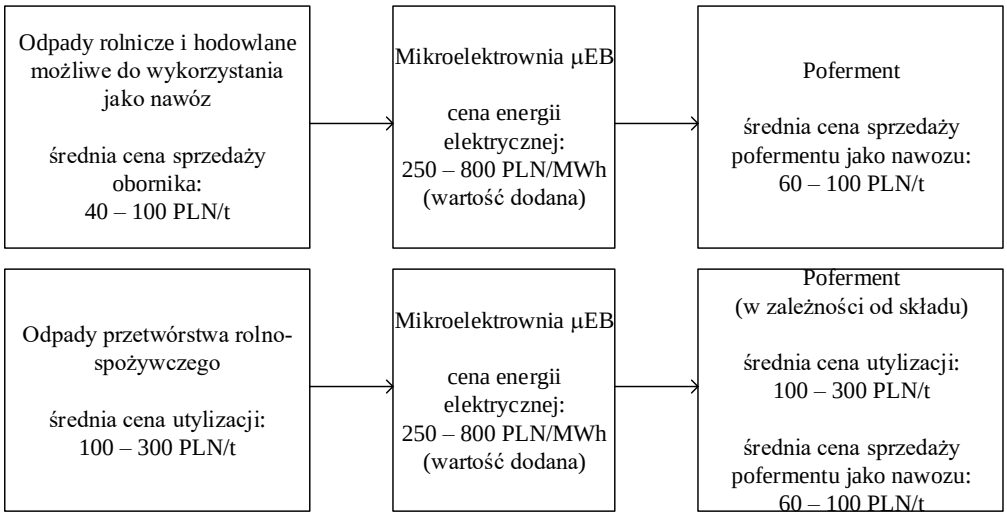
Analizując proces i koszty inwestycyjne (tab. 4.5) oraz koszty serwisowania, a także okres zwrotu inwestycji (4 i 10 lat), wyznaczono minimalne ceny energii (szacowane metodą prostego okresu zwrotu). Wyniki wskazują, że przy takich założeniach zapewnią minimalny roczny przychód dla którego inwestycja się zwróci. W analizie nie brano pod uwagę kosztów paliwa, jakim są odpady pochodzące bezpośrednio z uprawy/hodowli/produkcji (w takim ujęciu paliwo ma koszt zerowy), ale wzięto pod uwagę zmienny koszt serwisu dla przyjętych okresów zwrotu.

Tabela 4.5
Zestawienie minimalnych cen energii produkowanej przez mikroelektrownie μEB

Moc źródła, kW_{el}	10		50	
Okres zwrotu, lata	4	10	4	10
Roczna produkcja, MWh	80		400	
Koszt serwisu, PLN/rok	5 tys.		12 tys.	
Minimalna cena, PLN/MWh	800	400	600	250

Przyjęte okresy zwrotu są charakterystyczne, odpowiednio, dla inwestora NI oraz energetyki WEK. W przypadku rolnictwa charakterystyczne są dłuższe okresy zwrotu. Okres 10 lat jest zbieżny z okresem życia technologii (m.in. silnika spalinowego). Dla porównania koszty utylizacji odpadów rolniczych/hodowlanych i przemysłu spożywczego to obecnie 100–300 PLN/t.

Na rys. 4.17 przedstawiono łańcuch inwestycyjny w postaci mikroźródła biogazowego, uwzględniając rolę utylizacyjną w gospodarce obiegu zamkniętego. Mianowicie, w łańcuchu tym wprowadza się wartość dodaną w postaci dodatkowej energii (o dość dużej rozpiętości cenowej, zależnej od stopy zwrotu na kapitale). Przedstawione ceny pochodzą z krajowych portali aukcyjnych oraz cenników zakładów składowania i utylizacji odpadów.



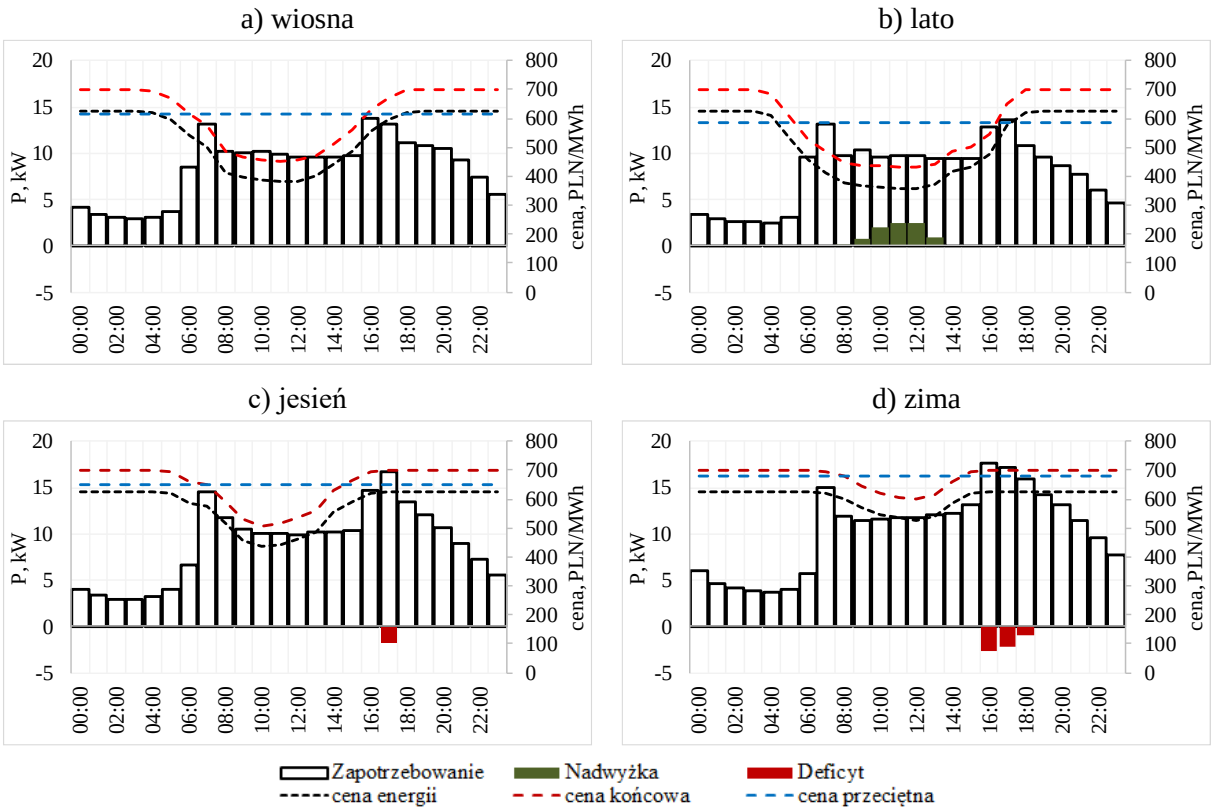
Rys. 4.17. Łańcuch cenowy inwestycji w postaci mikroźródła biogazowego
Fig. 4.17. The costs chain of investment in a biogas micro-source

Analiza bilansów energetycznych dla mikrosieci zasilanej z transformatora SN-nN z mikroźródłem biogazowym

Analizę bilansów energetycznych wykonano dla rzeczywistej linii nN na terenie wsi (mikrosieci), wykorzystując opracowane profile zapotrzebowania na energię elektryczną i generację źródła PV. Do mikrosieci przyłączonych jest 21 gospodarstw domowych (gospodarstw socjalnych) oraz jedno gospodarstwo rolno-hodowlane (uprawa zboża oraz krów mlecznych) prowadzące działalność agroturystyczną. Łączne roczne zapotrzebowanie na cele bytowe wynosi ok. 60 MWh, a na cele produkcyjne gospodarstwa – ok. 20 MWh. Uwzględniając potencjał dachów możliwych do wykorzystania (szczególnie ułożenie połaci względem południa) moc instalacji fotowoltaicznych wynosi 20 kW, a ich roczna produkcja sięga 20 MWh. Zestawiając roczny profil zapotrzebowania oraz generacji źródeł PV uzyskano 95% wykorzystanie energii z fotowoltaiki na potrzeby własne odbiorców mikrosieci. Roczny deficyt energii elektrycznej wynosi ok. 60 MWh, który będzie pokryty z mikroźródła biogazowego.

Przyjęto, że regulacja mikroźródła biogazowego pozwala na zbilansowanie analizowanej sieci do zera, czyli z ograniczeniem pobieranej i oddawanej energii elektrycznej (tzw. sieć semi off-grid). Skutkuje to koniecznością zastosowania zasobnika biogazu. Z tego powodu czas wykorzystania mocy maksymalnej wynosi 4000 godz., a mocy ekwiwalentnej – 6000 godz. Moc ekwiwalentna to moc elektryczna generowana w mikroźródle, dla której strumień biogazu z biogazowni jest całkowicie zużywany przez kogenerator i nie jest pobierany z zasobnika. Ze względu

na mniejsze wykorzystanie mikroźródła, cena energii wynosi 625 PLN/MWh. Średnia roczna cena energii w mikrosieci wynosi 560 PLN/MWh, natomiast uwzględniając koszt wykorzystania sieci nN, jednoskładnikowa średnia roczna cena końcowa wynosi 635 PLN/MWh. Przebiegi profili zapotrzebowania oraz niezbilansowania dla analizowanej sieci pokazano na rys. 4.18 dla czterech wybranych dni.



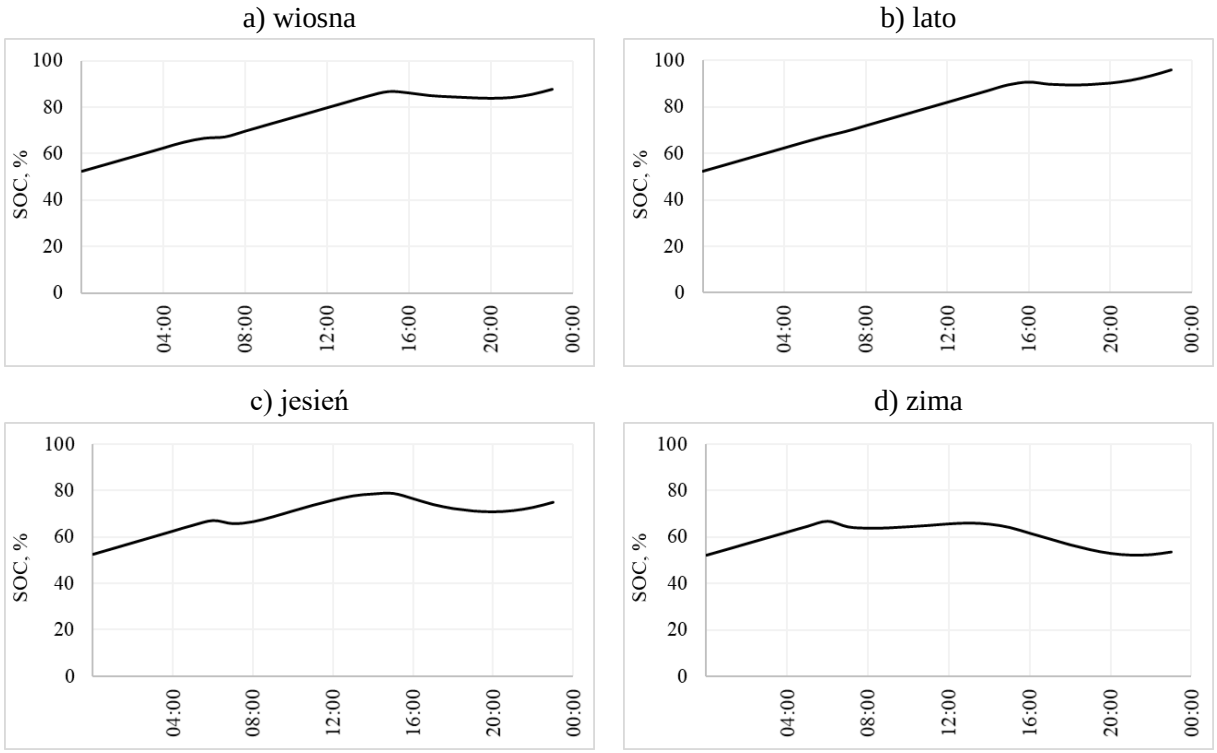
Rys. 4.18. Uśrednione godzinowe profile zapotrzebowania oraz bilansu energetycznego mikrosieci, praca w trybie semi off-grid

Fig. 4.18. Hourly average electric energy demand and energy unbalance profiles of microgrid, semi off-grid mode

Przedstawione na rys. 4.18 wykresy cen odzwierciedlają zmienną cenę lokalną w mikrosieci uwzględniając cenę generacji w mikroźródle biogazowym, źródle fotowoltaicznym oraz koszt użytkowania sieci nN. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że nie tylko możliwe jest zbudowanie spółdzielni energetycznej z mikrosiecią wykorzystująca linię nN, ale również uzyskanie konkurencyjnej ceny energii w stosunku do oferowanych taryf G11. Analizy będą kontynuowane, a ich celem będzie opracowanie modelu biznesowego funkcjonowania mikrosieci.

Na rys. 4.19 zestawiono wykresy przedstawiające przebiegi stanu napełnienia zasobnika biogazu. Przyjęta pojemność ekwiwalentna (w odniesieniu do energii

elektrycznej) wynosi 200 kWh. Dla takiej pojemności stan napełnienia nie zostaje przekroczony.



Rys. 4.19. Stan napełnienia zasobnika biogazu, praca w trybie semi off-grid
Fig. 4.19. State of charge of the biogas storage tank, semi off-grid mode

Bibliografia

1. Tyagi V., Nurul A.A., Rahim, N.A., Rahim, J.A.L., Selvaraj J.: Progress in solar PV technology: Research and achievement. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 2013, p. 443–461.
2. Chanseob Ch., Daeyoung K., Jung-Hwa O., Bonghwan K., Byeungleul L., Jonghyun L.: Surface texturing method for silicon solar cell using reactive ion etching with metal mesh. Physica Status Solidi, 211(8), 2014, p. 1844–1849.
3. Jarman J., Khalil E., Khalaf E.: Energy Analyses of Thermoelectric Renewable Energy Sources. Open Journal of Energy Efficiency, 2, 2013, p. 143–153.
4. Green M., Zhao J., Wang A., Wenham S.: Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells. Solar Energy & Solar Cells, 65, 2001, p. 9–16.
5. Glunz S.: Crystalline silicon solar cells with high efficiency. Advanced Concepts in Photovoltaics, 8, 2014, p. 1–29.
6. Domaradzki J.: Powłoki optyczne na bazie TiO_2. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
7. Dobrzański L.A., Szindler M., et al.: Silicon solar cells with Al_2O_3 antireflection coating. Central European Journal of Physics, 12(9), 2014, p. 666–670.

8. Drabczyk K., Kulesza-Matlak G., Drygała A., Szindler M., Lipiński M.: Electroluminescence imaging for determining the influence of metallization parameters for solar cell metal contacts. Solar Energy, 126, 2016, p. 14–21.
9. Musztyfaga-Staszuk M., Starowicz Z., Panek P., Socha R., Gawlińska-Nęcek K.: The influence of material parameters on optical and electrical properties of indium-tin oxide (ITO) layer. J. Phys., Conf. Ser., 1534(1), 2020, p. 1–8.
10. Chamberlain G.A.: Organic solar cells. Solar Cells, 8, 1983, p. 44–47.
11. Tang C.W.: Two-layer organic photovoltaic cel. Applied Physics Letters, 48, 1986, p. 183–185.
12. Geng Y., Ji W., Lin B., Zhu Y.: The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. Building and Environment, 121, 2017, p. 158–167.
13. Szindler M.M., Szindler M.: The structure and conductivity of polyelectrolyte based on MEH-PPV and potassium iodide (KI) for dye-sensitized solar cells. Open Physics, 15(1), 2017, p. 1022–1027.
14. Szindler M., Szindler M.M.: The effect of ZnO/NiO nanocomposite on the properties of a photoelectrode of a dye sensitized solar cel. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 15(3), 2020, p. 815–822.
15. Jarka P., Drygała A., Szindler M., Tański T., Matysiak W.: Influence of Screen Printed Nanowires/Nanoparticles TiO_2 Nanocomposite Layer on Properties of Dye-Sensitized Solar Cells. Acta Physica Polonica A, 138(2), 2020, p. 312–316.
16. Dobrzański L.A., Prokopiuk vel Prokopowicz M., Drygała A., Wierzbicka A., Lukaszkowicz K., Szindler M.: Carbon Nanomaterials Application as a Counter Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells. Archives Of Metallurgy And Materials, 62(1), 2017, p. 27–32.
17. Zhao S., Wang D.W., Amal R., Dai L.: Carbon based metal free catalysts for key reactions involved in energy conversion and storage. Advanced Materials, 31(9), 2019, 1801526.
18. Gerber I.C., Serp P.: A theory/experience description of support effects in carbon-supported catalysts. Chemical reviews, 120(2), 2019, p. 1250–1349.
19. Meier J.C., Galeano C., Katsounaros I., Witte J., Bongard H.J., Topalov A.A., Mayrhofer K.J.: Design criteria for stable Pt/C fuel cell catalysts. Beilstein journal of nanotechnology, 5(1), 2014, p. 44–67.
20. Ali S. et al.: Ni-based nano-catalysts for the dry reforming of methane. Catalysis Today, 343, 2020, p. 26–37.
21. Tomiczek B., Szindler M., Łukowiec D., Pawlyta M., Tański T.: The synthesis of Pd/Ni nanocatalyst supported by ultrasounds for low-temperature carbon dioxide methanation. Proceedings of the 6th International Conference Contemporary Problems of Thermal Engineering, 2020, p. 21–24.
22. Sobek S., Werle S.: Solar pyrolysis of waste biomass: Part 1 reactor design. Renew Energy, 143, 2019, p.1939–48. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.011.
23. Sobek S., Werle S.: Comparative Review of Artificial Light Sources for Solar-Thermal Biomass Conversion Research Applications. Ecol Chem Eng S, 26, 2019, p. 443–53. https://doi.org/10.1515/eces-2019-0033.
24. Kaczor Z., Bulinski Z., Werle S.: Numerical studies on capability to focus solar radiation with mirrors of different curvatures. Therm Sci, 23, 2019, p. 1153–62. https://doi.org/https://doi.org/10.2298/TSCI19S4153K.
25. Kaczor Z., Buliński Z., Werle S.: Mathematical Model of the Solar Pyrolysis of Biomass. J Energy Resour Technol, 142, 2020, p. 1–10. https://doi.org/10.1115/1.4046601.

26. Kaczor Z., Buliński Z., Sobek S., Werle S.: Application of inverse methodology to estimate unknown parameters of the mathematical model of biomass solar pyrolysis. Renew Energy, 163, 2021, p. 858–69. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.018.
27. Sobek S., Werle S.: Solar pyrolysis of waste biomass : A comparative study of products distribution, in situ heating behavior, and application of model-free kinetic predictions. Fuel, 292, 2021, 120365. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120365.
28. Popczyk J.: Cztery rynki elektroprosumeryzmu – odpowiedź na strukturalny kryzys 2020 (ścianę rodzącą energetyczny przełom), wyzwanie i szansa 2050. Biuletyn Rynki Elektroprosumeryzmu, 1, 2020. Energetyka, 11, 2020 (także: https://ppte2050.pl/, https://www.cire.pl/).
29. Popczyk J.: Architektura transformacyjna rynku energii elektrycznej. Listopad 2017. https://www.cire.pl, http://ppte2050.pl/
30. Khan Z.A., Jayaweera D.: Approach for forecasting smart customer demand with significant energy demand variability, 2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG), Mirpur Azad Kashmir, 2018, p. 1–5.
31. Yan G., Han T., Zhang W., Zhao S.: Short-Term Load Forecasting of Smart Grid Based on Load Spatial-Temporal Distribution, 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), Chengdu [China] 2019, p. 781–785.
32. Xue H.-R., Li L.-L., Chao K.-H., Fu C.: Short-Term Wind Power Prediction Based on Improved Chicken Algorithm and Support Vector Machine, 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 6–8 Dec. 2018, Taichung [Taiwan].
33. Popczyk J., Bodzek K., Fice M., Wereszczyński D.: Prosumencki model mikrosystemu elektroenergetycznego z mikroelektrownią μEB na rynku wschodzącym 1 energii elektrycznej. www.cire.pl, 2018.
34. Główny Urząd Statystyczny, Gospodarka ściekowa w Polsce w latach 2015–2016.
35. Popczyk J.: Transformacja energetyki. Paradygmatyczny triplet i mapa oraz trajektoria. Śląskie Wiadomości Elektryczne, 5, 2018. Ponadto: SEP – wydawnictwo okolicznościowe: 65 lat Oddziału Gliwickiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich 1953–2018, Gliwice 2018.

5. INNOWACYJNE TECHNOLOGIE I ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ

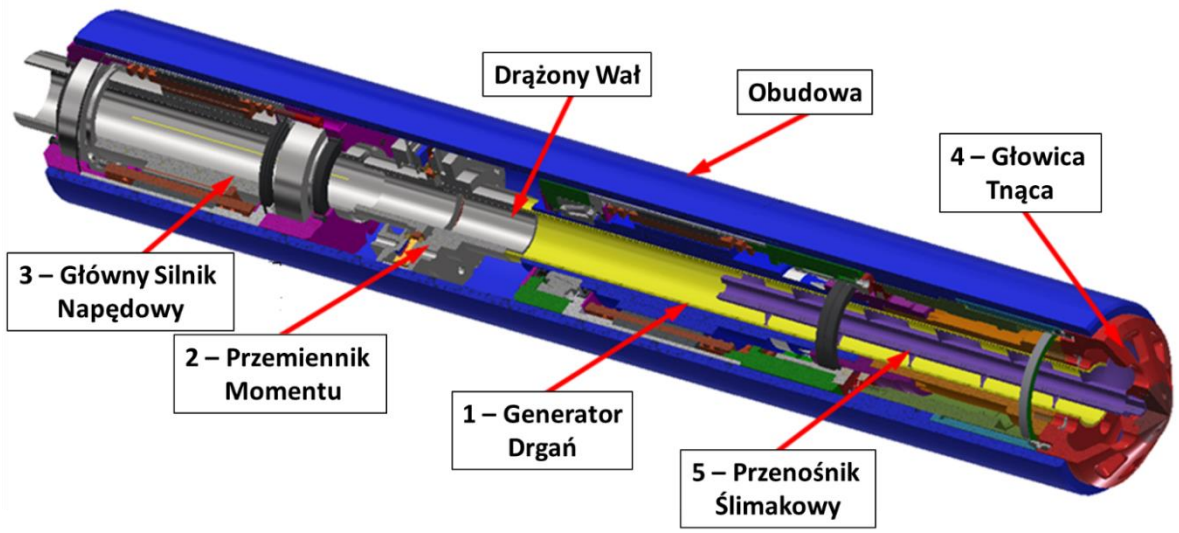
5.1. Wprowadzenie

Innowacyjne technologie czasami są definiowane jako nauka stosowana do celów praktycznych. W dzisiejszych czasach, gdy szybkość rozwoju i badań jest tak duża, należy uwzględniać zalety technologii i innowacji, które mają ogromny wpływ na życie człowieka. Innowacyjne technologie wytyczają ścieżkę dla rozwoju i usprawniania przemysłu, czyniąc go bardziej efektywnym i co ważne, bezpieczniejszym dla środowiska. Gwarantem ochrony środowiska w obecności wprowadzania innowacji technologicznych jest realizacja ścieżki zrównoważonego rozwoju zarówno przemysłu i wprowadzanych innowacji przy równoczesnym utrzymaniu wysokich standardów ochrony klimatu, gospodarki odpadami, zarządzania procesami.

W podrozdziałach przedstawiono rezultaty prac dotyczące szerokiego spektrum prac badawczych związanych z wprowadzaniem innowacyjnych technologii, których celem jest rozwój, udoskonalanie lub wprowadzanie nowych rozwiązań w odniesieniu do istniejących technologii. Przedstawiona tematyka poprzez rozwiązania z zakresu przetworników elektromechanicznych i użytkowania energii, układy sensorowe w różnej skali, pomiarowe w skali mikro i nano, fotoniczne struktury sensorowe, zagadnienia z zakresu zastosowań akustyki w urządzeniach chłodniczych, a także optymalizacja kształtu budowli, prezentują propozycje, których celem jest poprawa i wzbogacenie istniejących rozwiązań technologicznych. Te rezultaty mogą być również wskazaniem kierunku rozwoju technologii dla utrzymania wysokich standardów integracji rozwoju technologicznego z ochroną środowiska.

5.2. Metoda wiercenia wykorzystującego drgania skrętne generowane elektromagnetycznie

W ramach projektu INDIRES, współrealizowanego na Politechnice Śląskiej w ramach europejskiego projektu w obszarze Funduszy Badawczych Węgla i Stali [1, 2], przez zespół pracowników z Katedry Mechatroniki (Wydział Elektryczny), zaprojektowano nowy, innowacyjny typ wiertnicy. Nowa wiertnica składa się z trzech głównych elementów: elektromagnetycznego generatora drgań skrętnych, przemiennika momentu obrotowego i silnika napędowego. Ponadto w jej skład wchodzi wewnętrzny przenośnik ślimakowy i głowica tnąca. Na rys. 5.1 pokazano przekrój przez wiertnicę, gdzie: (1) oznacza generator drgań skrętnych, (2) – indukcyjny przemiennik momentu obrotowego, (3) – główny silnik napędowy, (4) – głowicę tnącą, i (5) – ślimak przenośnika.

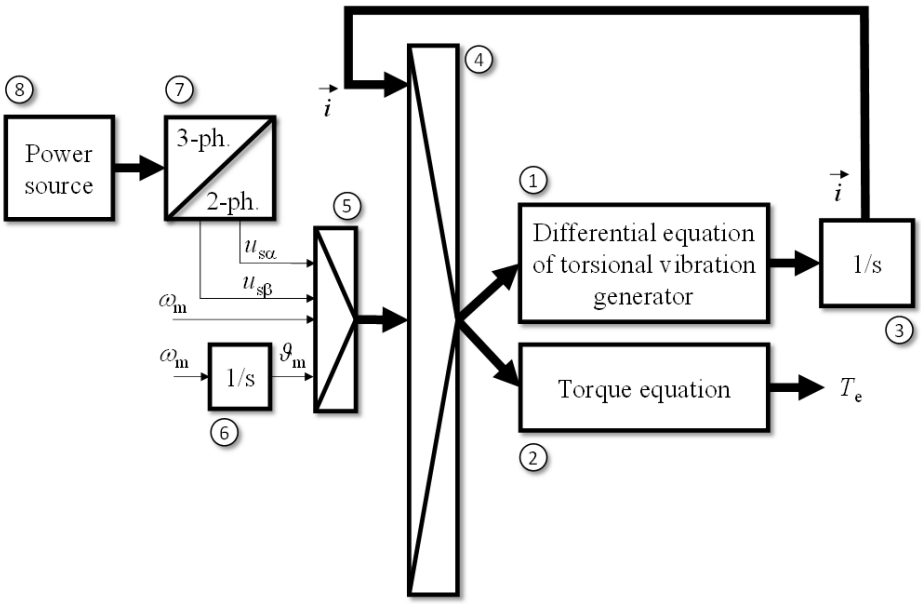


Rys. 5.1. Przekrój przez układ wiertnicy
Fig. 5.1. Cross section of drilling rig

System wiertnicy można podzielić ze względu na prędkość roboczą jej elementów na obszar dużej stałej prędkości i obszar zmiennej prędkości [2, 3]. Główny silnik napędowy pracuje w obszarze dużej prędkości, generuje główny moment napędowy dla głowicy tnącej i jednocześnie napędza wewnętrzny przenośnik ślimakowy. Indukcyjny przemiennik momentu obrotowego działa pomiędzy obszarami o dużej i zmiennej prędkości, i jest odpowiedzialny za bezkontaktowe przenoszenie momentu napędowego na generator drgań skrętnych i głowicę tnącą.

Elektromagnetyczny generator drgań skrętnych

W przeprowadzonych w projekcie INDIRES badaniach, oprócz modeli polowych i rysunków konstrukcyjnych generatora drgań skrętnych sformułowano również układy równań różniczkowych, do opisu różnych stanów dynamicznych generatora. Pozwalają one na analizę generowanego przebiegu chwilowego momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej wirnika. Możliwe jest również zbadanie wpływu częstotliwości napięcia zasilającego na zawartość harmonicznych momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez generator drgań skrętnych. Bardzo istotną cechą opracowanego modelu jest możliwość analizy wpływu zmian prędkości obrotowej wirnika generatora oraz częstotliwości napięcia i amplitudy napięcia zasilania generatora na wartość generowanego momentu obrotowego i jego harmonicznych. Na rys. 5.2 przedstawiono ogólny schemat rozwiązywania modelu matematycznego w formie równań różniczkowych zwyczajnych elektromagnetycznego generatora drgań skrętnych. Schemat ten pozwala na wygodną implementację modelu matematycznego w nowoczesnych programach komputerowych, takich jak Matlab czy Scilab.



Rys. 5.2. Schemat blokowy rozwiązywania modelu matematycznego elektromagnetycznego generatora drgań skrętnych [3]
Fig. 5.2. Block schema of solving the mathematical model of electromagnetic torsional vibration generator [3]

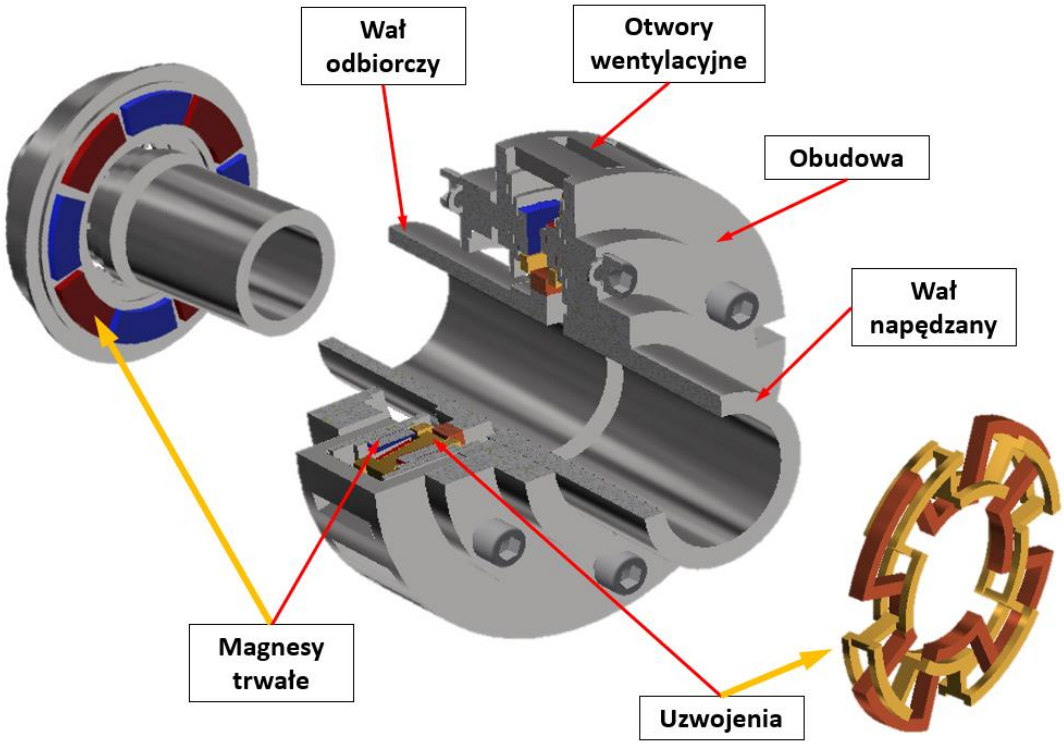
W bloku oznaczonym „1” należy zapisać lewą stronę równań różniczkowych zwyczajnych opisujących zachowanie dynamiczne prądów stojana i wirnika, równanie momentu obrotowego należy wpisać do bloku oznaczonego „2”. W bloku całki –

oznaczonej „3” – całkuje się równania różniczkowe, a wyniki całkowania kierowane są do multipleksera (oznaczonego „4”) – są to wyniki całkowania w danych kroku niezbędne w kolejnym etapie całkowania. Do multipleksera „4” wchodzi również wektor utworzony przez multiplekser „5”, na który składa się wektor napięcia stojana w układzie współrzędnych αβ (układ współrzędnych związany ze stojanem) oraz prędkość kątowa i przemieszczenie kątowe (blok „6”) wirnika. Źródło zasilania jest ujęte blokiem oznaczonym numerem „8”, a napięcia reprezentowane w naturalnym trójfazowym układzie współrzędnych są przekształcane przez transformację Clarka-Parka w bloku oznaczonym cyfrą „7” do dwufazowego układu współrzędnych αβ. Opracowany model matematyczny generatora drgań skrętnych w postaci równań różniczkowych zwyczajnych będzie również przydatny w procesie tworzenia systemów sterowania wiertnicą. Systemy te mogą być oparte na standardowych metodach ze sterowaniem skalarnym lub wektorowym. Wydaje się jednak bardzo obiecujące opracowanie metody sterowania generatorem, która zapewni pożądaną zawartość harmonicznych momentu obrotowego przy stałej prędkości wiercenia.

Indukcyjny przemiennik momentu

Ważnym elementem oddzielającym w sposób mechaniczny, ale sprzęgającym elektromagnetycznie generator drgań skrętnych z głównym silnikiem napędowym, jest indukcyjny przemiennik momentu obrotowego. Indukcyjny przemiennik momentu obrotowego (Induction Torque Converter – ITC) jest urządzeniem elektromechanicznym, które zamienia energię mechaniczną na energię mechaniczną za pomocą pola elektromagnetycznego wzbudzanego przez zespół magnesów trwałych [2–4], które oddziałują z polem elektromagnetycznym wzbudzonym przez prąd indukowany (w wyniku obrotu magnesów trwałych) w uzwojeniach. Wprowadzona energia mechaniczna jest dostarczana przez główny silnik napędowy, ruch obrotowy generuje wirujące pole elektromagnetyczne – energia mechaniczna (wirujących mas) jest zamieniana na energię zmagazynowaną w wirującym polu magnetycznym magnesów trwałych. To wirujące pole magnetyczne pobudza przepływ prądu w zwartych uzwojeniach indukcyjnego przemiennika momentu obrotowego, a w końcu prądy te wzbudzają dodatkowe pole magnetyczne, które oddziałuje z wirującym polem magnetycznym magnesów trwałych. Ta interakcja zmusza zestawy uzwojeń do ruchu – energia zmagazynowana w polach magnetycznych jest ponownie przekształcana w energię mechaniczną (ruchu uzwojeń).

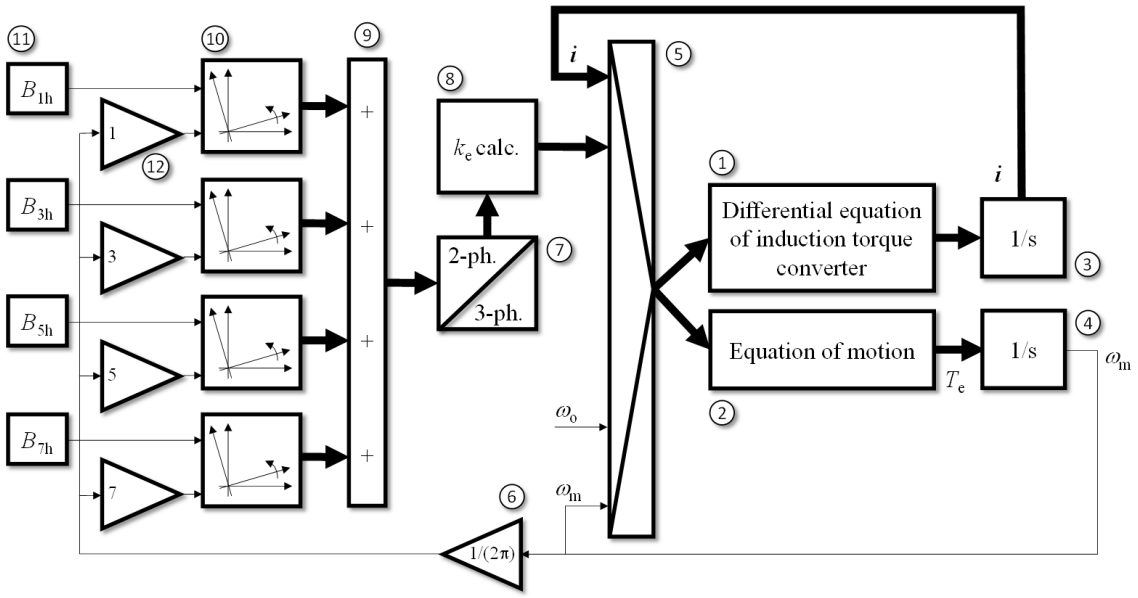
Zadaniem indukcyjnego przemiennika momentu jest przeniesienie momentu napędowego z głównego silnika napędowego bez kontaktu mechanicznego, ale tylko poprzez pole magnetyczne sprzęgające tarczę z magnesami trwałymi (obwodem wzbudzenia) oraz tarczę z uzwojeniami (element odbiorczy). Skutkuje to znaczną redukcją drgań poprzez wprowadzenie tłumienia pola magnetycznego, które może być przenoszone z generatora na silnik napędowy. Dodatkowo jest to element zabezpieczający główny silnik napędowy przed zablokowaniem w przypadku zablokowania głowicy tnącej i generatora drgań skrętnych. Jest to możliwe dzięki braku sztywnego połączenia mechanicznego oraz sprzężeniu układu wzbudzenia i elementu odbiorczego polem magnetycznym. Na rys. 5.3 przedstawiono elementy przemiennika momentu obrotowego: układ wzbudzenia (1), element odbiorczy (2), wałek napędzany (3), wał wyjściowy (4), magnesy trwałe (5), uzwojenia (6). Przedstawiony na rysunku przemiennik momentu obrotowego można rozbudować o dodatkowe tarcze, dzięki czemu możliwe jest zwiększenie wartości przenoszonych mocy i momentów. Tego typu rozwiązanie pozwala na skalowanie konwertera w zależności od potrzeb.



Rys. 5.3. Przekrój przez indukcyjny przemiennik momentu [3]
Fig. 5.3. View of cross-section of induction torque converter [3]

Model matematyczny ITC sformułowano w dwóch krokach: krok 1 – należało obliczyć uśrednione wartości gęstości strumienia magnetycznego w szczelinie

powietrznej, wynik ten posłużył do obliczenia tzw. współczynnika napięcia indukowanego, krok 2 – sformułowano równania różniczkowe zwyczajne dla uzwojenia elementu odbiorczego. Został sformułowany jako tzw. model obwodowy. Na rys. 5.4 przedstawiono ogólny schemat rozwiązywania równań różniczkowych indukcyjnego przemiennika momentu – modelu obwodowego. Prawe strony równań różniczkowych są umieszczane w bloku oznaczonym „1" i „2" i całkowane w blokach „3" i „4", a wyniki całkowania podawane są w pętli sprzężenia zwrotnego do multipleksera „5". Obliczone w bloku „8" wartości współczynników napięcia indukowanego ke oraz wartość prędkości kątowej ωm obwodu wzbudzenia również wchodzą do multipleksera „5". W bloku oznaczonym przez „11" zadawane są amplitudy harmonicznych gęstości strumienia magnetycznego. We wzmacniaczu „6" obliczana jest częstotliwość obrotowa i jest ona wartością wejściową dla wzmacniaczy „12". Oba zestawy wielkości są niezbędne do obliczenia zmiennej w czasie składowej strumienia magnetycznego w 2-osiowych układach współrzędnych „10", a następnie do obliczenia 3-fazowych przebiegów strumienia magnetycznego (blok „7").

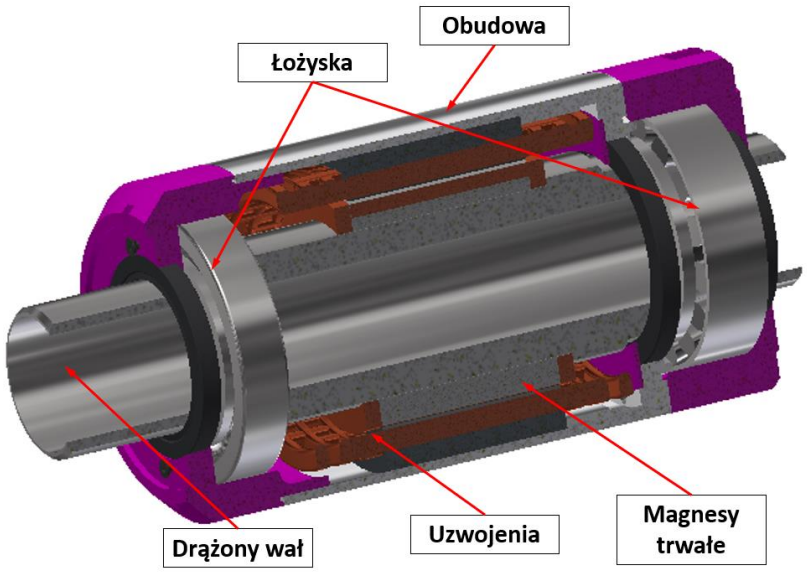


Rys. 5.4. Schemat blokowy rozwiązywania modelu matematycznego indukcyjnego przemiennika momentu [3, 4]
Fig. 5.4. Block schema of solving the mathematical model of induction torque converter [3, 4]

Główny silnik napędowy

Trzecim elementem wiertnicy jest główny silnik napędowy [5]. Silnik ten został zaprojektowany z wykorzystaniem magnesów trwałych i można go zaklasyfikować jako silnik synchroniczny z magnesami trwałymi – rodzaj przetwornika

elektromechanicznego. Tego rodzaju przetworniki (w przypadku zamiany energii elektrycznej na energię mechaniczną – silniki elektryczne) w których stosowane są uprzednio namagnesowane magnesy trwałe, posiadają jedno niekontrolowane źródło pola magnetycznego, związane z magnesami trwałymi. Drugim źródłem pola magnetycznego jest uzwojenie zasilane energią elektryczną. Pole magnetyczne wytwarzane przez uzwojenie może być polem stałym lub zmiennym w czasie, przy czym wartość pola magnetycznego określana jest przez parametry układu zasilającego. W przypadku silników trójfazowych prądu przemiennego (np. silników synchronicznych) polem wytwarzanym przez uzwojenie jest pole wirujące o prędkości obrotowej zależnej od częstotliwości źródła zasilania. Oddziaływanie pola magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenie i pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy jest źródłem elektromechanicznego momentu obrotowego (energii mechanicznej) wytwarzanego przez silnik. Silnik ten wytwarza niezbędny moment napędowy, aby obrócić głowicę tnącą w żądanym kierunku i napędzać przenośnik ślimakowy. Uzwojenia silnika są wykonane w taki sam sposób jak uzwojenia generatora momentu obrotowego, tj. mają taką samą liczbę par biegunów, liczbę faz i zajmują taką samą liczbę żłobków. Takie podejście znacznie obniży koszty prototypowania w przyszłości, ponieważ stojany i uzwojenia stojanów są takie same w generatorze drgań skrętnych, jak i w głównym silniku napędowym. Rysunek 5.5 przedstawia główne elementy silnika: uzwojenia stojana, wał wirnika, magnesy trwałe), łożyska.



Rys. 5.5. Przekrój przez główny silnik napędowy [5]
Fig. 5.5. View of cross-section of main drive motor [5]

Podsumowanie

Mając na uwadze, że podczas realizacji projektu została opracowana kompletna dokumentacja techniczna wiertnicy oraz zostały sformułowane modele matematyczne pola i obwodu magnetycznego, zasadne jest przejście do kolejnego etapu czyli budowy prototypu. Oprócz zbudowania prototypu wiertnicy, dzięki wyprowadzonym modelom matematycznym możliwe będzie również przygotowanie koncepcji układów sterowania dla tak złożonego obiektu.

5.3. Fotoniczne i światłowodowe niskokoherentne, interferencyjne czujniki chemiczne

Wstęp

Dynamiczny i ciągły rozwój cywilizacji niesie za sobą skutki uboczne w postaci szeregu zagrożeń. Pogłębiająca się globalna świadomość czynników wpływających na zdrowie i jakość życia człowieka, poparta szeregiem długofalowych badań, wymusza poszukiwanie nowych materiałów i technologii sensorowych, które są w stanie sprostać aktualnym i przewidywanym wyzwaniom, przed którymi obecnie stoi nasza cywilizacja. Niewątpliwie do takich technik należą między innymi fotoniczne technologie sensorowe.

Głównym celem prowadzonych badań było opracowanie efektywnych, fotonicznych, niskokoherentnych struktur sensorowych o konfiguracji interferometru Fabry-Perota. Struktury zostały zaprojektowane do detekcji i pomiaru wodoru (H_2) i wilgotności względnej (RH%) w konfiguracji struktur światłowodowych oraz amoniaku (NH_3) w konfiguracji planarnej, fotonicznej struktury warstwowej. W wyniku prowadzonych prac badawczych wyselekcjonowano materiały receptorowe, wytworzono serie ww. struktur oraz przeprowadzono charakteryzację i badania właściwości czujnikowych.

Zalety fotonicznej i światłowodowej techniki sensorowej

Fotoniczne, a zwłaszcza światłowodowe struktury czujnikowe do zastosowań w sensoryce analitów gazowych, stały się przedmiotem badań i prac eksperymentalnych ze względu na swoje szczególne cechy. Czujniki światłowodowe posiadają wiele zalet w stosunku do innych czujników. Wiele z tych zalet zostało

opisanych w pracach [6–11]. Główne zalety światłowodowych czujników wynikają z faktu, że czynnikiem sondującym, oddziaływującym bezpośrednio lub pośrednio z badanym analitem gazowym, jest fala elektromagnetyczna. Dzięki temu do zalet takich rozwiązań należy:

- możliwość transmitowania użytecznego sygnału pomiarowego na duże odległości z wykorzystaniem techniki światłowodowej,
- usunięcie energii elektrycznej ze środowiska pomiarowego, w którym pracuje czujnik, co istotnie polepsza bezpieczeństwo stosowania światłowodowych sensorów np. w środowisku wybuchowym i łatwopalnym,
- istotne ograniczenie rozmiarów fizycznych i masy czujników,
- relatywnie łatwiejsze multiplikowanie punktów i kanałów pomiarowych oraz tworzenie sieci czujników w tzw. sensoryce rozłożonej w porównaniu do konkurencyjnych rozwiązań,
- możliwość konstruowania układów sensorowych odpornych na zakłócenia elektromagnetyczne.

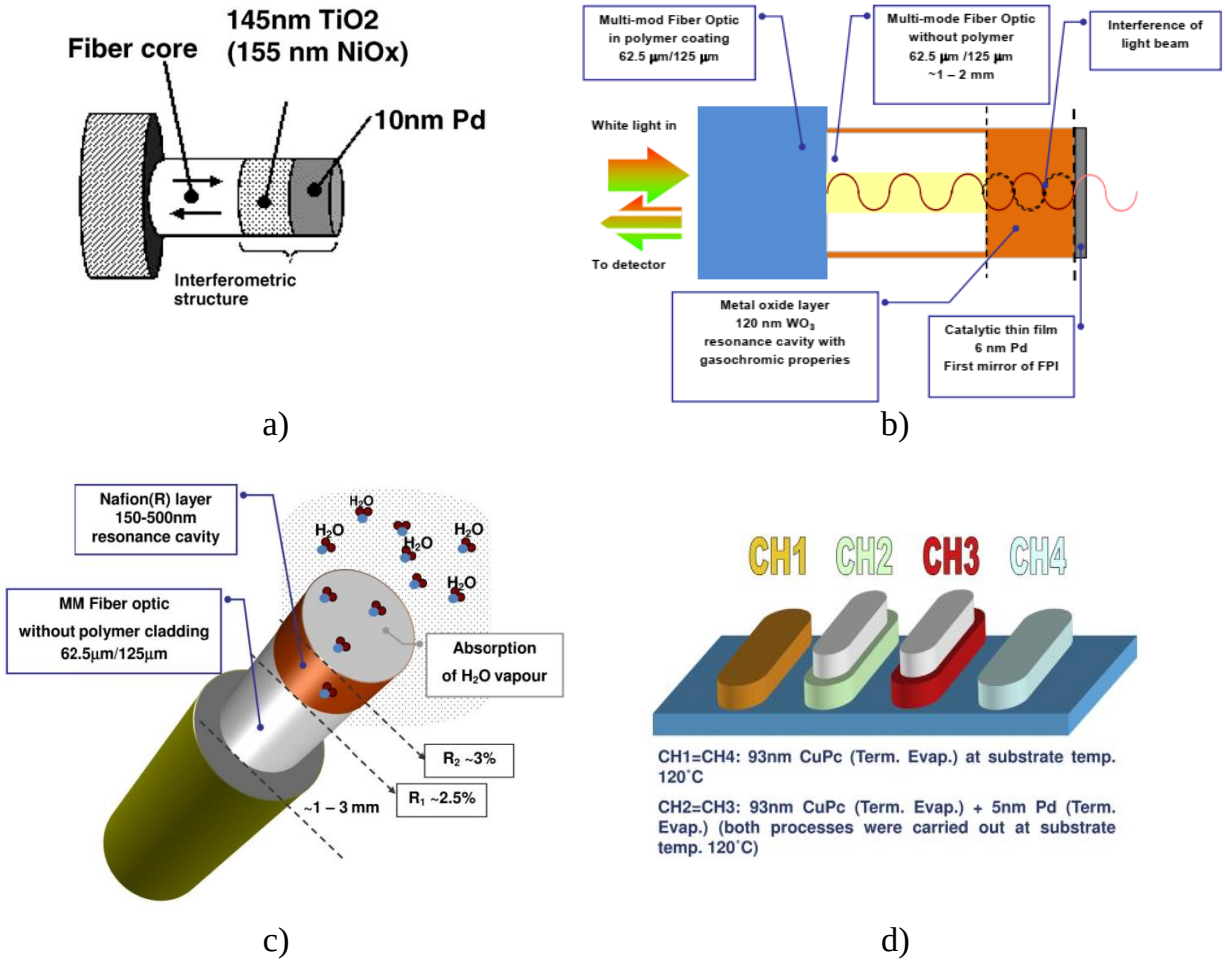
Dodając do tych zalet światłowodowych sensorów, możliwości miniaturyzacji i dywersyfikacji źródeł i detektorów światła, technologia zyskuje nowe, dotychczas nieuwzględniane obszary aplikacyjne chemooptycznej sensoryki.

Idea niskokoherentnego interferencyjnego czujnika gazu

Idea światłowodowych sensorów przedstawionych w pracach [6–11], opiera się na warstwowej konstrukcji struktury interferometru Fabry-Perota (FPI) (rys. 5.6).

Struktury FPI są bardzo wrażliwe na modulacje i zmiany parametrów wnęki rezonansowej, czyli przestrzeni znajdującej się między zwierciadłami interferometru. W rozwiązaniu światłowodowym, struktury FPI charakteryzują się kompaktowymi rozmiarami. W kierunku propagacji światła – rozmiary struktur mogą mieć wymiar rzędu kilkuset nanometrów. W przedstawionych badaniach, głowica jest warstwową strukturą, naniesioną na koniec odsłoniętego włókna światłowodowego, której parametry optyczne i geometryczne są tak dobrane aby spełniała ona warunek interferencji dla pomiarowego zakresu długości fal (rys. 5.6). Wnęka rezonansowa jest warstwą wykonaną z materiału aktywnego (H_2 – chemochromowego tlenku metalu przejściowego [6–8], RH%, NH_3 – Nafionu [9–11]), który wskutek absorpcji badanego gazu zmienia swoje parametry. Pierwsze zwierciadło (od strony włókna) jest zwierciadłem półprzepuszczalnym, które jest realizowane przez kontrast dielektryczny między światłowodem (SiO_2) i materiałem wnęki. Drugim zwierciadłem, w przypadku

czujników H_2, jest cienka, metaliczna warstwa katalityczna wykonana z palladu (Pd), niezbędna do dysocjacji wodoru [6–8] (rys. 5.6a i b). W przypadku czujnika RH% i NH_3 rolę zwierciadła, tak jak w przypadku pierwszego zwierciadła, pełni kontrast dielektryczny granicy fazowej warstwy wnęki rezonansowej i środowiska pomiarowego (najczęściej powietrze). Głowicę sensorową opcjonalnie można wyposażać w dodatkową polimerową warstwę, zabezpieczającą strukturę sensorową przed wpływem czynników środowiskowych, ale jednocześnie umożliwiającą przepuszczenie badanego analitu [7].



Rys. 5.6. Schematyczne konfiguracje niskokoherentnych interferencyjnych struktur sensorowych do detekcji analitów gazowych: a) struktury do detekcji wodoru w zakresie LEL z pracy [6], b) do detekcji wodoru w obecności węglowodorów [8], c) do detekcji i pomiaru wilgotności względnej powietrza [9, 10] i amoniaku [11], d) objętościowa, planarna struktura czterokanałowa dedykowana do pomiaru amoniaku [12]

Fig. 5.6. Schematic presentation of the concept of the low-coherence (white-light) interferometry FP sensors: a) structures for hydrogen detection in the range of LEL from work [6], b) for the detection of hydrogen in the presence of hydrocarbons [8], c) for the detection and measurement of relative humidity [9, 10] and ammonia [11], d) volumetric, planar four-channel structure dedicated to the measurement of ammonia [12]

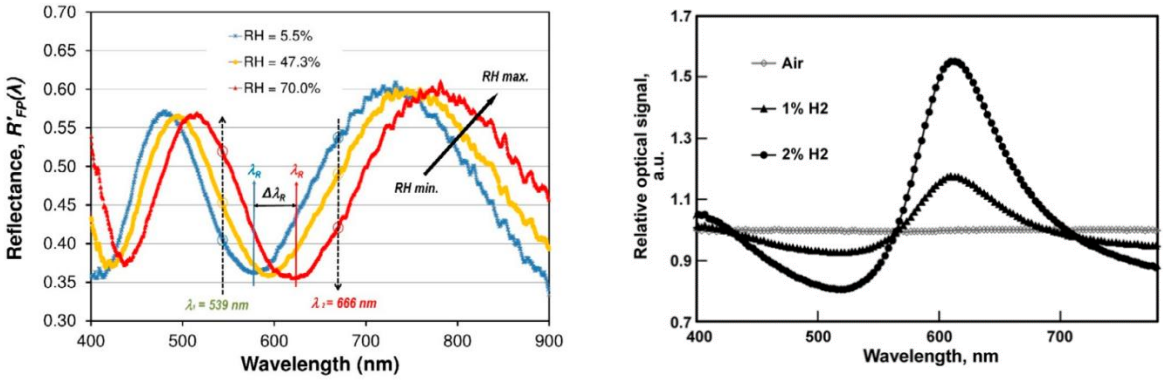
Do analizy zmian parametrów struktur FPI wyposażonych w aktywne fizykochemicznie receptory, zaproponowano metodę niskokoherentnej interferometrii (ang. *low-coherence interferometry* – LCI lub *white-light interferometry* – WLI) [9, 10]. W przeciwieństwie do klasycznej interferometrii, w której często występuje niejednoznaczność wyniku pomiaru, metoda LCI pozwala relatywnie łatwo uzyskać jednoznaczny wynik pomiaru. Przy zastosowaniu światłowodowej odmiany LCI metoda ta pozwala dodatkowo wykonywać pomiary zdalne, których wyniki są niezależne od zakłóceń czynników zewnętrznych. Głównym celem interferometrii jest pomiar różnicy dróg optycznych (ang. *optical path difference* – OPD) wiązek interferujących i określenie wartości wielkości fizycznych, które powodują zmiany OPD.

Metodologia analizy sygnału optycznego i wyniki badań

Relatywnie niskie współczynniki odbicia światła na granicach fazowych, rzędu kilku procent (np. 2–3% w pracach [9–11]) okazały się wystarczające dzięki zaproponowaniu metodologii rejestracji sygnału pomiarowego w postaci unormowanego interferogramu struktury FPI. W pracach [6–8] sposób normowania polegał natomiast na rejestracji względnego sygnału dla gazowego analitu odniesienia (powietrze syntetyczne lub azot). Tego typu normowanie gwarantuje uwypuklenie zmian w widmie interferencyjnym wywołanych obecnością badanego analitu i jego ilością. Na rys. 5.7 przedstawiono charakterystyki dla dwóch sposobów normowania sygnału optycznego. Charakterystyki wskazują w jakim zakresie i w jaki sposób badany analit jest w stanie wpływać na widmowe cechy unormowanego sygnału pomiarowego.

Ważnym atutem przedstawionych technik pomiarowych jest możliwość różnorodnej analizy spektralnego interferogramu. W pracach [6–12] wykorzystano kilka metod do uzyskania użytecznego sygnału niosącego informację o stężeniu lub koncentracji badanego analitu. Metody te dotyczą zarówno spektralnej dziedziny sygnału pomiarowego [9, 11], jak i jego dziedziny natężeniowej [6–10]. W zakresie widmowej analizy, rejestracji podlegała spektralna pozycja arbitralnie wybranego minimum lub maximum intrferogramu. Bardziej praktyczny wymiar, niewymagający rejestracji szerokiego zakresu widmowego a co za tym idzie brak konieczności stosowania w układzie pomiarowym spektrometru, posiada podejście amplitudowe. W przypadku tego rodzaju struktur interferencyjnych, jednym z lepszych rozwiązań jest metoda oparta na jednobarwowej analizie sygnału tzw. metoda punktu Q. Metodę

tą zaimplementowano w pracy [8]. Metoda analizy punktu Q jest doskonale znana z prac dotyczących interferometrycznej sensoryki fizycznej (np. czujników ciśnienia czy temperatury) opartych na strukturach Fabry-Perota (F-P). Punkt Q interferometru F-P znajduje się pośrodku zakresu liniowego prążków interferencyjnych, gdzie krzywa ma największe nachylenie; punktem pracy jest długość fali źródła (najczęściej laserowego) odpowiadająca długości fali w prążkach interferencyjnych. Czujniki mają niską czułość natężeniową na szczytach lub w dolinach prążków. Z kolei najmniejsze zniekształcenie sygnału i najwyższą czułość natężeniową można uzyskać, jeśli punkt pracy wpisuje się w Q-punkty interferometru F-P. Na rys. 5.8 przedstawiono ideę metody Q-punktu na przykładzie struktury FPI wykonanej z Nafionu w pracy [9].



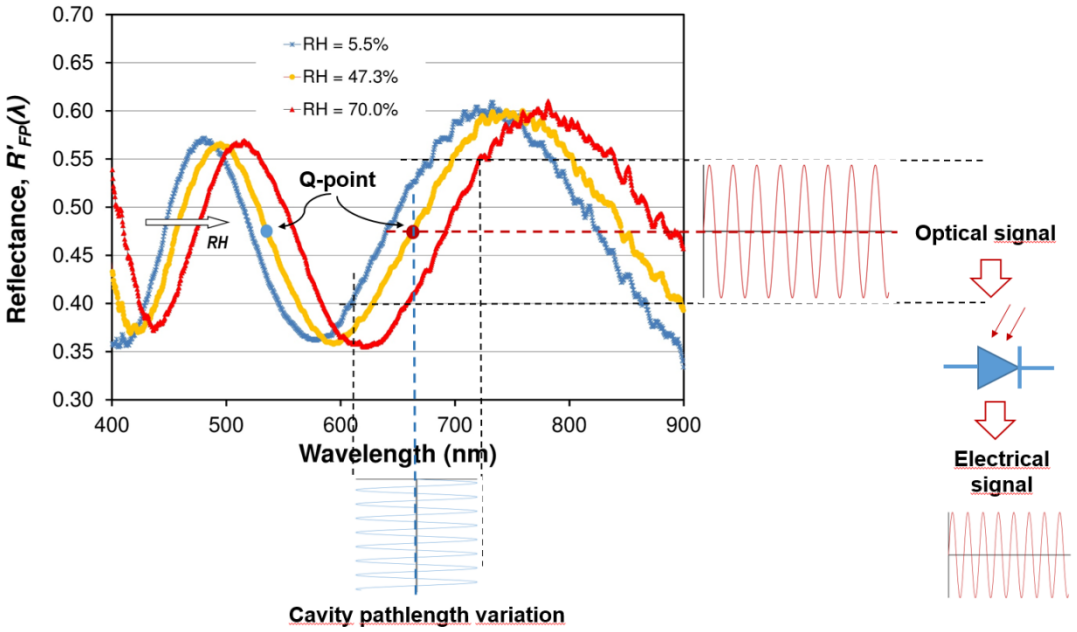
a) b)

Rys. 5.7. Unormowany sygnał optyczny – interferogram – zarejestrowany dla różnych struktur FPI. Pokazano różny sposób rejestracji wpływu analitu gazowego na względny sygnał optyczny: a) struktura Nafionu światłowodowego higrometru [9], b) światłowodowa struktura Pd/NiOx do detekcji wodoru w zakresie LEL [6]

Fig. 5.7. Normalized optical signal – interferogram – registered for various FPI structures. A different way of recording the effect of a gas analyte on a relative optical signal is shown: a) Nafion structure of a fiber optic hygrometer [9], b) Pd/NiOx optical fiber structure for hydrogen detection in the LEL range [6]

Tego typu podejście ma jednak kilka wad, z których najbardziej istotną jest nieodporność na czasowe fluktuacje mocy optycznej źródła światła zastosowanego w układzie pomiarowym. Dlatego wynikiem prac nad metodologią uzyskania użytecznego sygnału pomiarowego o poprawionych własnościach, był rozwój natężeniowych analitycznych metod pochodnych. W pierwszej kolejności, do analizy tego rodzaju struktur FPI opracowano metodę dwubarwową. Polega ona na wyborze niejako dwóch punktów Q struktury w obrębie tego samego prążka interferencyjnego (rys. 5.8). Przesunięcie interferogramu w dziedzinie długości fali (rys. 5.7a), będącego skutkiem oddziaływania badanego analitu na strukturę FPI, powoduje jednoczesny wzrost natężenia sygnału w jednym punkcie Q i spadek sygnału w drugim punkcie Q.

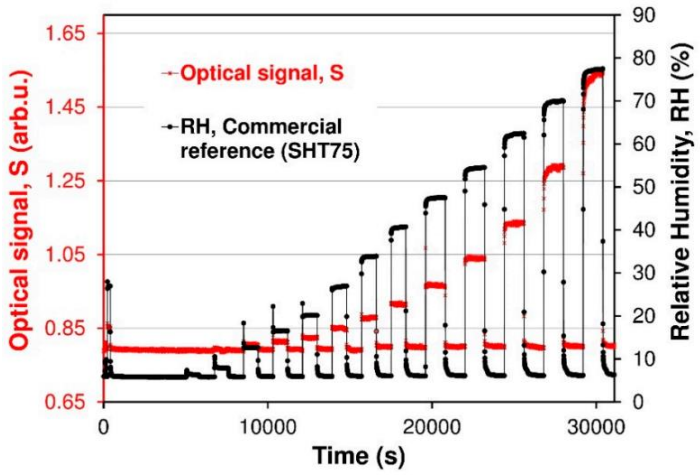
Użyteczny sygnał pomiarowy jest ilorazem sygnałów w punktach Q wybranych dla dwóch różnych długości fali. Metoda ta jest odporna na fluktuacje optycznej mocy źródła. Szersza analiza wad i zalet jest przedstawiona w pracy [9]. Opisana metoda pomiarowa oraz konstrukcja światłowodowych struktur FPI do detekcji i pomiaru wodoru stały się przedmiotem krajowego patentu nr 204 016.



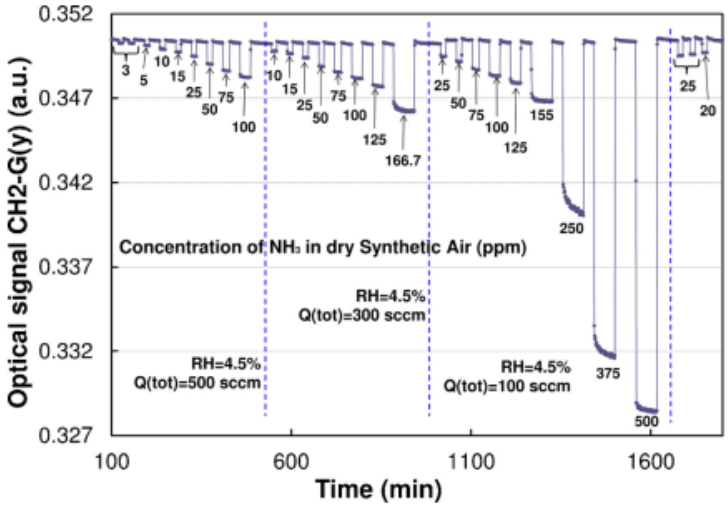
Rys. 5.8. Metodologia uzyskania sygnału pomiarowego z wykorzystaniem metody Q-punktu na przykładzie interferogramu zarejestrowanego w pracy [9]
Fig. 5.8. Methodology of obtaining the measurement signal using the Q-point method on the example of the interferogram recorded in the work [9]

Kolejnym etapem badań i rozwinięciem metod analizy sygnału w aktywnych strukturach FPI było zaimplementowanie detekcji wielobarwowej. Metoda ta opiera się na idei detekcji barwy interferencyjnej. Zmiana koloru interferencyjnego jest pochodną zmiany rozkładu prążków interferencyjnych w zakresie badanego widma Vis-NIR wywołanego fizykochemicznym oddziaływaniem analitu na strukturę FPI. Dynamiczny rozwój optoelektroniki, zaowocował między innymi pojawieniem się na rynku relatywnie tanich przyrządów (detektorów) do pomiaru koloru. Przyrządy tego typu umożliwiają analityczne określenie koloru poprzez pomiar współrzędnych barwowych. W pracy [12] zaproponowano konfigurację dwuwarstwowej struktury FPI Pd/CuPc w czterokanałowym układzie pomiarowym do pomiaru amoniaku. Strukturę skonfigurowano w taki sposób aby fizykochemiczne cechy receptora – ftalocyaniny miedzi wzmocnić fizycznymi cechami struktury interferencyjnej. Skutkiem tej realizacji było zintensyfikowanie zmian barwy badanej struktury. Sygnałem użytecznym w tym rozwiązaniu jest wartość „zielonej” współrzędnej barwowej G(y)

(wielkość względna). Przedstawione w pracy [12] wyniki wykazały, że możliwe jest skuteczne połączenie opisanej metody detekcji z odpowiednio zaprojektowaną optoelektroniczną strukturą sensorową. Praca [12] zawiera szeroką analizę zarówno metody pomiarowej opartej na pomiarze koloru, jak i metodykę przygotowania struktur wraz z ich wieloparametrową charakterystyką właściwości. Na rys. 5.9 przedstawiono przykłady dynamicznych sygnałów odpowiedzi czujników pracujących w trybie dwubarwowej [9] i wielobarwowej detekcji [12] gazowych analitów z wykorzystaniem fotonicznych struktur sensorowych.



a)



b)

Rys. 5.9. Przykłady sygnałów odpowiedzi czujników na bazie struktur FPI: a) dwubarwowa detekcja w strukturze światłowodowego higrometru [9], b) wielobarwowa detekcja w strukturze Pd/CuPc do pomiaru NH_3 [12]

Fig. 5.9. Sensor response signals of FPI structures: a) two-color detection in the fiber optic structure of the hygrometer [9], b) multi-color detection in the Pd/CuPc structure for NH_3 measurement [12]

Podsumowanie

Przedstawione fotoniczne techniki sensorowe wraz z metodami analizy optycznych sygnałów interferencyjnych mogą być z powodzeniem implementowane do analizy struktur, dla których charakteryzujący je interferogram nie zawiera zbyt dużej ilości prążków interferencyjnych. Ograniczenie ilości prążków interferencyjnych w zakresie badanego widma, niesie ze sobą zalety w postaci łatwiejszej analizy charakterystycznych cech interferogramu. Z badań wynika, że dobrym kryterium, z punktu widzenia analizy sygnału interferencyjnego, jest rejestracja w zakresie badanego widma, jednego maksimum (lub minimum) interferencyjnego. Skutkuje to ograniczeniem grubości warstwy wnęki rezonansowej struktur FPI do rozmiarów rzędu 100 nm – 500 nm, w zależności od rodzaju materiału wnęki rezonansowej. W takich warunkach analiza jest mniej czuła na tzw. przełączanie się prążków interferencyjnych. Natomiast z drugiej strony, potencjalne niedoskonałości procesu technologicznego wytwarzania struktur (zwłaszcza technologie z fazy ciekłej), prowadzące do fluktuacji grubości wnęki rezonansowej, nie wymuszają zmian zakresu widmowego w analizie bazującej na poszukiwaniu maksimum (lub mnimum), bądź też krytycznych zmian wyboru długości fal (wymiana źródeł światła) w natężeniowej analizie dwubarwowej.

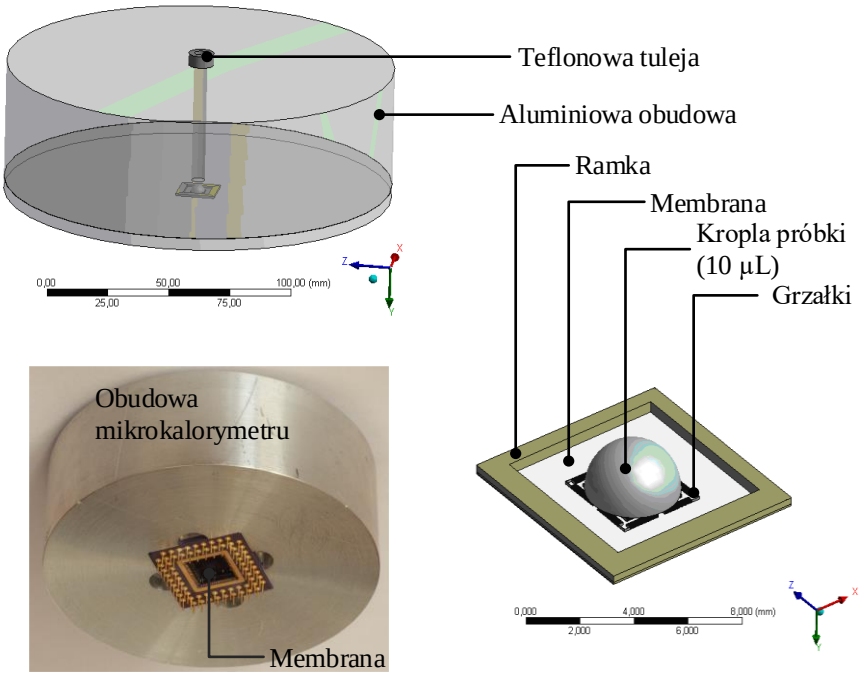
5.4. Urządzenia dla pomiarów cieplnych w skali mikro i nano

Dla celów kontroli, sterowania, monitorowania i optymalizacji procesów, mikroskopowe modele są korzystne, ponieważ mają dość prostą strukturę, ograniczoną liczbę elementów modelu i jego parametrów. Wynika to z możliwości bezpośredniego zastosowania równań bilansowych. Pomiary na poziomie mikroskopowym umożliwiają przygotowywanie modeli matematycznych na podstawie macierzy zawierających informację o kinetyce i bilansie masy oraz energii dla poszczególnych reakcji. Prezentowane urządzenia umożliwiają takie zastosowania jak: pomiar strumienia ciepła na poziomie kilku μW lub mW, pomiar entalpii lub szybkości reakcji dla próbek rzędu μl, pomiar promieniowania w zakresie UV-C o czułości pojedynczych pW/cm^2.

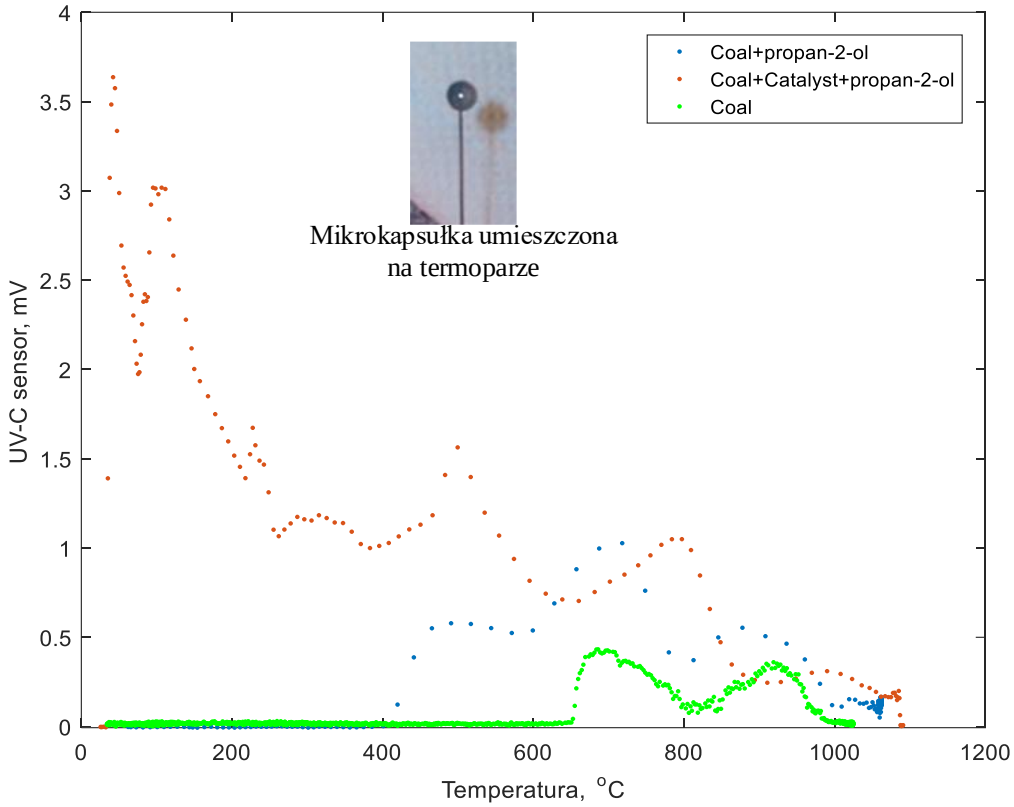
Blok pomiarowy wykorzystuje układ ADuCM360 zawierający dwa wielokanałowe przetworniki analogowo-cyfrowe o rozdzielczości 24 bitów oraz przetwornik cyfrowo-analogowy. Przetworniki A/C układu ADuCM360 cechują się efektywną liczbą bitów

(ENOB) na poziomie 20. Pozwala to na uzyskanie rozdzielczości pomiaru mocy wydzielanej w kalorymetrze (rys. 5.10) na poziomie 100 nW oraz rozdzielczości wykrywania zmian temperatury na poziomie stutysięcznych części stopnia Celsjusza (10^-5°C).

Jeden przetwornik A/C został wykorzystany do pomiarów sygnałów z mikrokalorymetru – napięcia na stosie termoelementów wykonanych w strukturze półprzewodnikowej oraz napięcia na półprzewodnikowym czujniku temperatury otoczenia. Drugi przetwornik A/C umożliwia monitorowanie mocy dostarczanej do elementu grzejnego poprzez naprzemienny pomiar napięcia i prądu na tym elemencie. Na podstawie tych dwu pomiarów na bieżąco wyliczana jest chwilowa moc (iloczyn napięcia i prądu) oraz aktualna rezystancja grzałki (iloraz napięcia i prądu). Wyjście przetwornika cyfrowo-analogowego jest wykorzystane do zadawania napięcia podawanego poprzez blok zasilania na element grzejny. Profil zmian napięcia oraz mocy może być zadawany programowo. Możliwe jest podawanie napięć stałych, jak i zmiennych. Jednocześnie udostępniane są sygnały odpowiadające aktualnej wartości napięcia oraz prądu na elemencie grzejnym.



Rys. 5.10. Widok i przekrój mikrokalorymetru
Fig. 5.10. View and cross-section of a microcalorimeter



Rys. 5.11. Zależność promieniowania UV-C od temperatury próbki
Fig. 5.11. UV-C radiation vs. sample temperature

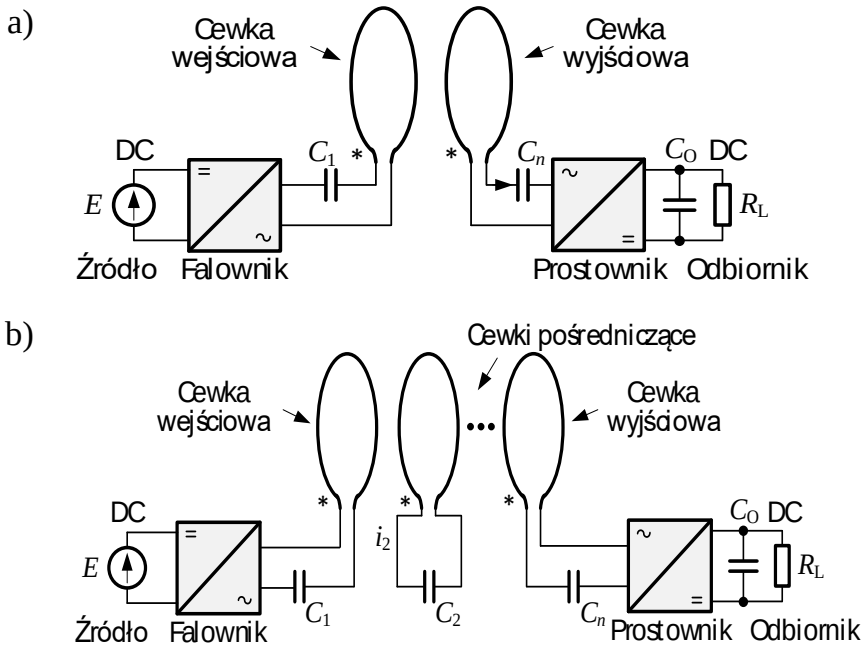
Zjawisko chemiluminescencji rodników OH^* umożliwia pomiar zjawisk związanych z procesami spalania czy pirolizy. Dla takich celów został opracowany przetwornik przeznaczony do pomiaru składowej UV-C w promieniowaniu emitowanym przez rodniki. Przetwornik pracuje w konfiguracji pętli prądowej dwuprzewodowej. Przetwornik wyposażony jest również w czujnik wewnętrznej temperatury. Wysokoczuły sensor wykonany w technologii SiC umożliwia ustawienie zakresów pomiarowych od 0–18 nW/cm^2 do 180 pW/cm^2. Jednocześnie tłumienie promieniowania widzialnego, w stosunku do sygnału dla 405 nm, wynosi co najmniej 10^{10}. W przypadku pomiarów w trudnodostępnych miejscach przetwornik można wyposażyć w obiektyw posiadający soczewkę pracującą jako kolimator. Do przetwornika wyposażonego w obiektyw z kolimatorem można także podłączyć światłowód zakończony złączem SMA-905. Zastosowanie układu o wysokiej rozdzielczości dla pomiaru temperatury za pomocą termopary oraz przetwornika promieniowania UV-C o wysokiej czułości umożliwiło dokonanie pomiarów spalania pojedynczych cząstek paliwa w obecności modyfikatorów procesów spalania. W tym celu w komorze spalania umieszczany był polimer formowany w kapsułki o kształcie kuli i średnicy 3,2 mm i pojemności 17 µL i zawartości 850 µg monofrakcji paliwa.

Kapsułki można umieszczać na końcu termopary, jak na zdjęciu (rys. 5.11). Dla porównania wpływu modyfikatorów na proces spalania polimer zawierał zarówno stałe jak i ciekłe substancje wpływające na proces pirolizy paliwa. Na rys. 5.11 zostały przedstawione wyniki pomiaru promieniowania związanego z chemiluminescencją rodników OH^* w zależności od temperatury próbki. Oprogramowanie przetwornika zapewnia możliwość wyboru zaimplementowanych i budowania własnych algorytmów eksploracji danych dla klasyfikacji danych pomiarowych.

5.5. Zaawansowany przesył i użytkowanie energii elektrycznej – bezprzewodowe oraz jednoprzewodowe zasilanie

Bezprzewodowy przesył energii elektrycznej za pośrednictwem cewek sprzężonych

Koncepcję bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej zaproponował i zrealizował Nikola Tesla już w 1891 r. Jednak dopiero współcześnie tego typu rozwiązania znajdują powszechne zastosowania praktyczne, w urządzeniach codziennego użytku, medycynie i przemyśle. Eliminacja połączenia elektrycznego zapewnia wysoki komfort użytkowania i bezpieczeństwo. Bezprzewodowe zasilanie jest najczęściej realizowane metodą indukcyjną poprzez zastosowanie dwóch (rys. 5.12a) lub więcej (rys. 5.12b) cewek sprzężonych magnetycznie.

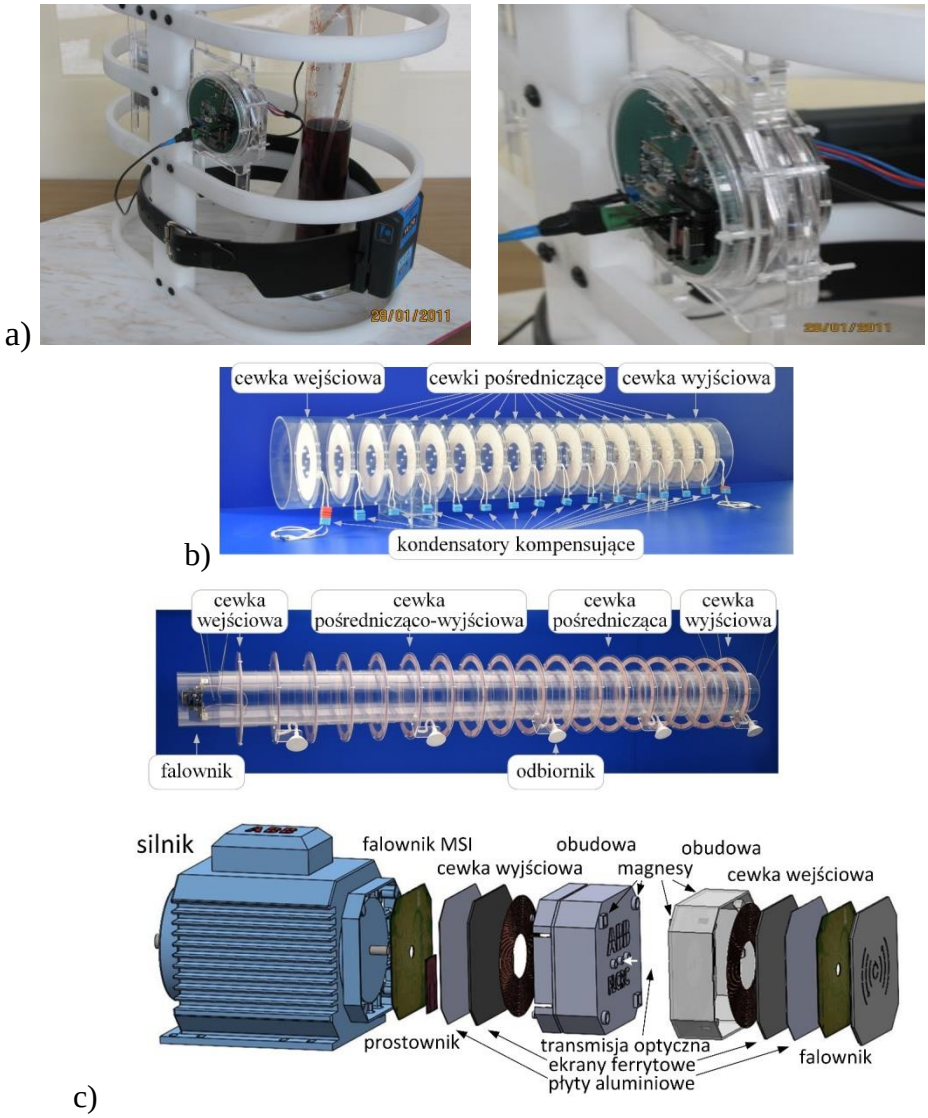


Rys. 5.12. Układ dwucewkowy (a) oraz kaskada cewek sprzężonych magnetycznie (b)
Fig. 5.12. Two-coil system (a) and cascade of magnetically coupled coils (b)

W typowym układzie DC/DC cewka wejściowa zasilana jest poprzez falownik ze źródła napięcia stałego oraz przekazuje energię bezpośrednio lub za pośrednictwem dodatkowych cewek sprzężonych magnetycznie do cewki wyjściowej, połączonej poprzez prostownik i filtr pojemnościowy z odbiornikiem. Zastosowanie dodatkowych cewek umożliwia zwiększenie dystansu przesyłu energii. Każdorazowo wymagane są odpowiednio dobrane kondensatory kompensujące efekt nieidealnego sprzężenia magnetycznego. Czynnikami korzystnie wpływającymi na sprawność, przy danym dystansie przesyłu, są silne sprzężenie magnetyczne pomiędzy sąsiednimi cewkami oraz wysoka dobroć cewek (stosunek ich reaktancji do rezystancji uzwojenia).

Pracownicy Katedry Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki (KENER) Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej formalnie rozpoczęli swoje badania w zakresie bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej w 2007 roku, uczestnicząc pod kierunkiem prof. Bogusława Grzesika w wieloletnim programie rządowym na lata 2007–2012 Polskie Sztuczne Serce. W rezultacie badań opracowano prototyp nowatorskiego, bezprzewodowego, wszczepialnego układu optycznej transmisji danych i zasilania protezy serca (rys 5.13a), który charakteryzował się: średnicą cewek 10 cm i 6 cm, częstotliwością pracy 800 kHz, stałymi napięciami, wejściowym i wyjściowym 24 V, mocą 30 W, dystansem cewek 1–1,5 cm oraz sprawnością powyżej 90% [13]. Poświęcona tej tematyce rozprawa doktorska dr. inż. Tomasza Cieśli (2012 r.) uzyskała nagrodę główną w jubileuszowej, X edycji Konkursu o Nagrodę ABB zorganizowanego przez ówczesne Korporacyjne Centrum Badawcze ABB (CRC) w Krakowie. Zapoczątkowało to współpracę z tą placówką naukowo-badawczą. W latach 2013–2019 zrealizowano wspólnie kilkanaście prac badawczych, dotyczących między innymi analizy właściwości, projektowania, optymalizacji parametrów, poprawy niezawodności, współpracy z odbiornikami o zmiennych parametrach oraz wykonano prototypy układów dwu- i wielocewkowych (tzw. kaskad cewek) przeznaczonych do bezprzewodowego zasilania. Badania związane z kaskadami uwzględniały przypadki jednego i kilku odbiorników (rys. 5.13b). Wybrane parametry przykładowej kaskady z jednym odbiornikiem wynosiły: długość kaskady 1 m, średnica cewek 15 cm, częstotliwość pracy 350 kHz, zmienne napięcie wejściowe 280 V i wyjściowe 250 V, moc 100 W, liczba cewek 16 oraz sprawność 84%. Część z tych wyników znajduje się w wyróżnionej rozprawie doktorskiej dra inż. Krystiana Frani (2019 r.). Podsumowaniem realizowanej współpracy była koncepcja oraz opracowanie prototypu kompaktowego napędu elektrycznego ze zintegrowanym falownikiem MSI, bezprzewodowym zasilaniem i komunikacją optyczną (rys. 5.13c) do zastosowań w szczególnych warunkach

(średnica cewek 8 cm, częstotliwość pracy 150 kHz, stałe napięcia wejściowe i wyjściowe 100–300 V, moc 1,2 kW, dystans cewek 1,2 cm oraz sprawność 97%) [14].



Rys. 5.13. Prototypy: zasilanie sztucznego serca (a), kaskady cewek (b), zintegrowany napęd (c)
Fig. 5.13. Prototypes: power supply for artificial heart (a), coil cascades (b), integrated drive (c)

Jednoprzewodowy przesył energii elektrycznej

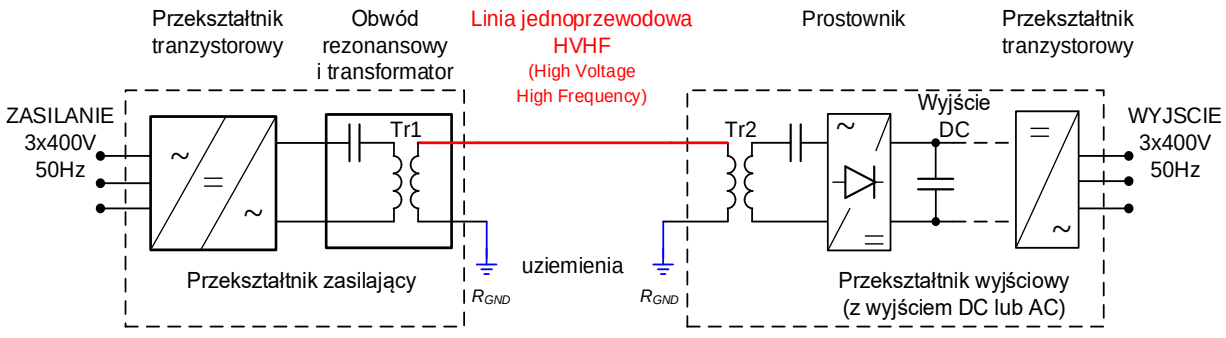
W literaturze i nielicznych patentach, które dotyczą jednoprzewodowego przesyłu energii elektrycznej SWET (Single Wire Energy Transfer), za pierwowzór takiego przesyłu uznaje się patent Nikola Tesli [15]. Zaproponowano w nim przesył energii elektrycznej jednym przewodem z wykorzystaniem ziemi jako przewodu powrotnego.

Przesył jednoprzewodowy znalazł zastosowanie w 1925 r. Jego podstawy teoretyczne opracował w 1947 r. Loyd Mandeno, który po raz pierwszy w Nowej

Zelandii wdrożył system określany jako SWER (Single Wire Earth Return). Od tego czasu na świecie zbudowano ponad 200 tys. km takich linii, między innymi w Australii, Brazylii, Afryce i na Alasce, do zasilania np. odległych terenów wiejskich. Są to linie pracujące przy częstotliwości 50/60 Hz. Podstawy teoretyczne takiej linii są dobrze znane i opisane w literaturze, a problematyka badawcza dotyczy głównie parametrów uziemienia, pola elektromagnetycznego w pobliżu linii oraz sprawności energetycznej. Zapotrzebowanie na linie SWET ma uzasadnienie ekonomiczne. Koszt inwestycyjny takiej linii jest około 3-krotnie mniejszy niż konwencjonalnej linii 3-fazowej. Natomiast wady, to: niska sprawność (rzędu 50%), napięcie linii (12–19) kV, znaczne spadki napięcia w punktach odbioru energii, czy wymóg wysokiej jakości uziemienia.

Najnowsze technologie tranzystorowych przekształtników rezonansowych umożliwiają skonstruowanie linii SWET pracujących jednocześnie przy wysokim napięciu (HV), od kilku do kilkunastu kilowoltów, oraz przy wysokich częstotliwościach (HF), np. (5–30) kHz. Schemat linii HVHF SWET zamieszczono na rys. 5.14. Linia składa się z następujących podzespołów:

- przekształtnika zasilającego z obwodem rezonansowym i transformatorem Tr1 podwyższającym napięcie, którego jeden z biegunów po stronie wysokiego napięcia jest uziemiony, a drugi – przyłączony do jednoprzewodowej linii HVHF,
- jednoprzewodowej linii przesyłowej HVHF,
- uziemienia z rezystancjami zastępczymi R_{GND},
- przekształtnika wyjściowego z transformatorem Tr2 obniżającym napięcie, prostownikiem i opcjonalnym przekształtnikiem tranzystorowym z wyjściem napięcia przemiennego (np. 3x400 V/50 Hz).



Rys. 5.14. Schemat jednoprzewodowego przesyłu energii elektrycznej (SWET)
Fig. 5.14. Schema of Single Wire Energy Transfer (SWET)

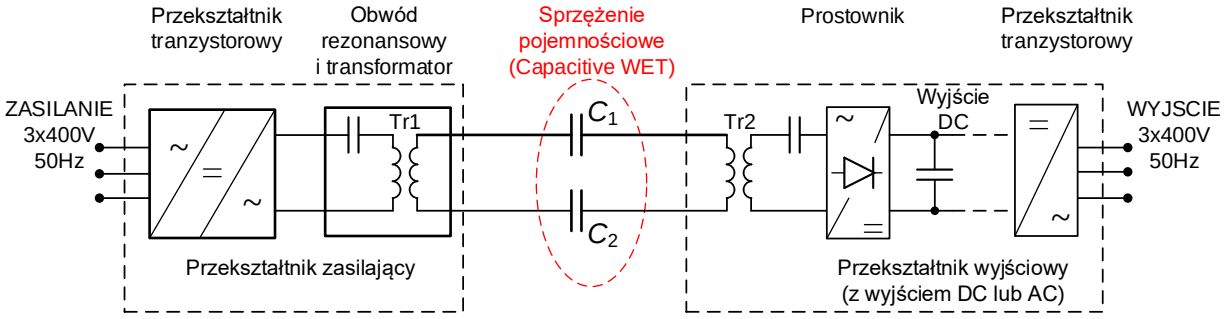
System HVHF SWET przedstawiony na rys. 5.14 realizuje przesył energii elektrycznej z wykorzystaniem rezonansu elektrycznego w transformatorach Tr1 i Tr2

oraz pewnych właściwości tzw. linii długiej. Taki system odpowiednio dostrojony do rezonansu charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami niż klasyczne linie SWET pracujące przy częstotliwości 50/60 Hz. Badania systemu HVHF SWET prowadzone w Katedrze KENER dotyczą systemu o mocy ok. 5 kW, napięciu linii (3–5) kV i częstotliwości ok. 10 kHz.

Bezprzewodowy przesył energii elektrycznej metodą pojemnościową

Na rys. 5.15 zamieszczono schemat systemu do przesyłu energii elektrycznej metodą pojemnościową (Capacitive Wireless Energy Transfer) z wykorzystaniem dwóch kondensatorów C1 i C2. Kondensatory utworzone są np. przez ruchome elektrody, które umożliwiają przemieszczanie się przekształtnika wyjściowego i odbiornika względem przekształtnika zasilającego. Pozostałe elementy składowe systemu są takie jak na rys. 5.14.

Badania systemu do przesyłu pojemnościowego prowadzone w Katedrze KENER dotyczą systemu o mocy ok. 3 kW, napięciu linii (5–10) kV i częstotliwości ok. 50 kHz.



Rys. 5.15. Schemat bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej metodą pojemnościową
Fig. 5.15. Schema of Capacitive Wireless Energy Transfer (Capacitive WET)

Systemy HVHF SWET oraz Capacitive WET są przedmiotem realizowanego w KENER projektu badawczego pt. „Innowacyjny wysokosprawny system zasilania maszyn i urządzeń zwiększający poziom bezpieczeństwa pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych". Celem zastosowania technologii jednoprzewodowej HVHF SWET jest przekazywanie energii między punktami zasilania i punktami dystrybucji w kopalni, zmniejszając liczbę przewodów oraz ich przekrój. Celem zastosowania technologii bezprzewodowej Capacitive WET jest zapewnienie ciągłego ładowania akumulatorów urządzeń transportowych poruszających się na zawieszonej szynie. Technologia opracowana w ramach tego projektu wydłuży zatem czas pracy takich urządzeń, który obecnie jest ograniczony przez energię zgromadzoną w okresowo

doładowywanych akumulatorach. Technologia ta znacznie poprawia bezpieczeństwo, eliminując potrzebę poprowadzenia kabli oraz demontażu i ładowania akumulatorów, tak jak to ma miejsce obecnie.

Informacja o finansowaniu (dotyczy: HVHF SWET z rys 5.14 oraz Capacitive WET z rys 5.15):

- Praca naukowa opublikowana w ramach projektu międzynarodowego współfinansowanego ze środków programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pn. „PMW” w latach 2020–2023; umowa nr 5122/FBWiS/2020/2.
- The project leading to this application has received funding from the Research Fund for Coal and Steel under grant agreement No 899469.

5.6. Optymalizacja kształtu, dynamika oraz oddziaływanie wiatru na obiekty budowlane, w tym chłodnie, kominy i wieże. Problemy trwałości

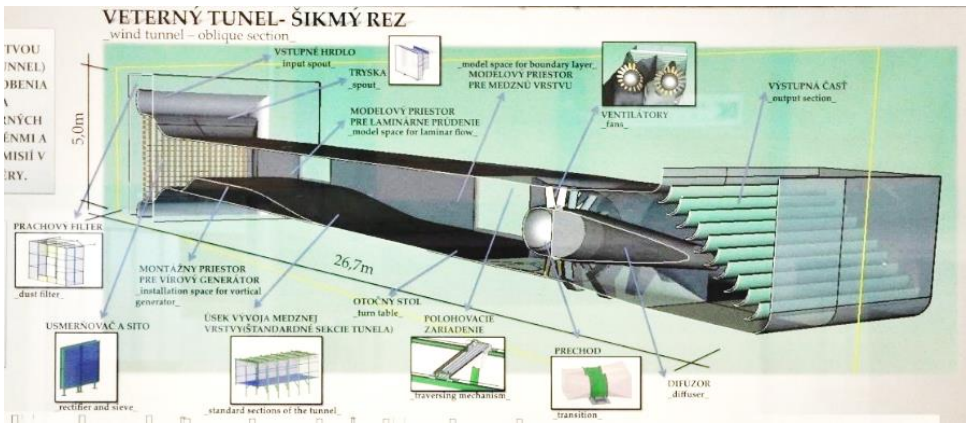
W pracy przedstawiono stan i plany w zakresie badań doświadczalnych i obliczeniowych w celu możliwości optymalizacji kształtu wybranych obiektów budowlanych, szczególnie powłok chłodni kominowych.

Dotychczasowe badania przepływu powietrza wokół dwóch walców zostały przeprowadzone w laboratorium w Bratysławie na Słowacji wraz z pomocą Pani prof. Olgi Hubovej (rys. 5.16).

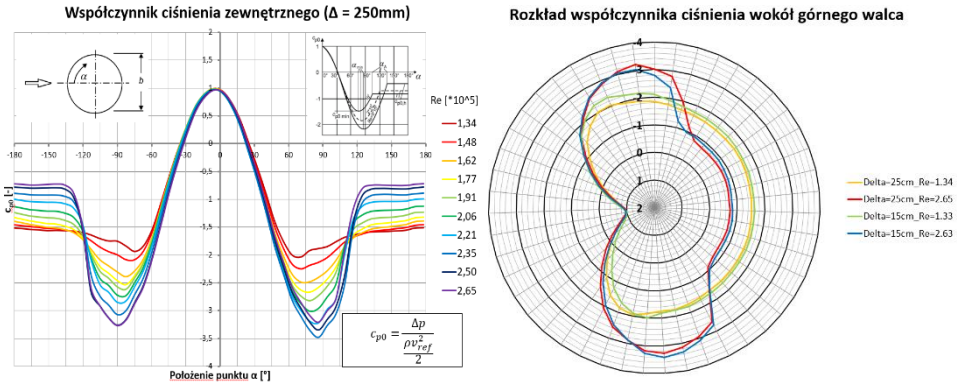
W wyniku przeprowadzonych obliczeń na potrzeby rozprawy doktorskiej Pani doktor Agnieszki Padewskiej-Jurczak [16] wysnuto wniosek, że w przypadku dwóch walców ustawionych blisko siebie ($a/b<2,5$, gdzie a oznacza pionową odległość między walcami, b – średnicę walca), poddanych działaniu wiatru o huraganowej prędkości wartości te są znacznie większe od podanych w normie PN-EN 1991-1-4 tzw. wiatrowej [17]. Dla $a/b=1,5$ różnica sięga nawet 64%. W celu weryfikacji modeli numerycznych zbadano przepływ powietrza o różnych prędkościach wokół dwóch walców o średnicy $\varphi=200$ mm i długościach $l=2400$ mm, o gładkich i chropowatych powierzchniach, w różnych ułożeniach oraz odległościach względem siebie.

Rysunek 5.17 przedstawia rozkład ciśnienia wokół górnego walca kołowego, przy różnych wartościach liczby Reynoldsa i bez wpływu swobodnych końców. W przypadku dwóch walców ustawionych jeden nad drugim współczynniki te okazały się większe niż wokół pojedynczego walca, z przepływem powietrza o podobnej liczbie Reynoldsa.

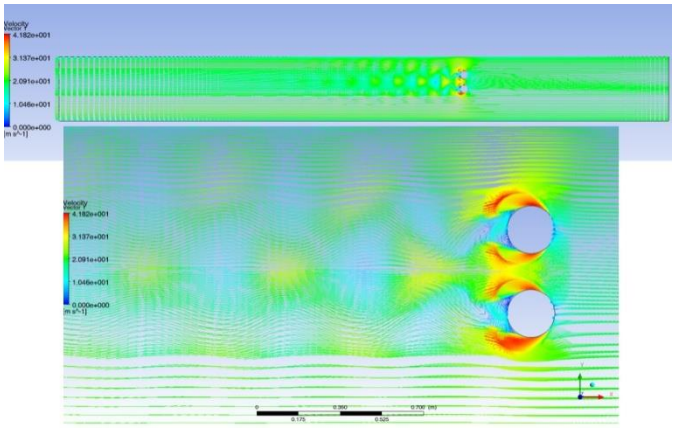
Analizy numeryczne potwierdziły wyniki rozkładu ciśnienia i prędkości oraz wartości sił aerodynamicznych uzyskanych w tunelu aerodynamicznym (rys. 5.18).



Rys. 5.16. Tunel aerodynamiczny w Bratysławie na Słowacji
Fig. 5.16. Wind tunnel in Bratislava, Slovakia.



Rys. 5.17. Rozkład ciśnienia na górnym walcu kołowym
Fig. 5.17. Pressure distribution on the upper circular cylinder



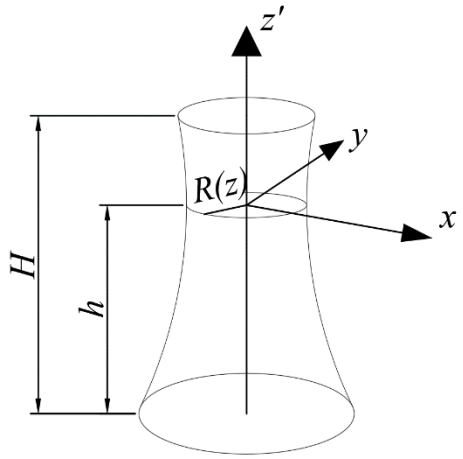
Rys. 5.18. Przykładowy rozkład wektorów prędkości przepływu wokół walców
Fig. 5.18. Example distribution of velocity vectors around two cylinders

W ramach obecnie realizowanych doktoratów i kilku już zrealizowanych prac [18, 19], przeprowadzono (i w dalszym ciągu są prowadzone) szereg analiz, mających na

celu zbadanie możliwości i zasadności wznoszenia katenoidalnych chłodni kominowych.

Dlaczego akurat katenoidalnych? Katenoida w swoim kształcie z pozoru zbliżona jest do powszechnie stosowanej do opisu geometrii chłodni hiperboloidy. Katenoida jest powierzchnią minimalną powłoki rozciągniętej pomiędzy dwoma pierścieniami, co daje jej pewną przewagę nad hiperboloidą – potencjalnej oszczędności materiału. Ponadto, katenoida, w przeciwieństwie do powłok hiperboloidalnych, nie jest powierzchnią prostokreślną, przez co można było przypuszczać, że stawia większy opór na utratę stateczności. Poniższe równanie (5.1) opisuje powłokę katenoidalną. Rysunek 5.19 zawiera objaśnienia parametrów.

$$R(z) = a\cosh\left(\frac{z-h}{h} * arc\cosh\frac{R_{max}}{R_{min}}\right) \tag{5.1}$$



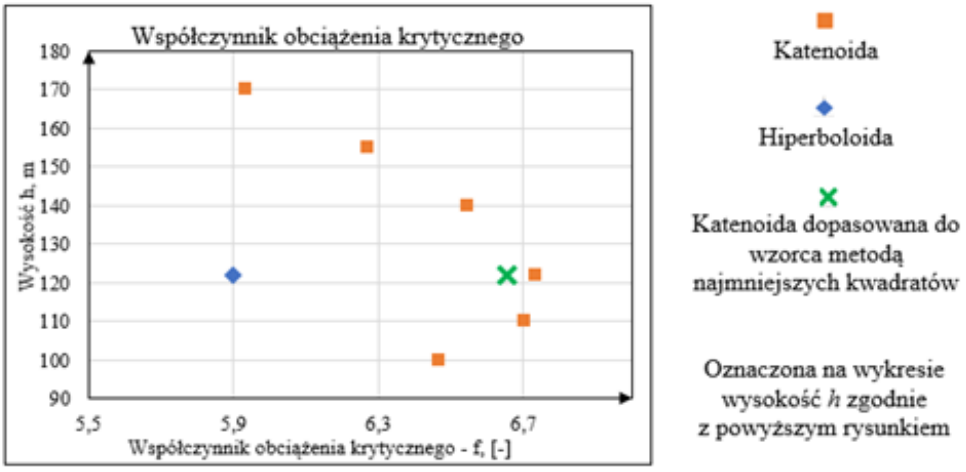
Rys. 5.19. Parametry powierzchni obrotowej: H – wysokość całkowita, h – wysokość przewężenia, R(z) promień zależny od położenia na osi z
Fig. 5.19. Geometrical parameters: H –total height, h – altitude od lowest radius, R(z) – radius

W ramach prac magisterskich wykonano porównanie pracy statycznej chłodni kominowej hiperboloidalnej – odwzorowanej na podstawie istniejącej chłodni na terenie Elektrowni Opole, oraz chłodni katenoidalnej i paraboloidalnej w 2 wariantach. Zostały również podjęte próby wyznaczenia obciążenia wiatrem przy pomocy numerycznej analizy w programie inżynierskim. Obliczenia statyczne wykonano w programie do obliczania konstrukcji Metodą Elementów Skończonych RFEM Dlubal oraz Autodesk Robot.

Dodatkowo zostały przeprowadzone: analiza stateczności (metodą współczynnika obciążenia krytycznego) oraz analiza dynamiczna z uwagi na wymuszenie drgań od strony podłoża. Została również wyznaczona wrażliwość rozwiązania na gęstość siatki elementów skończonych. Zbadano siatkę z podziałem od 36×27 ES do 288×176 ES (ilość elementów po obwodzie × ilość elementów po wysokości).

Na etapie studiów doktoranckich te same obliczenia statyczne zostały rozszerzone o większą ilość przypadków. Dodatkowym aspektem pracy stała się symulacja obciążenia wiatrem z wykorzystaniem metod komputerowych – CFD. Obliczenia wykonano za pomocą programów Ansys Fluent oraz RWIND Simulation (opartym na silniku Open Foam).

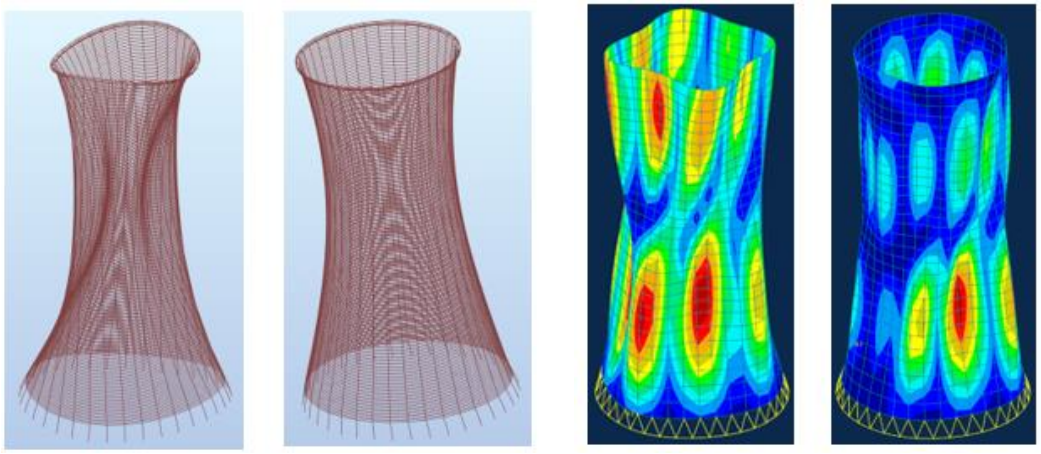
Analizowane modele katenoidalne były wzorowane na hiperboloidalnej chłodni, dlatego wielkości sił wewnętrznych nie zmieniają się znacznie w kolejnych analizowanych wariantach geometrii. Zaobserwowano jednak, że dla chłodni katenoidalnych zastosowanie przewężenia na wysokości 2/3 całej wysokości chłodni prowadzi do najmniejszych wartości sił wewnętrznych dla części chłodni pracującej w stanie błonowym.



Rys. 5.20. Zestawienie otrzymanych z obliczeń współczynników utraty stateczności
Fig. 5.20. Comparison of obtained critical load factors

W ramach prowadzonych prac planuje się przeprowadzić analizę statyczną połączoną z analizą CFD do wyznaczenia obciążenia wiatrem dla wybranych wariantów chłodni kominowych. W analizach zostaną ujęte przypadki obciążenia ciężarem własnym, wiatrem, gradientem temperatur. Planuje się również rozważyć wpływ nierównomiernego osiadania podłoża pod częścią chłodni. Analizy zakładają statykę geometrycznie nieliniową oraz wpływ imperfekcji geometrycznych – wygenerowanych na podstawie istotnych postaci utraty stateczności.

Dodatkowym aspektem pracy będzie sprawdzenie eksperymentalnie wyników wykonanych symulacji obciążenia wiatrem poprzez badanie w nowo powstałym na Politechnice Śląskiej tunelu aerodynamicznym.



Rys. 5.21. I i II postać: a) drgań własnych, b) utraty stateczności
Fig. 5.21. I and II form of: a) natural vibrations, b) buckling shape

Wnioski

Wstępne badania numeryczne oddziaływania wiatru o różnej prędkości na różne układy dwóch walców zostały zweryfikowane w laboratorium w Bratysławie na Słowacji wraz z pomocą Pani prof. Olgi Hubovej. Uzyskano wiele danych w zakresie rozkładu prędkości i ciśnienia, jak również sił aerodynamicznych.
Analizy statyczno-wytrzymałościowe dają pewne nadzieje na możliwość wznoszenia większych chłodni kominowych bez konieczności zwiększania grubości powłoki, lub na oszczędności materiałowe przy chłodniach tych samych rozmiarów, przy zastosowaniu kształtu katenoidy.

5.7. Analiza intensyfikacji wymiany ciepła falą akustyczną

Biorąc pod uwagę kryteria ekonomiczne jak i ekologiczne, podnoszenie sprawności silników cieplnych, w tym współczesnych silników lotniczych jak i gazowych turbin energetycznych, jest priorytetowym zadaniem współczesnych inżynierów. Tego typu silniki składają się ze sprężarki, komory spalania, w której sprężone powietrze miesza się z paliwem i jest spalane oraz z turbiny, w której następuje ekspansja gorących gazów. Jednym z podstawowych sposobów zwiększania sprawności jest w tym przypadku podnoszenie temperatury na wlocie do turbiny. Obecnie temperatura ta osiąga nawet ponad 1400°C. Co za tym idzie konieczne jest stosowanie wyrafinowanych technik chłodzenia łopatek turbiny oraz stosowanie odpowiednich materiałów. Łopatki turbiny są chłodzone powietrzem ze sprężarki,

a ich budowa zapewnia przepływ powietrza przez wewnętrzne kanały chłodzące jak i przez otwory, które wydmuchują powietrze na zewnętrzną powierzchnię łopatki zapewniając jej chłodzenie. Kanały chłodzące powinny być zaprojektowane w taki sposób aby zapewnić odpowiednie chłodzenie całej powierzchni łopatki przy jednoczesnym zminimalizowaniu strumienia chłodzącego. Stąd też dąży się do intensyfikacji wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem chłodzącym, a materiałem łopatki. W tym celu stosuje się dodatkowe żebra na powierzchni kanałów chłodzących, a sam kształt kanałów jest odpowiednio optymalizowany. Mimo to pojawiają się miejsca gdzie tradycyjne chłodzenie jest znacznie utrudnione, np. wierzchołek łopatki. Przedstawione badania mają na celu opracowanie oraz weryfikację nowej techniki chłodzenia opartej na wykorzystaniu zjawisk nieustalonych o wysokiej częstotliwości.

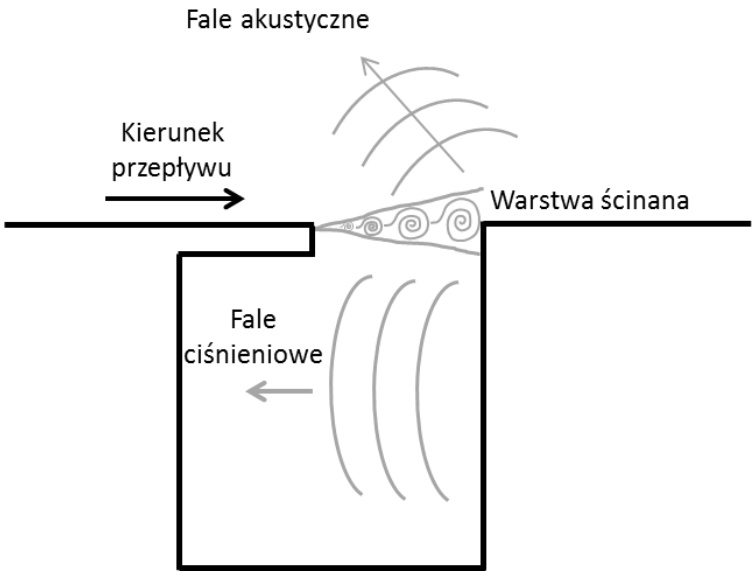
Obecnie badania obliczeniowe jak i eksperymentalne dotyczące dźwięku, w tym głównie hałasu są intensywnie rozwijane z uwagi na coraz bardziej restrykcyjne normy ochrony przed hałasem, np. w lotnictwie. Skupiają się one jednak głównie na poprawnym modelowaniu generacji oraz propagacji hałasu jak i sposobach jego redukcji.

Przedstawione badania są ukierunkowane na wykorzystanie mechanizmu generacji fali akustycznej w celu intensyfikacji wymiany ciepła. Mają one charakter podstawowy i w ujęciu interdyscyplinarnym skupiają się na określeniu zależności pomiędzy mechanizmem generacji fali akustycznej, a procesem wymiany ciepła. Potencjalnym miejscem aplikacji omawianego rozwiązania jest układ chłodzenia łopatki turbinowej.

Jednym ze źródeł fali akustycznej może być przepływ powietrza przez kanał, w którym znajduje się odpowiednio ukształtowana komora (rys. 5.22). W takim przypadku źródłem dźwięku są pojawiające się wewnątrz szczeliny pulsacje ciśnienia o znacznej amplitudzie.

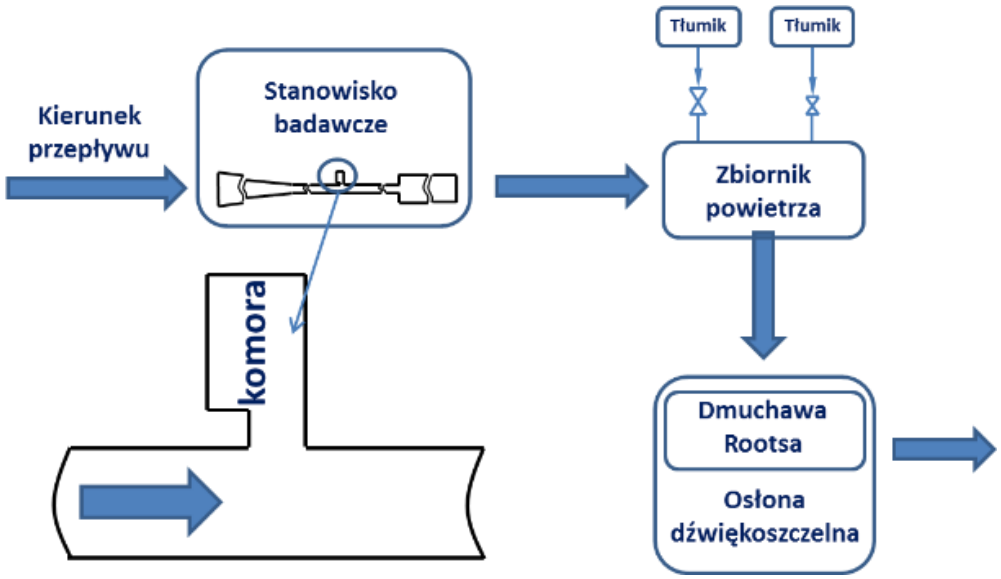
Pulsacje te występują jednak wyłącznie dla określonego zakresu prędkości zależnego od przyjętej geometrii szczeliny. Związane jest to ze zjawiskiem rezonansu, który powstaje na wskutek interakcji pomiędzy falami ciśnienia generowanymi wewnątrz szczeliny, a wirami które powstają w wyniku przepływu nad szczeliną. Zastosowanie tego typu rezonatora akustycznego w układzie przepływowym, np. w układzie chłodzącym łopatki turbinowej jest stosunkowo proste z uwagi na brak jakichkolwiek ruchomych elementów. Mimo to opracowanie odpowiedniej geometrii rezonatora wraz z określeniem jego wpływu na proces wymiany ciepła jest zadaniem niezwykle złożonym. Związane jest głównie z faktem, że w tym przypadku należy

uwzględnić dwa procesy o całkowicie różnej częstotliwości, które muszą być analizowane jednocześnie. Problem ten dotyczy zarówno badań numerycznych jak i eksperymentalnych.



Rys. 5.22. Charakterystyka przepływu wokół komory
Fig. 5.22. Flow characericistics around the cavity

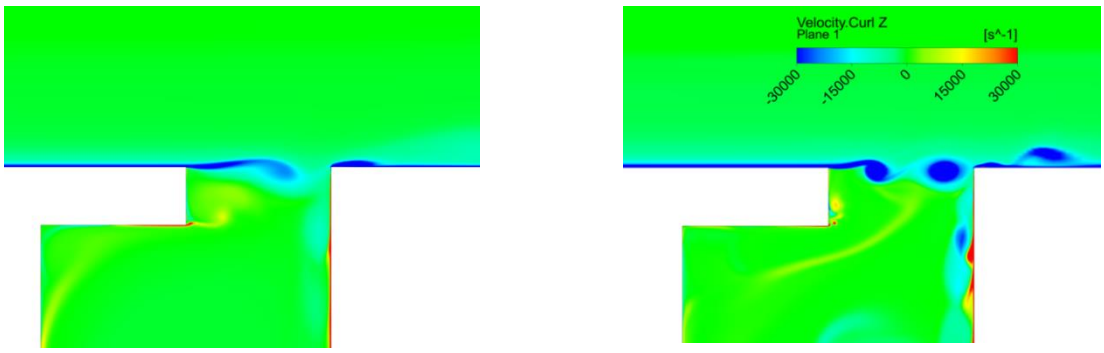
Prowadzone analizy obejmowały swoim zakresem obliczenia numeryczne jak również badania prowadzone na przygotowanym stanowisku eksperymentalnym, które przedstawiono na rys. 5.23. Dotyczyły one zróżnicowanych warunków przepływowych oraz różnych konfiguracji geometrycznych samej komory.



Rys. 5.23. Stanowisko badawcze
Fig. 5.23. Test stand

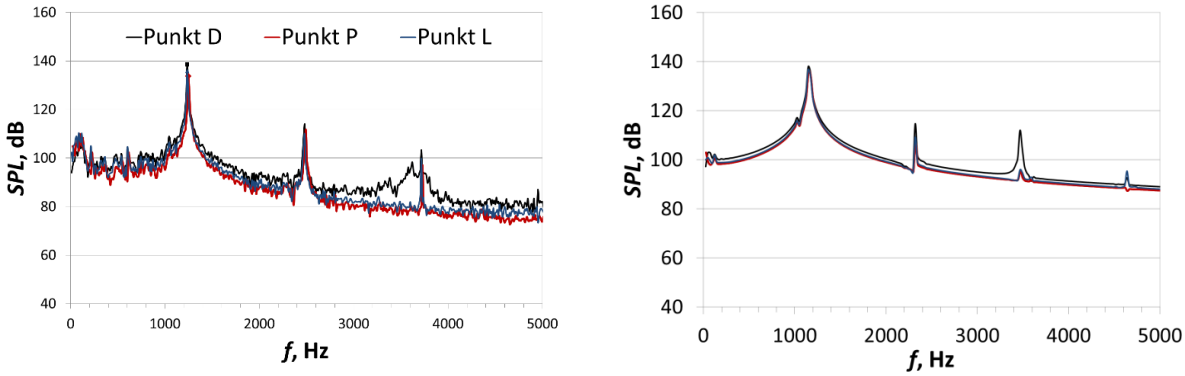
Na rys. 5.24 przedstawiono wyniki symulacji numerycznych, które obrazują chwilową strukturę pola prędkości w obszarze komory dla dwóch analizowanych prędkości przepływu w kanale głównym. Uzyskane wyniki wskazują, że w zależności od prędkości przepływu w obrębie szyjki komory, może być generowany pojedynczy wir lub para wirów co znacząco zmienia częstotliwość generowanego dźwięku i wpływa również na warunki przepływowe wewnątrz samej komory. Porównanie wartości poziomu ciśnienia akustycznego uzyskane na podstawie trójwymiarowej symulacji komputerowej oraz badań eksperymentalnych przedstawiono natomiast na rys. 5.25.

Przebiegi uzyskano dla trzech punktów pomiarowych zlokalizowanych na środku każdej ze ścian komory. Uzyskane wyniki charakteryzują się dobrą zgodnością, a maksymalny poziom ciśnienia akustycznego osiąga wartość aż 140 dB przy częstotliwości ok. 1000 Hz.



v=50 m/s v=80 m/s

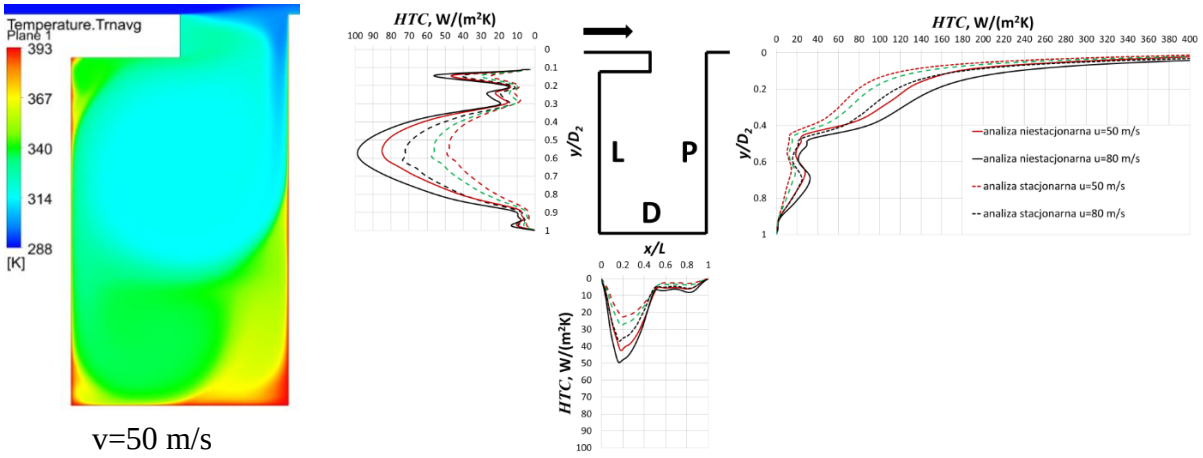
Rys. 5.24. Struktura chwilowego pola przepływu – symulacja komputerowa
Fig. 5.24. Structure of instantaneous flow field



Badania eksperymentalne Symulacja komputerowa

Rys. 5.25. Porównanie wyników symulacji komputerowych oraz badań eksperymentalnych dla prędkości w kanale wynoszącej 50 m/s
Fig. 5.25. Comparison between numerical simulation and experimental data obtained for velocity in main channel equal to 50 m/s

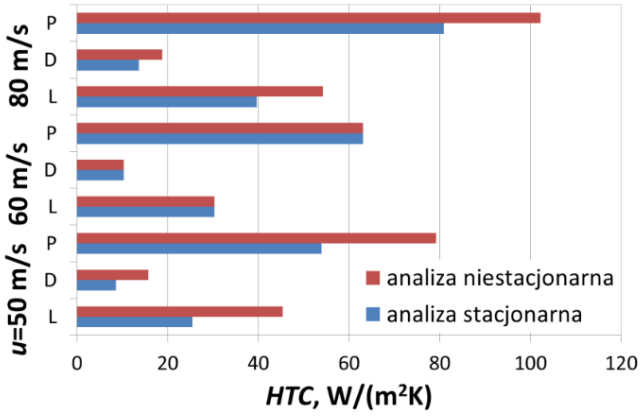
Rysunek 5.26 przedstawia natomiast wyniki symulacji komputerowych dotyczące rozkładu pola temperatury w ogrzewanej komorze. W tym przypadku na ścianach komory założono warunek brzegowy Dirichleta w formie stałej temperatury wynoszącej 120°C. Uzyskane wyniki świadczą o bardzo dużej zmienności w wartościach współczynnika HTC dla poszczególnych ścian komory.



v=50 m/s

Rys. 5.26. Rozkład pola temperatury oraz współczynnika wnikania ciepła HTC
Fig. 5.26. Distribution of temperaturę field and HTC

Warto zwrócić uwagę, że hałas generowany przez komorę oraz związane z nim silnie niestacjonarne pole przepływu występują tylko dla pewnych ściśle określonych warunków przepływowych. Stąd też występują zakresy prędkości w których komora nie generuje znacznego poziomu dźwięku. Dla rozpatrywanej komory obszar taki znajduje się w okolicach prędkości równej 60 m/s. Biorąc pod uwagę także ten zakres prędkości, można zauważyć pogorszenie warunków wymiany ciepła (rys. 5.27) w porównaniu do niższych wartości prędkości przepływu. Wyniki te świadczą o istotnym wpływie efektów niestacjonarnych na warunki wymiany ciepła wewnątrz samej komory.

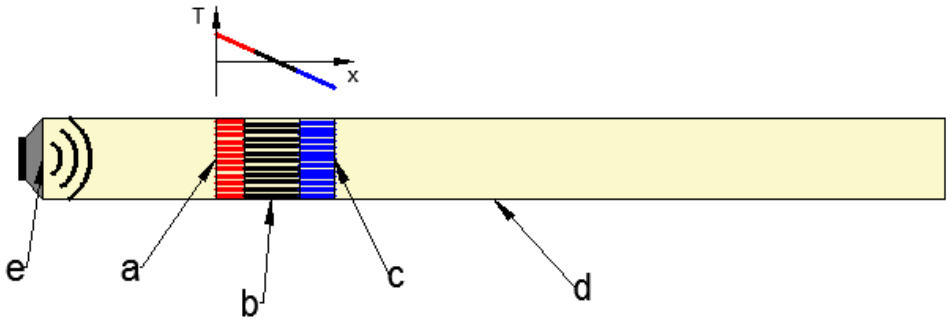


Rys. 5.27. Wartość średnia współczynnika wnikania dla poszczególnych ścian komory
Fig. 5.27. HTC averaged value for different cavity walls

Prowadzone prace obejmowały również możliwość aplikacji przedstawionego rozwiązania w kanale typu „U”, który jest stosowany w układzie chłodzenia konwekcyjnego łopatki turbinowej. Brano w tym przypadku pod uwagę typowe warunki chłodzenia w tego typu przepływie, a uzyskane wyniki charakteryzowały się znaczącym obniżeniem temperatury maksymalnej metalu w stosunku do rozważanego wariantu referencyjnego.

5.8. Chłodnictwo termoakustyczne – potencjał termoakustycznych urządzeń chłodniczych

Zjawisko chłodzenia termoakustycznego polega na wymuszeniu przepływu ciepła od źródła o temperaturze wyższej do źródła o temperaturze niższej wskutek oddziaływania fali akustycznej [20, 21]. Fenomen ten jest skutkiem interakcji cieplnej między gazem a ciałem stałym, wymuszonej propagującą falą dźwiękową. Elementarna termo akustyczna chłodziarka/pompa ciepła (rys. 5.28) charakteryzuje się nieskomplikowaną konstrukcją. W chłodziarce możliwe jest wykorzystanie płynów obojętnych chemicznie i nietoksycznych dla ludzi (hel, azot) jako podstawowych czynników roboczych [22–25].



Rys. 5.28. Schemat elementarnej termoakustycznej pompy ciepła (a – gorący wymiennik ciepła, b – regeneracyjny wymiennik ciepła (regenerator), c – zimny wymiennik ciepła, d – kanał akustyczny (rezonator), e – wzbudnik akustyczny). Zaznaczono gradient temperatury wzdłuż zestawu wymienników ciepła

Fig. 5.28. Scheme of an elementary thermoacoustic heat pump (a – hot heat exchanger, b – stack, c – cold heat exchanger, d – acoustic canal, e – acoustic inducer). Temperature gradient along the set of heat exchangers marked in colour

Urządzenia termoakustyczne znajdują szereg zastosowań w przemyśle spożywczym i chemicznym. Ponadto, wykazują one aplikacyjność jako urządzenia towarzyszące w zeroemisyjnych układach energetycznych. Jednakże, zaprojektowanie urządzeń o parametrach, umożliwiających konkurowanie z chłodziarkami

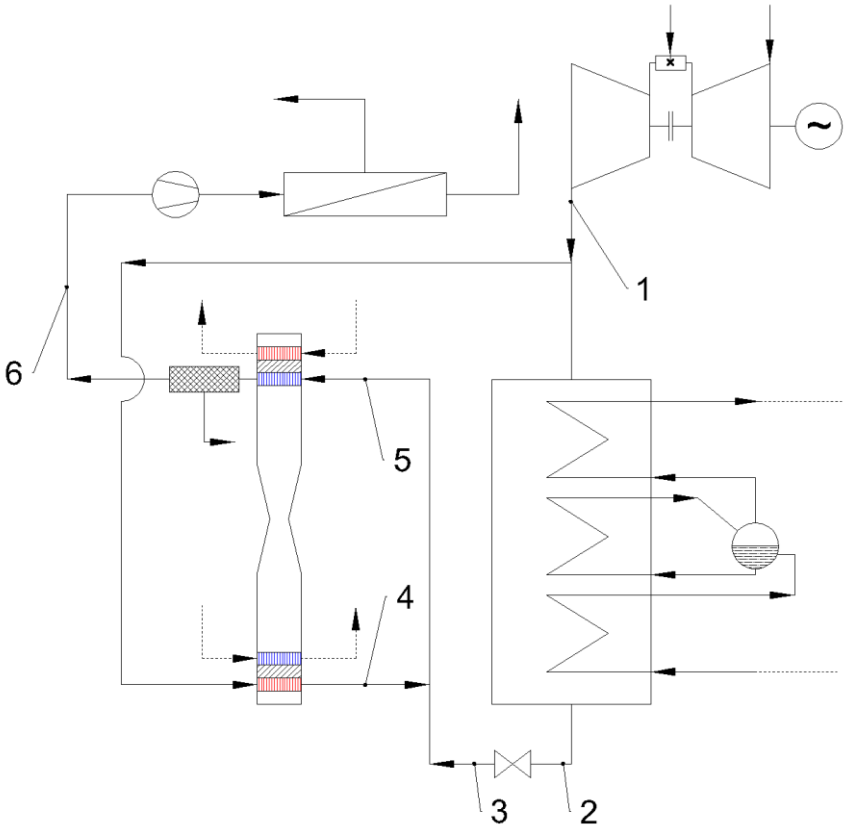
sprężarkowymi, wymaga pozyskania szczegółowej wiedzy i opracowania nowych modeli. Obecnie projektowane chłodziarki termoakustyczne cechuje relatywnie niska sprawność i wysoki koszt produkcji, co stanowi podstawowy czynnik ograniczający możliwości aplikacyjne.

Projektowanie urządzeń termoakustycznych, w tym chłodziarek, realizowane jest za pośrednictwem badań obliczeniowych oraz eksperymentu. W badaniach obliczeniowych wykorzystuje się przede wszystkim tzw. model liniowy, charakteryzujący się szybkim procesem obliczeniowym, lecz uproszczoną reprezentacją zjawisk akustycznych, zachodzących w badanym urządzeniu. Alternatywnie, stosuje się symulacje numeryczne w środowiskach obliczeniowej dynamiki płynów (CFD), które umożliwiają dokładne odwzorowanie zjawisk przepływowych i cieplnych, są jednak z reguły obarczone bardzo długim czasem obliczeń. Badania eksperymentalne, ze względu na pewność otrzymanych wyników, wykorzystywane są do walidacji modeli matematycznych. Niemniej, znaczące trudności w trakcie realizacji pomiarów mogą być spowodowane koniecznością zachowania niskiej niepewności pomiarowej, co przekłada się na zastosowanie wysokiej jakości czujników czy przetworników sygnału.

Pierwsze szeroko zakrojone badania aplikacyjne chłodziarek termoakustycznych przeprowadzono w latach 1991–2001 w Los Alamos National Laboratory (LANL) w USA, a ich efektem było opracowanie kriogenicznej instalacji skraplania gazu ziemnego (produkcji LNG) o wydajności 2250 dm^3/dobę i współczynniku COP na poziomie 0,65. Prototyp ten nie został wdrożony komercyjnie ze względu na trudności konstrukcyjne. Pierwsza komercyjnie dostępna chłodziarka termoakustyczna to urządzenie do przechowywania lodów (120 W mocy chłodniczej, temperatura zimnego wymiennika -24°C), opracowane w 2004 r. w Penn State University. W latach 2009–2012 realizowano europejski projekt badawczy THATEA, w którym obszar chłodnictwa stanowił jeden z szeregu badanych obszarów z zakresu termoakustyki. Cel prowadzonych wówczas badań stanowiła optymalizacja konstrukcji urządzenia kriogenicznego pracującego w stałej temperaturze zimnego wymiennika ciepła -40°C i w zmiennym zakresie mocy (50–250 W). Pierwsze badania fenomenu prowadzone w Politechnice Śląskiej prowadzono w latach 2010–2015 w ramach realizacji jednego z zadań projektu strategicznego „Zaawansowane technologie pozyskania energii” oraz samodzielnego projektu „Model numeryczny silnika i chłodziarki termoakustycznej” finansowanego ze środków ministerialnych.

W dotychczasowych pracach badawczych z zakresu termoakustyki, realizowanych w Politechnice Śląskiej, uwzględniono:

- obliczeniową i eksperymentalną analizę wpływu cech konstrukcyjnych i parametrów środowiskowych na parametry operacyjne kompaktowego urządzenia chłodniczego,
- obliczeniowe oszacowanie możliwości wykorzystania zjawiska termoakustycznego w układach regulacji i pomiaru parametrów pracy urządzeń energetycznych, w tym wymienników ciepła,
- porównanie parametrów operacyjnych urządzeń chłodniczych, funkcjonujących w warunkach fali stojącej i biegnącej, w oparciu o model uproszczony,
- analizę możliwości zastosowania termoakustycznych urządzeń chłodniczych jako urządzeń wspomagających regulację i poprawę parametrów membranowych układów separacji gazów (rys. 5.29).



Rys. 5.29. Schemat koncepcji wykorzystania chłodzenia termoakustycznego jako wspomagania membranowej separacji CO_2 z wilgotnych gazów spalinowych w układzie gazowo-parowym: 1 – punkt poboru gorących spalin, 2 – kanał spalinowy przed dławikiem, 3 – kanał spalinowy za dławikiem, 4 – kanał wlotowy spalin zimnych, 5 – kanał spalin zmieszanych, 6 – kanał dolotowy separatora membranowego (na podstawie [26])

Fig. 5.29. Scheme of the conceptual application of the thermoacoustic cooling as a suport for membrane CO_2 separation from moist exhaust gas in a gas turbine combined cycle: 1 – hot exhausts intake, 2 – exhaust gas duct before a throttling valve, 3 – exhaust gas duct after a throttling valve, 4 – cold exhaust gas inlet, 5 – mixed exhaust gas duct, 6 – membrane separator inlet duct (on the basis of [26])

Dotychczas przeprowadzone badania wykazały możliwość uzyskania widocznych efektów energetycznych dla małych urządzeń termoakustycznych przy wykorzystaniu niedrogich materiałów konstrukcyjnych. To przy dalszej optymalizacji wskazuje na możliwość opracowania urządzeń chłodniczych, wykorzystujących czynniki neutralne dla środowiska i konkurujących ekonomicznie z układami sprężarkowymi. Ponadto, analizy wykazały pozytywny wpływ sprzężenia chłodziarki termoakustycznej z membranowym separatorem CO_2 na parametry procesu separacji w przypadku oczyszczania spalin silnie zawilżonych, co może przełożyć się na zwiększenie sprawności dekarbonizacji spalin energetycznych.

Bibliografia

1. Trawiński T.: Enhanced drilling by torsional vibration. INDIRES Newsl., 1, 2018, p. 10–12, http://indires.eu/wp-content/uploads/INDIRES-Newsletter-1.pdf.
2. Trawiński T., Burlikowski W., Szczygieł M., at all.: Modelling of drilling rig with electromagnetically excited torsional vibration.Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, No. 863, Gliwice [Poland] 2020.
3. Trawinski T., Szczygieł M., Tomas A.: Electromagnetically excited torsional vibration to rock drilling support. 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Nancy [France] 2019, p. 29–31.
4. Tomas A., Trawiński T., Mężyk A.: Mathematical modelling and selecting the parameters of magnetic circuit of disk torque converter, [w:] Świder J., Kciuk S.,Trojnacki M. (eds.): Mechatronics 2017 – Ideas for industrial applications. Springer International Publishing, Berlin 2019, p. 417–426.
5. Kowol P., Szczygieł M., Burlikowski W., Trawiński T.: Electromagnetic field calculations of multimodule electromechanical device for drilling process – main motor calculations. Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE), Racławice, 9-12 September 2018, Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, p. 137–140, DOI: 10.1109/PTZE.2018.8503133.
6. Maciak E., Opilski Z.: Transition metal oxides covered Pd film for optic al H_2 gas detection. Thin Solid Films, 515(23), 2007, p. 8351–8355. DOI: 10.1016/j.tsf2007.03.022.
7. Maciak E., Opilski Z.: Hydrogen gas detection by means of a fiber optic interferometer sensor. Journal de Physique IV. Proc., 137, 2006, p. 135–140, DOI: 10.1051/jp4:2006137027.
8. Maciak E.: Fiber optic sensor for H2 gas detection in the presence of methane based on Pd/WO3 low-coherence interferometric structure. Proceedings of SPIE, 10455, 2017, UNSP 104550W. 12th Conference on Integrated Optics - Sensors, Sensing Structures, and Methods, Szczyrk, POLAND, FEB 27–MAR 03, 20176, DOI: 10.1117/12.2282891.
9. Maciak E.: Low-Coherence Interferometric Fiber Optic Sensor for Humidity Monitoring based on Nafion® Thin Film. Sensors, 19(3), 2019, p. 1–20, DOI: 10.3390/s19030629.
10. Maciak E.: Optical fiber coated with Nafion® thin film for humidity sensing. Proceedings of SPIE, 10034, 2016, UNSP 100340N. 11th Conference on Integrated Optics – Sensors, Sensing Structures, and Methods, Szczyrk, POLAND, FEB 29–MAR 04, 2016, DOI: 10.1117/12.2244821.

11. Pustelny T., Maciak E., Opilski Z., Bednorz M.: Optical interferometric structures for application in gas sensors. Optica Applicata, 37(1/2), 2007, p. 187–194.
12. Maciak E., Pustelny T.: An optical ammonia (NH3) gas sensing by means of Pd/CuPc interferometric nanostructures based on white light interferometry. Sensors and Actuators, B Chem., 189, 2013, p. 230–239. DOI: 10.1016/j.snb.2013.04.051.
13. Grzesik B., Brandt J., Kaczmarczyk Z., Szczurek Z., Świda K., Michnik A., Stępień M., Cieśla T.: Bezprzewodowy wszczepialny układ transmisji danych i zasilania protezy serca, [w:] Kustosz R., Gonsior M., Jarosz A. (red.): Technologie inżynierii materiałowej i technologie metrologiczne dla potrzeb polskich protez serca, Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi, Zabrze 2012.
14. Kaczmarczyk Z., Kasprzak M., Ruszczyk A., Sowa K., Zimoch P., Przybyła K., Kierepka K.: Inductive Power Transfer Subsystem for Integrated Motor Drive. Energies, 14, 2021, 1412, https://doi.org/10.3390/en14051412.
15. Tesla N.: Electrical Transformer, US Patent No.593138, 1897 r.
16. Padewska A.: Pogłębiona analiza numeryczna oddziaływania wiatru na obiekty budowlane o nietypowym kształcie i układzie. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 2016.
17. PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
18. Cornik D.: Porównanie charakterystyk dynamicznych chłodni kominowych hiperboloidalnej i katenoidalnej. Praca magisterska. Politechnika Ślaska, Gliwice 2020.
19. Wiśniowski M.: Analiza porównawcza statyki chłodni kominowej hiperboloidalnej i katenoidalnej z dopasowaniem kształtu według metody najmniejszych kwadratów. Politechnika Śląska, Gliwice 2019.
20. Tijani M.E.H.: Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven 2001.
21. Springer Handbook of Acoustics, ed. Rossing T.D., Springer Science+Business Media LLC New York, New York 2007.
22. Poese M.E., Smith R.W.M., Garret S.L., van Gerwen R., Gosselin P.: Thermoacoustic refrigeration for ice cream sales, The Penn State University Applied Research Laboratory, Penn State University, 2004.
23. Hamood A., Jaworski A.J., Mao X., Simpson K.: Design and construction of a two-stage thermoacoustic electricity generator with push-pull linear alternator. Energy 144, 2018, p. 61–72.
24. Bassem M.M., Ueda Y., Akisawa A.: Thermoacoustic Stirling Heat Pump Working as a Heater. Applied Physics Express 4, 2011, art. 107301.
25. Remiorz L.: Badania numeryczne i eksperymentalne akustycznej separacji CO_2, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
26. Wiciak G., Grzywnowicz K., Remiorz L.: Metoda wspomagania oczyszczania gazów spalinowych energetycznych z wykorzystaniem zjawiska chłodzenia termoakustycznego – wybrane zagadnienia, Międzynarodowa XIII Konferencja Kotłowa 2018 „Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów", Szczyrk, 23–26.10.2018 r.

6. EDUKACJA DLA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU I KSZTAŁTOWANIE ŚWIADOMOŚCI EKOLOGICZNEJ

6.1. Wprowadzenie

Aby skutecznie chronić środowisko naturalne i przeciwdziałać postępującej antropopresji, oprócz działań badawczych i współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym konieczne są także działania edukacyjne. W związku z pogarszającymi się parametrami środowiskowymi, ociepleniem klimatu, zanieczyszczeniem wód, gleby i powietrza edukacja dla zrównoważonego rozwoju i kształtowanie świadomości ekologicznej wszystkich grup społecznych, staje się ważnym elementem oddziaływania uczelni na otoczenie, realizowanym w ramach trzeciej misji. Prowadzone przez uczelnię projekty edukacyjne, seminaria i warsztaty, kierowane są do różnych grup odbiorców, począwszy od uczniów szkół podstawowych i ponadpodstawowych, a skończywszy na przedsiębiorcach, przedstawicielach JST, grupach czynnych zawodowo i seniorach. Wachlarz możliwych narzędzi wsparcia w kształtowaniu odpowiedzialnych zachowań człowieka w środowisku jest bardzo szeroki. Zaznaczyć jednak należy, że jest to proces długofalowy i wymagający holistycznego podejścia oraz zaktywizowania działań społeczeństwa obywatelskiego, stąd też istotny jest transfer wiedzy do społeczeństwa i szeroka współpraca uczelni z otoczeniem.

Edukacja dla zrównoważonego rozwoju musi uwzględniać wszystkie aspekty funkcjonowania człowieka w rzeczywistości społeczno-przyrodniczej, dostarczając wiedzy, umiejętności i narzędzi niezbędnych w wielowymiarowej koegzystencji człowieka z materią ożywioną i nieożywioną. Wspierana jest przez międzynarodowe instrumenty polityczne i działania agend ONZ, w tym przede wszystkim UNESCO, a także przez krajowe instytucje szczebla centralnego i lokalnego. Duże znaczenie mają także działania społeczne, wspierane przez instytucje edukacyjne i naukowe [1]. Szczególnie istotną rolę odgrywają uczelnie techniczne, kształcące inżynierów różnych branż. W edukacji przyszłych adeptów sztuki inżynierskiej ważne jest kształcenie w zakresie nauk humanistycznych (etyczne) i społecznych, które

ukierunkowują na działalność służącą dobru społeczeństwa i ludzkości, oraz na ochronę środowiska naturalnego, kształtując odpowiedzialne postawy i roztropne działania [2, 3]. Tak więc w edukacji dla zrównoważonego rozwoju najważniejsze są komponenty aksjologiczne – wartości stanowiące podstawę funkcjonowania człowieka w świecie przyrodniczym i w świecie ludzkim. Należą do nich przede wszystkim odpowiedzialność oraz sprawiedliwość generacyjna i międzygeneracyjna, jak również solidarność i tolerancja [4]. Narzędziami wspomagającymi procesy edukacji dla zrównoważonego rozwoju są nowoczesne technologie informacyjno-komunikacyjne (ICTs) [5] oraz technologie kognitywne [6].

6.2. Edukacja dla zrównoważonego rozwoju – dobre praktyki

Edukacja dla zrównoważonego rozwoju obejmuje zarówno wymiar ekonomiczny, jak i społeczny i ekologiczny. W każdy z tych wymiarów wpisana jest ochrona środowiska przyrodniczego. W wymiar ekonomiczny wpisana jest idea Społecznej Odpowiedzialności Przedsiębiorstw, w której ochrona środowiska przyrodniczego jest (powinna być) integralną częścią działalności przedsiębiorstw. W wymiar społeczny wpisane jest kształtowanie świadomości ekologicznej, by każdy człowiek przejął cząstkę odpowiedzialności za planetę, na której żyje. Od indywidualnych zachowań ludzi (segregacja odpadów, oszczędzanie energii elektrycznej, rezygnacja z konsumpcjonizmu) zależy w dużej mierze stan środowiska przyrodniczego. Należy także dodać, że problemy ekologiczne są w gruncie rzeczy problemami społecznymi, gdyż życie w zanieczyszczonym środowisku powoduje większą zachorowalność, generującą koszty związane z ochroną zdrowia indywidualnego i publicznego, większą absencję chorobową w zakładach pracy i mniejszą aktywność społeczną. Wymiar ekologiczny ściśle związany jest z działaniami służącymi ochronie środowiska przyrodniczego, angażując zarówno podmioty indywidualne, społeczne, jak i instytucjonalne.

Edukacja dla zrównoważonego rozwoju wymaga skupienia, wokół głównych idei, jak najszerszej rzeszy ludzi, którym należy komunikować podstawowe założenia i motywować do działań zgodnych z celami zrównoważonego rozwoju. Funkcję taką pełnią między innymi liczne konferencje organizowane przez Katedrę Stosowanych Nauk Społecznych WOIZ Politechniki Śląskiej i Śląskie Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju działające przy Politechnice Śląskiej.

Globalne konteksty poszanowania praw i wolności człowieka to konferencja poświęcona szerzeniu wiedzy na temat Powszechnej Deklaracji Praw Człowieka oraz jej kluczowego znaczenia we współczesnym świecie. Integralnym elementem każdej edycji konferencji są zagadnienia dotyczące edukacji dla zrównoważonego rozwoju i celów zrównoważonego rozwoju, Agendy 21 i kolejnych programów i planów działań, w tym także nowej Agendy na rzecz Zrównoważonego Rozwoju do 2030 r. W trzynastu już edycjach konferencji udział wzięło liczne grono studentów, uczniów okolicznych szkół, przedstawicieli samorządów lokalnych, polityków, przedstawicieli świata biznesu i regionalnych izb gospodarczych, naukowców z różnych ośrodków naukowych w Polsce oraz z zagranicy (m.in. z Ukrainy, Słowacji, Austrii, Białorusi, Hiszpanii, USA, Szkocji), Efektem wygłoszonych referatów i dyskusji są monografie naukowe, które są dostępne dla szerokiego grona czytelników. Honorowy patronat nad konferencją sprawuje między innymi Polski Komitet ds. UNESCO, który z ramienia głównej agendy ONZ programowo działa na rzecz edukacji dla zrównoważonego rozwoju. Niejednokrotnie na konferencji obecni byli przedstawiciele Polskiego Komitetu ds. UNESCO oraz Ośrodka informacji ONZ w Warszawie, dzięki czemu uczestnicy konferencji mogli się zapoznać nie tylko z aktualnymi problemami, ale także dowiedzieć się, jakie działania są podejmowane w zakresie edukacji dla zrównoważonego rozwoju. Konferencja wnosi więc określony wkład w rozwój młodych ludzi w ramach edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju i kształtowania odpowiedzialnych postaw wobec otoczenia społeczno-przyrodniczego, by możliwy był dalszy rozwój i przetrwanie człowieka na ziemi.

Międzynarodowy Kongres Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju – odbywa się co dwa lata w Rybniku z inicjatywy Prezes Śląskiego Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju Aleksandry Kuzior i Prezydenta Miasta Piotra Kuczery. Kongres jest to forum wymiany doświadczeń, dzielenia się dobrymi praktykami i pomysłami w zakresie realizacji założeń idei społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstw oraz zrównoważonego rozwoju. Skupia międzynarodowe grono naukowców, biznesmenów, samorządowców, organizacji pozarządowych i społeczności lokalnej. W 2016 r. gościli w Rybniku uczestnicy z Austrii, Niemiec, Słowacji, Ukrainy i Polski. Patronat Honorowy nad Kongresem objęło Ministerstwo Rozwoju RP. Wykład plenarny nt. “Sustainable Development and Technology” wygłosił prof. Gerhard Banse, przedstawiciel Berliner Zentrum Technik und Kultur, wieloletni pracownik naukowy Karlsruher Institut für Technologie, zwracając uwagę na konieczność kompleksowego, holistycznego spojrzenia na zrównoważony rozwój, biorąc pod uwagę liczne współzależności ekonomiczne, społeczne, kulturowe

i ekologiczne w wymiarze globalnym i lokalnym, długoterminową orientację oraz potrzebę określenia limitów w odniesieniu do wzrostu gospodarczego. Ważnym wskaźnikiem zrównoważonego rozwoju jest rozwój nowoczesnych technologii, lecz z uwzględnieniem identyfikacji, oceny i minimalizacji ryzyk związanych z ich rozwojem i zastosowaniem. W zorganizowanych na kongresie dyskusjach panelowych udział wzięli: prof. Heinrich Badura z austriackiego Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, wiceprezydent Zabrza Katarzyna Dzióba, prezydent Wodzisławia Śląskiego Mieczysław Kieca oraz prezydent Rybnika Piotr Kuczera, prof. Michael Aßländer (Technische Universität Dresden, Internationales Hochschulinstitut Zittau, member of Executive Committe of EBEN), Paulina Bednarz (dyrektor ds. projektów unijnych i komunikacji Instytutu Badań nad Demokracją i Przedsiębiorstwem Prywatnym Fundacji Krajowej Izby Gospodarczej), dr inż. Janusz Karwot (prezes Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Rybniku), prof. Alla Lobanova (Krivoy Rog National University, Ukraina. Porównanie różnych doświadczeń (austriackich, niemieckich, polskich i ukraińskich) wskazuje kierunki działań do tego, aby idee społecznej odpowiedzialności przedsiębiorstw i zrównoważonego rozwoju zakorzeniły się w społeczeństwie i w gospodarce. Na Kongresie podpisano także listy intencyjne o współpracy między trzema organizacjami: Śląskim Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju (prof. Aleksandra Kuzior – prezes), Polskim Ruchem Czystszej Produkcji (dr Michał Cichy – prezes i prof. Zygfryd Nowak – wieloletni prezes i założyciel stowarzyszenia) oraz Centrum Doradztwa Etycznego Uniwersytetu Mateja Beli w Bańskiej Bystrzycy (prof. Pavel Fobel – dyrektor Centrum) [7]. W kolejnym Kongresie (2018) (rys. 6.1 i 6.2) kluczowe tematy obejmowały zagadnienia dotyczące circular economy, etycznych, społecznych i psychologicznych aspektów i wyzwań zrównoważonego rozwoju, rozwoju Przemysłu 4.0, ochrony środowiska społeczno-przyrodniczego i etycznego biznesu. W dyskusjach panelowych udział wzięli: prof. Anna Lupina-Wegener (University of Applied Sciences and Arts, Western Switzerland, School of Business and Engineering Vaud, Yverdon-les-Bains, Switzerland), prof. Aleksandra Kuzior (Politechnika Śląska), prof. Jerzy Buzek (poseł do Parlamentu Europejskiego), Piotr Kuczera (Prezydent Rybnika), prof. Zdzisława Piątek (Uniwersytet Jagielloński), prof. Krzysztof Zamasz (wiceprzewodniczący Śląsko-Zagłębiowskiej Metropolii), dr inż. Janusz Karwot (PWiK Rybnik), dr Zygmunt Łukaszczyk (dyrektor CKI Rybnik), prof. Agata Chudzicka-Czupała (SWPS), prof. Augustyn Bańka (SWPS), prof. Katarzyna Popiołek (SWPS), prof. Małgorzata Dobrowolska (Politechnika

Śląska), dr inż. Tomasz Zieliński (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach), dr Damian Grabowski (SWPS), dr inż. Józef Ober (Politechnika Śląska).

Rys. 6.1. Międzynarodowy Kongres Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju Rybnik 2018. Od lewej: prof. Aleksandra Kuzior, prof. Jerzy Buzek (Fot. P. Kuzior)
Fig. 6.1. International Congress of Business Ethics and Sustainable Development Rybnik 2018. From left: prof. Aleksandra Kuzior, prof. Jerzy Buzek (Photo by P. Kuzior)

Rys. 6.2. Międzynarodowy Kongres Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju Rybnik 2018. Od lewej: prof. Krzysztof Zamasz, Piotr Kuczera, prof. Jerzy Buzek, prof. Zdzisława Piątek, dr inż. Janusz Karwot, dr Zygmunt Łukaszczyk, prof. Aleksandra Kuzior, dr inż. Józef Ober (Fot. P. Kuzior)
Fig. 6.2. International Congress of Business Ethics and Sustainable Development Rybnik 2018. From left: prof. Krzysztof Zamasz, Piotr Kuczera, prof. Jerzy Buzek, prof. Zdzisława Piątek, dr inż. Janusz Karwot, dr Zygmunt Łukaszczyk, prof. Aleksandra Kuzior, dr inż. Józef Ober (Photo by P. Kuzior)

Przesłanie Kongresów kierowane jest do szerokiego grona odbiorców i integruje środowisko biznesu, samorządu, nauki i organizacji pozarządowych. Inicjatywa

organizacji Kongresu została doceniona także poprzez przyznanie nagrody specjalnej „Czarny Diament" prof. Aleksandrze Kuzior. Izba Przemysłowo-Handlowa Rybnickiego Okręgu Przemysłowego za wkład w krzewienie idei CSR i zrównoważonego rozwoju oraz integrowanie środowiska biznesowego z nauką.

Międzynarodowy Kongres Naukowy „Zrównoważony Rozwój – perspektywy na przyszłość" organizowany jest co dwa lata w Zabrzu przy współudziale Miasta Zabrze, Śląskiego Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju i Wydziału Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej. Realizowany jest pod honorowym patronatem prezydent Zabrza dr Małgorzaty Mańki-Szulik, prof. Jerzego Buzka (posła do Parlamentu Europejskiego) i prof. Arkadiusza Mężyka (rektora Politechniki Śląskiej). Pierwsza edycja Kongresu odbyła się w 30. rocznicę opublikowania Raportu Brundtland.

Kongres organizowany jest w celu oceny wdrażania założeń koncepcji zrównoważonego rozwoju w wymiarze globalnym, regionalnym i lokalnym, nakreślenia perspektyw na przyszłość oraz wskazania roli ważnych wydarzeń, które przyczyniły się do ukonstytuowania i ewolucji idei zrównoważonego rozwoju, takich jak: opublikowanie Raportu Brundtland (1987), opublikowanie raportów dla Klubu Rzymskiego (m.in. „Granice wzrostu" – 1972; „Ludzkość w punkcie zwrotnym" – 1974 i in.), organizacja Szczytu Ziemi w Rio de Janeiro (1992), Szczytu Ziemi w Johannesburgu (2002), Szczytu Ziemi w Rio de Janeiro (Rio+20 – 2012). Publikacja Agendy 21 (1992) i nowej Agendy na rzecz Zrównoważonego rozwoju do 2030 roku (2015). Kongres jest okazją do prezentowania wyników nowych badań w zakresie efektywnego realizowania założeń koncepcji zrównoważonego rozwoju dla dobra teraźniejszej i przyszłych generacji. Sesja inauguracyjna Kongresu odbyła się w Łaźni Łańcuszkowej postindustrialnego kompleksu sztolni Królowa Luiza w Zabrzu (rys. 6.3). W sesjach plenarnych i dyskusjach panelowych uczestniczyli: prezydent Zabrza Małgorzata Mańka-Szulik, prorektor ds. współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym Politechniki Śląskiej prof. Janusz Kotowicz, prezes Śląskiego Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju prof. Aleksandra Kuzior, dziekan Wydziału Organizacji i Zarządzania prof. Krzysztof Wodarski, Sekretarz Generalny Polskiego Komitetu ds. UNESCO prof. Sławomir Ratajski, prezes Polskiego Towarzystwa Anestezjologii i Intensywnej Terapii prof. Piotr Knapik, Sekretarz Rady Społecznej przy Arcybiskupie Metropolicie Katowickim ks. prof. Arkadiusz Wuwer (rys. 6.4 i 6.5).

Rys. 6.3. „Zrównoważony Rozwój – perspektywy na przyszłość” (2017) – uczestnicy Kongresu (Łaźnia Łańcuszkowa) (Fot. P. Kuzior)
Fig. 6.3. „Sustainable Development – prospects for the future” (2017) – Congress participants (Łaźnia Łańcuszkowa) (Photo by P. Kuzior)

Rys. 6.4. „Zrównoważony Rozwój – perspektywy na przyszłość” (2017). Od lewej: prof. Jerzy Buzek, prof. Aleksandra Kuzior, prof. Krzysztof Wodarski
Fig. 6.4. „Sustainable Development – prospects for the future” 2017. From left: prof. Jerzy Buzek, prof. Aleksandra Kuzior, prof. Krzysztof Wodarski

Rys. 6.5. „Zrównoważony Rozwój – perspektywy na przyszłość" 2017. Od lewej: prof. Aleksandra Kuzior, prof. Arkadiusz Wuwer, prof. Sławomir Ratajski, dr Małgorzta Mańka-Szulik, prof. Janusz Kotowicz, prof. Krzysztof Wodarski, prof. Piotr Knapik (Fot. P. Kuzior)

Fig. 6.5. „Sustainable Development – prospects for the future" 2017. From left: prof. Aleksandra Kuzior, ks. prof. Arkadiusz Wuwer, prof. Sławomir Ratajski, dr Małgorzata Mańka-Szulik, prof. Janusz Kotowicz, prof. Krzysztof Wodarski, prof. Piotr Knapik (Photo by P. Kuzior)

Słuchacze mogli się zapoznać z konkretnymi działaniami Miasta Zabrze w realizacji założeń zrównoważonego rozwoju, rolą kultury jako integralnego elementu zrównoważonego rozwoju społecznego oraz zaangażowania UNESCO w różnorodne inicjatywy promujące zrównoważony rozwoju, ekologiczne technologie służące ochronie środowiska, opracowane i wdrożone przez naukowców Politechniki Śląskiej, z ważnym wkładem uczelni wyższych w przygotowanie profesjonalnych kadr menedżerskich dla biznesu, świadomych tego, że zrównoważony rozwój ekonomiczny wymaga synergii wielu podmiotów życia gospodarczego i społecznego, uwzględniających różnorodne aspekty jakości życia oraz roli czynnika duchowego w zrównoważonym rozwoju jednostki i społeczeństwa i fundamentalnego znaczenia wartości etycznych w realizacji zasad zrównoważonego rozwoju. W drugim dniu obrad, głównym pytaniem zadanym w kontekście realizacji założeń zrównoważonego rozwoju, było pytanie – „gdzie jesteśmy, dokąd zmierzamy?". Odpowiedzi na to pytanie udzielili między innymi prof. Jerzy Buzek – poseł do Parlamentu Europejskiego, prof. Małgorzata Burkchard-Dziubińska z Uniwersytetu Łódzkiego, prezes zarządu łódzkiego oddziału Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego. Wizyta profesora Jerzego Buzka dała także możliwość uczestnikom Kongresu i studentom

Wydziału Organizacji i Zarządzania bezpośredniego zapytania o główne problemy poruszane na forum Parlamentu Europejskiego. Profesor mówił między innymi o trendach dotyczących energetyki i ochrony środowiska. Kongres zgromadził ponad 200 osób z Polski, Ukrainy, Indii, Słowacji i Litwy – naukowców, studentów, przedstawicieli firm oraz instytucji państwowych i samorządowych [8]. Głównym celem każdej edycji Kongresu jest ukazanie praktycznych aspektów wdrażania koncepcji zrównoważonego rozwoju. W 2019 r. główna problematyka obrad skupiała się wokół ochrony powietrza oraz obiektywnych i subiektywnych wskaźników jakości życia (rys. 6.6).

Rys. 6.6. „Zrównoważony Rozwój – perspektywy na przyszłość" (2019). Od lewej: prof. Aleksandra Kuzior, Jarosław Zagórowski, Katarzyna Dzióba, prof. Jerzy Buzek, prof. Marian Turek (Fot. P. Kuzior)

Fig. 6.6. „Sustainable Development – prospects for the future" 2017. From left: prof. Aleksandra Kuzior, Jarosław Zagórowski, Katarzyna Dzióba, prof. Jerzy Buzek, prof. Marian Turek (Photo by P. Kuzior)

W dyskusji panelowej nt. „Ochrona powietrza determinantą poprawy jakości życia" wzięli udział: wiceprezydent Zabrza Katarzyna Dióba, prof. Jerzy Buzek Premier RP w latach 1997–2001, przewodniczący Parlamentu Europejskiego w latach 2009–2012, poseł do PE od 2004 r., prof. Marian Turek, dziekan Wydziału Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej w latach 2008–2016 oraz Jarosław Zagórowski, prezes Jastrzębskiej Spółki Węglowej w latach 2007–2015, prof. Aleksandra Kuzior – prezes Śląskiego Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju. Słuchacze mieli możliwość zapoznania się z działaniami podjętymi przez

władze Zabrza, służącymi ochronie powietrza, działaniami komisji przemysłu, badań naukowych i energii Parlamentu Europejskiego, problemami związanymi z niską emisją i smogiem oraz działaniami w zakresie kształtowania świadomości ekologicznej. Kongresowi towarzyszyła wystawa prac polskich artystów pod tytułem "Stop! Smog”. Ta edycja Kongresu także zgromadziła prawie 200 osób. Dodatkowo uczestnicy mieli okazję do zwiedzenia Kopalni Guido, reliktu przemysłu wydobywczego i perły turystyki postindustrialnej [9]. Kolejny Kongres planowany jest na wrzesień 2021 r. Pomysłodawczynią i inicjatorką jest prof. Aleksandra Kuzior.

Debiut naukowy – zrównoważony rozwój – konkurs na innowacyjny artykuł naukowy, to inicjatywa posła do Parlamentu Europejskiego prof. Jerzego Buzka, w organizacji, w której czynny udział bierze Wydział Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej i Śląskie Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju. W 2020 r. miała miejsce 10. edycja konkursu, w ramach którego młodzi ludzie mogli zaprezentować i opublikować swoje artykuły poświęcone problematyce zrównoważonego rozwoju. Tym razem konferencja odbyła się w trybie hybrydowym – stacjonarnie i on-line. Sesja plenarna tematycznie oscylowała wokół zagadnień Europejskiego Zielonego Ładu oraz wokół kompetencji krytycznego i analitycznego myślenia, zdefiniowanych jako kompetencje przyszłości. Wzięli w niej udział: prof. Jerzy Buzek – poseł do Parlamentu Europejskiego, prof. Jan Kaźmierczak – dziekan Wydziału Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej oraz prof. Aleksandra Kuzior – prodziekan ds. Współpracy i Rozwoju WOIZ (rys. 6.7 i 6.8).

Rys. 6.7. Debiut Naukowy – Zrównoważony Rozwój (2020). Od lewej: prof. Aleksandra Kuzior, prof. Jerzy Buzek, prof. Jan Kaźmierczak (Fot. A. Smogulski)
Fig. 6.7. Scientific Debut – Sustainable Development (2020). From left: prof. Aleksandra Kuzior, prof. Jerzy Buzek, prof. Jan Kaźmierczak (Photo by A. Smogulski)

Rys. 6.8. Debiut Naukowy – Zrównoważony Rozwój 2020. Od lewej: prof. Jan Kaźmierczak, dr Józef Ober, prof. Aleksandra Kuzior, dr Anna Kochmańska, prof. Jerzy Buzek, Anna Amiłowska-Czaja, dr Katarzyna Postrzednik-Lotko, Krzysztof Kaczorowski, dr Bartłomiej Knosala, dr Henryk Kretek (Fot. A. Smogulski)

Fig. 6.8. Scientific Debut – Sustainable Development 2020. From left: prof. Jan Kaźmierczak, dr Józef Ober, prof. Aleksandra Kuzior, dr Anna Kochmańska, prof. Jerzy Buzek, Anna Amiłowska-Czaja, dr Katarzyna Postrzednik-Lotko, Krzysztof Kaczorowski, dr Bartłomiej Knosala, dr Henryk Kretek (Photo by A. Smogulski)

W sekcjach tematycznych prezentowane były referaty konkursowe. Od początku trwania projektu, tj. od 2009 r. powstało 12 tomów monografii z artykułami uczestników konkursu, kilkudziesięciu studentów otworzyło przewody doktorskie, a kilkunastu obroniło doktoraty. Debiut naukowy jest rzeczywistym wsparciem kariery młodych naukowców. Organizatorzy zakładają kontynuację projektu, a jego formuła zostanie poszerzona o zagadnienia Nowego Zielonego Ładu [10].

InfoEnergia – do inicjatyw promujących edukację dla zrównoważonego rozwoju zaliczyć należy także zorganizowaną przez Śląskie Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju dyskusję panelową nt. „Zrównoważony rozwój Śląska – aksjologiczne podstawy i praktyka działań" w 2017 r. na targach i konferencji InfoEnergia. W dyskusji udział wzięli: dr Małgorzata Mańka-Szulik (Prezydent Miasta Zabrze i Przewodnicząca Górnośląskiego Związku Metropolitalnego), prof. Jerzy Buzek (poseł do Parlamentu Europejskiego, przewodniczący Komisji Przemysłu, Badań Naukowych i Energii), prof. Janusz Kotowicz (prorektor ds. Współpracy z Otoczeniem Społeczno-Gospodarczym Politechniki Śląskiej), prof. Aleksandra Kuzior (prezes Śląskiego Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju),

Tadeusz Donocik (prezes Regionalnej Izby Gospodarczej) oraz prof. Andrzej Kiepas (kierownik Zakładu Antropologii Filozoficznej i Kognitywistyki Uniwersytetu Śląskiego) (rys. 6.9).

Rys. 6.9. InfoEnergia 2017. Od lewej: prof. Aleksandra Kuzior, prof. Jerzy Buzek, dr Małgorzata Mańka-Szulik, prof. Janusz Kotowicz, Tadeusz Donocik, prof. Andrzej Kiepas (Fot. P. Kuzior)

Fig. 6.9. InfoEnergia 2017. From left: prof. Aleksandra Kuzior, prof. Jerzy Buzek, dr Małgorzata Mańka-Szulik, prof. Janusz Kotowicz, Tadeusz Donocik, prof. Andrzej Kiepas (Photo by P. Kuzior)

W dyskusji poruszono tematy dotyczące zrównoważonego rozwoju Śląska w aspekcie Europejskiej Wspólnoty Energetycznej i bezpieczeństwa energetycznego, wkładu szkół wyższych w procesy programowania i wdrażania założeń zrównoważonego rozwoju Śląska, Społecznej Odpowiedzialności Biznesu (CSR) i problemów RRI (Responsible Research and Innovations). Przeprowadzona na InfoENERGIA 2017 dyskusja dotyczyła zarówno wymiaru lokalnego i regionalnego zrównoważonego rozwoju i poruszała zarówno wątki aksjologiczne, etyczne (odpowiedzialności i sprawiedliwości generacyjnej i międzygeneracyjnej) oraz techniczne i zarządcze aspekty zrównoważonego rozwoju. Zwrócono uwagę na fakt, że Śląsk i Zagłębie to najbardziej zanieczyszczone regiony Europy, a zanieczyszczenie powietrza jest powodem wielu chorób. Ale także przedstawiono rozwiązania, które mogą obniżyć negatywny wpływ energetyki konwencjonalnej na środowisko naturalne oraz ograniczyć niską emisję. Dyskusja panelowa na temat zrównoważonego rozwoju Śląska zgromadziła liczne grono zainteresowanych. Przybyli studenci śląskich uczelni,

naukowcy z Uniwersytetu Śląskiego, Politechniki Śląskiej i Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, zajmujący się różnymi aspektami zrównoważonego rozwoju i społecznej odpowiedzialności biznesu oraz przedstawiciele samorządów lokalnych. Podjęta problematyka uznana została za bardzo ważną, a paneliści nakreślili kierunki rozwoju, uwzględniające zrównoważony rozwój regionu [11].

Seminaria dla Regionalnej Izby Gospodarczej w Katowicach z zakresu Społecznej Odpowiedzialności Przedsiębiorstw – realizowane są przez członków Śląskiego Centrum Etyki Biznesu i Zrównoważonego Rozwoju dla otoczenia społeczno-gospodarczego. Na seminariach poruszane są kwestie między innymi obowiązku raportowania danych pozafinansowych, zagadnienia prawne związane z CSR w obszarze reklamy, zarządzania zasobami ludzkimi z perspektywy CSR, PR-em, zagadnieniami etycznego liderowania, realiów stosowania CSR w przedsiębiorstwach i marki osobistej liderów, jako narzędzi CSR.

Aktywności związanych z promowaniem idei zrównoważonego rozwoju, edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju i kształtowania świadomości ekologicznej jest oczywiście o wiele więcej. Z konieczności przedstawione zostały tylko wybrane. Wnoszą one znaczący wkład w kształtowanie postaw proekologicznych różnych podmiotów otoczenia społeczno-gospodarczego oraz studentów i uczniów szkół średnich.

6.3. Ścieżki edukacyjne jako element promocji wartości lokalnych

W dyscyplinie Architektura i Urbanistyka prowadzone są badania nad problemami zagospodarowania terenów rekreacyjnych. W ramach tego wykonuje się analizy wartości lokalnych związanych z terenami zieleni, parkami, terenami poprzemysłowymi, krajobrazem terenów zurbanizowanych i pozamiejskich. Na podstawie rozpoznanych walorów określa się sposoby zagospodarowania ze wskazaniem miejsc i obiektów wymagających ochrony, zabezpieczenia lub szerszego udostępnienia. Wiele prowadzonych badań opartych jest na projektach koncepcyjnych i budowlanych (research by design). Doktor hab. inż. arch. Krzysztof Rostański prof. PŚ opracował heurystyczny koncept naukowy, nazwany „Naturą modelowaną”, opisujący sposoby zagospodarowania i przebudowy terenów zieleni, który zakłada wzmacnianie lokalnej bioróżnorodności, sprzyja ochronie przed zmianami klimatu i podnosi kwestie lokalnych wartości kulturowych [12, 13]. Wartości kulturowe zostały głębiej opisane w monografii „Konotacje w architekturze” [14]. W metodzie

heurystycznej zakłada się hipotezę celu projektowanych interwencji planistycznych. Modele określone w „Naturze modelowanej" – historyczny, prawny, ideowy, estetyczny, formalny, percepcyjny, funkcjonalny i sumaryczny heurystyczny, wskazują cele do wyboru, działania z nimi związane i efekty, jakie są przez nie osiągane w kontekście zrównoważonego rozwoju. Widocznym efektem zastosowania wspomnianych modeli są wzorce kształtowania zieleni w sposób przyrodniczy, organiczny, malowniczy i geometryczny. Różnią się pod względem estetyki i ilości użytych roślin rodzimych. Niema tu prostego schematu wyboru wzorca, choć można założyć, że dla centrów terenów zurbanizowanych korzystniejsze są wzorce wyraźniejsze w geometrii i bardziej barwne, a dla terenów otwartych (poza centrum) wzorce swobodniejsze, bardziej bliskie naturalnym zbiorowiskom roślinnym.

Powodzenie działań w korzystnym przyrodniczo zagospodarowaniu terenu zależy od społecznego poparcia. Edukacja szkolna wciąż wydaje się niewystarczająca. Przeładowane programy nauczania i sposób ich weryfikacji nastawione są na znajomość faktów i wyszukiwanie fraz bez ich zrozumienia. Informacja o terenie wydaje się być kluczowa, bo zrozumienie wartości lokalnych, wśród których żyjemy, jest czymś, co każdy może zweryfikować i co może zostać przyjęte jako prawda w świadomości lokalnego społeczeństwa. Elementy edukacyjne w terenie powinny czerpać z szerszej specjalistycznej wiedzy, ale podawać ją w sposób zrozumiały i przekładalny na walory lokalne. Powinny podkreślać miejscowe wartości. Rozbudzać poczucie związku z miejscem, z jego tożsamością, wyjątkowością.

Wśród tematów, jakie najczęściej występują na ścieżkach edukacyjnych są:

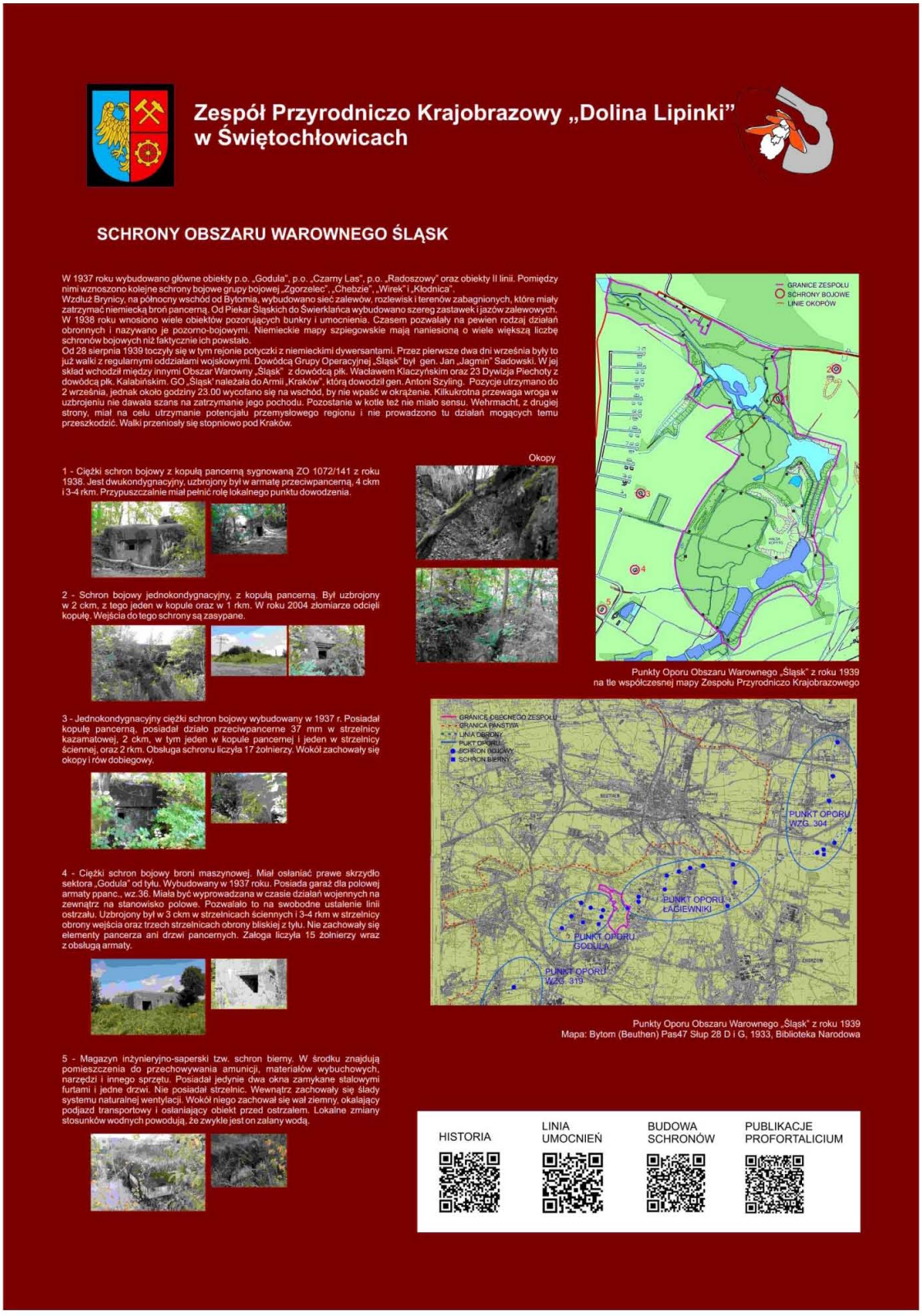
- Historia obiektu – rozwój lokalnego przemysłu, pozostałości z okresu II wojny światowej i walory architektoniczne związane z różnymi stylami i kontekstem historycznym;
- Geologia – minerały kruszconośne i charakterystyka materiału zwałowisk lub innych utworów geologicznych;
- Fauna – ptaki, motyle i ważki, jako najłatwiej obserwowane zwierzęta oraz ssaki;
- Rośliny – drzewa i krzewy, rośliny zielne rodzime i obce inwazyjne, lokalne rośliny o szczególnych cechach, rośliny ozdobne;
- Ekologia – zagadnienia dotyczące funkcjonowania ekosystemów, zagrożeń i działań ochronnych;
- Idee mające związek z obiektem – popularyzacja działań wzmacniających lokalną tożsamość, popularyzacja różnych zagadnień rozwijających kontekst walorów

lokalnych, np. wzorce z innych krajów, zagadnienia artystyczne, religijne, sportowe itp.

Umieszczenie w terenie tablic z materiałami graficznymi i krótkimi opisami jest korzystne ze względu na rozbudzanie zaciekawienia użytkowników. Aby uchronić tablice przed zniszczeniem konieczna jest ich ochrona. Można to realizować przez zastosowanie mocnej konstrukcji i ich zabezpieczenie, przed malowaniem, farbą lub przez użycie konstrukcji łatwych do wymiany i nie pociągających za sobą znacznych kosztów. W związku z rozwojem technik informatycznych korzystnym jest wprowadzenie na tablice odpowiednich kodów QR, które umożliwiają łatwe znalezienie tematu na odpowiednich stronach internetowych, poszerzających tematykę dla osób zainteresowanych [15]. Treści podane na tablicach muszą być zwartym skrótem, który nie wypełni powierzchni tablic nadmiernie. Duża ilość tekstu powoduje niechęć użytkowników do jego czytania. Zawsze korzystne jest podawanie istotnych treści w sposób graficzny, umożliwiający szybką orientację (rys. 6.10 i 6.11).

Efekty edukacyjne wzmacniają charakterystyczne cechy elementów projektowanych. Ułatwia to zapamiętanie obiektu i treści z nim związanych. Korzystne jest opracowanie i umieszczenie na tablicach wyróżniających elementów graficznych w formie logo. Każdy obiekt powinien też mieć własną, charakterystyczną szatę graficzną. Bardzo dobrym działaniem, było wprowadzenie zamówionych graffiti na ścianach wiaduktów na terenie „Żabich Dołów" w części bytomskiej (rys. 6.12). Powiązanie wysokich i oryginalnych walorów estetycznych – kulturowych z walorami przyrodniczymi zwiększyło atrakcyjność obiektu. Należy tu zwrócić uwagę na sterowanie ruchem w terenie, który jest postrzegany jako atrakcyjny. Istotne jest zróżnicowanie dostępności terenu dla samochodów, rowerów, uprawiania sportu i dostępu pieszych zależnie od wymaganej ochrony siedlisk.

Pewne obiekty umożliwiają ilustrację treści szkolnej podstawy programowej. Korzystne jest umieszczenie w terenie odpowiednich miejsc umożliwiających prowadzenie zajęć z uczniami na świeżym powietrzu. Ilość miejsc i tablic odnoszących się do zbliżonych treści nie powinna przekraczać kilku. Ilość punktów edukacyjnych przekraczająca 5 powoduje utratę skupienia się uczniów na temacie. Popularność mediów internetowych wskazuje na istotną potrzebę przygotowania dedykowanej infrastruktury edukacyjnej w postaci stron internetowych. Na takich stronach konieczne jest umieszczenie podstawowych treści o obiekcie, ale też elementów zwiększających atrakcyjność w postaci gier indywidualnych i grupowych oraz różnych interaktywnych funkcji (np. www.zabiedoly.pl).



Rys. 6.10. Tablica edukacyjna prezentująca walory historyczne „Doliny Lipinki” w Świętochłowicach
Fig. 6.10. Educational board presenting the historical values of the "Lipinka Valley" in Świętochłowice
Źródło: Dokumentacja projektowa do ustanowienia Zespołu Przyrodniczo-Krajobrazowego „Dolina Lipinki” w Świętochłowicach. Pracownia HORTUS Listopad 2020. Inwestor: Gmina Świętochłowice. Współpraca: Rostański K.M., Rostański A., Gorczyca J., Dulias R., Jonczy I., Bronicka B.

Rys. 6.11. Tablica edukacyjna prezentująca metalofity – rośliny charakterystyczne dla hałd pocynkowych. Ruda Śląska

Fig. 6.11. Educational board presenting metallophytes – plants characteristic for post-zinc heaps. Ruda Śląska

Źródło: Dokumentacja projektowa budowlano-wykonawcza dla zadania: „Rewitalizacja zwałowiska pocynkowego zlokalizowanego w Rudzie Śląskiej w rejonie ul. 1 Maja" w ramach projektu Implementation of Sustainable Land Use in Integrated Environmental Management of Functional Urban Areas – LUMAT. Pracownia HORTUS Czerwiec 2017, realizacja 11.2018. Inwestor: Miasto Ruda Śląska. Współpraca: Rostański K., Rostański L., Rostański A., Bronicka B., Trocer S., Pogrzeba M., Żmudzińska-Nowak M., Jonczy I.

Rys. 6.12. Tablica edukacyjna na temat ptaków występujących na terenie Zespołu Przyrodniczo-Krajobrazowego „Żabie Doły” w części bytomskiej

Fig. 6.12. Educational board on birds occurring in the area of the Nature and Landscape Complex "Żabie Doły" in the Bytom part

Źródło: Projekt rewitalizacji terenu Zespołu przyrodniczo-krajobrazowego „Żabie Doły” (część bytomska). AB „CoLoR inwestprojekt” s.c. Kwiecień 2017, realizacja wrzesień 2018. Inwestor: Miejski Zarząd Zieleni i Gospodarki Komunalnej w Bytomiu. Współpraca: Rostański K., Rostański L., Czerwiński T., Rostański A., Gorczyca J.

6.4. Uczelnie techniczne wobec wyzwań edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju

Znaczenie edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju

Fundamentalne znaczenie udziału szkolnictwa wyższego w dążeniu do zmiany obecnego modelu rozwoju na model integrujący kwestie społeczne, środowiskowe i ekonomiczne jest akcentowane od wielu lat. Rolę edukacji dla zrównoważonego rozwoju podkreśla ponad 25 międzynarodowych deklaracji, publikowanych od 1972 r. [16]. Nowsze deklaracje, w tym Traktat Rio+20 o szkolnictwie wyższym (Rio+20 Treaty on Higher Education) stały się dokumentami wiążącymi, co oznacza, że ich podpisanie skutkuje wskazaniem realnego udziału sygnatariuszy w promowaniu zrównoważonego rozwoju [17, 18]. Swoje zobowiązania ogłosiło ponad 600 uniwersytetów z całego świata, podpisując takie deklaracje i konwencje jak Karta Bolońska, Deklaracja Halifax, Deklaracja z Talloires czy Karta Zrównoważonego Rozwoju Copernicus Alliance [19]. Wezwanie do prowadzenia edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju, zostało zawarte również w dokumencie Agenda 21, przyjętym na Konferencji ONZ na temat Środowiska i Rozwoju w Rio de Janeiro w 1992 r. W odpowiedzi na to wezwanie powstała europejska sieć zrzeszająca instytucje szkolnictwa wyższego (Copernicus Alliance). Ostatnim historycznie dokumentem, który jednoznacznie wskazuje, że sektor szkolnictwa wyższego powinien bardziej niż kiedykolwiek angażować się we wdrażanie zrównoważonego rozwoju we wszystkich obszarach tematycznych jest ogłoszona w listopadzie 2015 r. przez Zgromadzenie Ogólne ONZ „Agenda 2030" oraz Cele Zrównoważonego Rozwoju (ang. *Sustainable Development Goals* – SDGs) [20, 21]. Agenda ta podkreśla znaczenie edukacji w realizacji każdego z siedemnastu Celów Zrównoważonego Rozwoju, a nie jedynie Celu 4, który odnosi się bezpośrednio do działań edukacyjnych (Cel 4 – Zapewnić wszystkim edukację wysokiej jakości oraz promować uczenie się przez całe życie) [22]. Instytucje szkolnictwa wyższego ze względu na pełnione przez nich role (kształcenie, prowadzenie badań naukowych, społeczna) są odpowiedzialne w sposób szczególny za „wyposażanie" młodego pokolenia w wiedzę, umiejętności i kompetencje społeczne umożliwiające im realizować Cele Zrównoważonego Rozwoju. W świetle powyższego, włączanie edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju do programów nauczania na uczelniach wyższych jest działaniem bezwzględnie potrzebnym.

Zrównoważony rozwój w programach nauczania na uczelniach technicznych

Obecnie, w wielu przypadkach, edukacja na rzecz zrównoważonego rozwoju oznacza nauczanie i przybliżanie samej idei zrównoważonego rozwoju, działań oraz powiązanych z koncepcją teorii [8]. Jednakże, aby tego rodzaju edukacja mogła przynosić zamierzone efekty powinna być edukacją holistyczną i skutkować zmianą świadomości społecznej. Nie powinna więc koncentrować się jedynie na wybranych koncepcjach i fragmentarycznej wiedzy, lecz wskazywać wzajemne powiązania i oddziaływania sfery życia gospodarczego i społecznego na środowisko [1].

Poza licznymi przykładami polityk i deklaracji, coraz częściej pilna potrzeba zmiany obecnych modeli kształcenia inżynierów na modele zorientowane na rzecz zrównoważonego rozwoju, wskazywana jest w literaturze przedmiotu [23–25]. Projektowanie i wdrażanie rozwiązań mających wspierać osiąganie Celów Zrównoważonego Rozwoju wymaga znacznego wsparcia ze strony nauk technicznych. Niezbędne jest kształcenie inżynierów świadomych wyzwań zrównoważonego rozwoju, posiadających wiedzę i umiejętności, które przyczynią się do wprowadzenia zmian związanych z wdrożeniem gospodarki niskoemisyjnej, rozwiązań inżynierskich przyczyniających się do obniżania zużycia energii i surowców, ale również inżynierów cechujących się kreatywnością i zdolnością do współpracy z różnymi grupami interesariuszy. Można wyróżnić trzy główne powody, dla których podkreśla się kluczowy charakter zrównoważonej inżynierii w kontekście szeroko rozumianego rozwoju zrównoważonego [26]:

- wszechobecność działalności inżynierskiej,
- jej znaczenie dla rozwoju gospodarczego i podnoszenia standardów życia,
- znaczący wpływ, jaki inżynieria wywiera na środowisko naturalne.

Badania skupione wokół sposobów integrowania zagadnień zrównoważonego rozwoju w edukacji inżynierów wskazują, że pomimo tego, iż wiele przedmiotów związanych tematycznie ze zrównoważonym rozwojem zostało już w ostatnich latach wprowadzonych w programach nauczania na uczelniach wyższych [27], programy kształcenia na uczelniach technicznych, koncentrują się na dostarczaniu wiedzy umożliwiającej rozwiązywanie problemów technicznych bez uwzględnienia, w wielu przypadkach, skutków społecznych i środowiskowych jakie mogą wywoływać proponowane rozwiązania inżynierskie [28, 29]. Z tego też względu tak ważnym jest poszerzenie wiedzy przyszłych inżynierów w zakresie wpływu decyzji na projektowane systemy [30]. Badania wskazują również, że istnieje niewielka integracja strategiczna i systemowa treści odnoszących się do zrównoważonego

rozwoju w programach kształcenia [31, 32]. Zgodnie z zapisami Deklaracji z Barcelony z 2004 r., zatwierdzonej podczas konferencji poświęconej edukacji inżynierów na rzecz zrównoważonego rozwoju (Engineering Education for Sustainable Development) w obecnych czasach inżynier powinien [33]:

- rozumieć oddziaływania pracy na społeczeństwo i środowisko, zarówno na poziomie lokalnym jak i globalnym, w celu identyfikacji potencjalnych wyzwań, zagrożeń i skutków,
- rozumieć wkład swojej pracy w różnych kontekstach kulturowych, społecznych i politycznych oraz uwzględniać różnice,
- umieć pracować w międzydyscyplinarnych zespołach w celu dostosowywania obecnej technologii do wymagań wynikających ze zrównoważonego stylu życia, efektywnego gospodarowania zasobami, zapobiegania zanieczyszczeniom i gospodarowania odpadami,
- umieć stosować podejście holistyczne i systemowe do rozwiązywania problemów oraz posiadać umiejętność wychodzenia poza tradycyjne podejście polegające na dekomponowaniu problemu na oddzielne, niepowiązane ze sobą elementy,
- aktywnie uczestniczyć w debacie i procesie formułowania polityk dotyczących rozwoju gospodarczego, społecznego i technologicznego, wspierając w ten sposób zmiany w kierunku rozwoju zrównoważonego,
- stosować wiedzę zawodową kierując się zasadami etyki oraz uniwersalnymi wartościami,
- uwzględniać potrzeby obywateli i innych zainteresowanych stron oraz umożliwiać im wypowiadanie się na temat rozwoju nowych technologii i infrastruktury.

Kształcenie przyszłych specjalistów, inżynierów którzy powinni umieć wykorzystać swoją wiedzę w kontekście naukowym i technicznym przy jednoczesnym uwzględnieniu potrzeb społecznych i środowiskowych jest zadaniem, które powinno być realizowane na uczelniach technicznych.

Badania – zrównoważony rozwój w programach kształcenia na polskich uczelniach technicznych

Zagadnienia związane z rolą szkolnictwa wyższego w rozwijaniu i wzmacnianiu kompetencji ukierunkowanych na zrównoważony rozwój są tematem aktualnym i stanowią przedmiot wielu opracowań naukowych [34–40]. Jednakże niewiele z nich koncentruje się na analizie podejścia uczelni technicznych do włączania zagadnień zrównoważonego rozwoju do programów kształcenia inżynierów [25, 41–43].

W związku z tym badania w podobszarze pt.: „Uczelnie techniczne wobec wyzwań edukacji na rzecz zrównoważonego rozwoju" będą koncentrowały się na analizie stanu obecnego w zakresie integrowania zagadnień zrównoważonego rozwoju w programach kształcenia na polskich uczelniach technicznych. Zaproponowane zostanie narzędzie oceny stopnia wdrożenia zagadnień zrównoważonego rozwoju, które wykorzystane w kolejnych etapach badań pozwoli porównać sytuację krajowych uczelni z uczelniami technicznymi wybranych krajów członkowskich Unii Europejskiej.

6.5. Kształcenie etyczne dla ochrony środowiska

Degradacja środowiska naturalnego jest wynikiem działalności człowieka. Wynikające z tego faktu zagrożenia nie tylko dla flory i fauny, ale dla całej ludzkości są bezpośrednio związane ze sposobami gospodarowania na Ziemi [44]. Mają one charakter antropogenny, zależny od działań człowieka. Sfera ludzkich działań to obszar opisywany i analizowany w kategoriach moralnych. Zajmując się zagadnieniami ekologicznymi, należy zatem rozważać je w kategoriach etycznych. Z punktu widzenia historii ludzkości, człowiek znalazł się w sytuacji bezprecedensowej [45]. Po raz pierwszy w dziejach, człowiek jest w stanie nieodwracalnie zachwiać podstawami swego życia i całkowicie je zniszczyć. Poprzez całe epoki przyroda oddziaływała na człowieka, który podejmował rozmaite próby obrony przed jej żywiołami. Mimo stałych ingerencji człowieka w otaczające środowisko, pozostawało ono dla niego czymś przekraczającym jego siły. Obecnie, na skutek gwałtownego rozwoju techniki sytuacja odwróciła się. To nie przyroda zagraża człowiekowi, ale człowiek zagraża przyrodzie. Człowiek stał się wyzyskiwaczem przyrody a Ziemia surowcem do eksploatowania, fabryką do produkcji przynoszącej materialny zysk [46]. Można powiedzieć nawet, że przyroda stała się potencjalną ofiarą człowieka [47].

Postęp technologiczny i szybki rozwój gospodarczy spowodowały wzrost zamożności mieszkańców, zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych. Możliwość nabywania coraz większej ilości dóbr i korzystania z rozlicznych usług stała się dziś kryterium określającym status społeczny człowieka. Przenikające się nawzajem sfery ekonomiczne, konsumpcyjne i prywatne utworzyły specyficzną kulturę, zwaną kulturą konsumencką. Jej konsekwencją jest niepohamowane eksploatowanie środowiska naturalnego i postępujące uprzedmiotowienie relacji międzyludzkich. W krajach

zindustrializowanych osiągnięto wysoki standard życia obywateli kosztem trwającej przez dziesięciolecia, regularnej dewastacji środowiska naturalnego i dużej emisji gazów cieplarnianych. Paradoksalnie, wszystkie skutki degradacji środowiska naturalnego, a zwłaszcza postępujące zmiany klimatyczne, oddziaływują w sposób nieproporcjonalny na kraje słabo rozwinięte, zwłaszcza kraje afrykańskie, mające tylko niewielki udział w korzystaniu z zasobów i bogactw Ziemi. W nieznacznym stopniu uczestniczą one w dobrobycie i rozwoju, a najbardziej są dotknięte niszczącymi działaniami nowoczesnego przemysłu. Susze, powodzie, kurczące się zasoby czystej wody, postępująca erozja ziemi, zamieniająca ogromne tereny w pustynie, są przede wszystkim udziałem krajów gospodarczo wykluczonych [48].

Katastrofalna sytuacja, którą człowiek spowodował jest ogromnym wyzwaniem dla etyki, która już od pewnego czasu nie nadąża za generowanymi problemami w kwestii ochrony środowiska naturalnego. Problematyka ta domaga się pilnego przeformułowania zakresu i kryteriów moralnych ocen. Należy mieć świadomość, że każde działanie lub zaniechanie, ma moc dokonywania zmian czasowo-przestrzennych i odpowiedzialność człowieka nie może być już pojmowana jedynie w kategoriach zasięgu lokalnego [48]. Skala możliwych następstw ludzkich poczynań przerosła możliwości naszej wyobraźni. Działania współczesnego człowieka odciskają swoje piętno na terenach i czasach zbyt odległych, aby mogły mieścić się w ramach obecnych norm etycznych. Nowoczesne technologie otworzyły pole do działań o skali, przedmiocie i następstwach tak obszernych, że znane kwestie dawnej, ale i obecnej etyki nie mogą ich ogarnąć [49, 50].Wyobraźnia jednostek samodzielnie nie potrafi prześledzić do końca najodleglejszych konsekwencji swych dzisiejszych działań. Nie istnieją też przekonujące pobudki do podjęcia należytego wysiłku w tej kwestii. Zaspokajamy swoje poczucie wypełnienia obowiązku moralnego podejmując odpowiedzialność za osoby nam bliskie. Za odległe konsekwencje naszych czynów nie przyjmujemy odpowiedzialności, ponieważ albo ich nie dostrzegamy, albo uważamy, że powinny zająć się nimi odpowiednie instytucje. Tymczasem, różnorakie, skomplikowane związki ludzkich działań i ich powiązania, które nie są nam znane i których nie potrafimy objąć swą odpowiedzialnością, decydują o losach ludzi, których nigdy nie spotkamy, również tych, którzy jeszcze się nie urodzili [49, 51]. Dlatego ukonstytuowanie nowej etyki, etyki na miarę gigantycznych możliwości człowieka, wymaga wykształcenia w nim pewnego imperatywu kategorycznego, który nakazywałby takie działanie, aby jego wyniki miały zasięg globalny [52, 53].

Na planecie zwanej Ziemią jesteśmy od siebie globalnie uzależnieni, a zatem z etycznego punktu widzenia wszyscy jesteśmy za siebie odpowiedzialni. W obliczu

zagrożeń wynikających z degradacji środowiska naturalnego jedynym ratunkiem dla człowieka może być ponowne zawiązanie ścisłej ludzkiej wspólnoty, która dziś postrzegana jest jako niepotrzebny balast, utrudniający realizację własnego, egocentrycznego życia. Chodzi o rodzaj wspólnoty etycznej, złożonej z długotrwałych zobowiązań, gotowej do przyjęcia niemożliwych do odrzucenia obowiązków i respektowania niezbywalnych praw wszystkich istot żyjących. Zobowiązania, które stanowiłyby o etyczności takiej wspólnoty, musiałyby charakteryzować się nową jakością, mianowicie wzajemną troską o wspólny ludzki los. Wzajemność nie może jednak być warunkiem odpowiedzialności. Nienarodzone jednostki nie mają szans domagać się żadnych praw, ani stanąć w ich obronie. Mieszkańcy biedniejszych niezamożnych krajów, którzy stają się przedmiotami technologicznego działania na odległość również nie mogą się bronić. Muszą zatem stać się adresatami naszej solidarności z nimi i odpowiedzialności. Ich podstawowym uprawnieniem jest prawo do życia w świecie nadającym się, z ekologicznego punktu widzenia, do zamieszkania [48].

Na rzecz przestrzenno-czasowego rozszerzenia odpowiedzialności nie można argumentować, posługując się zwyczajowymi, ogólnie uznanymi w społeczeństwie naszego typu, kategoriami korzystnej wymiany czy wzajemności zysków. Zadanie uświadomienia sobie możliwych następstw czynu lub jego zaniechania i złączony z nim obowiązek dopasowania czynu na miarę pożądanych następstw musi być troską osoby działającej. Każdy z nas musi być odpowiedzialny również za swoją niewiedzę i za stan swojej wyobraźni. Wyobraźnia etyczna, czyli wyobrażenie sobie daleko idących następstw przedsięwzięć technologicznych i naszych codziennych działań jest kluczowym elementem przyszłej etyki, która musi dotyczyć sytuacji i zdarzeń, które jeszcze nie zaistniały. Nasza zbiorowa odpowiedzialność moralna, tak jak i odpowiedzialność indywidualna, działa zatem w przestrzeni niepewności. Niepewność nie jest niczym nowym, ani niekorzystnym dla wyborów moralnych [48]. Wręcz przeciwnie, przyszła etyka powinna kierować się heurystyką lęku, podporządkowaną zasadzie niepewności, dla której najpilniejszą sprawą jest zachowanie i zapobieganie, a nie postęp i doskonalenie [49]. Moralność wieku technologii musi też mieć cechy samoograniczania się [54].

Tymczasem nasza wyobraźnia skupiona jest na generowaniu coraz nowszych potrzeb i korzystania z rozlicznych możliwości, jakie daje nowoczesność. Jesteśmy zniewoleni bezustannym oczekiwaniem na nowe trendy, jakie nadchodzą w rozmaitych dziedzinach: w motoryzacji, w modzie, w odżywianiu się, w sposobach zachowania, wypoczynku. Można powiedzieć, że autonomia współczesnego człowieka

przekształciła się w tyranię możliwości [52]. Sprzeczność pomiędzy tym, co dla człowieka jest możliwe, a tym, co powinno stanowić granicę możliwości, ukazuje nam w nowym świetle konieczność korzystania z dorobku etyki. Rola etyki polega nie tylko na stawianiu granic rosnącym możliwościom techniki, ale również ukazywaniu różnic między tym, co konieczne, co potrzebne, a co niezbędne [55].

Nie rozwiąże etycznych problemów konstruowanie nowych i skomplikowanych norm etycznych. Zasad moralnych można nauczyć się na pamięć, można je upowszechnić, ale człowiek w ten sposób nie stanie się istotą etyczną. Człowiek sam musi konfrontować się z konsekwencjami własnych czynów. Do tego potrzebne jest podjęcie trudu myślenia i rozbudzanie twórczej wyobraźni, intuicji, która nakazuje, co czynić w danym momencie [56]. Chodzi o radykalną zmianę postawy wobec wszystkiego, co jest żywiołem naszego świata, również zmianę postawy wobec drugiego człowieka, nawet tego, o którego istnieniu nie wiemy, ale możemy go sobie wyobrazić [57]. Taka zmiana jest możliwa poprzez realizowanie idei zrównoważonego rozwoju, rozwijanie krytycznego myślenia obywateli i systematycznej edukacji ekologicznej. Rozwijanie etycznej wrażliwości i wyobraźni jest zadaniem nie tylko nauczycieli i rodziców, ale wszystkich ludzi należących do ludzkiej, globalnej wspólnoty. Edukacja ekologiczna musi odbywać się na wielu poziomach. Człowiek, choć zagrożony, nie znajduje się na zupełnie straconej pozycji i jeśli tylko zechce, może wiele zmienić, poprzez odczytanie na nowo swojego wezwania do realizowania podstawowych ludzkich wartości. Dobro to mienie całej ludzkości, za które każdy z nas odpowiada [54].

Pokolenie młodych ludzi rozumie skalę i wagę problemów związanych z ochroną środowiska. Większym problemem jest pokolenie starsze, posiadające złe nawyki i nie lubiące zmian. Również przedstawiciele wielu rządów na świecie i właściciele wielkich korporacji nie są zainteresowani rezygnacją z zysków.

6.6. Norma PN-ISO 37120 jako narzędzie prowadzące do rozwoju współczesnych miast

Jak obliczono, połowa światowej populacji ludzi mieszka w miastach. W Unii Europejskiej procent ludności miejskiej jest wyższy i osiąga wartość 74%. Przewiduje się, że do 2025 r. 58,2% populacji świata i 75,8% populacji Europy będzie mieszkać na obszarach miejskich [58]. Wobec powyższego wyzwania, przed którym stoi każde współczesne miasto to zapewnienie rosnącej populacji jak najlepszej jakości życia

i usług. Naprzeciw tym wyzwaniom wychodzi koncepcja inteligentnego miasta Smart City, która opiera się na zintegrowanych i wzajemnie połączonych systemach, aby skutecznie świadczyć lepsze usługi i poprawiać jakość życia obywateli, zapewniając wszystkim równe szanse i jednocześnie chronić środowisko. Miasta na całym świecie pracują obecnie nad inicjatywami „inteligentnych miast", aby uczynić je bardziej wydajnymi, zrównoważonymi, atrakcyjniejszymi dla obywateli i przedsiębiorstw oraz pobudzić wzrost gospodarczy [59, 60]. Biorąc powyższe pod uwagę, miasta jak również jednostki samorządowe (gminy, powiaty) potrzebują odpowiednich wskaźników do pomiaru efektów swojej działalności, które byłyby znormalizowane, spójne i umożliwiające porównanie zmian na przestrzeni czasu. W tym celu, Global City Indicators Facility wraz z ponad 250 miastami członkowskimi opracowali międzynarodową normę ISO 37120 „Zrównoważony rozwój społeczny – Wskaźniki usług miejskich i jakości życia" w zakresie zrównoważonego rozwoju miast, której celem jest pomoc miastom w kierowaniu i ocenie efektów działalności w zakresie usług miejskich oraz jakości życia. Norma ta może być także pomocna w analizach i porównaniach stopnia rozwoju oraz określania potrzeb poszczególnych miast [61, 62]. W 2017 r. Polski Komitet Normalizacyjny opracował polski odpowiednik tej normy PN-ISO 37120:2015-03.

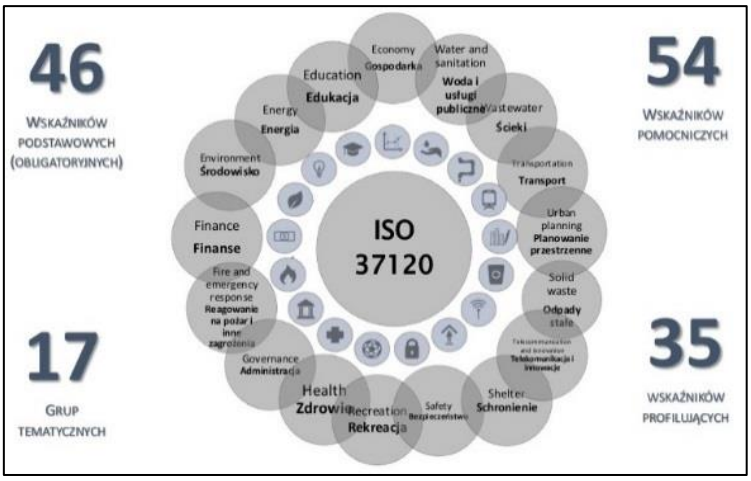
Norma PN-ISO 37120 jako standard wspierający idee Smart City i wspomagający realizację sprawiedliwej transformacji

Obecnie w Polsce realizowany jest szereg różnego rodzaju działań mających na celu pobudzenie oraz wsparcie samorządów miast do podejmowania działań, które mają na celu poprawę jakości życia mieszkańców oraz działania na rzecz pro-klimatycznej i energetycznej transformacji. Szczególnie ten temat jest istotny w miastach znajdujących się w aglomeracji śląskiej, stojących u progu zmian gospodarczych związanych z transformacją niskoemisyjną. Niezbędne jest podjęcie działań na rzecz podniesienia jakości życia mieszkańców poprzez przeprowadzenie kompleksowych działań rewitalizacyjnych, uporządkowania przestrzeni miejskich, zlikwidowania chaosu urbanistyczno-architektonicznego, podjęcia rzeczywistej współpracy z mieszkańcami/użytkownikami miast. Częścią zmian zachodzących w aglomeracji śląskiej, a związanych z transformacją energetyczną, niskoemisyjną powinny być działania podnoszące jakość życia w regionie, dotyczące, między innymi dostępności opieki zdrowotnej, uczestnictwa w kulturze, transportu publicznego, rozwoju szkół i uczelni, mieszkań na wynajem, usług senioralnych, terenów

rekreacyjnych. Bardzo ważnym elementem planu jest ochrona i regeneracja środowiska naturalnego, w tym poprawa jakości powietrza oraz rewitalizacja terenów poprzemysłowych. W dobie nadchodzących zmian, miasta śląskie będę musiały podejmować nowe wyzwania i wyznaczać nowe kierunki rozwoju. I w tym kontekście powstają pytania: Czy w miastach śląskich idea Smart City będzie stanowiła alternatywę ich nowego rozwoju ? Czy idea Smart City jest naturalną i jedyną drogą rozwoju tych miast? Czy koncepcja Smart City to nowa wizja rozwoju regionu? Czy to produkt czy idea? Jak mierzyć miejską inteligencję? W jakiej skali patrzeć na miasto inteligentne ?

Obecnie pomimo wielu działań podejmowanych przez miasta, większość z nich nie można zakwalifikować jako działania systematyczne i uporządkowane, dążące do określonego celu. Nadanie miastu etykiety „smart" stało się modne na arenie politycznej, a koncepcja ta jest często zapisywana w różnych strategiach rozwoju, natomiast władze lokalne w zdecydowanej większości przypadków wydają się jednak nieprzygotowane na realizację tej koncepcji. Odpowiedzią na te pytania i problemy może stać się norma PN-ISO 37120 „Zrównoważony rozwój społeczny – Wskaźniki usług miejskich i jakości życia". Norma ta jest pierwszym międzynarodowym i polskim standardem wskaźników miejskich oraz jest jednym z narzędzi pomiaru koncepcji zrównoważonego rozwoju opierającej się na zachowaniu równowagi pomiędzy rozwojem ekologicznym, gospodarczym i społecznym. Norma ta może być wykorzystana jako narzędzie jednolitego sposobu raportowania stanu rozwoju miasta i może być również stosowana w gminach, bądź innych formach lokalnego zarządzania [64].

Standard ten definiuje kompleksowy zestaw wskaźników, które mogą być wykorzystane przez miasta różnej wielkości do mierzenia i kontrolowania poziomu rozwoju pod kątem społecznym, gospodarczym oraz środowiskowym. Norma ta zawiera 100 wskaźników przyporządkowanych do 17 kategorii (grup tematycznych), według których władze miasta mogą dokonać pomiarów jakości życia i usług miejskich. Wskaźniki te są tożsame dla każdego miasta niezależnie od jego lokalizacji i uwarunkowań. Wśród wskaźników znajduje się 46 podstawowych oraz 54 pomocniczych (rys 6.13). Siedemnaście grup tematycznych to kolejno: (1) Gospodarka, (2) Edukacja, (3) Energia, (4) Środowisko, (5) Finanse, (6) Reagowanie na pożar i inne zagrożenia, (7) Administracja, (8) Zdrowie, (9) Rekreacja, (10) Bezpieczeństwo, (11) Schroniska, (12) Odpady stałe, (13) Telekomunikacja i innowacje, (14) Transport, (15) Planowanie przestrzenne, (16) Ścieki, (17) Woda i usługi sanitarne.



Rys. 6.13. Wykaz grup tematycznych i wskaźników zawartych w normie ISO 37120:2014 [63]
Fig. 6.13. List of thematic groups and indicators included in the ISO 37120: 2014 standard [63]

Korzyści dla miasta z certyfikacji normy PN-ISO 37120 to:

- Ocena miasta i pomiar postępu w dążeniu do osiągnięcia celu, jakim jest poprawa jakości życia i zrównoważony rozwój miasta;
- Identyfikacja mocnych i słabych stron miasta;
- Możliwość porównywania do innych miast na poziomie krajowym i międzynarodowym;
- Wzmocnienie marki miasta jako „Smart City" oraz rozpoznawalność na poziomie europejskim i globalnym;
- Wskaźniki Normy ISO 37120 pozwolą na zobrazowanie rzeczywistego zaangażowania miasta w działania na rzecz poprawy jakości życia mieszkańców oraz jego możliwości w zakresie kreowania miasta jako przyjaznego środowiska do życia.

Podsumowanie

Norma PN-ISO 37120 jest narzędziem do ujednoliconego monitorowania stanu rozwoju miasta w czasie. Jest pierwszym tego typu systemem wskaźników, który może być wykorzystany do śledzenia i raportowania postępów miasta w zakresie zarządzania usługami miejskimi oraz jakości życia. Stanowi użyteczne narzędzie zarządzania miastem, które pozwala również na pomiar skuteczności działań. Umożliwia porównywanie miast między sobą w skali globalnej i lokalnej. Biorąc pod uwagę potrzeby rozwoju współczesnych miast polskich w kierunku inteligentnych, zrównoważonych miast, edukacja i wiedza na temat tej normy powinna być szeroko rozpowszechniana wśród pracowników samorządów miejskich.

6.7. Wybrane działania edukacyjne w projektach czystszej produkcji

Strategia Czystszej Produkcji to dynamiczny model ochrony środowiska [66] włączający do działań cały łańcuch obszarów życia społecznego: konsumenta, producenta, jednostkę usługową, instytucje samorządowe i gospodarcze, jednostki administracji państwowej i placówki edukacyjne. Długofalowe korzyści jakie firmy osiągają dzięki zaangażowaniu w realizację strategii Czystszej Produkcji (tab. 6.1), wynikają także z działań edukacyjnych, w które są angażowani zarówno pracownicy jak i społeczności lokalne [67].

Tabela 6.1
Najważniejsze korzyści z wdrożenia w przedsiębiorstwie strategii CP [68]

Lp.	**Korzyści z wdrożenia w przedsiębiorstwie strategii CP**		
	Środowiskowe	**Ekonomiczne**	**Społeczne**
1	Eliminacja emisji zanieczyszczeń do środowiska	Zmniejszenie zużycia energii i wody – niższe opłaty za media; Eliminacja lub zmniejszenie opłat za emisje do środowiska	Poprawa wizerunku firmy – wzrost pozytywnego zainteresowania ze strony konsumentów oraz lokalnej społeczności
2	Poprawa warunków pracy na stanowiskach – zmniejszenie wypadkowości	Obniżenie kosztów absencji pracowników z tytułu chorób zawodowych i wypadków przy pracy	Poprawa jakości pracy – wzrost zadowolenia pracowników
3	Przygotowanie do procesu certyfikacji SZŚ wg norm ISO 14001 lub EMAS	Zdecydowanie niższe koszty pozyskania certyfikatu	Edukacja ekologiczna – wzrost świadomości ekologicznej wszystkich pracowników

Czystsza Produkcja (CP) nie jest działaniem jednorazowym. Inwestycje zwracają się czasami od razu a czasami po kilku miesiącach lub latach (zależnie od projektu CP). Niezwykłe działanie edukacyjne jak i motywujące w trakcie realizacji w firmach projektów CP, jest osiągane dzięki wdrażanym w pierwszym etapie realizacji tzw. ”low hanging fruits” – „nisko wiszącym owocom” – wdrożeniom często zupełnie bezkosztowym, dającym szybkie efekty środowiskowe i ekonomiczne, angażującym zarówno pracowników firmy, jak i społeczność lokalną. Szczególny nacisk na poszukiwanie takich możliwości kładą firmy rozpoczynające wdrażanie strategii Czystszej Produkcji, bo są to działania, które umożliwiają szybkie zmiany w kulturze organizacji, która ma być coraz bardziej proekologiczna.

Analiza

Zaprezentowano efekty uzyskane przez dwa wybrane przedsiębiorstwa – Firmę „Gyllow Tradycyjnie" z Przejmy k. Iłłowa oraz „Kegar" Sp. z o.o. z Kępic. Przeanalizowano projekty tych firm, wyodrębniając elementy tworzenia modelu biznesowego zgodnego z zasadami Circular Economy [65], zwracając szczególną uwagę na promowane działania edukacyjne. Następnie zdiagnozowano kolejne działania firm w ramach strategii CP, mające na celu wprowadzenie elementów gospodarki cyrkularnej (GOZ), co polegało również na poszerzaniu działalności o nowe obszary – nie tylko produkcyjne czy usługowe, ale również społeczno-edukacyjne (tab. 6.2).

Tabela 6.2

Efekty wdrożenia strategii CP Firm: „Gyllow Tradycyjnie" i „Kegar" Sp. z o.o.

Nr Ak. CP/nr proj.	Firma	Korzyści z wdrożenia w przedsiębiorstwie strategii CP		
		Środowiskowe	Ekonomiczne	Społeczne
46/ 746	Gyllow Trady-cyjnie	Redukcja emisji CO2 o 50% (podczas jednego gotowania o 68 kg); Spadek emisji pyłów zawieszonych o 12,5 Mg, benzopirenu 0,9 g i CO 294 kg (obliczone dla 5 lat działalności)	Oszczędności w wysokości 17 000 zł w ciągu 5 lat (okres zwrotu inwestycji – 2 lata)	Poprawa wizerunku firmy – wzrost pozytywnego zainteresowania ze strony konsumentów oraz lokalnej społeczności
46/ 747	KEGAR Sp. z o.o.	Przekierowanie dwóch strumieni odpadów, które dotychczas były przekazywane na paliwo alternatywne (R12) do wytworzenia nowego, pełnowartościowego produktu	Zysk ze sprzedaży produktu upcyclingowego w ciągu 9 m-cy (łącznie z fazą testową) ponad 29 480 zł	Wspomaganie warsztatów terapii zajęciowej podopiecznych lokalnego Środowiskowego Domu Samopomocy; Budowanie świadomości ekologicznej odbiorcy produktu

Podsumowanie

Firma „Gyllow Tradycyjnie" angażując się w działania rozwoju lokalnego promuje zdrowe i prośrodowiskowe funkcjonowanie firmy. Produkcja metodami tradycyjnymi bardzo przyciąga konsumentów współczesnego pokolenia, które korzysta

z możliwości z jednej strony obcowania z czystą przyrodą, a z drugiej – zaopatrywania się w produkty zdrowe, niekonserwowane i co najważniejsze – produkowane w taki sposób, który nie szkodzi środowisku [68]. Firma „Kegar" Sp. z o.o. wykorzystała odpad poprodukcyjny dla wspomagania warsztatów terapii zajęciowej podopiecznych lokalnego Środowiskowego Domu Samopomocy, którzy wykonują z barwnych ścinków w kształcie kół zabawki do aportowania dla psów. Zysk z ich sprzedaży nie jest wielki, ale ogromne znaczenie ma aspekt społeczno-edukacyjny – zaprezentowanie możliwości wykorzystania odpadu z jednoczesnym zaangażowaniem społeczności lokalnej.

Takie podejścia firm wpisują się w działania zamykające obieg zgodnie z gospodarką cyrkularną (tab. 6.3); mają również dla firm ogromne znaczenie wizerunkowe.

Tabela 6.3
Działania Firm: „Gyllow Tradycyjnie" i „Kegar" Sp. z o.o. w kierunku GOZ [69]

Firma	Działania po wdrożeniu projektu CP (lub w ramach projektu) – elementy logistyki cyrkularnej, rozpoczęcie/poszerzenie działalności produkcyjnej/usługowej
Gyllow Tradycyjnie	- Zmiana sposobu ogrzewania z węglowego na gazowe (optymalizacja, działanie zgodne z zasadami Zero Waste); - Włączenie do systemu instalacji grzewczych fotowoltaiki (optymalizacja, działanie zgodne z zasadami Zero Waste); - Pokazy sztuki gotowania tradycyjnych powideł z jednoczesną promocją instalacji ograniczających emisję do atmosfery (edukacja).
Kegar Sp. z o.o.	- Produkcja zabawek dla psów do aportowania w celu minimalizacji dwóch strumieni odpadów, które dotychczas były przekazywane na paliwo alternatywne (zapętlanie, działanie zgodne z zasadami Zero Waste); - Wspomaganie warsztatów terapii zajęciowej podopiecznych lokalnego Środowiskowego Domu Samopomocy (edukacja); - Budowanie świadomości ekologicznej odbiorcy produktu (edukacja).

Bibliografia

1. Kuzior A.: Dekada Edukacji dla Zrównoważonego Rozwoju, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Organizacja i Zarządzanie, 72, 2014, s. 87–100.
2. Kuzior A., Grebski W., Lyulyov O.: Rola etyki w kształceniu inżynierów. Etyka Biznesu i Zrównoważony Rozwój. Interdyscyplinarne studia teoretyczno-empiryczne, 1, 2019, s. 15–27.
3. Kuzior A., Zozul'ak J.: Adaptation of the idea of phronesis in contemporary approach to innovation. Manage. Syst. Prod. Eng., 27(2), 2019, p. 84–87. DOI: 10.1515/mspe-2019-0014.

4. Kuzior A.: Aksjologia zrównoważonego rozwoju, Belianum, Banska Bystrica 2014.
5. Kuzior A., Lobanova A.: Tools of Information and Communication Technologies in Ecological Marketing under Conditions of Sustainable Development in Industrial Regions (Through Examples of Poland and Ukraine). J. Risk Financial Manag., 13, 2020, 238. https://doi.org/10.3390/jrfm13100238.
6. Kwilinski A., Tkachenko V., Kuzior A.: Transparent Cognitive Technologies to Ensure Sustainable Society Development. Journal of Security and Sustainability Issues, 9(2), 2019, p. 561–570. http://doi.org/10.9770/jssi.2019.9.2(15).
7. Kuzior P.: Międzynarodowy Kongres Etyki Biznesu Zrównoważonego Rozwoju. Biuletyn Politechniki Śląskiej, 6/7, 2016, s. 22–24.
8. Kuzior P.: Międzynarodowy Kongres Naukowy – „Zrównoważony Rozwój – perspektywy na przyszłość". Biuletyn Politechniki Śląskiej, 6/7, 2017.
9. Kuzior P.: Międzynarodowy Kongres Naukowy – „Zrównoważony Rozwój – perspektywy na przyszłość". Biuletyn Politechniki Śląskiej, 2019.
10. Kretek H.: X edycja projektu „Zrównoważony rozwój – debiut naukowy". Biuletyn Politechniki Śląskiej, 2020.
11. Kuzior P.: Sustainable development of Silesia – panel discussion atthe fairs and conference InfoENERGIA 2017, Etyka Biznesu i Zrównoważony Rozwój 2017, http://www.polsl.pl/organizacje/SCEBIZR/Documents/Doś%20Anna%20-%20Etyka%201%202017.pdf
12. Rostański K.M.: Natura modelowana. Elementy naturalistyczne w kompozycji urbanistycznej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
13. Rostański K.M.: Structural sustainability: Heuristic approach, [in:] World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture – Urban Planning Symposium. WMCAUS 2017, 12–16 June 2017, Prague, Czech Republic. (Eds.) Marian Drusa, Isik Yilmaz, Marian Marschalko, Eva Coisson, Jaroslaw Rybak, Andrea Segalini. Bristol: Institute of Physics, 2017, art. 052007 s. 1–10, DOI: 10.1088/1757-899X/245/5/052007, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/5/052007/pdf.
14. Rostański K.M.: Konotacje w architekturze. Część 1. O sztuce wiązania znaczeń czerpanych z kultury. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2018.
15. Rostański K.M.: Surrealistic Historical Park in Rabka, 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.603 032099, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/603/3/032099/pdf
16. Grindsted T., Holm T.: Thematic development of declarations on sustainability in higher education. Environmental economics, 3(1), 2012, p. 32–40.
17. Copernicus Alliance, 2013. Rio20 Treaty on Higher Education. Cheltenham [UK]. http://hetreatyrio20.com
18. UNCSD, United Nations Conference on Sustainable Development, Rio20. 2012, https://sustainabledevelopment.un.org/rio20/futurewewant
19. Aleixo A.M., Azeiteiro U., Leal S.: The implementation of sustainability practices in Portuguese higher education institutions. International Journal of Sustainability in Higher Education, 19(1), 2018, p. 146–178.
20. United Nations. World Commission on Environment and Development, In: Our Common Future; A/42/427; United Nations: New York, NY, USA, 1987.
21. United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development; A/RES/70/1; United Nations: New York, NY [USA] 2016.
22. Ramos G.I.: The Sustainable Development Goals: A duty and an opportunity. In Debate the Issues: New Approaches to Economic Challenges; Love, P., Ed.; OECD Publishing: Paris, France, 2016; p. 17–21.

23. Milutinović S., Nikolić V.: Rethinking higher education for sustainable development in Serbia: an assessment of Copernicus charter principles in current higher education practices. J Clean Prod, 62, 2014, p. 107–113.
24. Desha C.J., Hargroves K., Smith M.H.: Addressing the time lag dilemma in curriculum renewal towards engineering education for sustainable development. Int. J. Sustain. High. Educ., 10, 2009, p. 184–199.
25. Byrne E., Desha C., Fitzpatrick J., Hargroves H.: Engineering Education for Sustainable Development: A Review of International Progress. In 3rd International Symposium for Engineering Education; University College Cork: Cork, Ireland, 2010, https://cora.ucc.ie/bitstream/handle/10468/372/EPB_EngineeringPV2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y
26. Azapagic A., Perdan S., Shallcross D.: How much do engineering students know about sustainable development? The findings of an international survey and possible implications for the engineering curriculum. Eur. J. Eng. Educ., 30, 2005, p. 1–19.
27. Rosen M.: Engineering Sustainability: A Technical Approach to Sustainability. Sustainability, 4, 2012, p. 2270–2292.
28. Huntzinger D.N., Hutchins M.J., Gierke J.S., Sutherland J.W.: Enabling sustainable thinking in undergraduate engineering education. Int. J. Eng. Educ., 23, 2007, p. 218–230.
29. Tejedor G., Segalàs J., Rosas-Casals M.: Transdisciplinarity in higher education for sustainability: How discourses are approached in engineering education. J. Clean. Prod., 175, 2018, p. 29–37.
30. Sánchez-Carracedo F., Moreno-Pino F.M., Sureda B., Antúnez M., Gütierrez I.: A Methodology to Analyze the Presence of Sustainability in Engineering Curricula. Case of Study: Ten Spanish Engineering Degree Curricula. Sustainability, 11, 2019, 4553.
31. Pappas E., Pappas J.: A behavioral approach to building cognitive foundations for efective thought and action. Innov. High. Educ., 36, 2011, p. 359–372.
32. Allen D., Allenby B., Bridges M., Crittenden J., Davidson C., Hendrickson C., Matthews C., Murphy C., Pijawka D.: Benchmarking Sustainability Engineering Education: Final Report; Centre for Sustainable Engineering: Pittsburgh, PA [USA] 2008.
33. Byrne E.P., Desha C.J., Fitzpatrick J.J., Hargroves K.: Exploring sustainability themes in engineering accreditation and curricula. Int. J. Sustain. High. Educ., 14, 2013, p. 384–403.
34. EESD – Engineering Education in Sustainable Development Conference, http://eesd08.tugraz.at/
35. Disterheft A., Caeiro S., Azeiteiro U.M., Leal Filho W.: Sustainability Science and Education for Sustainable Development in Universities: A Way for Transition. In Sustainability Assessment Tools in Higher Education Institutions, Springer International Publishing, Cham [Switzerland] 2013.
36. Caeiro S., Leal Filho W., Jabbour C., Azeiteiro U.M. Eds.: Sustainability Assessment Tools in Higher Education Institutions, Springer International Publishing, Cham [Switzerland] 2013, p. 3–27. ISBN 978-3-319-02374-8.
37. Sibbel A.: Pathways towards sustainability through higher education. Int. J. Sustain. High. Educ., 10, 2009, p. 68–82.
38. Lambrechts W., Mulà I., Ceulemans K., Molderez I., Gaeremynck V.: The integration of competences for sustainable development in higher education: An analysis of bachelor programs in management. J. Clean. Prod., 48, 2013, p. 65–73.
39. Sady M., Zak A.: Rzepka K.: The role of universities in Sustainability-Oriented Competencies Development: Insights from an Empirical Study on Polish Universities. Adm. Sci., 9, 2019, 62.

40. García-Feijoo M., Eizaguirre A., Rica-Aspiunz A.: Systematic Review of Sustainable Development Goal Deployment in Business Schools. Sustainability, 12, 2020, 440.
41. Davidson C.I., Hendrickson C.T., Matthews H.S., Bridges M.W., Allen D.T., Murphy C.F., Allenby B.R., Crittenden J.C., Austin S.: Preparing future engineers for challenges of the 21st century: Sustainable engineering. J. Clean. Prod., 18, 2010, p. 698–701.
42. Lozano F.J., Lozano R.: Developing the curriculum for a new bachelor's degree in engineering for sustainable development. J. Clean. Prod., 64, 2013, p. 136–146.
43. Watson M.K., Lozano R., Noyes C., Rodgers M.: Assessing curricula contribution to sustainability more holistically: Experiences from the integration of curricula assessment and students' perceptions at the Georgia institute of technology. J. Clean. Prod., 61, 2013, p. 106–116.
44. Kuzior A.: Odpowiedzialność człowieka za przyrodę w perspektywie kryzysu ekologicznego, Studia Ecologiae et Bioethicae 5, Gliwice 2007, s. 115–124.
45. Jonas H.: Zasada odpowiedzialności. Etyka dla cywilizacji technologicznej, tłum. M. Klimowicz, Kraków 1986.
46. Tischner J.: Świat ludzkiej nadziei, Wydawnictwo Znak, Kraków 2000.
47. Gabriel I.: Zur Einführung – Ökologie als Gerechtigkeitsfrage der Gegenwart, [w:] Gabriel I., P. Steinmair-Pösel P. (red.), Gerechtigkeit in einer endlichen Welt, 2014.
48. Bauman, Z.: Straty uboczne. Nierówności społeczne w epoce globalizacji, tłum. J. Hunia, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2012(a).
49. Jonas H.: Philosophical Essays: From Ancient Creed to Technological Man. Prentice Hall. Englewood Cliffs 1974, s. 8–9.
50. Bauman Z.: Etyka ponowoczesna, Wydawnictwa Aletheia, Warszawa 2012(b).
51. Bauman Z.: Wspólnota. W poszukiwaniu bezpieczeństwa w niepewnym świecie. Wydawnictwo Literackie, Kraków 2008.
52. Bauman Z.: Ponowoczesność jako źródło cierpień, Wydawnictwo Sic!, Warszawa 2000.
53. Jonas H.: The Imperative of Responsibility: In Search of Ethics for the Technological Age. University of Chicago Presss. Chicago 1984.
54. Franciszek: Encyklika Laudato Si, Watykan 2015.
55. Tischner J.: Etyka solidarności oraz Homo sovieticus, Wydawnictwo Znak, Kraków 2005.
56. Tischner J.: Myślenie według wartości. Wydawnictwo Znak, Kraków 2002.
57. Marszałek-Kotzur I.: Tischnerian land husbandry. Ethical aspects of management of the environment. Scienific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series, 140, 2019, p. 197–205.
58. Colldahl C., Frey S., Kelemen J.E.: Smart Cities: Strategic Sustainable Development for an Urban World. Master's Thesis, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona [Sweden] 2013.
59. Allam Z., Newman P.: Redefining the Smart City: Culture, Metabolism and Governance. Smart Cities, 1, 2018, p. 4–25, doi:10.3390/smartcities1010002.
60. Jing C., Mingyi Du M., Songnian Li S., Liu S.: Geospatial Dashboards for Monitoring Smart City Performance. Sustainability, 11, 2019, 5648, doi:10.3390/su11205648.
61. Huovilaa A., Bosch P., Airaksinen M.: Comparative analysis of standardized indicators for Smart sustainable cities: What indicators and standards to use and when? Cities, 89, 2019, 141–153.
62. Midor K., Płaza G.: Norma ISO 37120 – nowe narzędzie do oceny i porównania inteligentnych miast, [w:] Jonek-Kowalska I., Kaźmierczak J. (red.): Inteligentny rozwój inteligentnych miast. CeDeWu, Warszawa 2020, s. 189–202.

63. International Standardization Organization. ISO 37122 Sustainable development in communities – Indicators for Smart Cities. 2019. Available in: www.iso.org.
64. Fijałkowska J., Aldea T.: Raportowanie zrównoważonego rozwoju a norma ISO 37120. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 478, 2017, 182.
65. Projekty Czystszej Produkcji zrealizowane przez firmy: Gyllow Tradycyjnie z Przejmy, Kegar Sp. z o.o., w trakcie 46 Akademii Czystszej Produkcji w roku 2018, https://www.cp.org.pl/p/projekty-cp.html [dostęp: 10.04.2021].
66. Nowak Z. (red.): Czystsza Produkcja, Stowarzyszenie „Polski Ruch Czystszej Produkcji", Katowice 2000.
67. Hordyńska M., Kuczyńska-Chałada M.: Narzędzia doskonalenia procesów w przedsiębiorstwach produkcyjnych: CP, GOZ, Lean&Green, [w:] Nowacki K.: Współczesne tendencje w inżynierii produkcji, Wydawnictwo Naukowe Sophia, Katowice 2018.
68. https://e-sochaczew.pl/artykul/zip-festiwal-powidel/582684 [dostęp: 10.04.2021].
69. opracowanie własne na podstawie: Karwacka M., Łuba P.: W kierunku gospodarki obiegu zamkniętego. Wyzwania i szanse, Koalicja na rzecz Gospodarki Obiegu Zamkniętego Reconomy, Warszawa 2016, http://zero-waste.pl [dostęp: 10.04.2021].

7. PROBLEMY DEGRADACJI I REWITALIZACJA TERENÓW

7.1. Wprowadzenie

Tereny poprzemysłowe na Górnym Śląsku cechują się wyjątkowo zróżnicowanymi walorami morfologii terenu. Są to zwykle niespotykane formacje poza ośrodkami przemysłowymi. Ich cechy zależą od rodzaju aktywności przemysłowej, która była przyczyną ich powstania. Na Górnym Śląsku związane są z przemysłem wydobywczym rud srebra, ołowiu, cynku i żelaza, działalnością kopalni węgla kamiennego i brunatnego, kamieniołomami, kopalniami piasku i gliny. Efektem tych działań są też zwały powęglowe, pocynkowe i zwały nadkładu ziemnego. Działalność wydobywcza związana jest także z powstawaniem zapadlisk i zatopisk. Funkcjonowanie przemysłu powoduje emisję do środowiska metali ciężkich oraz związków organicznych, stanowiących bezpośrednie zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania organizmów żywych, w tym człowieka. Ponadto, działalność przemysłowa bez względu na sektor gospodarki zawsze pozostawia też po sobie budynki i budowle techniczne, drogi i szlaki kolejowe. W związku z powyższym rewitalizacja terenów poprzemysłowych, jakie na przykład znajdują się na obszarze Górnego Śląska, jest problemem złożonym wynikającym zarówno z chemicznego zanieczyszczenia środowiska, jak również ze zmiany rzeźby terenu i stopnia zachowania dawnych przemysłowych obiektów budowlanych. Skuteczne nadanie funkcjonalności takim terenom wymaga interdyscyplinarnego podejścia.

7.2. Rewitalizacja architektury poprzemysłowej

Problematyka rewitalizacji obszarów i obiektów związanych z historycznym dziedzictwem poprzemysłowym to pole badawcze szeroko rozwijane na Wydziale Architektury (WA), szczególnie w Katedrze Teorii, Projektowania i Historii Architektury.

Liczne opracowania badawcze, w tym prace magisterskie, doktorskie, prace NB, PBL i projekty międzynarodowe, stanowią spójny program badań nad poprzemysłowym dziedzictwem kulturowym Polski i Europy (rys. 7.1). Jako integralna część obszaru badawczego POB-4 „Inteligentne miasta i mobilność przyszłości", zostały szczegółowo omówione w ramach podobszaru POB-4.II „Architektura i inżynieria środowiska".

Rys. 7.1. Muzeum Śląskie powstałe na dawnych terenach Kopalni Węgla Kamiennego Katowice (Fot. K.M. Rostański)
Fig. 7.1. The Silesian Museum was established in the former area of the Coal Mine Katowice (Photo by K.M. Rostański)

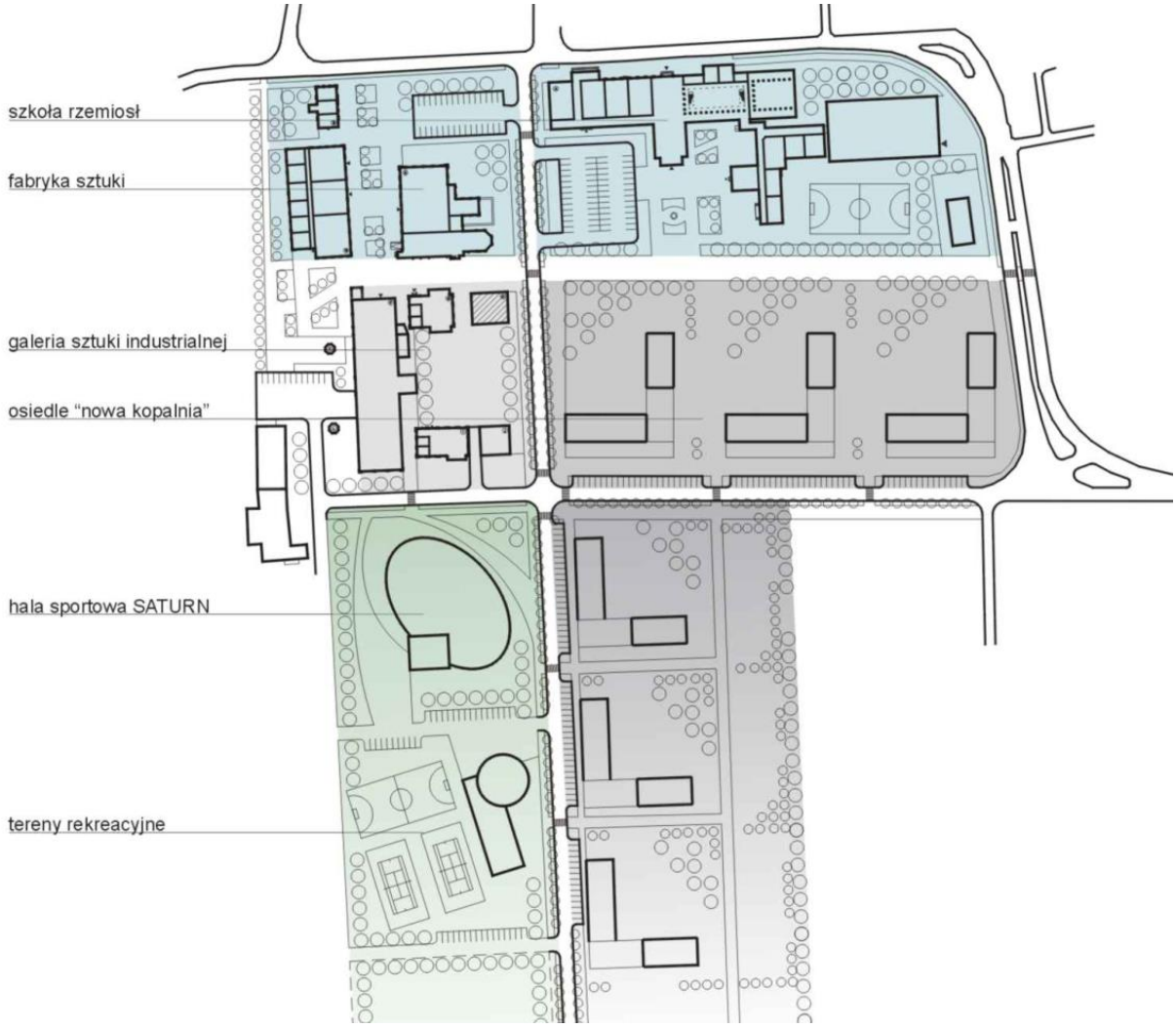
7.3. Nadawanie nowej funkcji terenom poprzemysłowym

Badania dotyczące przekształceń terenów i obiektów poprzemysłowych na Wydziale Architektury (WA) Politechniki Śląskiej prowadzone są od około 40 lat. Z ważniejszych prac przekrojowych należy wymienić książki autorstwa Janiny Klemens [1], Ewy Szady [2], Krzysztofa Gasidło [3]. Na Wydziale wykonano też szereg prac doktorskich, dotyczących tej tematyki, m.in.:

- Kuc-Słuszniak Beata: Zmiana sposobu użytkowania budynków ze szczególnym uwzględnieniem budynków przemysłowych. Próba systematyki zasad i możliwości przekształceń, 1998 (promotor Juzwa N.),
- Zagała Łukasz: Adaptacja obiektów poprzemysłowych na nowe funkcje jako istotny nurt architektury współczesnej, 2005 (promotor Gasidło K.),

- Dyraga (Wiatr) Aneta: Kierunki przemian poprzemysłowych terenów zieleni urządzonej w aglomeracji górnośląskiej, 2012 (promotor Gasidło K.).

  Obecnie w opracowaniu są dwie dysertacje:
- Bogusław Hajda: Adaptacja obiektów poprzemysłowych na cele sportu, (promotor Gasidło K.),
- Aleksandra Wyrzykowska: Kierunki przekształceń terenów poprzemysłowych podziemnych zakładów górniczych wydobywających węgiel kamienny (promotor Gasidło K.).

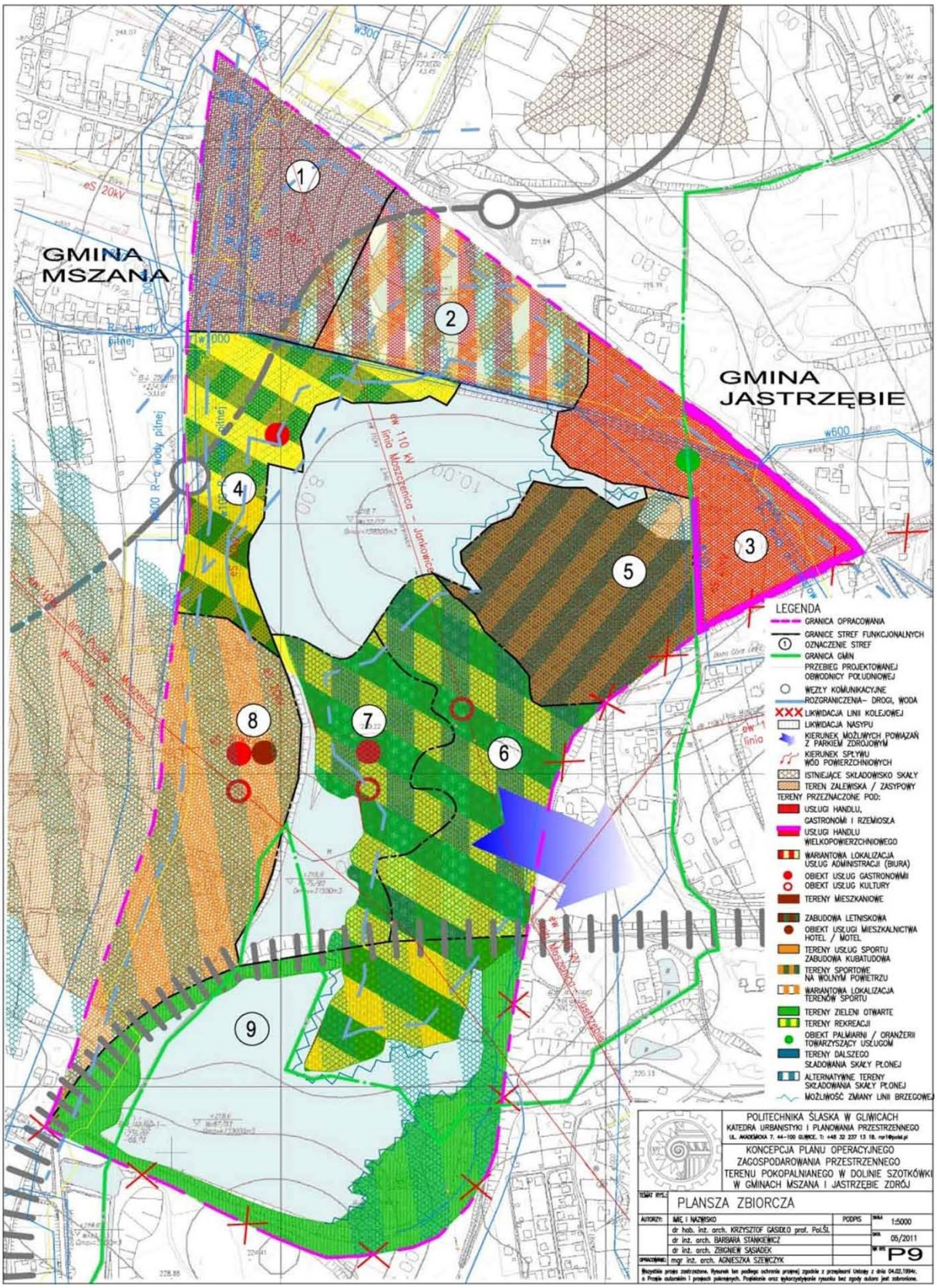


Rys. 7.2. Koncepcja zagospodarowania terenów po KWK Saturn w Czeladzi
Fig. 7.2. Concept of land development of the area of Coal Mine Saturn in Czeladź

Przekształcenia terenów i obiektów poprzemysłowych są również tematem prac naukowo-badawczych lub usługowych, realizowanych na zlecenie przedsiębiorstw. W Katedrze Urbanistyki i Planowania Przestrzennego opracowano w ostatnich latach m.in.:

- Inwentaryzację oraz koncepcję programowo-przestrzenną zagospodarowania obszaru byłej Kopalni Węgla Kamiennego Saturn przy ul. Dehnelów w Czeladzi, 2005 (Gasidło K., Mazur-Belzyt K., Opania S., 2005) (rys. 7.2),
- Koncepcję planu operacyjnego zagospodarowania przestrzennego terenu pokopalnianego w dolinie Szotkówki w gminach Mszana i Jastrzębie-Zdrój, 2011 (Gasidło K., Sąsiadek Z., Stankiewicz B., 2011) (rys. 7.3),
- Studium urbanistyczne zagospodarowania terenu Hałdy Murckowskiej w Katowicach Murckach przy ul. Leśników, 2014,
- Koncepcję architektoniczną adaptacji na inne cele budynków KWK Knurów-Szczygłowice JSW SA w Knurowie przy ul. Szpitalnej 23 A-C wraz z projektem zagospodarowania terenu w granicach działek oznaczonych jako obszar opracowania, 2019,
- Studium możliwości zagospodarowania nieczynnego zwałowiska skały płonnej po byłej KWK Moszczenica z uwzględnieniem czynników społeczno-gospodarczych i ochrony środowiska, 2020.

Przekształcenia terenów poprzemysłowych są również przedmiotem projektów zagospodarowania terenu, w których biorą udział pracownicy Politechniki Śląskiej, a które są implementacją wcześniejszych prac naukowych. Przykładem takiej realizacji jest rewitalizacja zwałowiska pocynkowego zlokalizowanego w Rudzie Śląskiej w rejonie ul. 1 Maja. Powstały obiekt nosi nazwę Góra Antonia (rys. 7.4–7.6). Powstał jako projekt pilotażowy w ramach projektu Implementation of Sustainable Land Use in Integrated Environmental Management of Functional Urban Areas – LUMAT [4]. Projektantem wiodącym był dr hab. inż. arch. Krzysztof Rostański prof. PŚ. Wstępne prace partycypacyjne prowadził dr hab. inż. arch. Michał Stangel prof. PŚ. Warunki chemiczno-gruntowe były opracowane przez dr hab. inż. arch. Iwonę Jonczy prof. PŚ. Materiały historyczne do ścieżki edukacyjnej opracowała prof. dr hab. inż. arch. Magdalena Żmudzińska-Nowak. W projekcie brali też udział pracownicy Uniwersytetu Śląskiego i Instytutu Ekologii Terenów Uprzemysłowionych. Góra Antonia jest elementem Traktu Rudzkiego łączącego obiekty rekreacyjne w Rudzie Śląskiej. W jej pobliżu, na terenie hałdy powęglowej, powstał też amfiteatr leśny zaprojektowany przez doktorantkę Wspólnej Szkoły Doktorskiej – mgr inż. arch. Ewę Twardoch.



Rys. 7.3. Koncepcja planu operacyjnego zagospodarowania terenów pogórniczych w dolinie Szotkówki w gminach Jastrzębie-Zdrój i Mszana

Fig. 7.3. Concept for the plan of operational development of post-mining areas in the Szotkówka valley in the municipalities of Jastrzębie-Zdrój and Mszana

Jednym z aspektów zagospodarowania terenów poprzemysłowych jest kształtowanie optymalnego programu funkcjonalnego, wykorzystującego potencjał miejsca i odpowiadającego na potrzeby mieszkańców okolicznych terenów oraz innych interesariuszy. Oprócz ustawowych metod udziału społeczeństwa w opracowywaniu dokumentów planistycznych i koncepcji urbanistycznych, polegających na opiniowaniu wykładanych do konsultacji planów miejscowych, istnieje też wiele innych sposobów, w jaki przedstawiciele mieszkańców i innych interesariuszy mogą być włączeni w procesy planistyczne. Pogłębiona partycypacja społeczna, wykraczająca poza ustawowe minimum, może obejmować działania na różnych etapach: od edukacji na temat planowania, przez diagnozę potrzeb i zbieranie informacji wejściowych, przez wypracowywanie rozwiązań w procesach warsztatowych i łagodzenie ewentualnych konfliktów, weryfikację roboczych wersji dokumentów, po usprawnioną informację na temat efektów planowania.

W procesach takich pomocna może być też metodologia *placemaking*, tzn. idea kształtowania przestrzeni miejskiej, która zakłada wieloaspektowe podejście do planowania, projektowania i zarządzania przestrzenią publiczną [5–7]. Placemaking ma aktywować lokalne społeczności, angażować sąsiadów do tworzenia wspólnych miejsc, sprzyjać poprawie zdrowia i samopoczucia, budowania więzi sąsiedzkich. Przestrzeń publiczna ma ulegać ewolucji, dostosowując się do zmiennych potrzeb i możliwości. Placemaking może uzupełniać tradycyjny proces projektowy, gdy projektowanie urbanistyczne zostaje wzbogacone o wieloaspektowe spojrzenie na przestrzeń i zwrócenie uwagi na ludzkie potrzeby, potencjał miejsca, potencjał różnych organizacji, itp. Placemaking wywodzi się od odnowy zaniedbanych i zdegradowanych przestrzeni publicznych w istniejącej przestrzeni miejskiej (dzielnicach, osiedlach, centrum itp.) ale idea ta może z powodzeniem uzupełniać projektowanie nowych struktur; w tym na terenach poprzemysłowych. Tłumacząc ideę, Jan Gehl mówi w uproszczeniu, że zamiast projektować budynki, pomiędzy którymi zostanie przestrzeń, należy najpierw przemyśleć „życie” (funkcje przestrzeni), potem zaprojektować przestrzeń, a budynki mają ją otaczać i uzupełniać.

Dr hab. inż. arch. Michał Stangel był zaangażowany w procesy partycypacyjne przy sporządzaniu założeń zagospodarowania terenów poprzemysłowych między innymi w Rudzie Śląskiej, Jaworznie, Sosnowcu, Chorzowie i Świętochłowicach. Metodologię taką stosowano też z powodzeniem na zajęciach projektowych ze studentami, między innymi dla terenów poprzemysłowych w Katowicach (Nikiszowiec), Radlinie, Rybniku [8–10].

Rys. 7.4. Góra Antonia w Rudzie Śląskiej – Sześciany widokowe
Fig. 7.4. Antonia Mountain in Ruda Śląska – View points in cubes

Rys. 7.5. Góra Antonia w Rudzie Śląskiej – Uchwyty na hamaki
Fig. 7.5. Mount Antonia in Ruda Śląska – Holders for hammocks

Rys. 7.6. Góra Antonia w Rudzie Śląskiej – Przemysłowy plac zabaw
Fig. 7.6. Antonia Mountain in Ruda Śląska – Industrial playground

7.4. Badania naukowe w zakresie usług ekosystemów na terenach poprzemysłowych

Tereny poprzemysłowe często pozostawiane są bez zagospodarowania ze względu na degradację walorów użytkowych. Są to jednak miejsca o dużym potencjale usług ekosystemowych. Są to usługi:

- podstawowe, związane z naturalnym obiegiem materii, czyli podtrzymujące różnorodność biologiczną,
- zaopatrujące, które w przypadku górnośląskich terenów poprzemysłowych wzbogacają atmosferę w tlen, służą jako siedliska zwierząt, są źródłem pożytku dla pszczół,
- regulacyjne, neutralizujące skażenia przemysłowe, regulujące mikroklimat, chroniące gleby przed erozją,
- kulturowe zapewniające miejsca rekreacji, kontaktu z przyrodą, będące świadectwem historii regionu.

W takich miejscach rozwija się spontanicznie przyroda tworząc zbiorowiska o różnej wartości. Często dominują w nich rośliny ruderalne i inwazyjne, tworzące zbiorowiska inicjalne, ubogie, odległe składem od naturalnych zbiorowisk roślinnych

Polski. Mimo tego stają się one wartościowymi siedliskami dla ptaków i innych zwierząt, a także centrami dyspersji roślin przystosowanych do rozwoju na ubogich siedliskach, stanowiących źródło naturalnej sukcesji. Poddając tereny poprzemysłowe rekultywacji w kierunku przyrodniczym lub rekreacyjnym wykonuje się waloryzacje przyrodnicze, by wskazać najbardziej wartościowe elementy i zoptymalizować decyzje o ingerencji w ich strukturę. Waloryzacje wykonywane na terenie Górnego Śląska pokazują znaczną bioróżnorodność takich miejsc. Często występuje tu ponad 400 gatunków roślin naczyniowych i 70–90 gatunków ptaków. Mimo antropogenicznego pochodzenia gruntów na terenach poprzemysłowych pojawiają się też rzadkie i chronione gatunki roślin. Tereny poprzemysłowe są czasem skażone, jak np. zwałowiska pocynkowe. Nie są to tereny korzystne pod rekreację. Wymagają szczególnych zabiegów i ograniczonego programu użytkowego. Najkorzystniejsze są zatopiska, które powstały na gruntach rolnych lub innych nieskażonych np. w kamieniołomach.

W Politechnice Śląskiej w Katedrze Projektowania Architektury Mieszkaniowej i Użyteczności Publicznej dr hab. inż. arch. Krzysztof Rostański prof. PŚ opracował modele naturalistyczne terenów zieleni [11–13]. Ujmują działania i cele przez nie osiągane, które opisują różne podejścia do projektowania z wykorzystaniem roślin rodzimych lub wzorców projektowania zieleni czerpanych z naturalnych struktur i procesów przyrodniczych. Aspekty tu podkreślane odnoszą się do wartości historycznych, prawnych, ideowych, estetycznych, formalnych, percepcyjnych i funkcjonalnych. W zależności od stopnia podobieństwa do naturalnych zbiorowisk roślinnych, projektowane zgodnie ze wspomnianymi modelami, tereny zieleni mogą reprezentować typy: przyrodniczy, organiczny, malowniczy lub geometryczny. Każdy z nich ma swoje zalety i wady, każdy jednak powinien znajdować swoje miejsce w terenach zieleni ponieważ, nie ma rozwiązań idealnych, lecz optymalne i to właśnie różnorodność jest największą z wartości, jaką możemy zapewnić terenom zieleni. Każde rozwiązanie musi jednak wynikać z lokalnych uwarunkowań, choć jego forma może być różna. Efekty aplikacji wspomnianych modeli naturalistycznych można zobaczyć na przykład w Zespole Przyrodniczo-Krajobrazowym „Żabie Doły” w Bytomiu (rys. 7.7), parku Góra Antonia w Rudzie Śląskiej (rys. 7.8), Parku Miejskim w Pyskowicach, Parku Rybaczówka w Strzelcach Opolskich i innych miejscach.

Rys. 7.7. Żabie Doły – teren zatopisk powstałych w wyniku działalności górniczej – miejsca obserwacji ptaków
Fig. 7.7. Żabie Doły – the area of sunken area created as a result of mining activities – bird observation sites

Rys. 7.8. Góra Antonia w Rudzie Śląskiej – Skała świadek – pozostałość pocynkowego spieku żużlowego
Fig. 7.8. Góra Antonia in Ruda Śląska – Witness Rock – post-zinc slag residue

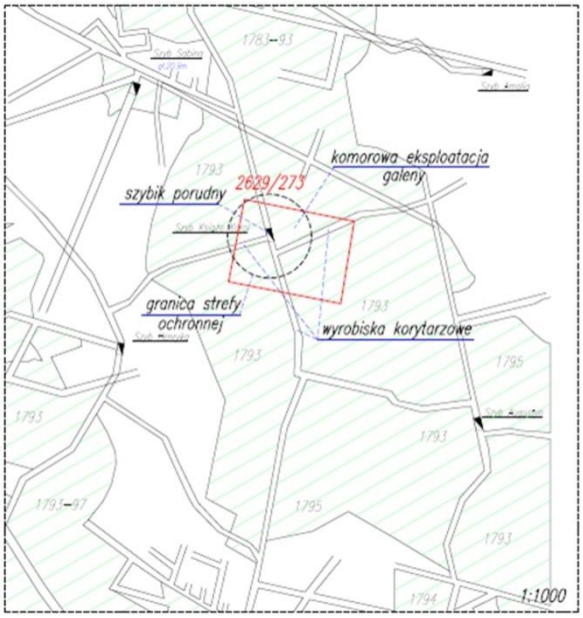
7.5. Rekultywacja gruntów

Na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej dr inż. Rafał Jendruś, dr inż. Tadeusz Mzyk prowadzą prace nad ocenami stanu zagrożenia występowaniem nieciągłych deformacji powierzchni na obszarach płytkiej eksploatacji górniczej metodami geofizycznymi.

Zagrożenie spowodowane występowaniem deformacji nieciągłych na terenach pogórniczych po dawnej eksploatacji rud metali ujawnia się zwykle w toku badań podłoża gruntowego dla planowanych inwestycji budowlanych. Jeżeli wstępne rozpoznanie terenu na podstawie analizy archiwalnych map eksploatacji górniczej wskazuje na potencjalną możliwość występowania pozostałości po wyrobiskach górniczych, zrobów eksploatacyjnych, zwałowisk odpadów lub innych struktur antropogenicznych, podejmowane są badania geofizyczne. Ich celem jest dokładniejsze rozpoznanie podłoża, a na ich podstawie ewentualnie wykonuje się wiertnicze – kontrolne otwory badawcze, które, w przypadku stwierdzenia nieciągłości w przewiercanym podłożu, służą następnie jako otwory iniekcyjne do przeprowadzenia robót zabezpieczająco-uzdatniających.

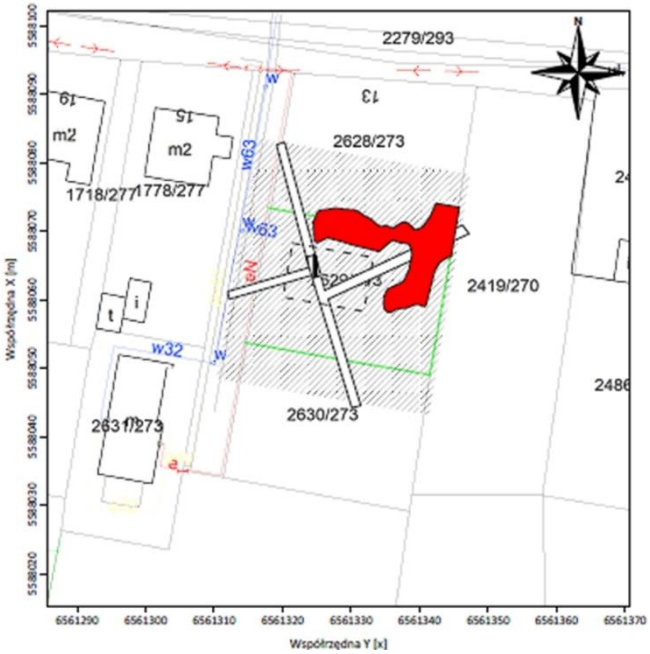
Problemy te zmuszają realizatorów prac związanych z przygotowaniem podłoża gruntowego pod inwestycje do ponoszenia kosztów wykonywania i likwidacji zbędnych otworów badawczych, realizacji nadmiarowej ilości robót wiertniczych lub wykonywania innych form zabezpieczenia obiektów budowlanych w sposób znacznie przekraczający rzeczywiste potrzeby. Prowadzi to do znaczącego i nieuzasadnionego wzrostu kosztów prowadzenia inwestycji budowlanych na terenach zagrożonych występowaniem deformacji nieciągłych powierzchni.

Metody geofizyczne w badaniach budowy geologicznej opierają się na śledzeniu zjawisk związanych z występowaniem zróżnicowania parametrów fizycznych skał utworów budujących podłoże. Sposób, w jaki budowa geologiczna może być rozpoznawana, zależy od najbardziej skontrastowanego w badanym środowisku parametru fizycznego [14–16]. Metody geofizyczne są metodami pośrednimi, bezinwazyjnymi. W celu weryfikacji genezy wydzielanych zaburzeń, anomalii, obiektów itp. należy wykonywać odwierty kontrolne (rys. 7.9 i 7.10). Stosowanie różnych metod geofizycznych i ich technik wynika z faktu, iż istnieje ścisły związek mierzonych rozkładów wielkości fizycznych z przyczynami indukowanymi w podłożu działalnością geologiczną lub antropogeniczną. Ogromny wpływ na stan podłoża mają również warunki hydrogeologiczne.



Rys. 7.9. Fragment mapy eksploatacji rudnej Kopalni Fryderyk w Tarnowskich Górach (1790–1860), z lokalizacją działki inwestycyjnej. Na podstawie transformacji i wektoryzacji mapy w skali 1:1000

Fig. 7.9. Fragment of the map of the ore exploitation of the Fryderyk Mine in Tarnowskie Góry (1790–1860), with the location of the investment plot. Based on the transformation and vectorization of the map in the scale 1:1000



Rys. 7.10. Przykładowa mapa rozkładu stref anomalnych elektrooporowych (jedna z wielu stosowanych metod geofizycznych), świadcząca o potencjalnym zagrożeniu wystąpienia pustek pogórniczych, wykonana dla w/w terenu

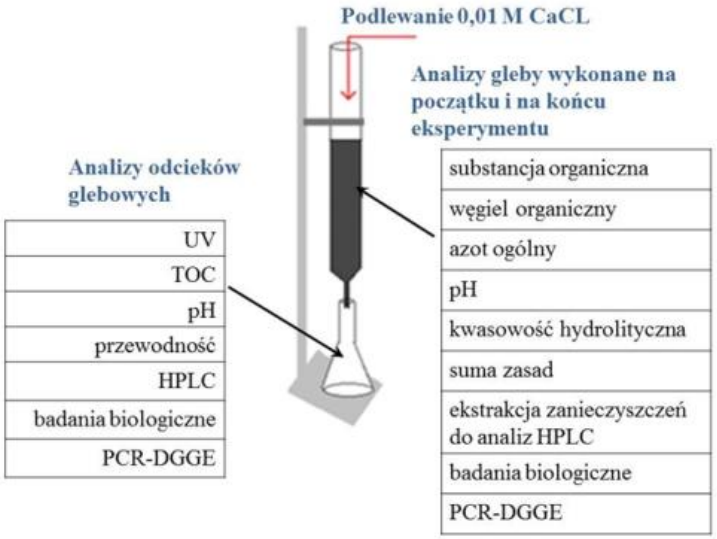
Fig. 7.10. An exemplary map of the distribution of anomalous electrofusion zones (one of the many geophysical methods used), proving the potential risk of post-mining voids, made for the above-mentioned area

Na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki dr inż. Jolanta Turek-Szytow prowadzi badania nad wykorzystaniem nadtlenku wapnia (CaO_2) w remediacji gleb.

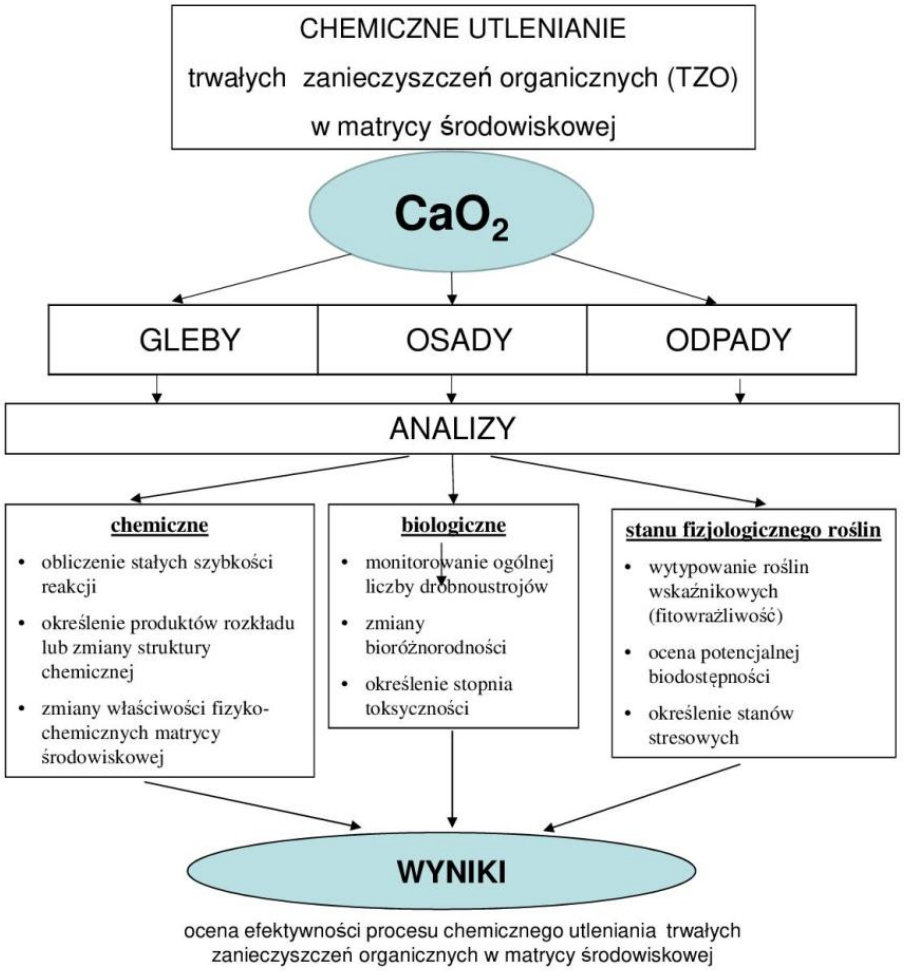
Elementem środowiska najbardziej narażonym na wszelkie zanieczyszczenia jest gleba, ponieważ głównie w niej następuje kumulacja związków toksycznych. W przeciwieństwie do zanieczyszczeń powietrza i wody, zanieczyszczenia gleby zalegają w niej przez bardzo długi czas, nawet przez okres setek lat (np.: DDT, metale ciężkie, WWA). Zanieczyszczenie gleby prowadzi do poważnego zaburzenia prawidłowego funkcjonowania ekosystemów, wynikającego z obecności substancji chemicznych pogarszających aktywność biologiczną oraz zmian właściwości fizycznych i chemicznych środowiska, a także negatywnie wpływa na organizmy, w tym na zdrowie i życie ludzi.

W związku z bardzo ważną rolą, jaką odgrywa gleba w życiu człowieka (produkcja żywności), w celu przeciwdziałania obniżaniu się lub utraty wartości użytkowych gleby, poszukuje się nowych, bezinwazyjnych, a zarazem skutecznych i szybkich metod oczyszczania gruntów, szczególnie zanieczyszczonych niebezpiecznymi mikrozanieczyszczeniami. Wykrywanie, eliminacja oraz badanie przemian związków chemicznych wpływających szkodliwie na jakość poszczególnych elementów środowiska, a w szczególności ekosystemów wodnych i glebowych jest traktowane jako jedno z kluczowych zadań chemii środowiska.

Badania prowadzone w ostatnich latach dotyczą zastosowania nadtlenku wapnia (CaO_2) w procesie remediacji (rys. 7.11 i 7.12). CaO_2 to substancja chemiczna o charakterze utleniającym, generująca w środowisku molekuły rodnikowe i uwalniająca tlen aktywny, może powodować naruszenie chemicznej struktury ksenobiotyków i jednocześnie stymulować biochemiczne przemiany zachodzące w środowisku glebowym. Ze względu na przewidywaną dwoistość natury nadtlenku wapnia (charakter rodnikowy i źródło tlenu) oczekuje się zmian fizykochemicznych badanej gleby. Stosowanie CaO_2 wydaje się być szczególnie uzasadnione w usuwaniu zaniczyszczeń występujących w niskich stężeniach, gdy zastosowanie innych metod jest kosztowniejsze lub niemożliwe. Użycie CaO_2 jako biostymulatora (w niskich stężeniach, w odpowiednich warunkach środowiskowych) może efektywnie wspomagać bioremediację. Wspomagając naturalną biodegradację można zapobiegać kumulacji zanieczyszczeń i umożliwiać użytkowanie rekultywowanego środowiska. W wyniku badań w tej tematyce uzyskano cztery patenty [17–20].



Rys. 7.11. Przykładowy schemat badań lizymetrycznych na glebie
Fig. 7.11. An exemplary scheme of lysimeter studies on soil



Rys. 7.12. Procedura badań lizymetrycznych na glebie
Fig. 7.12. The procedure of lysimeter studies on soil

7.6. Remediacja wód

Zanieczyszczenia organiczne środowiska naturalnego stanowią istotny problem i wyzwanie współczesnego społeczeństwa. Różnorodna działalność przemysłowa człowieka powoduje, że do obiegu wód w przyrodzie przedostają się pozostałości środków ochrony roślin, opóźniaczy palenia oraz innych.

Zespół dr hab. inż. Barchańskiej, prof. PŚ pracujący w Katedrze Chemii Nieorganicznej, Analitycznej i Elektrochemii Wydziału Chemicznego zajmuje się badaniami podstawowymi z zakresu usuwania pozostałości pestycydów i opóźniaczy palenia z wód powierzchniowych na drodze fitoremediacji. Szczególna uwaga badaczy zwrócona jest na usuwanie produktów degradacji pestycydów, ponieważ stanowią one istotne zagrożenie toksykologiczne dla wielu gatunków organizmów, w tym człowieka, a brakuje technologii pozwalających na skuteczne eliminowanie tego typu związków ze środowiska. Badania skupiają się nie tylko na typowaniu potencjalnych bioakumulatorów, ale również obejmują zagadnienia związane z wpływem pestycydów i produktów ich degradacji na metabolizm i kondycję roślin.

Holistyczne podejście do zagadnienia fitoremediacji gwarantuje uzyskanie szerokiego spektrum informacji na temat tego procesu niezbędnych do prawidłowego zasiedlania zanieczyszczonych zbiorników wodnych, uwzględniającego indywidualne warunki panujące w danym zbiorniku.

Realizacja postawionych zadań badawczych prowadzona jest z zastosowaniem szeregu technik ekstrakcyjnych oraz instrumentalnych zapewniających uzyskanie rzetelnego wyniku analitycznego w szerokim zakresie stężeń. Obiektem badań są zarówno rośliny jak i woda. W związku z tym do wydzielania opóźniaczy palenia i pozostałości pestycydów stosowane są następujące techniki ekstrakcyjne: ekstrakcja do fazy stałej (SPE), ekstrakcja ciało stałe ciecz, ekstrakcja z próbki zmieszanej z wypełniaczem (MSPD) oraz QuEChERS. Do oznaczeń końcowych związków organicznych oraz analiz metabolicznych tkanek roślinnych stosowana jest chromatografia cieczowa połączona z tandemowym spektrometrem mas. Do analiz wielopierwiastkowych wód oraz roślin wykorzystywana jest technika fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej [21].

W celu identyfikowania związków endogennych stanowiących odpowiedź metaboliczną rośliny na zanieczyszczenia środowiska stosowana jest specjalistyczna obróbka danych eksperymentalnych za pomocą następujących programów LightSight, Cliquid oraz Matlab.

W prace badawcze zaangażowana jest grupa studentów Wydziału Chemicznego zrzeszona w Kole Naukowym Chemików. W roku akademickim 2020/2021 uzyskała ona finansowanie w ramach konkursu o przyznanie finansowania projektów studenckich kół naukowych (Program Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza) zatytułowany: „Fitoremediacja organicznych zanieczyszczeń środowiska”.

7.7. Metody składowania i zabezpieczania materiałów poprodukcyjnych i odpadów

W Katedrze Geologii Stosowanej Wydziału Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej dr Łukasz Gawor i dr hab. inż. Marek Marcisz prof. PŚ, prowadzą prace nad oceną rekultywacji i zagospodarowania zwałowisk odpadów przemysłowych z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych [22–24].

Zwałowiska odpadów przemysłowych, w tym głównie górniczych i hutniczych wpisują się od dziesiątek lat w krajobraz przemysłowy Górnego Śląska. Najstarsze obiekty związane są z początkami eksploatacji górniczej i można traktować je często jako zabytki techniki, należące do dziedzictwa przemysłowego regionu.

Działalność górnicza jest nierozerwalnie związana z powstawaniem odpadów wydobywczych i przeróbczych. Według danych statystycznych, wydobyciu 1 Mg eksploatowanego węgla towarzyszy powstawanie ok. 0,4 Mg odpadów. Na przestrzeni dziejów były one składowane głównie w formie zwałowisk nadpoziomowych, rzadziej podpoziomowych. Skład petrograficzny odpadów powęglowych deponowanych na Górnym Śląsku obejmuje głównie skały osadowe – piaskowce, mułowce i iłowce, a także węgiel oraz łupki węglowe (których zawartość może stanowić zagrożenia samozapłonem materiału odpadowego i w efekcie pożarami hałd).

Rozmieszczenie zwałowisk pozostałych po górnictwie i przeróbce węgla kamiennego wynika głównie z lokalizacji zakładów górniczych. Wśród śląskich przeważają hałdy przyzakładowe, usytuowane w bezpośrednim sąsiedztwie kopalń. Nieliczne zwałowiska centralne stanowią duże obiekty, których powierzchnia sięga nierzadko kilkuset hektarów, są usytuowane najczęściej na peryferiach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). W miejscach tych zwałowano często materiał odpadowy z różnych kopalń, a czasem również inne odpady, takie jak popioły elektrowniane czy odpady pogalwaniczne.

W ramach badań naukowych prowadzonych od prawie 20 lat dokonano szczegółowej inwentaryzacji zwałowisk odpadów po górnictwie węgla kamiennego

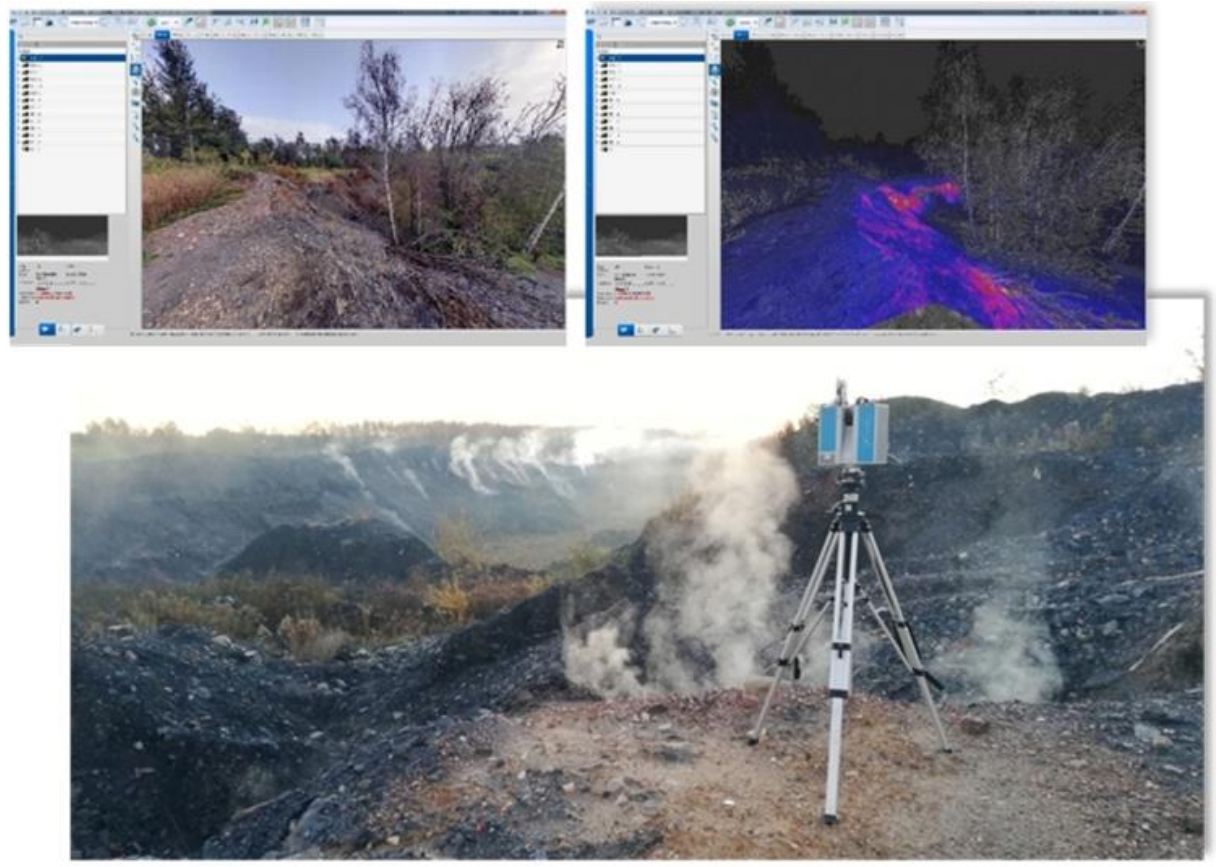
oraz oceny rekultywacji i zagospodarowania badanych obiektów. Wykonano również waloryzację zwałowisk według autorskiej metody. W badaniach wykorzystano nowoczesne metody teledetekcyjne – niskopoziomowe zdjęcia lotnicze z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego (BSP). Dokonano również oceny zagrożeń dla środowiska badanych obiektów, z wykorzystaniem kamer termowizyjnych i BSP. Ponadto wykonano zdjęcia i zwaloryzowano wybrane kamieniołomy GZW. Obecnie na obszarze Górnego Śląska wraz z czeską częścią Górnośląskiego Zagłębia Węglowego zlokalizowano ponad 250 obiektów. Szacuje się, że na zwałowiskach zdeponowano ok. 700 mln Mg odpadów, które zajmują powierzchnię od kilku do kilkuset ha. Szczegółowa inwentaryzacja w polskiej części GZW wykazała występowanie 226 obiektów na obszarze 2 województw (śląskie i małopolskie), 27 powiatów, 44 gmin, o łącznej powierzchni 4270 ha. Wszystkie zwałowiska zostały zwaloryzowane oraz przedstawione na 44 mapach tematycznych (rys. 7.13 i 7.14).

Rys. 7.13. Zwałowisko przy ul. Pszczyńskiej, Gliwice
Fig. 7.13. Spoil heap at Pszczyńska St., Gliwice

Rys. 7.14. Kamieniołom w Mikołowie, Mikołów-Mokre
Fig. 7.14. The quarry in Mikołów, Mikołów-Mokre

W Katedrze Eksploatacji Złóż Wydziału Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej dr inż. Zenon Różański analizuje stan termiczny zwałowisk odpadów powęglowych [25–27].

Jednym z negatywnych efektów działalności górniczej jest powstawanie znacznych ilości odpadów wydobywczych. W przeszłości w Polsce i na świecie powszechnie stosowanym sposobem unieszkodliwiania odpadów pochodzących z górnictwa węgla kamiennego było ich składowanie na zwałowiskach. Dlatego obecnie na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego zlokalizowanych jest ponad 220 tego typu obiektów. Przykładowo w Chinach ich liczba przekracza 1700. Zajmują one duże areały gruntów i nie pozostają bez wpływu na środowisko (zanieczyszczenie atmosfery, gruntów i wód, degradacja krajobrazu itp.). Ze względu na znaczną zawartość części palnych w odpadach powęglowych istotnym zagrożeniem dla środowiska i bezpieczeństwa ze strony zwałowisk są pożary endogeniczne. Towarzyszy im wysoka temperatura materiału oraz emisja gazów i pyłu do atmosfery. Stanowią one istotną przeszkodę w możliwości zagospodarowania terenu zwałowisk.



Rys. 7.15. Termowizja połączona naziemnym skaningiem laserowym TLS
Fig. 7.15. Thermovision combined with TLS terrestrial laser scanning

Rys. 7.16. Termowizja i fotogrametria niskiego pułapu
Fig. 7.16. Thermovision and low flight altitude photogrammetry

Pracownicy Katedry Eksploatacji Złóż prowadzą badania stanu termicznego zwałowisk odpadów powęglowych. Pozwalają one na wczesne wykrycie aktywności termicznej, co umożliwia wprowadzenie odpowiednich działań prewencyjnych w celu ograniczenia możliwości rozwoju pożaru. W sytuacji występowania pożarów na zwałowiskach prowadzi się badania stanu termicznego w celu określenia zasięgu i intensywności zjawisk termicznych. W Katedrze prowadzi się także badania wielkości emisji gazów pożarowych do atmosfery oraz badania w zakresie możliwości odzysku węgla z odpadów zdeponowanych na zwałowiskach w celu reeksploatacji i odwęglenia co korzystnie wpływa na redukcję zagrożenia pożarowego i umożliwia rekultywację oraz zagospodarowanie zdegradowanych terenów.

W badaniach stanu termicznego zwałowisk odpadów powęglowych wykorzystuje się nowoczesne techniki polegające na pomiarach temperatury powierzchni i wnętrza zwałowisk oraz stężeń gazów powstających w strefach aktywności termicznej. Stosuje się termowizję klasyczną (z ręki) oraz zintegrowaną z geodezją nowoczesną tj. kamera termograficzna współpracująca z bezzałogowym statkiem powietrznym (UAV) lub naziemnym skanerem laserowym (TLS) (rys. 7.15). Dzięki zastosowaniu fotogrametrii i specjalistycznego oprogramowania opracowuje się mapy termiczne terenu oraz chmury punktów umożliwiające opracowanie modeli 3D stanowiące odwzorowanie przestrzenne badanych powierzchni wraz z rozkładem ich temperatury (rys. 7.16). Dodatkowo w celu określenia intensywności i etapu rozwoju pożaru stosuje się wielokanałowe analizatory gazów w celu określenia składu atmosfery wnętrza zwałowisk.

Wyniki badań wykorzystywane są w doborze metod zwalczania pożarów, projektowaniu rekultywacji technicznej i biologicznej terenów, na których ulokowano odpady powęglowe.

7.8. Podsumowanie

Teren Górnego Śląska jest silnie dotknięty przez prowadzoną latami wyniszczającą środowisko działalność przemysłu ciężkiego. Dlatego jednym z priorytetów społeczności tego regionu jest zagospodarowanie terenów poprzemysłowych, tak aby służyły mieszkańcom aglomeracji śląskiej i zarazem przyczyniły się do poprawy jakości środowiska. Przywrócenie funkcjonalności terenom poprzemysłowym jest zadaniem trudnym i wymagającym współdziałania specjalistów z wielu dziedzin. Naprzeciw temu wyzwaniu wychodzą pracownicy Politechniki Śląskiej skupieni

w siódmym podobszarze badawczym POB6. Prowadzone przez nich badania dotyczące zarówno oczyszczania środowiska z zanieczyszczeń antropogenicznych, własności chemicznych materiałów poprodukcyjnych, opracowania metod ich składowania i zabezpieczania jak i prowadzone prace nad rekultywacją gruntów i badania w zakresie usług ekosystemów na terenach poprzemysłowych aż do nadawania nowej funkcji terenom poprzemysłowym i rewitalizacja architektury poprzemysłowej dostarczają gotowych rozwiązań bieżących problemów Górnego Śląska. Współpraca z otoczeniem społeczno-gospodarczym Uczelni umożliwia wdrażanie opracowanych narzędzi.

Poprzemysłowe zanieczyszczenie środowiska oraz wyzwania związane z rekultywacją zdegradowanych obszarów są niestety cechą nie tylko Górnego Śląska. Dlatego doświadczenie pracowników Politechniki Śląskiej związane z rewitalizacją terenów poprzemysłowych i opracowane przez nich rozwiązania mogą być z powodzeniem adaptowane do innych terenów, gdzie występują podobne problemy.

Bibliografia

1. Klemens J.: Problemy zagospodarowania zwałów poprzemysłowych górnictwa węgla kamiennego (na przykładzie aglomeracji górnośląskiej). Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Architektura, z. 2, Gliwice 1985.
2. Szady E.: Uwarunkowania przekształceń przestrzennych powierzchni wyeksploatowanych kopalń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Architektura, z. 12, Gliwice 1990.
3. Gasidło K.: Problemy przekształceń terenów poprzemysłowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Architektura, z. 37, Gliwice 1998.
4. Rostański K.M.: Sustainable Land Use Principle as Employed in the Revitalization of a Zinc Spoil Heap Located in Ruda Slaska, Poland. 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 471 102019 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/471/10/102019.
5. Drobniak A., Stangel M.: Łańcuch wartości jako mechanizm budowania nowych relacji gospodarczych – przykład strategii zagospodarowania terenów poprzemysłowych wybranych miast Aglomeracji Górnośląskiej, [w:] Kudłacz T., Brańka P. (red.): Teoria i praktyka rozwoju obszarów funkcjonalnych, Studia KPZK PAN, tom CLXXIV, Warszawa 2017.
6. Stangel M., Witeczek A.: Design thinking and role-playing in education on brownfields regeneration. Experiences from Polish-Czech cooperation. ACEE Archit. Civ. Eng. Environ., 12 (4), 2015.
7. Stangel M.: Územně–plánovací dokumentace a projektová dokumentace, [w:] Mikolas M., Biały W. (red.): Těžba uhlí a posthornická krajina v česko–polském pohraničí. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (VŠB), Ostrava 2014.
8. Stangel M., Czuwara K.: Rewitalizacja terenów poprzemysłowych Mysłowic, Jaworzna i Sosnowca w odniesieniu do obszaru funkcjonalnego Aglomeracji Górnośląskiej,

[w:] Gasidło K., Bradecki T. (red.): Wielkie inwestycje publiczne w miastach aglomeracji, Tom 2, Gliwice 2017.
9. Stangel M.: Silesian Territory: Agglomeration of the Neighbourhoods or Fragmentation of the Cities?, [w:] I. Mironowicz, J. Majczyk, R. Skrzypczyński, J. Potoczak (red.): Diamonds in the mine: strategies for the cities in the Silesian Metropolitan Region. Katowice-Bruksela, Fundacja Think Silesia, 2018.
10. Zięba A., Stangel M.: Rewitalizacja kluczowych przestrzeni publicznych w centrach miast obszaru funkcjonalnego Chorzowa, Rudy Śląskiej i Świetochłowic, [w:] Markowski T. (red.): Powrót do centrum miasta – wyzwanie dla krajowej polityki miejskiej, Studia KPZK PAN tom CLXVIII, Warszawa 2016.
11. Rostański K.M.: Natura modelowana. Elementy naturalistyczne w kompozycji urbanistycznej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, s. 298, Gliwice 2012.
12. Rostański K.M.: Modelling Nature in Ecologically Oriented Urban Context, [w:] John Tiefenbacher (Ed.), Perspectives on Nature Conservation – Patterns, Pressures and Prospects, ISBN: 978-953-51-0033-1, InTech, Rijeka 2012, p. 3–30, Available from: http://www.intechopen.com/articles/show/title/modelling-nature-in-ecologically-oriented-urban-context.
13. Rostański K.M.: Structural sustainability: Heuristic approach. in: World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture – Urban Planning Symposium. WMCAUS 2017, 12–16 June 2017, Prague, Czech Republic. Eds. M. Drusa, I. Yilmaz, M. Marschalko, E. Coisson, J. Rybak, A. Segalini. Bristol: Institute of Physics, 2017, art. 052007 p. 1–10, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/5/052007/pdf.
14. Jendruś R., Mzyk T.: Detection of anomalous zones in a rock-mass, caused by past shallow extraction of zinc, lead and silver ore. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 261, 2019, 012015. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/261/1/012015/pdf.
15. Strozik G., Jendruś R.: Lokalizacja i likwidacja pustek podziemnych w masywie skał triasowych narażonych na oddziaływanie deformacyjne ze strony podbierającej eksploatacji złoża karbońskiego. Przegląd Geologiczny, 65 (10), 2017. https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/publikacje-2/przeglad-geologiczny/2017/pazdziernik-2-4/5112-pg-2017-10-2-27/file.html.
16. Jendruś R.: Geophysical Measurements in the Aspect of Recognition of Discontinuous Deformation Processes – A Case Study, [in:] Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds): AUTOMATION 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 920. Springer, Cham. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-13273-6_66.
17. P.419493 – Sposób wyznaczania obecności mikroorganizmów w pierwotnie odwodnionych osadach zwłaszcza w instalacjach wodociągowych.
18. P.411232 – Sposób biostymulacji aktywności podłoża stałego (gleba, osad, kompost) nadtlenkiem wapnia zwłaszcza w procesach technologicznych.
19. P.400226 – Metoda oznaczania albendazolu w tkankach roślinnych.
20. P.400227 – Metoda oznaczania levamizolu w tkankach roślinnych.
21. Barchańska H., Plonka J., Jaros A., Ostrowska A. Potential application of *Pistia stratiotes* for the phytoremediation of mesotrione and its degradation products from water. International Journal of Phytoremedtaion 21, 2019, p. 1090–1097.
22. Probierz K., Gawor Ł., Jonczy Ł., Marcisz M.: Waloryzacja zwałowisk odpadów pogórniczych z kopalń Katowickiego Holdingu Węglowego S.A. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 33(1), 2017, p. 35–50, IGSMiE PAN, Kraków 2017.
23. Probierz K., Gawor Ł., Marcisz M.: Valorization of coal mining waste dumps from the mines of Jastrzębska Spółka Węglowa SA for the needs of the recovery of coal and

further reclamation and management. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 34(4), IGSMiE PAN, Kraków 2018, p. 97–114.
24. Marcisz M., Probierz K., Gawor Ł.: Possibilities of reclamation and using of large-surface coal mining dumping grounds in Poland. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 36 (1), 2020, p. 105–122, IGSMiE PAN, Kraków 2020.
25. Różański Z.: Management of Mining Waste and the Areas of its Storage–environmental aspects. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, 35 (3), 2019, p. 119–142, DOI 10.24425/gsm.2019.128525.
26. Różański Z.: Recovery of the raw materials as an element of coal waste management and reusing of landfill sites. Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management, 2019, p. 147–162, DOI: 10.24425/gsm.2019.128542.
27. Balcarczyk L., Różański Z.: Bezinwazyjne pomiary termowizyjne 3D – skanowanie laserowe i fotogrametria. Konferencja Środowisko Informacji, Warszawa 2018.

8. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA I ZARZĄDZANIE ENERGIĄ

8.1. Wprowadzenie

Efektywność energetyczna i zarządzanie energią odgrywa coraz większą rolę szczególnie w kontekście rosnącej dbałości o korzystanie z zasobów energii. W tym rozdziale przedstawiono metodykę i wyniki badań naukowych i prac wdrożeniowych dotyczące zwiększenia efektywności energetycznej oraz optymalizacji zarządzania energią w budownictwie oraz transporcie. Efektywność energetyczna w budownictwie obejmuje szereg tematów związanych zarówno z obudową budynku, jego wyposażeniem w instalacje jak i otoczeniem. Izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych, jest jedną ze składowych całkowitych strat ciepła. W poniższym rozdziale poruszono dwa wybrane zagadnienia związane z poprawą, jakości cieplnej przegród zewnętrznych. Całkowite straty ciepła przez projektowane przegrody są sumą strat przez powierzchnię i przez mostki cieplne. Liniowe mostki cieplne występujące w przegrodach budowlanych są dość dobrze opisane i uwzględniane w projektowaniu i diagnostyce. Punktowe (przestrzenne) mostki cieplne z uwagi na ich dość złożony charakter, są dość często pomijane w obliczaniu całkowitych strat ciepła. Powoduje to znaczące niedokładności obliczeń, a czasem skutkuje występowaniem negatywnych zjawisk od strony wewnętrznej przegrody – zabrudzenie, zwilgocenie i w konsekwencji zagrzybienie. W artykule przedstawiono metodę dokładną i uproszczoną uwzględniania mostków punkowych w przegrodach. Część druga artykułu poświęcona jest ważnemu zagadnieniu poprawy, jakości energetycznej przegród w budynkach historycznych, gdzie docieplenie ściany od strony zewnętrznej jest praktycznie niemożliwe z uwagi na konieczność zachowania elewacji. Docieplenie od strony wewnętrznej jest w takich przypadkach jedyną możliwością ograniczenia strat ciepła. Działanie takie wymaga zarówno znajomości budowy wewnętrznej przegród i ich stanu technicznego, jak i uwzględniania konieczności określenia wpływu nowo zastosowanej termoizolacji na przyszły stan techniczny całości przegrody. Obliczenia takie są zaawansowanymi symulacjami

przeprowadzanymi w oparciu o programy numeryczne. W kolejnym podrozdziale przedstawione zostały zagadnienia zastosowania termografii w budownictwie, jako jednego z podstawowych elementów diagnostyki cieplnej przegród budowlanych. Dotyczy to szczególnie budynków, które zostały zaprojektowane i wzniesione, jako budynki nisko energetyczne, lub blisko zeroenergetyczne. Wykonanie i opracowanie badań polowych termograficznych, pozwala na określenie jakości cieplnej przegród badanego budynku oraz oszacowaniu rodzaju i ilości liniowych i punktowych mostków cieplnych lub innych wad cieplnych. W kolejnym podrozdziale dotyczącym analizy zużycia energii, kosztów cyklu życia oraz wpływów środowiskowych w budynkach mieszkalnych w Polsce przedstawiono badania dotyczące analizy porównawczej śladu węglowego i zużycia energii i kosztów cyklu życia budynków. Dla jednego konkretnego przykładu określono ilościowe różnice w emisji CO_{2e}, kosztach cyklu życia i komforcie cieplnym w zależności od wariantu konstrukcji (drewno, cegła) i zastosowanych źródeł ciepła z uwzględnieniem rozwiązania tradycyjnego i energooszczędnego. Badania przeprowadzono za pomocą programu symulacyjnego EnergyPlus dla modelu wielostrefowego naturalnie wentylowanego domu jednorodzinnego. W ostatnim podrozdziale przedstawiono zagadnienia projektowania pojazdów elektrycznych w kontekście dążenia do minimalizacji zużycia energii przez te pojazdy w trakcie jazdy. W trakcie projektowania nowoczesnych pojazdów elektrycznych zastosowano intensywnie metody symulacji numerycznych do szczegółowego zbadania zagadnień przepływu energii zarządzania energią w nowoprojektowanych pojazdach. Metodyka projektowania opartego na modelu zastosowana w kilku przypadkach doprowadziła, poprzez optymalizację parametrów konstrukcyjnych jak i scenariuszy jazdy, do znacznego ograniczenia zużycia energii a tym samym wydłużenia zasięgów pojazdów.

8.2. Punktowe mostki cieplne

Wstęp

Straty ciepła w budynku to ucieczka ciepła przez przegrody budowlane. Główną charakterystyką opisującą jakość przegrody budowlanej, pod kątem jakości cieplnej jest współczynnik przenikania ciepła U [W/(m^{2}K)]. Charakterystyka ta, jest regulowana przepisami, ale jest znacznie uproszczona i nie odzwierciedla rzeczywistych strat ciepła przez obudowę budynku. Zdecydowanie dokładniej straty

ciepła przez obudowę wyraża się przez współczynnik strat ciepła przez przenikanie H_D. Współczynnik ten wyrażany jest wzorem (8.1) [1]:

$$H_D = \sum_i^1 A_i U_i + \sum_k^1 l_k \Psi_k + \sum_j^1 \chi_j \quad (8.1)$$

gdzie:

Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła [W/(mK)];

χ – punktowy współczynnik przenikania ciepła [W/K)];

l_k – długość liniowego mostka cieplnego.

We wzorze tym dwa ostatnie składniki sumy reprezentują mostki cieplne występujące praktycznie w każdym obiekcie budowlanym. Z uwagi na duże trudności w ich obliczaniu praktycznie kostki punktowe (przestrzenne) nie są uwzględniane w obliczeniach. Pojęcie mostka cieplnego, jest na ogół mało znane projektantom. O ile o liniowych mostkach cieplnych można znaleźć dość dużo informacji, to mostki punktowe (przestrzenne) postrzegane są jedynie, jako łączniki mechaniczne przechodzące przez termoizolację zewnętrzną.

Mostek cieplny to część obudowy budynku, w której jednolity opór cieplny jest znacznie zmieniony przez: całkowite lub częściowe przebicie obudowy budynku przez materiał o innej przewodności cieplnej, zmianę grubości warstw materiałów, różnicę między wewnętrznymi i zewnętrznymi powierzchniami przegród, co występuje przy połączeniach ściana/podłoga/sufit.

Warto ponadto zwrócić uwagę na fakt, że jedynym dokumentem zobowiązującym projektantów do uwzględniania mostków cieplnych jest rozporządzenie ministra infrastruktury w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynków [1]. W zapisie uwzględnia się jednak tylko mostki liniowe. Zdaniem autora należałoby dodać człon uwzględniający mostki punktowe, gdyż w dużym stopniu zmieniają one bilans energetyczny budynku, o czym świadczy chociażby konieczność kompensowania ich wpływu dodatkową grubością warstwy izolacji. Mostki przestrzenne uwzględnia się w rozporządzeniu [1], jako miejsca gdzie należy sprawdzać możliwość występowania kondensacji powierzchniowej.

Mostki punktowe – łączniki mechaniczne

Mostek termiczny, to część obudowy budynku, w której jednolity opór cieplny jest znacznie zmieniony przez: całkowite lub częściowe przebicie obudowy budynku przez materiały o innym współczynniku przewodzenia ciepła, zmianę grubości warstw materiałów, a także różnicę między wewnętrznymi i zewnętrznymi powierzchniami

przegród [2]. Punktowy mostek według opisu nazywany jest często „przestrzennym" z uwagi na brak jednakowego przekroju poprzecznego w każdym kierunku. Jego obecność przyczynia się do zwiększenia całkowitego strumienia ciepła przez obudowę budynku. Norma PN EN ISO 10211 [2] określa sposób obliczania punktowego współczynnika przenikania ciepła z równania (8.2):

$$c = L_{3D} - \sum_{i=1}^{Ni} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{Nj} Y_j \cdot l_j \qquad (8.2)$$

gdzie:

L_{3D} – współczynnik sprzężenia cieplnego otrzymany z 3-D obliczeń 3-D komponentu, oddzielającego dwa rozważane środowiska, [W/K];

Ui – współczynnik przenikania ciepła 1-d komponentu i, oddzielającego dwa rozpatrywane środowiska, [W/(m^{2}K)];

Ai – pole powierzchni, na której stosuje się wartość U_i, [m^2];

Ψj – liniowy współczynnik przenikania ciepła, [W/mK];

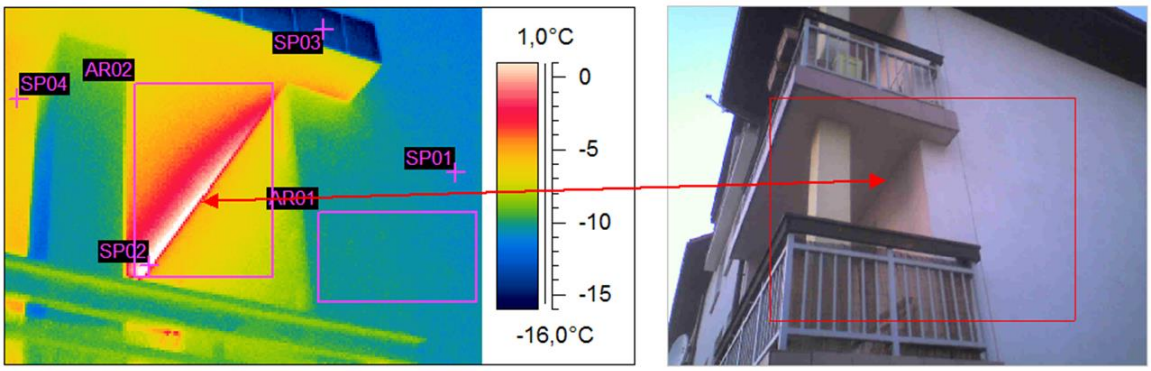
lj – długość, [m];

Nj – liczba komponentów 2-D;

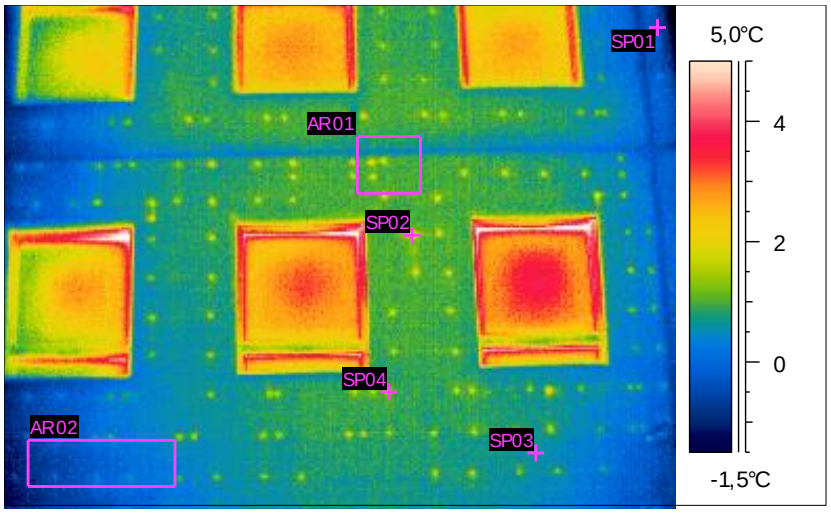
N – liczba komponentów 1-D.

Powyższe równanie wykorzystuje się w programach komputerowych do analizy cieplnej i do wyznaczania punktowych mostków cieplnych. Istnieją również mniej dokładne, lecz prostsze metody pozwalające określić wystarczająco dokładnie straty ciepła powstałe z punktowych mostków cieplnych. Obliczenia takie prowadzi się na ogół zgodnie z normą PN EN ISO 6946: 2017-10 [3].

Identyfikację mostków punktowych i liniowych w budynkach istniejących wykonuje się przy użyciu kamery termowizyjnej. Przykłady takich mostków w formie termogramów, pokazano na rys. 8.1 i 8.2.

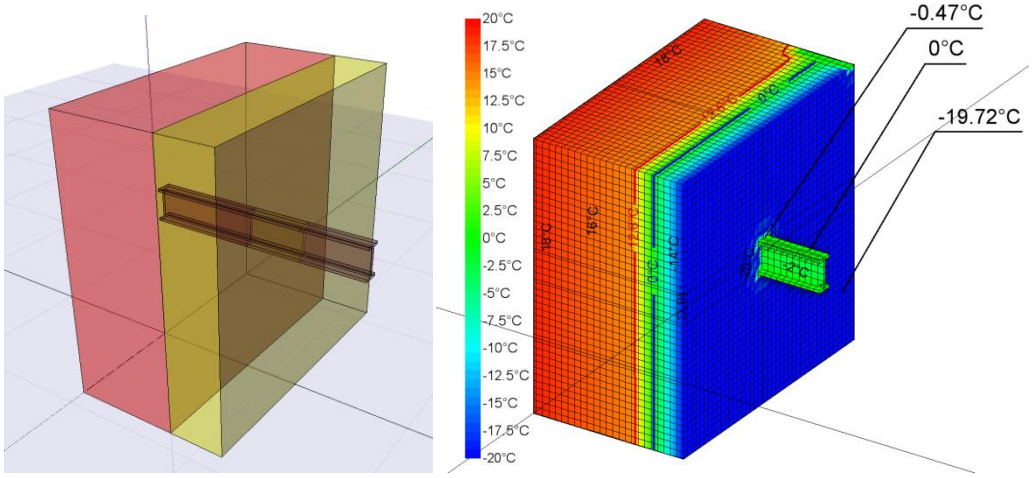


Rys. 8.1. Typowy mostek termiczny – płyta balkonu przechodząca przez termoizolację
Fig. 8.1. Typical thermal bridge – balcony slab passing through thermal insulation



Rys. 8.2. Typowe punktowe mostki cieplne – łączniki do termoizolacji
Fig. 8.2. Typical point thermal bridges – connectors for thermal insulation

W obiektach istniejących identyfikuje się oraz oblicza liniowe i punktowe mostki cieplne tylko z użyciem programów numerycznych. Mostki punktowe to nie tylko łączniki mechaniczne w postaci śrub, kotew do betonu, czy łączników do termoizolacji. Poniżej na rys. 8.3. przedstawiono przykład mostka punktowego w postaci profilu stalowego – dwuteownik 100, przenikającego przez termoizolację.



Rys. 8.3. Mostek punktowy w postaci belki walcowanej – dwuteownika osadzonego w części nośnej muru i przenikającego termoizolację zewnętrzną
Fig. 8.3. Point bridge in the form of a rolled beam – I-section embedded in the load-bearing part of the wall and penetrating the external thermal insulation

Dla prezentowanego przykładu, współczynnik przenikania ciepła całej przegrody U=0,20 W/(m^{2}K), profil stalowy I – 100. Obliczona wartość punktowego mostka cieplnego χ=0,1505 W/K, przy założonym obliczeniowym polu powierzchni dla modelu A_o=1,00 m^2. Mostki punktowe w postaci łączników można też obliczać z dość dobrym przybliżeniem przy użyciu modeli 2D – zdecydowanie łatwiejszych

w modelowaniu numerycznym, przy założeniu, że przekrój łącznika jest kołowy lub kwadratowy.

Mostek punktowy w postaci pręta zagłębionego nie więcej niż 0,5 grubości części konstrukcyjnej przegrody o średnicy pręta d. Niezbędnym założeniem, jest przyjęcie modelu o długości 1 m.

Chcąc obliczyć wartość mostka punktowego, dla pręta o przekroju kołowym należy zastosować wzór (8.3):

$$\chi = d \cdot \psi \cdot 1.00 \cdot (1-(d^2 - (\pi \cdot d^2/4))) \tag{8.3}$$

gdzie:

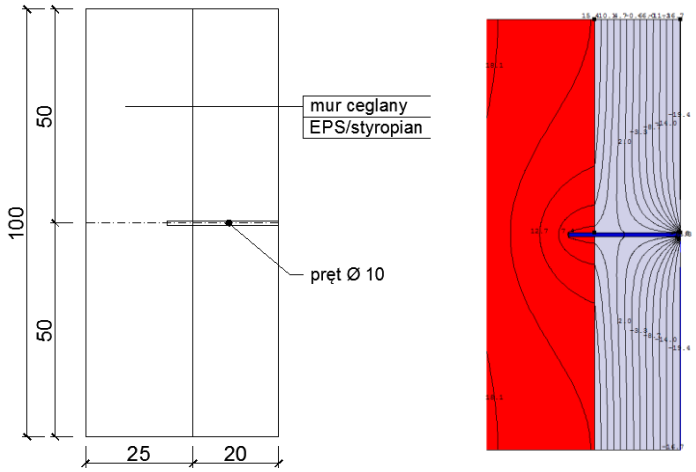
d – średnica pręta w [m];

Ψ – liniowy mostek cieplny obliczony z użyciem programu numerycznego 2D.

Dla pręta kołowego o średnicy d=0,01 m (rys. 8.4.) i obliczonej wcześniej wartości liniowego mostka cieplnego Ψ=0,0023 W/(mK).

χ=0,0023·0,785=0,00181 χ=0,00181 W/K.

Wpływ mostka punktowego jest w tym przypadku niewielki, lecz nie pomijalny.

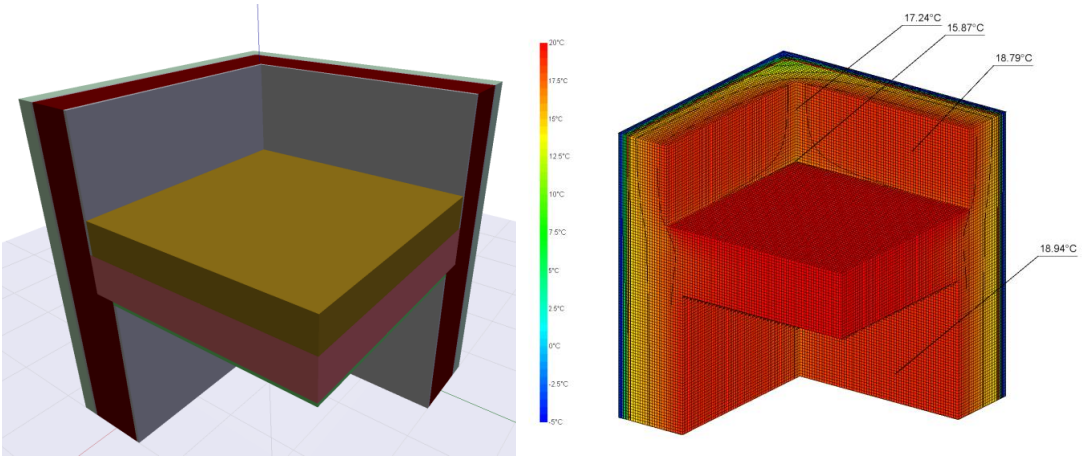


Rys. 8.4. Rysunek poglądowy z lewej, model numeryczny z prawej dla pręta zagłębionego w ścianie konstrukcyjnej

Fig. 8.4. Illustrative drawing on the left, numerical model on the right for a bar embedded in a Structural wall

Mostki punktowe – elementy przestrzenne

Mostki punktowe w odniesieniu do części pomieszczenia (budynku), gdzie występuje połączenie trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyzn np. dwóch ścian i stropu (stropodachu) to mostki przestrzenne. Poniżej (rys. 8.5) przykład modelu mostka przestrzennego wraz z modelem obliczeniowym. Model i obliczenia wykonano w programie Psi-Therm 7.0.



Rys. 8.5. Z lewej rysunek poglądowy, z prawej model numeryczny mostka przestrzennego
Fig. 8.5. An overview drawing on the left, a numerical model of the spatial bridge on the right

Wyniki obliczeń numerycznych obejmujące: obliczenie strumienia ciepła Q [W], oraz mostków liniowych na połączeniu strop-ściana i ściana-ściana (naroże płaskie), oraz końcowej wartości przestrzennego mostka cieplnego χ, pokazano na rys. 8.6.

```
Topologie setzen:
  Knoten...
  Elemente...
  Materialien...
  Randbedingungen...
S T A R T  :  F I N I T E  -  E L E M E N T E  -  B E R E C H N U N G
Matrizen initialisieren...
Anzahl der Knoten: 513012
Anzahl der Elemente: 486248
Zusammenbau der Steifigkeitsmatrix und des Lastvektors... fertig
Das Gleichungssystem wird gelöst:
  * 100 Iterationen
  * 200 Iterationen
   Anzahl der Iterationen: 260
E N D E  :  F I N I T E  -  E L E M E N T E  -  B E R E C H N U N G
Zusammenfassung der Randbedingungen:
 Randbedingung     Typ     Wärmestrom   Fläche   Temperatur    Rs(i,e)
                            q [W]        [m²]                 [(m²K)/W]
         1        Robin     18.2698      1.5904    20.0000      0.1300
         2        Robin      1.2658      2.0164    20.0000      0.1300
         3        Robin     24.4669      2.5284    20.0000      0.1300
         4        Robin      6.4689      1.6641    20.0000      0.1300
         5        Robin    -25.2385      3.6200    -5.0000      0.0400
         6        Robin    -25.2386      3.6200    -5.0000      0.0400
                 Summe :    -0.0056
Gesamtwärmestrom(positiv)                 Q+ =   50.47151  [W]
Gesamtwärmestrom(vom Innenraum ausgehend) Q  =   50.47151  [W]
                                                 ==========
Dauer der Berechnung (Tage:Std:Min:Sek): 0:0:1:6
Chi(X)-Wert Berechnung
======================
Tabelle der ungestörten U-Werte :
---------------------------------
Nummer Beschreibung           Fläche   U-Wert  Faktor
                               [m²]   [W/(m²*K)]
    1   1                     3.400    0.300   1.000
    2   2                     3.200    0.230   1.000
Tabelle der Ψ-Werte :
---------------------
 Nummer Beschreibung           Länge  Psi-Wert Faktor
                                [m]   [W/(m*K)]
    1   1                     1.000    0.040   1.000
    2   2                     1.000    0.030   1.000
Ergebnisse :
------------
 Σ U(i) x A(i) * F(i)              =   1.7560 [ W/K ]
 Σ Ψ(i) x L(i) * F(i)              =   0.0700 [ W/K ]
 L3D             (50.472 / 25.000) =   2.0189 [ W/K ]
 Chi       (2.019 - 1.756 - 0.070) =   0.1929 [ W/K ]
```

Rys. 8.6. Wyniki obliczeń z programu numerycznego
Fig. 8.6. Calculation results from the numerical program

Podsumowanie

Uwzględnianie punktowych mostków cieplnych w projektowaniu budynków niskoenergetycznych jest koniecznością związaną z zapewnieniem rzeczywistego niskiego zużycia energii w całym obiekcie. Pomijanie ich w obliczeniach, chociaż zgodne z wytycznymi rozporządzenia [1], będzie skutkowało rozbieżnościami w projektowanym i rzeczywistym zużyciu energii. Za istotne należy uznać kształcenie inżynierów i architektów w posługiwaniu się programami do modelowania elementów budowlanych z użyciem programów numerycznych 2D i 3D i stosowaniu ich w praktyce.

8.3. Ocieplenie ścian ceglanych i z muru pruskiego budynków zabytkowych od strony wewnętrznej – materiały i technologie

Wstęp

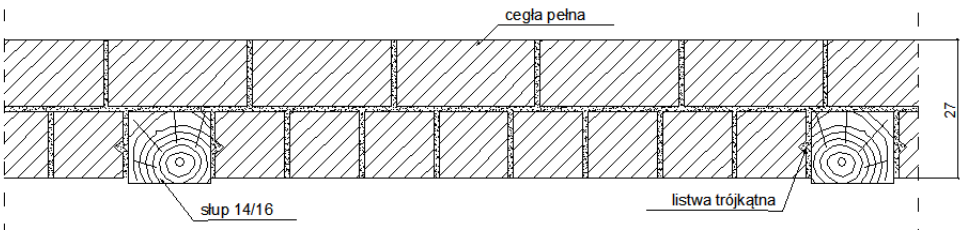
Oszczędność energii w budownictwie kojarzy się z dociepleniem ścian zewnętrznych, dachów, wymianą okien i modernizacją ogrzewania. Główną grupą obiektów, które już zostały ocieplone, lub są ocieplane, to budynki mieszkalne powstałe po 1945 r. Znaczącą grupą obiektów, które nie zostały ocieplone są budynki historyczne, wzniesione przed 1945 r. Budynki te wymagają szczególnej formy analizy stanu technicznego przed termomodernizacją oraz prognozy stanu głównych elementów konstrukcji ścian uwzględniającej projektowane zmiany. Za najważniejsze elementy analizy przed remontem należy uznać: rozpoznanie zastosowanych w nich technik budowania, technologii i materiałów, poprawne rozpoznanie stanu zawilgocenia wybranych fragmentów ścian i połączeń. Nowatorskim elementem projektowania docieplenia od strony wewnętrznej w budynkach historycznych, jest analiza numeryczna wpływu wprowadzanych zmian w budowę przegród, na stan techniczny elementów konstrukcji ścian i stropów.

8.4. Historyczne rozwiązania konstrukcji szkieletowych

Wśród obecnie zachowanych, historycznych budynków szkieletowych, dominują powstałe na przełomie XIX i XX w. Ich konstrukcja szkieletowa, oparta jest na układzie poziomych (rygiel, podwalina, oczep), pionowych (słupy) i ukośnych

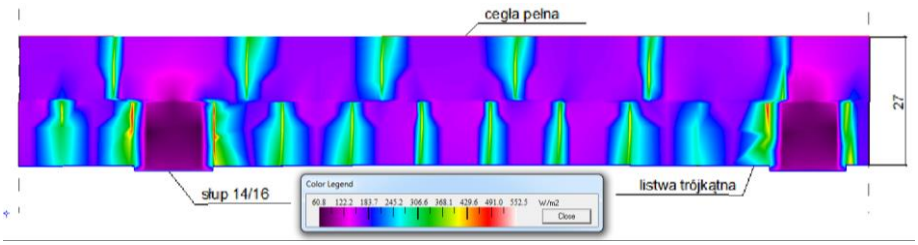
(zastrzały, miecze) elementów drewnianych stanowiących szkielet w płaszczyźnie budynku. Szkielet w połączeniu z więźbą dachową przenosi obciążenia stałe i zmienne (użytkowe). Różne sposoby usztywnienia węzłów często tworzyły misterne kratownice, świadczące o wyczuciu cieśli i znajomości pracy statycznej konstrukcji. Wypełnienie szkieletu ścian cegłą, tworzy tzw. mur pruski. Technologia ta w Polsce popularność zdobyła głównie w XIX wieku na terenach ówcześnie należących do Prus. Obecnie takie budynki występują głównie na Pomorzu, także na Warmii i Mazurach i dość powszechnie na Śląsku. Obiekty o takiej konstrukcji występują na Górnym Śląsku w osiedlach Zabrza, Bytomia, Rudy Śląskiej, Pyskowic i Gliwic. Dla robotników powstały budynki wielorodzinne, o dwóch lub trzech kondygnacjach mieszkalnych, czasami z mieszkaniami na kondygnacjach poddaszy (rys. 8.7). Szkielet drewniany (najczęściej występujące przekroje słupów: od 12/12 cm do 16/16 cm), widoczny od strony elewacji, wypełniany był cegłą i obudowywany od strony pomieszczeń warstwą cegły ułożonej na płask. Całkowita grubość przegrody wynosiła ok. 25 cm. Drewno występowało także w elewacyjnych elementach dekoracyjnych, w postaci bogato zdobionych płycin, nakładanych na cegłę, obudów gzymsów międzykondygnacyjnych, tralek, poręczy, deskowań szczytów czy okiennic. Typową budowę ściany zewnętrznej z tzw. muru pruskiego przedstawiono na rys. 8.8.

Rys. 8.7. Budynki z elementami muru pruskiego, Zabrze (fot. A. Gwiżdż)
Fig. 8.7. Buildings with elements of the half-timbered house, Zabrze (photo by A. Gwiżdż)



Rys. 8.8. Typowa ściana z muru pruskiego o grubości 25 cm
Fig. 8.8. Typical wall made of half-timbered timber 25 cm thick

Przegrody z muru pruskiego, z powodu swojej budowy, stanowią przypadek szczególny wśród przegród budowlanych. Występuje w nim połączenie elementów konstrukcji drewnianych, ceglanych oraz zaprawy murarskiej, czasami tynku. Są to materiały o różnych współczynnikach przewodzenia ciepła, rozszerzalności cieplnej, oraz o odmiennym oporze dyfuzyjnym, absorpcji wilgoci i promieniowania słonecznego. Charakterystyczną cechą tej przegrody jest występowanie szczelin pomiędzy szkieletem a przylegającymi elementami, umożliwiające wnikanie wody opadowej w głąb muru. Szacuje się, że grubość warstwy drewna przekrojów poprzecznych, która ulega rozkładowi (zanika) w wyniku starzenia w warunkach naturalnych, zewnętrznych, w przeciągu 100 lat sięga 6 mm [4]. Niejednorodne przewodzenie ciepła, duże różnice gęstości strumienia ciepła w cienkich warstwach materiału o różnych właściwościach, przyczyniają się do lokalnego rozszczelnienia muru. Na rys. 8.9 pokazano rozkład gęstości strumienia ciepła dla muru pruskiego o grubości 25 cm.



Rys. 8.9. Wynik analizy numerycznej dla modelu 2D – wycinek płaski przegrody muru pruskiego, stan istniejący. Zaburzenia gęstości strumienia ciepła [4]
Fig. 8.9. The result of the numerical analysis for the 2D model – a flat section of a half-timbered partition, the existing condition. Heat flux density disturbance [4]

Problemem zachowanych, historycznych budynków szkieletowych jest ich niewystarczająca izolacyjność cieplna. Izolacyjność zachowanych przegród drewniano-ceramicznych w zależności od struktury ściany kształtuje się na poziomie U=1,90–2,70 W/(m^{2}K). Wartości obliczanego współczynnika przenikania ciepła U ściany zewnętrznej mogą różnić się w zależności od przyjętej przewodności cieplnej materiałów. Właściwości użytych w przeszłości materiałów (cegły i drewna) mogą wykazywać znaczące różnice. W określaniu stanu istniejącego a następnie w analizach projektowych, mogą pomóc projektantowi zestawienia parametrów materiałów historycznych, dostępnych w źródłach drukowanych lub bazach bibliotek programów komputerowych, do symulacji cieplnych i obliczeń fizykalnych.

Materiały termoizolacyjne w docieplenia od wewnątrz

Współczesne wymagania prawne w zakresie charakterystyk energetycznych budynków i przegród zewnętrznych oraz konieczność polepszenia komfortu użytkowania pomieszczeń wymuszają wykonywanie prac termomodernizacyjnych, także w budynkach historycznych, ze złożoną budową przegrody, jak mur pruski. Dla takich obiektów w zasadzie nie obowiązują wymagania, co do współczynnika przenikania ciepła U z uwagi na fakt, iż ocieplenie wykonywane jest od strony wewnętrznej pomieszczeń. Rozwiązania materiałowe stosowane w koncepcjach ociepleń od wewnątrz zależą od zastosowanych materiałów, wchodzących w skład istniejącej ściany zewnętrznej. Pierwszym wariantem jest ocieplenie od wewnątrz z zastosowaniem materiału termoizolacyjnego o bardzo wysokim oporze dyfuzyjnym. Przykładem tego typu materiałów jest szkło piankowe, stosowane o grubości od 4 cm do 18 cm, współczynniku oporu dyfuzyjnego $\mu=\infty$ [5], a w praktyce $\mu=100000$. Rozwiązania materiałowe dopuszczające wystąpienie kondensacji produkowane są z silikatu wapiennego. Płyty z silikatu wapiennego, dzięki swojej aktywności kapilarnej pochłaniają wilgoć i rozpraszają ją na całej swojej powierzchni, skąd zostaje ona odparowana [6, 7]. Innym materiałem termoizolacyjnym dopuszczającym wystąpienie kondensacji są mineralne płyty izolacyjne, wykonane z bardzo lekkiej odmiany betonu komórkowego. Materiał ten posiada zdolność do chłonięcia wilgoci z powietrza oraz bardzo szybkiego wysychania. W tabeli 8.1, zestawiono materiały termoizolacyjne mogące mieć zastosowanie w docieplenia od wewnątrz.

Dobór materiałów w docieplenia od wewnątrz

Polskie przepisy dotyczące ochrony cieplnej zawarte w rozporządzeniu [10], zwalniają budynki będące zabytkami, lub o elewacjach podlegających ochronie konserwatora zabytków, z konieczności spełnienia wymagań, co do izolacyjności cieplnej wyrażonej współczynnikiem przenikania ciepła U, oraz wskaźnika EP dla całości budynku. Poza wymaganiami związanymi z oszczędności energii, istnieją wymagania związane z komfortem użytkowanych pomieszczeń i zapewnieniu trwałości przegród. Wymagania te to konieczność unikania ryzyka kondensacji powierzchniowej zarówno na ścianie płaskiej jak i w węzłach konstrukcyjnych, oraz o konieczność wykazania, iż wilgoć powstająca w warstwach przegrody odparuje w okresie letnim. Wymagania te są szczególnie trudne do zrealizowania w przegrodach o skomplikowanej budowie, z uwagi na konieczność wykonania obliczeń elementu budowlanego w modelu 3D w przypadku kondensacji

powierzchniowej, a w przypadku kondensacji międzywarstwowej, użycia programu do symulacji, bazującym na wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES).

Tabela 8.1

Wybrane izolacje od wewnątrz materiały i komponenty [6–9]

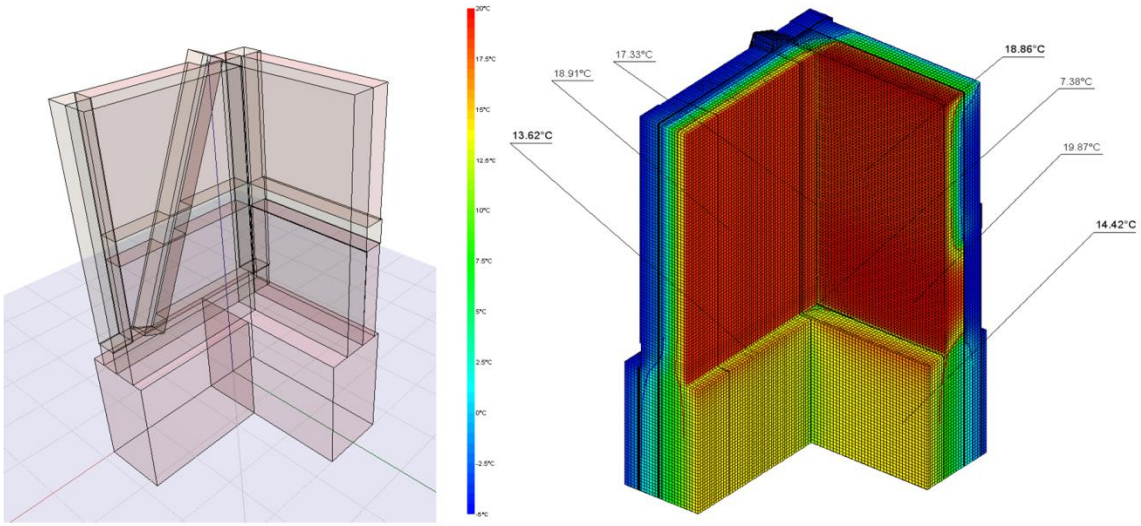
Lp.	Materiał	Grubość [cm]	λ [W/mK]	μ [-]
1	Silikat wapienny	1,5–30	0,042–0,07	2–6
2	Płyty mineralne	1,5–10	0,042	5–7
3	Mineralny tynk ciepłochronny	2–10	0,07–0,09	7–8
4	Wełna drzewna + tynk gliniany	4–10	0,045	5
5	Płyty keramzytowo-gliniane	do 17 cm	0,20	5–10
6	Płyta GK+EPS	3,3; 4,3	0,25/0,04	40
7	Płyta GK+XPS			
8	Szkło piankowe	4–18	0,04	∞
9	Wełna mineralna+aerożel	1,6–5	0,019	>3
11	XPS	0,3–0,9	0,03	650
12	Wełna drzewna	2–10	0,04	3
14	Płyty korkowe	2–10	0,04	25–30
15	Płyty z włókien konopnych	3–22	0,04	1
16	Celuloza	6–8	0,052	2,4
17	Pianka rezolowa	3–14	0,022	38

Na rys. 8.10 i 8.11 pokazano przykładowy model fragmentu ściany z muru pruskiego, analizowanego wraz z docieplenie od wewnątrz, na potrzeby analizy możliwości występowania kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody.
Do wykonywania prognoz zmian zawilgocenia służy unikalny program WUFI 2D-3, w którym zastosowano sprzężony model zjawisk transportu ciepła i wilgoci.

W programie WUFI 2D dyfuzja strumienia pary wodnej opisana jest zwykłym równaniem transportu w układzie współrzędnych kartezjańskich x; y w postaci (8.4.) [10]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{1}{\partial x}(D_w(u)\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\partial y}(D_w(u)\frac{\partial u}{\partial y}) \tag{8.4}$$

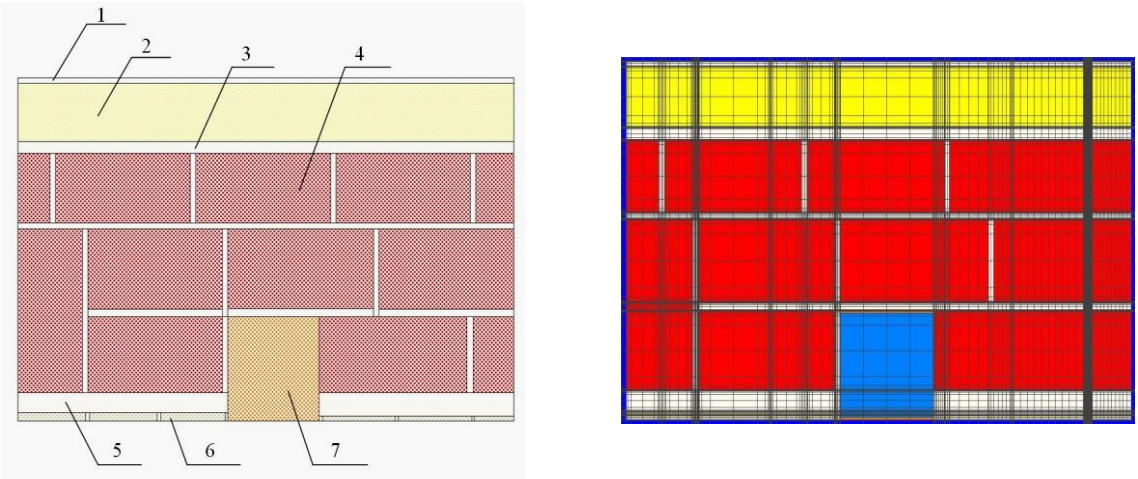
gdzie D_w – współczynnik transportu cieczy, zależny od rodzaju materiału, oraz warunków cieplno-wilgotnościowych.



Rys. 8.10. Model 3D, wybrany fragment naroża ściany z muru pruskiego wraz z wynikami obliczeń pola temperatury.
Fig. 8.10. 3D model, selected fragment of a half-timbered wall corner with the results of temperature field calculations

Takie sformułowanie zagadnienia transportu, pary wodnej, wody oraz sprzężonego z nim przepływu ciepła, pozwala na definiowanie dowolnych modeli dwuwymiarowych łącznie z imperfekcjami w postaci np. słupów drewnianych.

Symulacje w programie WUFI 2D-3, przeprowadzane były dla ściany muru pruskiego ocieplonego od wewnątrz w klimacie lokalnym z przyjęciem odpowiedniego dla warunków przyszłej eksploatacji mikroklimatu wewnętrznego.



1 – tynk wewnętrzny; 2 – materiał termoizolacyjny; 3 – warstwa klejowa na podkładzie cementowo-wapiennym – mur ceglany (cegła historyczna); 5 – tynk cementowo-wapienny; 6 – okładzina z płytek glazurowanych białych; 7 – słupek drewniany

Rys. 8.11. Z lewej, schemat fragmentu ściany z muru pruskiego, z prawej model obliczeniowy z widoczną siatką MES
Fig. 8.11. On the left, a schematic of a fragment of a half-timber wall, on the right a calculation model with a visible MES grid

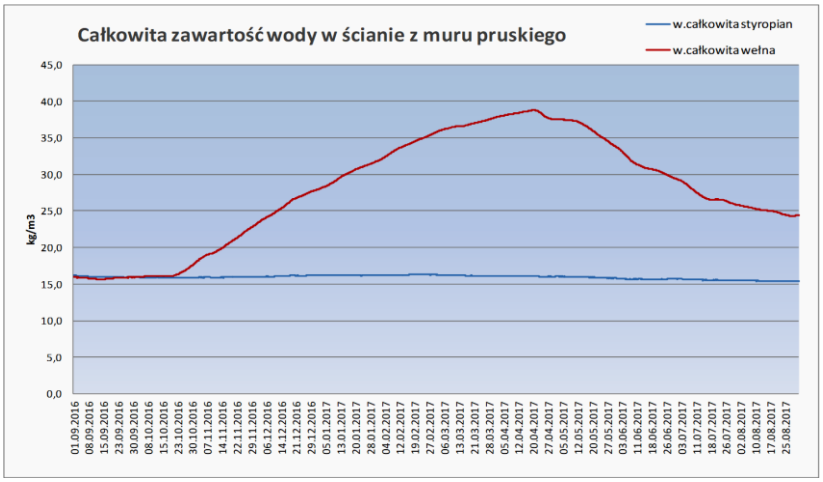
Uzyskane wyniki i ich analiza, pozwolą na dobór materiału termoizolacyjnego i rozwiązania technologicznego zapewniającego zmniejszenie strat ciepła przy jednoczesnym niepogorszeniu stanu zawilgocenia przegrody [12].

Wyniki symulacji i ich analiza

Wyniki symulacji pokazano w formie graficznej na rys. 8.12. Szczegółowa analiza ilościowa przyrostu wody w poszczególnych warstwach muru oraz zestawiania przyrostu wody w poszczególnych materiałach i warstwach muru, wykracza poza zakres tego opracowania. Na podstawie przeprowadzonej symulacji dla kilku wariantów materiałów w tym dla wełny i styropianu oraz analizie uzyskanych wyników można zaproponować konkretne rozwiązanie materiałowe dla badanej przegrody.

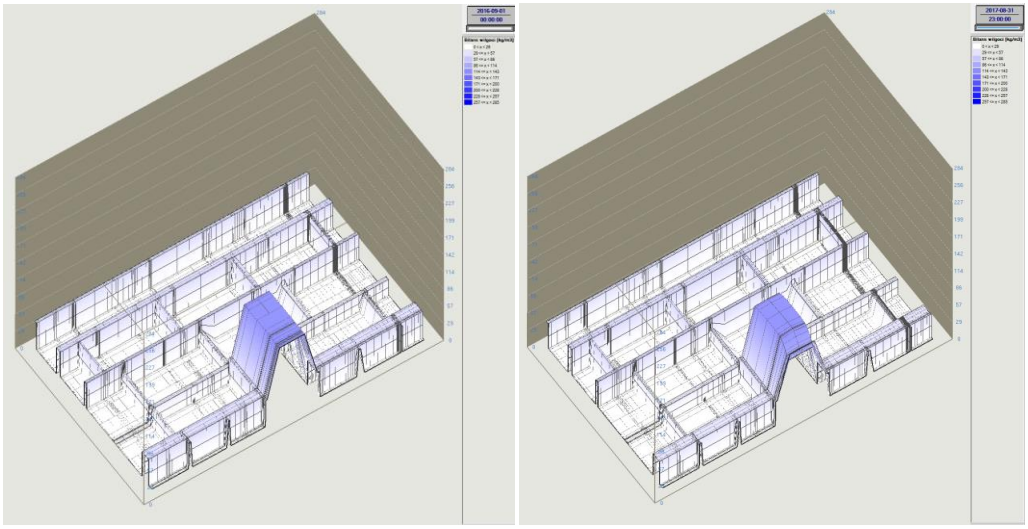
Wyniki symulacji (prognozy) można obserwować w trybie ciągłym w modelu pseudo 3D, gdzie na osi Z, widoczne są zmiany w czasie rzeczywistym. Na rys. 8.13 przedstawiono wyniki zmian zawilgocenia analizowanego detalu w chwili startu obliczeń i po okresie 1 roku.

Uzyskane wybrane wyniki pozwoliły na określenie tendencji zmian zachodzących w ocieplanej przegrodzie dla obydwóch wariantów. Ostateczne, wartości określające zawartość wody w warstwie izolacji, po rocznym okresie symulacji dla ściany północno-zachodniej nie odbiegały znacznie od siebie. Analizy nie wykazały niepokojącej kumulacji wilgoci w warstwach przegrody ani na jej wewnętrznej powierzchni dla prezentowanego przypadku.



Rys. 8.12. Porównanie prognozowych zmian zawartości wody w całym modelu po docieplenia przegrody od wewnątrz dla wariantu I i II

Fig. 8.12. Comparison of the forecast changes in water content in the entire model after the partition is insulated from the inside for variants I and II



Rys. 8.13. Graficzna prezentacja ilości wody w modelu ściany z muru pruskiego po dociepleniu. Z lewej na początku symulacji, z prawej po 1 roku
Fig. 8.13. Graphic presentation of the amount of water in the model of the half-timbered wall after insulation. Left at the beginning of the simulation, right after 1 year

8.5. Termografia w budownictwie mieszkaniowym

Jednym z podstawowych elementów diagnostyki cieplnej przegród budowlanych są badania termograficzne. Dotyczy to szczególnie budynków, które zostały zaprojektowane i wzniesione, jako budynki niskoenergetyczne, lub blisko zeroenergetyczne. Wykonanie i opracowanie badań polowych termograficznych, pozwala na określenie jakości cieplnej przegród badanego budynku oraz oszacowaniu rodzaju i ilości liniowych i punktowych mostków cieplnych lub innych wad cieplnych. Wady i uszkodzenia wewnętrzne ujawniają się na powierzchniach przegród od strony wewnętrznej i zewnętrznej. Przy użyciu termowizji możemy diagnozować: nieciągłość izolacji termicznej, wady materiałowe, przebicie izolacji termicznej materiałami o niskim współczynniku przewodzenia ciepła, lokalne zawilgocenia, lokalne nieszczelności na połączeniach przegród (węzły konstrukcyjne), połączenia stolarki okiennej i drzwiowej z przegrodą [13].

Podstawy teoretyczne oraz podstawowe definicje

Promieniowanie cieplne nazywane też termicznym lub promieniowaniem temperaturowym, jest sposobem przekazywania energii za pośrednictwem fal elektromagnetycznych o umownie przyjętych długościach od 0,76 μm do 1000 μm. Promieniowanie podczerwone emitowane jest przez każdy obiekt o temperaturze

wyższej od zera bezwzględnego. Zakres długości fal odpowiada widmu promieniowania umownie nazwanemu promieniowaniem podczerwonym. Fale z tego zakresu przenoszą przeważającą część energii wewnętrznej ciał nagrzanych.

W technice termowizyjnej wprowadzono pojęcia ciała dyfuzyjnego i szarego, które posiadają emisyjność mniejszą od jedności, w przypadku ciała dyfuzyjnego niezależną od kierunku, zaś w przypadku szarego niezależnie od długości fali. Prawidłowy dobór współczynnika emisyjności powierzchni przegród emitujących promieniowanie podczerwone jest jednym z ważniejszych elementów pomiarów termowizyjnych. Przykładowe wartości współczynnika emisyjności materiałów budowlanych można znaleźć w literaturze [13].

Badania termowizyjne

Zastosowanie termografii do oceny izolacyjności termicznej przegród budowlanych jest typowym przykładem wdrożenia metody badawczej. Wykorzystanie tej metody w odniesieniu do budynków pozwala wykryć typowe błędy powodujące lokalne obniżenie izolacyjności termicznej przegród budowlanych w tym:

- zastosowanie innych materiałów termoizolacyjnych niż założonych w projekcie;
- nieciągłość warstw izolacyjnych i zmniejszenie grubości warstw (wtopienie, wprasowanie);
- nieprawidłowe wykonanie lub brak izolacji termicznej i przeciwwodnej w złączach w budynkach prefabrykowanych;
- lokalne nieszczelności na połączeniach elementów w tym np. okno – ściana, drzwi zewnętrzne – ściana, ściana wewnętrzna – ściana zewnętrzna i inne.

Pojęcia użytkowe

Anomalie to miejsca o zróżnicowanej lokalnie temperaturze powierzchni wewnętrznej lub zewnętrznej, związane z geometrią przegród. Występują niezależnie od ilości i jakości zarówno materiału izolacyjnego, rozwiązania konstrukcyjnego czy też, jakości robót. Do anomalii zalicza się występujące na budynku w wielu miejscach złamania płaszczyzn ścian zewnętrznych obudowy wstającej ponad dach, czyli pionowe i poziome naroża oraz połączenia ścian pod różnymi kątami dającymi tzw. efekt naroża wypukłego, wklęsłego, lub o kątach zawartych pomiędzy 10–170^{o}.

Defekty to wady i usterki spowodowane niewłaściwym projektowaniem i/lub wykonawstwem.

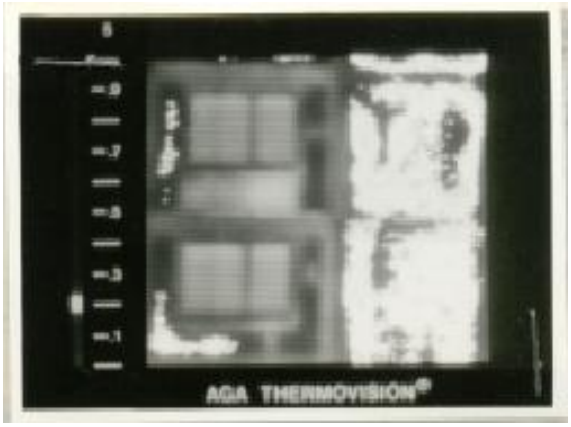
Defekty cieplne można generalnie podzielić na dwa rodzaje:

- liniowe mostki cieplne związane z konstrukcją i połączeniami pomiędzy elementami przegród np. połączenia krawędzi ścian z dachem itp. i nie zostały odpowiednio zaprojektowane tak, aby wyeliminować ich wpływ na straty ciepła liniowe nieciągłości izolacji związane z technologią wykonania połączeń;
- lokalne nieciągłości izolacji, lub zmniejszenie jej grubości powstałe w wyniku lokalnej zmiany grubości materiału izolacyjnego w przegrodach. Może też wystąpić lokalne zawilgocenie materiałów budowlanych w przegrodzie w szczególności materiałów termoizolacyjnych.

Rodzaje badań wykonywanych przy użyciu termowizji mające zastosowanie w budownictwie

Badania jakościowe

Pod pojęciem termografii jakościowej należy rozumieć metody, w których nie wyznacza się określonych wartości pomiarowych [15]. Przedstawia się natomiast wizualizację różnic temperatury na badanej powierzchni przegrody (rys. 8.14).



Rys. 8.14. Przykładowy termogram jakościowy, bez wyznaczania wartości pomiarowych
Fig. 8.14. Sample quality thermogram, without measuring values

Badania termograficzne termoizolacyjności przegród zewnętrznych prowadzi się z reguły od zewnątrz budynku, chociaż ich wartość użyteczna jest znacznie mniejsza aniżeli przy badaniach od strony wewnętrznej. Badania od strony wewnętrznej są bardziej miarodajne, jednak ze względu na uciążliwości spowodowane prowadzeniem w eksploatowanych pomieszczeniach, mają z reguły charakter ograniczony. Badania jakościowe szczegółowo omawiane są w normie [14]. Norma ta często błędnie jest przywoływana przy badaniach ilościowych.

Badania ilościowe

Termografia ilościowa wykorzystuje podczerwień w metodzie badawczej bez bezpośredniego udziału innych przyrządów pomiarowych. Granice tolerancji dokładności pomiaru są dość znaczne. Rozróżnia się kilka sposobów postępowania w badaniach termograficznych:

- pomiar bez dodatkowych środków pomocniczych;
- pomiar z temperaturą odniesienia;
- pomiar z wzorcowym promiennikiem;
- pomiar z płaszczyzną odniesienia; polega na porównaniu wielkości mierzonych promiennika wzorcowego, wzorca temperatury odniesienia i powierzchni przegrody [15, 16];
- kombinowane metody pomiaru – kombinacja urządzenia termowizyjnego oraz miernika przepływu ciepła i temperatury.

Pomiary

Przed rozpoczęciem właściwych badań termograficznych należy postępować zgodnie z [15] oraz [14] wykonać czynności wstępne. Po wykonaniu wszystkich zalecanych czynności można przystąpić do wykonywania badań zasadniczych [18]. Schemat postępowania przy wykonywaniu badań zasadniczych określony jest w stosownej literaturze [13, 15]. Badania termograficzne należy prowadzić zgodnie z ogólnymi zasadami wymagań badawczych zawartymi w normach [14] i [15].

Diagnostyka izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych z wykorzystaniem termografii

Badania te są wykonywane w warunkach niestacjonarnego przepływu ciepła, przez różne jednostki są często w sposób niejednoznaczny interpretowane, nie dając miarodajnych odpowiedzi, co do rzeczywistej izolacyjności przegród budowlanych.
Ogólnie można stwierdzić, że zasada diagnozowania izolacyjności przegród budowlanych polega na:

- określeniu rzeczywistego rozkładu temperatury na badanej powierzchni przegrody;
- ustaleniu czy rozkład temperatury jest prawidłowy, czy też identyfikuje anomalie termiczne geometryczne w postaci naroży płaskich i przestrzennych lub anomalie związane z konstrukcją przegród w postaci łączników metalowych lub

żelbetowych, zawilgoceniem wewnętrznej lub zewnętrznych fragmentów powierzchni przegrody związanych z normalną eksploatacją pomieszczeń.

Anomalie termiczne trudne do interpretacji na podstawie analizy geometrycznej, analizy konstrukcji przegrody lub innych czynników mogących wpłynąć na wynik pomiaru, należy traktować, jako odchylenie od wymogów projektowych – defekty.

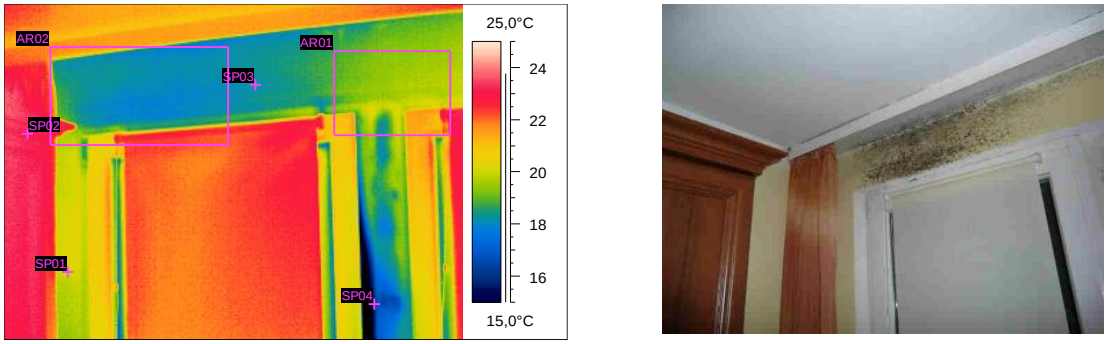
Duża ilość czynników wywołujących zakłócenia podczas prowadzenia badań powoduje, iż interpretacja przy niezachowaniu wszystkich warunków ich przeprowadzania oraz prowadzenia pomiarów dodatkowych jest znacznie utrudniona i może prowadzić do znacznego zniekształcenia rzeczywistych stanów izolacyjności analizowanych przegród [19, 20].

Badania od strony wewnętrznej są bardziej miarodajne, jednak ze względu na uciążliwości spowodowane prowadzeniem ich w eksploatowanych pomieszczeniach, mają z reguły charakter ograniczony [21]. Badania przeprowadzane od zewnątrz należy traktować wyłącznie, jako rozpoznawcze przydatne w dalszych etapach diagnostyki termoizolacyjnej przegród zewnętrznych.

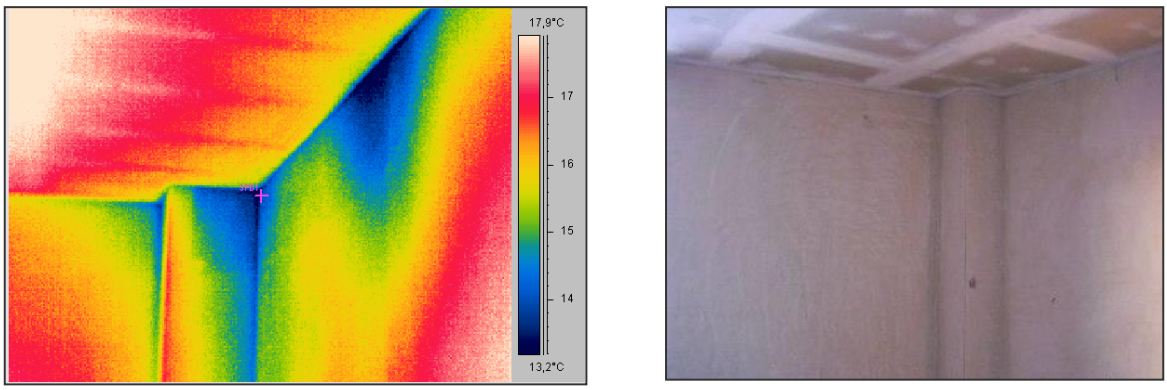
Identyfikacja wad izolacyjności termicznej w budownictwie

Bezpośrednio za pomocą jedynie termografii, bez urządzeń pomocniczych, nie można jednoznacznie określić jakości izolacji obudowy, oporu cieplnego przegrody czy też współczynnika przenikania ciepła budynku U i związanej z tym izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych.

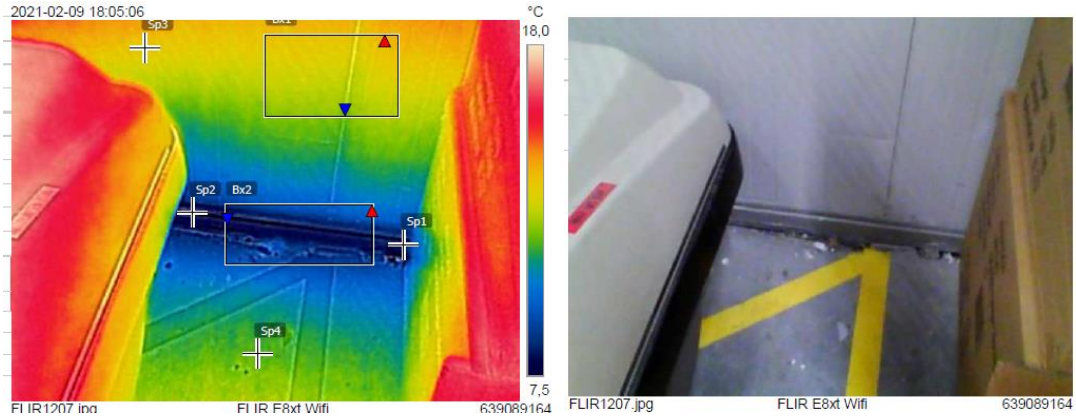
Na podstawie termogramów przy dużej wprawie w ich interpretacji można określić: wielkość i rodzaj mostków cieplnych oraz lokalne zawilgocenia przegród, lub występowanie łączne obu tych defektów. Przykładowe wady w postaci mostków cieplnych liniowych i punktowych, oraz lokalnego zwilgocenia ściany pokazano na rys. 8.15–8.19.



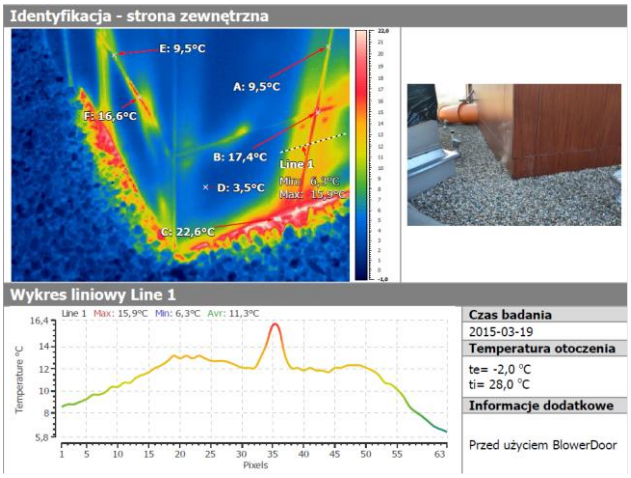
Rys. 8.15. Liniowy mostek cieplny – nieocieplone nadproże. Widoczny rozwój pleśni
Fig. 8.15. Linear thermal bridge – non-insulated lintel. Visible mold growth



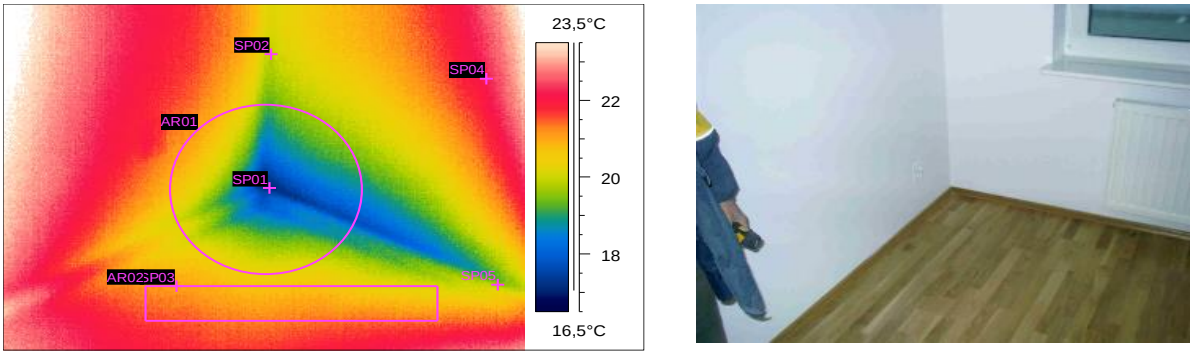
Rys. 8.16. Liniowe mostki cieplne wzdłuż naroża i połączenia ściany ze stropem, zawilgocenie lokalne górnej części ściany (przy stropie). Termogram wykonany od strony wewnętrznej
Fig. 8.16. Linear thermal bridges along the corner and wall-to-ceiling connection, local moisture in the upper part of the wall (at the ceiling). Thermogram made from the inside



Rys. 8.17. Nieszczelności przy połączeniu ściany zewnętrznej z podłogą
Fig. 8.17. Leaks at the connection between the outer wall and the floor



Rys. 8.18. Identyfikacja nieszczelności powietrznej obudowy. Kombinowana metoda pomiaru z użyciem urządzenia typu Blower Door – nadciśnienie wewnątrz pomieszczenia – termogram zewnętrzny
Fig. 8.18. Casing air leakage identification. Combined measurement method using a Blower Door device – overpressure inside the room – external thermogram



Rys. 8.19. Mostek przestrzenny – naroże dolne wypukłe w pomieszczeniu. Termogram wykonany od wewnątrz
Fig. 8.19. Spatial bridge – convex bottom corner in the room. Thermogram made from the inside

Uwagi do analizy badań termowizyjnych

Wykonując analizę badań termowizyjnych wykonanych w warunkach zimowych od strony zewnętrznej, oraz obliczenia pomocnicze dla budynków ogrzewanych należy kierować się następującymi ogólnymi zasadami:

- temperatura powierzchni przegrody płaskiej jest zawsze wyższa niż temperatura otaczającego powietrza;
- w połączeniach elementów prostopadłych występują zawsze anomalie termiczne, które niekoniecznie muszą być liniowymi mostkami cieplnymi;
- temperatury powierzchni zewnętrznej uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych w modelu na ogół nie będą dokładnie takie same jak uzyskane w wyniku badań wykonanych przy użyciu termowizji. Występujące różnice temperatur związane są z różnymi uwarunkowaniami oddziaływania środowiska, oraz niepewnością danych materiałowych badanej przegrody szerzej omawianymi w literaturze [18, 22];
- przyjmując dane materiałowe do obliczeń i porównań z termogramem, należy uwzględnić dane pochodzące z okresu wykonywania projektu budowlanego;
- przy obróbce komputerowej konieczne jest uwzględnienie danych pochodzących z pomiarów własnych w tym z pomiaru: temperatury powietrza, wilgotności, oraz odległości od płaszczyzny ściany;
- przy pomiarach wykonywanych w porze nocnej, dokumentację fotograficzną wykonuje się z tych samych miejsc, z których wykonywane były termogramy;
- w porze dziennej ocenia się współczynnik emisyjności badanych powierzchni.

8.6. Analiza zużycia energii, kosztów cyklu życia oraz wpływów środowiskowych w budynkach mieszkalnych w Polsce

Jednym z punktów polityki klimatyczno-energetycznej UE jest ograniczenie gazów cieplarnianych dla Polski o min. 7% [23]. W gospodarstwach domowych wykorzystuje się energię, która jest głównym czynnikiem emisji CO_2. Wykazanie odpowiedniego efektu ekologicznego jest obecnie kluczowym celem. Zmniejszenie zużycia energii ma korzystny wpływ na ograniczenie kosztów eksploatacji budynku jak i na środowisko zewnętrzne. Istotny jest wybór materiałów budowlanych. Powinny być stosowane te, które we wszystkich fazach życia mają najmniejszy wpływ na środowisko. Tak więc przed inżynierami stawiane są nowe cele, które powinny być uwzględniane w procesie projektowania. Do tej pory uwaga inwestorów i projektantów skupiała się na działaniach zmniejszających zapotrzebowanie na ciepło budynku, co było uzasadnione w naszej strefie klimatycznej. W dobie ocieplającego się klimatu w rocznym bilansie cieplnym zaczyna przeważać zapotrzebowanie na chłód. Mocno zaizolowane budynki mają ograniczoną możliwość wymiany ciepła do otoczenia, co w lecie może znacznie pogorszyć komfort cieplny. Budynek staje się swego rodzaju „termosem" i bez dodatkowego systemu chłodzenia nie jest możliwe usunięcie zbędnych wewnętrznych zysków ciepła.

Cel i metodyka badań

Celem badań jest środowiskowa i energetyczna ocena cyklu życia budynków. Z jednej strony pojawia się pytanie czy warto zainwestować na etapie inwestycji w budynek o lepszym standardzie energetycznym, co wpłynie korzystnie zarówno na koszty życia budynku oraz na potencjał globalnego ocieplenia? Z drugiej strony pojawia się wątpliwość czy działania zmierzające do zmniejszenia kosztów cyklu życia nie pogorszą komfortu cieplnego użytkowników budynku, co bezpośrednio przekłada się na zdrowie w dłuższej perspektywie.

Badania opierają się na pomiarach warunków cieplnych w budynkach oraz na obliczeniach numerycznych z zastosowaniem symulacji wydajności budynku (BPS, ang. *Building Performance Simulation*) w warunkach dynamicznych z małym krokiem czasowym (np. 15 minut), z uwzględnieniem użytkowania budynku i chwilowej zmienności strumienia powietrza infiltrującego do pomieszczeń. Obliczenia wpływów środowiskowych są przeprowadzane z użyciem dedykowanych programów komputerowych na podstawie dostępnych deklaracji środowiskowych produktów.

Część zrealizowanych dotąd prac zostało wykonanych przy współudziale studentów w ramach prac PBL (*Project Based Learning*).

Przykładowe wyniki badań

Jako przykład zaprezentowano wyniki badań przeprowadzone dla domu jednorodzinnego o powierzchni 154 m^2 (rys. 8.20) zaprojektowanego w dwóch wariantach konstrukcyjnych. Pierwszy wariant (B) to technologia murowana, gdzie żelbetowy strop oparto na ścianach nośnych z pustaków Porotherm. Drugi (W), to konstrukcja drewniana (dom kanadyjski), w której strop składa się z drewnianych belek. Są to najczęściej spotykane metody wznoszenia budynków jednorodzinnych w Polsce. Rozpatrzono 2 przypadki izolacyjności przegród zewnętrznych (tab. 8.2):

- B/W_{2021}: budynek spełniający wymagania Warunków Technicznych 2021 [11],
- B/W_{PASS}: budynek spełniający wymagania dla budynków pasywnych [24].

Rys. 8.20. Widok domu jednorodzinnego od strony południowo-zachodniej
Fig. 8.20. View of a single-family house from the south-west

Tabela 8.2
Zestawienie współczynników przenikania ciepła dla poszczególnych wariantów konstrukcji

Rodzaj przegrody budowlanej	Współczynnik przenikania ciepła U, W/m^2K			
	B_{2021}	B_{PASS}	W_{2021}	W_{PASS}
Ściana zewnętrzna	0,20	0,10	0,20	0,10
Podłoga na gruncie	0,29	0,11	0,29	0,11
Stropodach	0,15	0,11	0,15	0,11
Okno	0,85	0,90*	0,85	0,90*

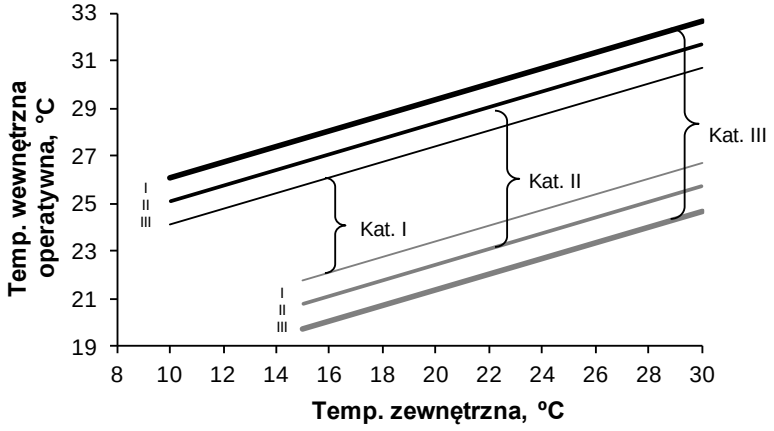
* okno o wyższym współczynniku przepuszczalności energii słonecznej

Obliczenia cieplne zostały przeprowadzone w programie EnergyPlus [25]. Jest to obecnie najczęściej stosowany w pracach naukowych i ciągle rozwijany, program do

przeprowadzania analiz energetycznych budynku. Obliczenia wpływu środowiskowego (emisja gazów cieplarnianych) zostały wykonane programem One Click LCA [26].

Harmonogramy bytowania ludzi zostały określone na podstawie zwyczajów polskiego społeczeństwa. Oświetlenie elektryczne oraz żaluzje wewnętrzne były uruchamiane w zależności od promieniowania słonecznego. W modelu przewidziano rośliny pnące (zrzucające liście na zimę), nad oknami w salonie na szerokości całego budynku. Przyjęto model wentylacji naturalnej o zmiennym strumieniu powietrza wentylacyjnego w zależności od prędkości wiatru uwzględniający wpływ otwierania okien przez mieszkańców. Model cieplny oraz model wentylacji zostały dokładnie opisane we wcześniejszych publikacjach [27, 28]. Temperatura obliczeniowa w sezonie grzewczym była utrzymywana na poziomie 8–24°C w zależności od pomieszczenia; z tym, że w tych przeznaczonych na stały pobyt ludzi utrzymywano 21°C (w godz. 24:00–6:00 temperatura 21°C i 24°C była obniżana do 18°C); w lecie temperatura nie była regulowana. Obliczenia przeprowadzono dla standardowych danych klimatycznych dla Warszawy [29].

Ważnym elementem analizy była kwestia minimalizacji energii wymaganej na ogrzanie projektowanego domu, przy jednoczesnym zachowaniu komfortu cieplnego w ciągu roku. W niniejszych badaniach przyjęto adaptacyjny model komfortu cieplnego [30], w którym ocena środowiska cieplnego polega na wskazywaniu zakresu właściwych wartości wewnętrznej temperatury operatywnej, która ujmuje łączne oddziaływanie na człowieka temperatury powietrza oraz średniej temperatury promieniowania otoczenia. Na podstawie temperatury można określić kategorie środowiska cieplnego (rys. 8.21).



Rys. 8.21. Klasyfikacja środowiska cieplnego w budynkach z wentylacją naturalną [30]
Fig. 8.21. Classification of thermal environment in buildings with natural ventilation [30]

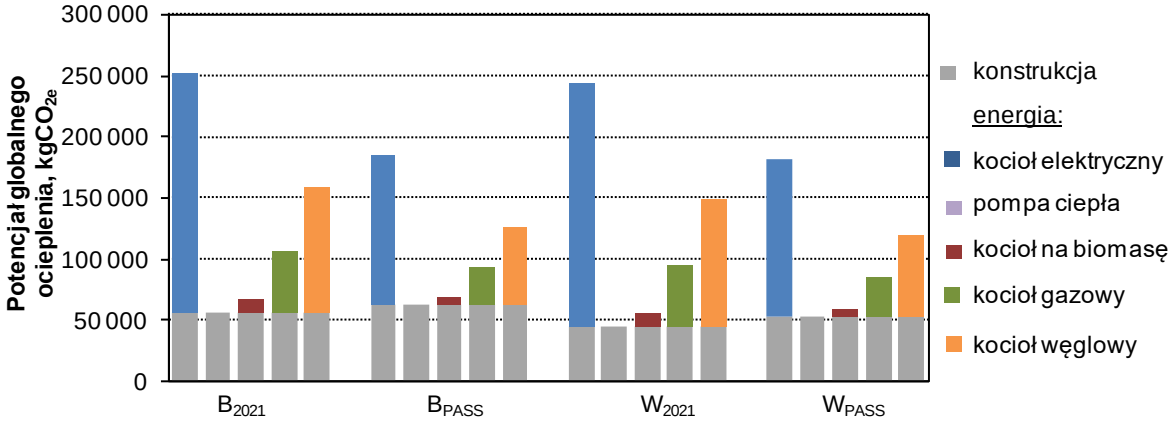
W każdym wariancie obliczeniowym określono liczbę godzin dyskomfortu, jako sumę liczby godzin dyskomfortu z wszystkich pomieszczeń przeznaczonych na stały pobyt (dla kategorii II środowiska cieplnego). Pod uwagę brano jedynie czas, w którym mieszkańcy przebywają w danych pomieszczeniach. Z obliczeń wyłączono godziny nocne w okresie grzewczym, w których założono obniżenie temperatury wewnętrznej.

Sporządzona kalkulacja kosztów obejmowała wzniesienie budynku do stanu surowego zamkniętego, z uwzględnieniem kosztów ścian działowych oraz tynków wewnętrznych i zewnętrznych. Do analiz wybrano 5 źródeł ciepła: kocioł elektryczny, tradycyjny kocioł węglowy (na ekogroszek), pompę ciepła (powietrze-woda) wraz z współpracującymi z nią ogniwami fotowoltaicznymi, kocioł na biomasę (pellet), kocioł gazowy kondensacyjny. Założono jedynie zmianę źródła ciepła bez zmiany pozostałych elementów wchodzących w skład instalacji wewnętrznej. Przyjęto ceny rynkowe paliwa, z którego wytwarzano energię. Obliczenia przeprowadzono dla okresu eksploatacji 25 lat. W badaniach założono nominalną stopę procentową równą 3,9%, stopę inflacji 2,5% na podstawie celu inflacyjnego NBP na 2020 r. oraz wzrost cen energii wynoszący 2%.

Analizy pokazały (rys. 8.22), że im budynek spełnia bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące izolacyjności przegród, tym większa jest ilość CO_{2e} (ekwiwalent CO_2) części konstrukcyjnej budynku. Wyprodukowanie i zamontowanie grubszej izolacji w obiekcie, związane jest z większą ilością emitowanego CO_{2e}. Większa emisja CO_{2e} występuje w przypadku domu murowanego, w porównaniu z domem drewnianym. Jednak nie jest to „spektakularna" różnica jakiej można byłoby oczekiwać, ponieważ za największą ilość emitowanego CO_{2e} odpowiadają fundamenty (37%), które były jednakowe we wszystkich wariantach budynku. Zastosowanie dodatkowej izolacji generuje natomiast korzyści w okresie eksploatacji. Emisja CO_{2e} związana z ogrzewaniem maleje wraz ze wzrostem wymogów dotyczących izolacyjności przegród budowlanych. Emisja CO_{2e} powstała w okresie eksploatacji systemu ogrzewania ma znaczący wpływ na całkowitą emisję. W przypadku zastosowania kotła na biomasę emisja CO_{2e} związana z ogrzewaniem średnio stanowi tylko 10% całkowitej emisji. Natomiast w przypadku kotła elektrycznego emisja zanieczyszczeń związana z ogrzewaniem w ciągu 25 lat stanowi aż 75% całkowitej emisji.

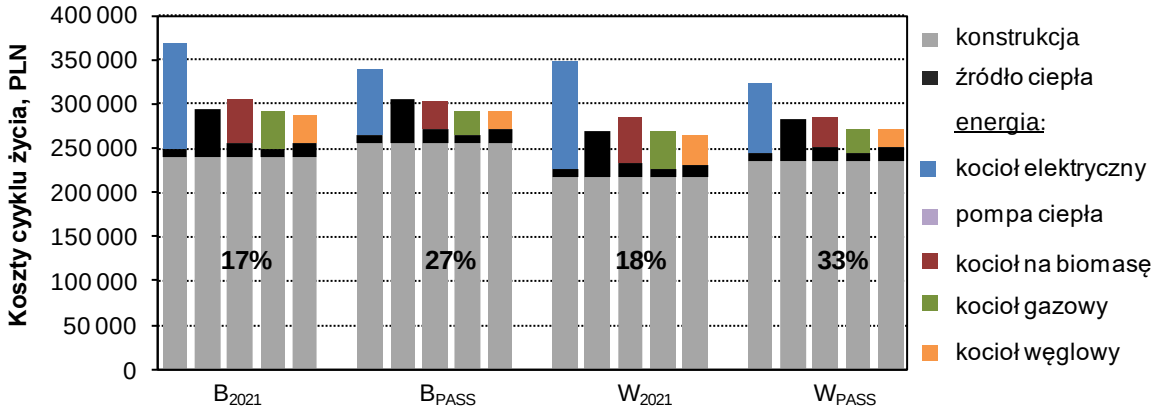
Porównując koszty cyklu życia domów (rys. 8.23), w których zastosowano kocioł elektryczny do tych z innymi źródłami ciepła można stwierdzić, że rozwiązanie z kotłem elektrycznym jest najdroższe. W każdym przypadku sumaryczne koszty przy

wykorzystaniu kotła elektrycznego, dla obu technologii nie są wyższe od 300 tys. zł. Jest to związane z ceną energii elektrycznej za 1 kWh, która utrzymuje się na wysokim poziomie w stosunku do ceny energii pochodzącej z innych źródeł. Porównując kocioł na biomasę oraz pompę ciepła wykazano, że pompy stanowią najdroższe rozwiązanie inwestycyjne, jednak całościowo (tzn. uwzględniając koszty związane z budową oraz eksploatacją) nie powodują znacznego zawyżenia kosztów i są lepiej opłacalne.



Rys. 8.22. Emisja CO_{2e} związana z konstrukcją budynku oraz ze zużyciem energii na ogrzewanie w 25-letnim okresie eksploatacji

Fig. 8.22. The CO_{2e} emissions related to the building structure and energy consumption for heating over a 25-year lifespan



Rys. 8.23. Koszty cyklu życia budynku w zależności od typu kotła i budynku. Zaznaczono procentowy udział czasu dyskomfortu cieplnego w okresie letnim (czerwiec-sierpień) w stosunku do wszystkich godzin obecności ludzi w pomieszczeniach

Fig. 8.23. Building life cycle costs depending on the type of boiler and building. The percentage share of the time of thermal discomfort in the summer period (June-August) in relation to all occupied hours in the rooms was marked

Budynki w technologii pasywnej mają zauważalnie mniejsze zapotrzebowanie na ciepło (ok. 35%), ale warunki komfortu cieplnego są w nich zdecydowanie gorsze (w przypadku budynków drewnianych prawie 2-krotnie większa liczba godzin dyskomfortu cieplnego). Izolując bardzo dobrze dom trzeba mieć świadomość tego, że

bez klimatyzacji będzie trudno utrzymać komfortową temperaturę. Porównując dane dla dwóch różnych technologii wykonania domu jednorodzinnego można zauważyć, że w domu drewnianym, w porównaniu do murowanego, w pomieszczeniach występują zdecydowanie wyższe temperatury maksymalne, w zależności od pomieszczenia o 2,5–4,0°C. Taki stan rzeczy ma miejsce ze względu na to, że konstrukcja drewniana jest lżejsza (ma mniejszą pojemność cieplną), w porównaniu do konstrukcji murowanej, a tym samym budynek ten będzie szybciej reagował na zmiany temperatury zewnętrznej.

Podsumowując, najkorzystniejszym rozwiązaniem ekonomicznym jest dom w technologii drewnianej z tradycyjnym kotłem węglowym (najniższe sumaryczne koszty inwestycyjne i eksploatacyjne), jednak w budynku drewnianym występuje większa liczba godzin dyskomfortu cieplnego. Również polepszenie parametrów izolacyjnych domu zwiększa liczbę godzin dyskomfortu cieplnego, a ocieplający się klimat będzie dodatkowo działał niekorzystnie.

Przyszłe badania

W badaniach przyjęto wiele założeń, których dokładne określenie w długoletnim okresie eksploatacji budynku jest utrudnione ze względu np. na zmieniającą się sytuację na rynku cen energii, zmiany klimatyczne, czas przebywania mieszkańców w budynku, ich zachowanie oraz sposób użytkowania. Pomimo tego w efekcie badań opracowano pewne uniwersalne wskazówki i zalecenia dla inwestorów i projektantów domów energooszczędnych i przyjaznych środowisku, które zostały opublikowane w artykułach naukowych [27, 28]. Zrealizowane w pracy badania przeprowadzono dla klimatu standardowego. Otrzymuje się go w wyniku wieloletnich obserwacji, a metoda jego obliczania powoduje, że ma on „spłaszczone” wartości ekstremalne temperatur. Badania realizowane w przyszłości zostaną przeprowadzone dla klimatu rzeczywistego oraz dla prognozowanego przyszłego klimatu.

8.7. Modelowanie pojazdów elektrycznych w celu minimalizacji zużycia energii

Zazwyczaj projektowanie pojazdów odbywa się w kilku etapach, od fazy koncepcyjnej, przez projekt wstępny do projektu technicznego i drogą kolejnych przybliżeń identyfikowane są cechy konstrukcyjne pojazdu. W porównaniu

z samochodami z silnikami spalinowymi, samochody elektryczne mają stosunkowo prosty układ napędowy, jednak w celu osiągnięcia znacznego zmniejszenia zużycia energii w systemie napędowym samochodu elektrycznego, integrowane są dodatkowe systemy takie jak system odzyskiwania energii, dodatkowe podsystemy mechatroniczne, zaawansowane systemy sterowania, co powoduje ciągły wzrost złożoności obecnie używanych elektrycznych układów napędowych. Złożoność środków technicznych wpływa na złożoność modelu matematycznego pojazdu. Wśród modeli opisujących dynamikę pojazdów, które są stosowane w analizie i optymalizacji zużycia energii [31–33], zazwyczaj obserwuje się dwa podejścia ze względu na rodzaj stosowanego modelu i rozróżnia się następujące modele:

- Analityczne – w tych modelach odpowiedź modelu na sygnał jest rejestrowana jako równanie ruchu;
- Modele, w których model jest oparty na danych eksperymentalnych.

Utworzony model symulacyjny pojazdu może być kombinacją dwóch typów modeli. Uwzględniając kierunek przetwarzania informacji w modelu, rozróżnia się następujące modele [34]:

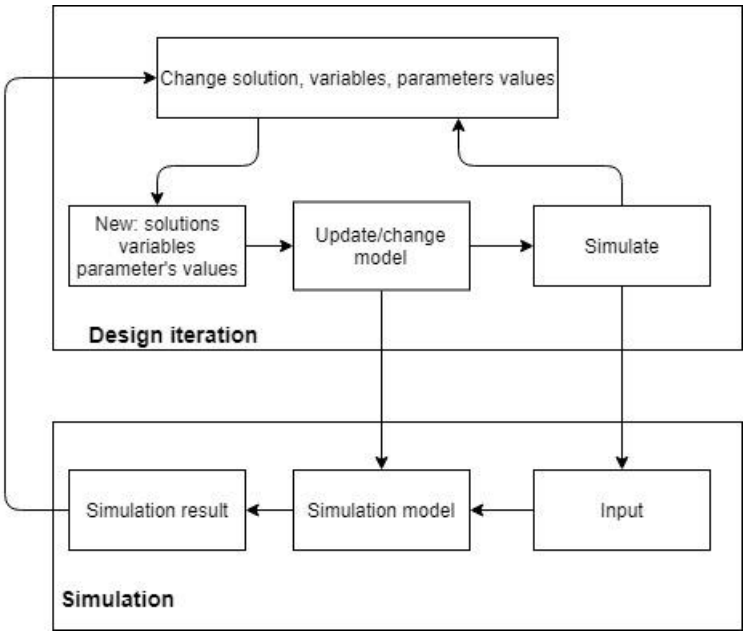
- Proste – gdzie obliczenia wykonane przez model zaczynają się od silnika, energia jest przekazywana do kół pojazdu;
- Odwrotne – w którym odwzorowane jest zachowanie samego pojazdu; na przykład prędkość i na tej podstawie określa się wymagany moment obrotowy i prędkość obrotową wału silnika.

Wybór typu modelu zależy głównie od potrzeby, dla której model ma być używany. Do modelowania dynamiki pojazdów elektrycznych stosuje się wiele programów komputerowych, wśród nich na uwagę zasługuje platforma ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) [35, 36] napisany jako program w pakiecie MATLAB-Simulink. Program w swoich bibliotekach daje możliwość analizy wielu rozwiązań systemu zasilania, układu napędowego lub nadwozia pojazdu. Kolejną platformą działającą w środowisku MATLAB-Simulink jest PSAT (The Powertrain System Analysis Toolkit), który symuluje wiele wstępnie zdefiniowanych rozwiązań dla pojazdów konwencjonalnych, elektrycznych i innych [37]. Ewolucją PSAT jest środowisko Autonomy [38] dostępne na LMS Imagine.Lab. Innym przykładem aplikacji własnej jest zaproponowana w pracy [39] metodyka i oprogramowanie modelowania pojazdu. Oprócz tych środowisk symulacyjnych, w których modele są abstrakcyjne i które uwzględniają mechatroniczny charakter układu napędowego pojazdu elektrycznego, istnieje wiele specjalistycznych programów analizy dynamicznej wykorzystujących wieloobiektowy formalizm, takich jak

oprogramowanie LS-Dyna, Adams lub MotionSolve. Ważnym ograniczeniem przytaczanym przez autorów jest czas obliczeń symulacyjnych. Aby skrócić czas obliczeniowy, model powinien być napisany w języku niskiego poziomu, np. C, ponieważ [40] czas symulacji można skrócić nawet 20 razy w porównaniu z programem napisanym w języku MATLAB [41].

Metoda

Proponowana metoda projektowania układów napędowych wykorzystuje podejście oparte na modelu [42]. Projekt oparty na modelu (rys. 8.24) zakłada opracowanie numerycznych modeli symulacyjnych rozwijanego systemu od najwcześniejszych etapów projektowania i rozwoju tego modelu. W projektowaniu opartym na tym modelu model systemowy znajduje się w centrum procesu rozwoju, od opracowywania wymagań, poprzez projektowanie, wdrażanie i testowanie. Na każdym etapie projektowania model jest odzwierciedleniem stanu wiedzy na temat zaprojektowanego systemu. Jest to szczególnie ważne w przypadku złożonych systemów, których działanie jest trudne do przewidzenia. Dzięki symulacjom przeprowadzonym na modelu można określić, czy rozwój systemu idzie w dobrym kierunku. Symulacja pokazuje, czy model/system działa poprawnie. Model jest również używany do określenia podstawowych cech konstrukcyjnych zaprojektowanego systemu.



Rys. 8.24. Diagram metodyki projektowania opartego na modelu
Fig. 8.24. Model-Based Design diagram

Założenia dla modelu symulacyjnego

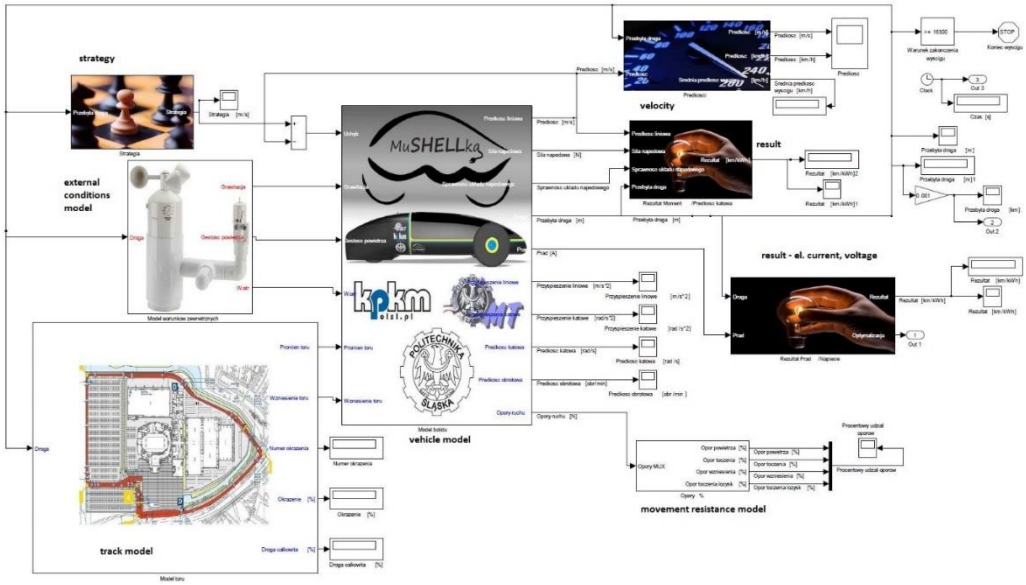
Ponieważ model symulujący jest najważniejszym elementem proponowanej metodyki, a jego budowa musi umożliwiać łatwą realizację wyżej wymienionych działań, sam model musi spełniać dodatkowe założenia, a jego ogólna struktura jest ściśle określona. Szczegóły założeń i konstrukcji modelu zostaną opisane poniżej. Do celów tworzenia modeli numerycznych wybrano uniwersalne środowisko Matlab/Simulink, ale nie ma przeciwwskazań do korzystania z innych narzędzi tego typu.

Podstawowe założenia modelu obejmowały następujące kwestie [43, 44]:

- Budowa modelu powinna rozpocząć się jak najszybciej, dając wyniki odpowiednie do poziomu wiedzy.
- Aby ułatwić proces opracowywania modelu, cały model został podzielony na oddzielne modele częściowe, które miały być opracowane przez ekspertów z tej dziedziny, modele częściowe obejmowały oddzielne zjawiska transferu energii w pojeździe.
- Początkowe jawne modele częściowe opierały się przede wszystkim na relacjach analitycznych opisujących poszczególne zjawiska [44, 45].
- Zakładany poziom szczegółów w szczególności modeli częściowych opierał się głównie na określeniu dokładnych modeli za pomocą badań liczbowych i standerycznych, np. Na tym etapie wzięto pod uwagę niejawne modele.
- Zakładany poziom szczegółów modeli numerycznych miał być przenoszony za pomocą bardziej zaawansowanych modeli analitycznych, złożonych modeli numerycznych, w tym zaawansowanych metod numerycznych lub opracowania modeli niejawnych w oparciu o wyniki badań [46]. Wyniki badań wykorzystano również do dostosowania zaawansowanych modeli analitycznych i numerycznych [47].
- Oprócz samego modelu pojazdu przyjęto szczegółowy model toru miejskiego w Rotterdamie lub inne miejsca, w których miały być przeprowadzone testy drogowe.
- Numeryczny model symulacyjny po niektórych przekształceniach powinien być odpowiedni do rozwiązywania odwrotnych zadań, czyli oznaczania i weryfikacji cech konstrukcyjnych pojazdu.

Główne moduły modelu symulacyjnego (rys. 8.25) opracowanego w środowisku MATLAB/Simulink są następujące [48]:

- Model warunków zewnętrznych opisujący warunki atmosferyczne i warunki pogodowe podczas jazdy;
- Model toru opisujący geometryczną formę toru wyścigowego;
- Model pojazdu opisujący cechy konstrukcyjne samego pojazdu;
- Model oporu ruchu opisujący zjawiska energetyczne związane ze zużyciem energii;
- Model strategiczny pozwalający na określenie założeń prowadzenia pojazdu i aktywowania odpowiednich podsystemów pojazdu;
- Parametry/wyniki ruchu, które są rodzajem interfejsu aplikacji, który pozwala łatwiej analizować wyniki symulacji.



Rys. 8.25. Ogólny model w podejściu opartym na modelu
Fig. 8.25. Framework of the main model for Model-Based Design

Przykłady zastosowania

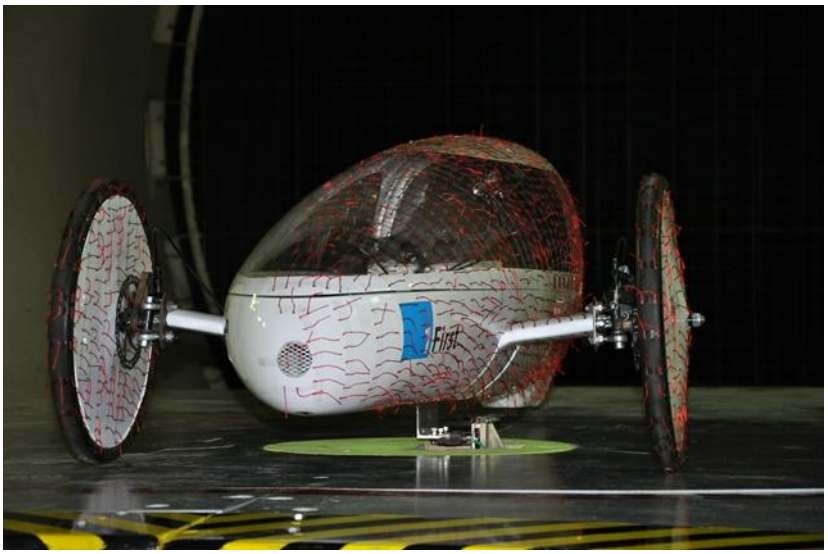
Metoda ta została zastosowana do projektowania i rozwoju trzech istniejących pojazdów do celów wyścigu Shell Eco-marathon:

- MuSHELLka – Pojazd kategorii Prototyp elektryczny baterii (rys. 8.26),
- Bytel – pojazd kategorii Urban Concept ConceptElektryczny,
- HydroGENIUS – pojazd kategorii UrbanConcept Hydrogen (rys. 8.26).

Zastosowanie symulacji od samego początku, nawet na początkowym etapie koncepcji w procesie projektowania pojazdu MuSHELLka pozwoliło na kierowanie ograniczonych zasobów projektowych do projektowania elementów mających największy wpływ na wynik i początkowe określenie cech tych komponentów.

Następnie, podczas opracowywania projektu i modelu symulacyjnego, przeprowadzono obliczenia symulacyjne, których wyniki pozwoliły określić ostateczne cechy konstrukcyjne [49]. Kolejne prace obejmowały weryfikację poszczególnych cech konstrukcyjnych przy użyciu metod MBDO i wyników testów drogowych. Metodę wykorzystano do określenia właściwości aerodynamicznych pojazdu [50]. Wyniki obliczeń zostały potwierdzone w badaniach w tunelu aerodynamicznym (rys. 8.27). Aby przyspieszyć zmiany konstrukcyjne zastosowano zaawansowane metody modelowania generatywnego [51].

Rys. 8.26. Elektryczne pojazdy wyscigowe MuSHELLka (z lewej) HydroGENUS (z prawej)
Fig. 8.26. MuSHELLka (left) and HydroGENIUS(right) electric race vehicles.

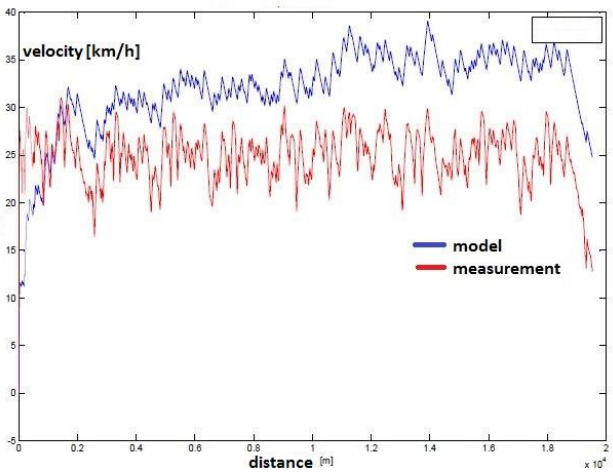


Rys. 8.27. Testy aerodynamiczne pojazdu – nitkowa wizualizacja przepływu
Fig. 8.27. Aerodynamic tests of the vehicle – thread flow visualization

Rozwój modelu symulacyjnego

Podczas wyścigu, Shell Eco-marathon 2012, zespół miał numeryczny model symulacyjny, który nie został w pełni zweryfikowany za pomocą danych pomiarowych. Na podstawie tego modelu wyścig został symulowany i opracowano

strategię wyścigu. Wykorzystanie modelu symulacyjnego na tym etapie rozwoju pomogło opracować strategię, która w porównaniu do początkowej, intuicyjnej strategii wyścigu zmniejszyła zużycie energii ponad dwukrotnie. Wykres (rys. 8.28) wykazuje znaczne podobieństwo do profilu wykresów prędkości uzyskanych podczas wyścigu oraz danych z eksperymentu symulacji numerycznej. Jednocześnie na diagramie można zaobserwować znaczące różnice, które zmusiły do poprawy modelu symulacyjnego. Zdecydowano, że podstawą do ulepszenia modelu będzie lepsza identyfikacja cech konstrukcyjnych pojazdu i dokładna weryfikacja właściwości pojazdu. Strojenie modelu symulacyjnego dokonano w oparciu o dane pomiarowe otrzymane podczas jazd testowych.



Rys. 8.28. Porównanie zmierzonej prędkości pojazdu podczas symulacji wyścigu i modelu numerycznego przed dostrojeniem modelu
Fig. 8.28. Comparison of the measured vehicle speed during a race simulation and the numerical model before the revision of the model

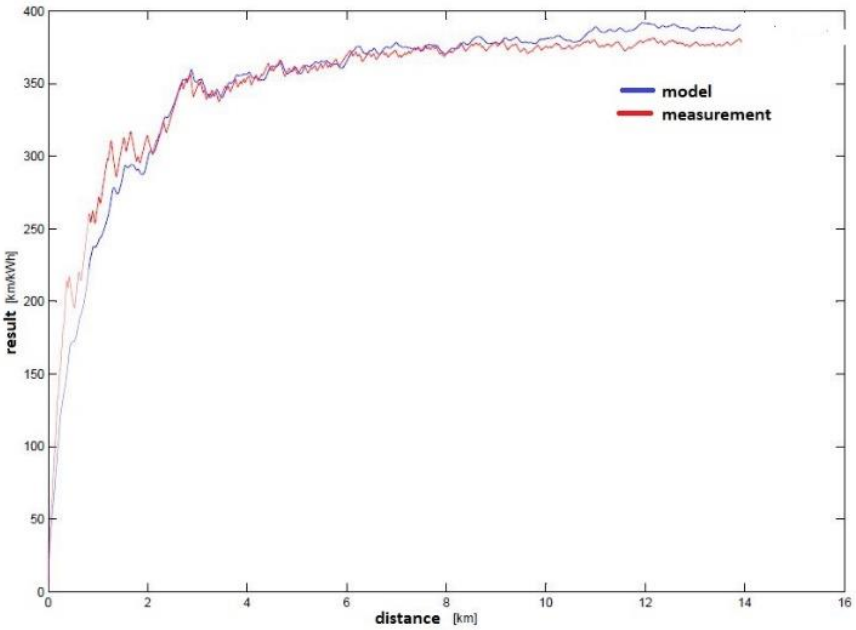
Identyfikacja parametrów systemowych polega na znalezieniu takiego zestawu parametrów pojazdu, który dla zadanego modelu pozwala najlepiej zbliżyć się do danych z eksperymentu jazd testowych. Oszacowane dane reprezentują skorygowane i wierniej odzwierciedlające parametry pojazdu. Słowo „oszacowanie" podkreśla, że powstały model jest zawsze w pewnym stopniu niedokładny i może zbliżyć się tylko do prawdziwych wartości [52, 53]. Identyfikacja została zredukowana do problemu minimalizacji funkcji adaptacji [44] opracowanej na podstawie sygnałów z modelu i pomiarów. Ostatnim krokiem identyfikacji parametrów jest weryfikacja modelu, czyli sprawdzenie, w jakim stopniu model jest podobny do rzeczywistego obiektu.

Powodzenie oszacowania zależy od dokładności wyboru struktury modelu. Ważne jest, aby zrozumieć działanie systemu i jasno ocenić zjawiska zachodzące w systemie. Konieczne jest, aby mieć zdolność do łączenia wiedzy z różnych dyscyplin. W celu

opracowania funkcji adaptacyjnej konieczne było przekształcenie modelu symulacyjnego (rys. 8.25). Dodano dane wektora wejściowego, a bieżący sygnał pochodzący z pomiarów stał się sygnałem wejściowym silnika. Sygnał prędkości z modelu został porównany z sygnałem odbieranym z prędkości modelu symulacyjnego. Na podstawie konsultacji w ramach projektu wybrano parametry identyfikacji. Wybrano parametry, dla których projektanci mają najmniejsze zaufanie lub które nie zostały zdefiniowane w ogóle. Są to głównie aerodynamiczne współczynniki oporu określone do tego na podstawie obliczeń CFD. Poziom wartości tego czynnika, według oceny ekspertów, określony przez tę metodologię, ma wysoki stopień niepewności. Dodatkowo zidentyfikowano prędkość wiatru. Jest to dodatkowy parametr, który nie został zidentyfikowany podczas jazdy i w obliczeniach zakładano zerową prędkość wiatru. Pomiar wiatru jest trudnym zadaniem, technicznie niemożliwym w wielu częściach toru. Wynika to z jego lokalizacji i obecności dużej liczby dużych budynków w obszarze toru. Okrążenie zostało podzielone na 24 odcinki o różnych warunkach wietrznych.

W celu zidentyfikowania parametrów modelu wykorzystano algorytm genetyczny.

Weryfikacja jest przeprowadzana na innym zestawie danych niż ten, który został użyty do określenia parametrów. Proces weryfikacji opiera się na danych z pierwszego wyścigu. Dane zużycia energii w jednostkach [km/kWh] po dostrojeniu modelu zaprezentowano na rys. 8.29. Wyniki jazdy testowej i eksperymentu symulacyjnego wykazywały dużą zgodność po dostrojeniu modelu.



Rys. 8.29. Porównanie wyniku wyścigu z pomiaru i z modelu numerycznego
Fig. 8.29. Comparison of the result of race from measurement and from numerical model

Wnioski

Proponowana metoda projektowania obejmująca połączenie projektu opartego na modelu i optymalizacji opartej na modelu została wykorzystana w projektowaniu trzech elektrycznych pojazdów wyścigowych, które z powodzeniem rywalizowały w Shell Eco-marathon [54], uzyskując w 2016 r. drugie miejsce w klasie UrbanConcept pojazdów ze źródłem zasilania Hydrogen Fuel Cell Stack. Ponadto przy obliczaniu właściwości aerodynamicznych zweryfikowano zastosowanie modelu odwrotnego, uzyskując lepsze wyniki niż w metodach CFD (Computational Fluid Dynamics) [50].

Metoda projektowania opracowana i zmodyfikowana podczas wieloletnich prac badawczych zespołu projektowego, charakteryzuje się wyjątkowością korzystania z modelu symulacyjnego pojazdu od bardzo wczesnych etapów opracowywania koncepcji do testów operacyjnych, znaczącej orientacji optymalizacji do bezwzględnego zmniejszenia zużycia energii w poruszającym się pojeździe, specyficzna modułowa forma modelu obejmuje nie tylko pojazd, ale także tor jazdy i inne aspekty zewnętrzne, które mają wpływ na redukcję zużycia energii. Możliwość łatwego przekonwertowania modelu na formularz, który pozwala rozwiązać zadanie odwrotne, jest szczególnie przydatna w weryfikowaniu złożonych funkcji projektowych. Zastosowanie tej metody pozwoliło znacznie zwiększyć wiedzę zespołu programistów na temat zaprojektowanego pojazdu oraz jakościowego i ilościowego wpływu cech konstrukcyjnych na zużycie energii podczas prowadzenia pojazdu.

Obecne prace koncentrują się na ulepszeniu szczegółowego modelu źródeł zasilania, a przede wszystkim złożonego źródła zasilania, którym jest Hydrogen Cell Stack zintegrowanym z superkondensatorami. Przy takich źródłach zasilania o złożonych właściwościach, zastosowanie metod MBDO pozwala na znaczne zmniejszenie zużycia energii podczas prowadzenia pojazdu.

Bibliografia

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 3 czerwca 2014 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2014, poz. 888, ze zm.).
2. PN-EN ISO 10211:2008 Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.

3. PN-EN ISO 6946: 2017-10 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
4. Dobrowolska E., Jankowska A., Laskowska A.: Wytrzymałość i wybrane właściwości fizyczne drewna poddanego różnym metodom sztucznego starzenia, [w:] Ochrona budynków przed wilgocią, korozją biologiczną i ogniem. Monografia nr 13, Wrocław 2017.
5. Kozakiewicz P., Matejak M.: Klimat a drewno zabytkowe. Dawna i współczesna wiedza o drewnie. Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2013.
6. Szymanowska-Gwiżdż A., Steidl T.: Rozkłady temperatur w ścianach z muru pruskiego – badania teoretyczne i in situ. XV Konferencja naukowo-techniczna, Fizyka budowli w teorii i praktyce, Łódź, Słok, 9–11 czerwca 2015.
7. Kuzman R.: Tablice cieplne z wykresami. Dane liczbowe w układzie technicznym i międzynarodowym. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1966.
8. Häuptl P.: BAUPHYSIK: Klima Wärme Feuchte Schall. Berlin, Ernst&Sohn 2008.
9. PN-EN 12524:2003 Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno--wilgotnościowe.
10. DIN 4108 Warmeschutz im Hochbau Beuth-Verlag, Berlin. Teil 4 Warme und feuchteschutztechnische Kennwerte (V 1998).
11. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (tekst jednolity Dz.U. 2019, poz. 1065).
12. Szymanowska-Gwiżdż A., Steidl T.: Impact of building walls of historic objects from half-timbered wall in their state of thermal protection. Civil and Environmental Engineering Reports, 20 (1), 2016, p. 171–178.
13. Nowak H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
14. PN-EN 13187:2001 Właściwości cieplne budynków. Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku. Metoda podczerwieni.
15. COBR PB CEBET: Wytyczne jakościowej oceny przegród zewnętrznych budynków pod względem izolacyjności cieplnej metodą termowizyjną. Warszawa 1990.
16. DS/INSTA 110-1986: Thermal insulation – Thermography of buildings.
17. ISO 6781 Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularieties inbuilding envelopes – Infrared method.
18. Krause H., Czyszek M., Steidl T.: Termografia w budownictwie mieszkaniowym. WARSTWY 3(8), 1997.
19. Minkina W.A., Rutkowski P., Wild W.: Podstawy pomiarów termowizyjnych. Pomiary, Automatyka Kontrola, 46(1), 2000, s. 7–14.
20. Madura H. (red.): Pomiary termowizyjne w praktyce. Agenda Wydawnicza PAK-u, Warszawa 2004.
21. Minkina W.A.: Pomiary termowizyjne – Przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
22. Griffith B., Turler D., Goudey H.: Infrared Thermographic Systems. Lawrence Berkeley Nat. Lab., Berkeley CA, 2001, www.btech.lbl.gov/papers/46590.
23. COP24. Cele i zobowiązania Polski, UE i świata na 2030 r. Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, 2019.
24. Państwowy Instytut Budownictwa Pasywnego. Dostęp online: http://www.pibp.pl/
25. EnergyPlus™ Version 8.7 Documentation, Engineering Reference, U.S. Department of Energy, 2016, [online] https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/ pdfs/pdfs_v8.7.0/ EngineeringReference.pdf

26. One Click LCA (2015). Bionova Ltd.: Helsinki, Finland. Dostęp online: https://www.oneclicklca.com/
27. Grygierek K., Ferdyn-Grygierek J., Gumińska A., Baran Ł., Barwa M., Czerw K., Gowik P., Makselan K., Potyka K., Psikuta A.: Energy and environmental analysis of single-family houses located in Poland. Energies 13, 2020, 2740.
28. Ferdyn-Grygierek J., Grygierek K., Gumińska A., Baran Ł., Barwa M., Czerw K., Gowik P., Makselan K., Potyka K., Psikuta A.: Analysis of heat demand and thermal comfort in naturally ventilated single-family houses of various constructions. Architecture Civil Engineering Environment, 3, 2020, p. 63–71.
29. EnergyPlus pliki klimatyczne. Dostęp online: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/POL//POL_Warszawa.Okecie.123750_IMGW
30. ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA [USA] 2017.
31. Skarka W.: The Metod of Optimization of Energy Efficient Electric Vehicle, [w:] Proceedings of the 6th International Conference on Integrity-Reliability-Failure. IRF2018, Lisbon/Portugal, 22–26 July 2018. Eds.: J. F. Silva Gomes, Shaker A. Meguid. [Porto]: FEUP-INEGI, 2018, p. 415–422,
32. Tyczka M., Skarka W.: Optimisation of operational parameters based on simulation numerical model of hydrogen fuel cell stack used for electric car drive. In: Transdisciplinary engineering: crossing boundaries. Proceedings of the 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering, October 3–7, 2016. Eds. by Milton Borsato, Nel Wognum, Margherita Peruzzini, Josip Stjepandić, Wim J.C. Verhagen. Amsterdam: Advances in Transdisciplinary Engineering; vol. 4 2352–751X IOS Press, 2016, p. 622–631.
33. Targosz M., Szumowski M., Skarka W., et al.: Velocity Planning of an Electric Vehicle Using an Evolutionary Algorithm, 13th International Conference on Transport Systems Telematics (TST) Katowice, Poland 23–26.10.2013 in Ed. by: Mikulski J.: ACTIVITIES OF TRANSPORT TELEMATICS Book Series: Communications in Computer and Information Science Volume, 395, 2013, p. 171–177
34. Gao D.W., Emadi C. Mi, A. Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE, 95(4), 2007, p. 729–745.
35. Markel T., Brooker A., Hendricks T., Johnson V., Kelly K., Kramer B., O'Keefe M., Sprik S., Wipke K.: Advisor: A systems analysis tool for advanced vehicle modeling. Journal of Power Sources, 110, 2002, p. 255–266.
36. Wipke K.B., Cuddy M.R., Burch S.D. Advisor 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 48, 1999, p. 1751–1761.
37. Strona www: Argonne National Laboratory Develops Powertrain System Analysis Toolkit https://www.mathworks.com/company/user_stories/argonne-national-laboratory-develops-powertrain-system-analysis-toolkit.html [dostęp: 30.04.2021].
38. Strona www: Autonomie www.autonomie.net, [dostęp: 30.04.2021].
39. Targosz M., Skarka W., Przystałka P.: Model-Based Optimization of Velocity Strategy for Lightweight Electric Racing Cars. Journal of Advanced Transportation Volume, 2018, Article ID 3614025, 20 pages https://doi.org/10.1155/2018/3614025.
40. Vaillant M., Eckert M., Gauterin F.: Energy management strategy to be used in design space exploration for electric powertrain optimization. Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014.
41. Krykowski K., Hetmańczyk J., Gałuszkiewicz Z., Miksiewicz R.: Computer analysis of high-speed PM BLDC motor properties. COMPEL, 30(3), 2011, p. 941–956.

42. Skoberla R., Skarka W.: Towards simulation based design. In: International Conference Methods & Tools for CAE – concepts and applications, Bielsko-Biała, October 18-20.2017. Proceedings. Warsaw University of Technology. Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering. Institute of Machine Design Fundamentals. 2017, p. 149–155.
43. Cholewa A., Skarka W., Sternal K., Targosz. M.: Electric Vehicle for the Students' Shell Eco-Marathon Competition. Design of the Car and Telemetry System, Telematics in the Transport Environment, 12th International Conference on Transport Systems Telematics, TST 2012, Katowice-Ustroń, Poland, October 10–13, 2012, Communications in Computer and Information Science, Jerzy Mikulski (ed.), Springer, Berlin – Heidelberg, 2012, p. 26–33.
44. Przystałka P., Skarka W., Szumowski M., Targosz M.: Velocity Planning of an Electric Vehicle Using an Evolutionary Algorithm, Activities of Transport Telematics, 13th International Conference on Transport Systems Telematics, TST 2013, Katowice-Ustroń, Poland, October 23–26, 2013, Communications in Computer and Information Science, Jerzy Mikulski (ed.), Springer, Berlin – Heidelberg, 2013, p. 171–177.
45. Arczyński S.: Mechanics of the moving car. WNT, Warsaw 1993.
46. Targosz M.: Test bench for efficiency evaluation of belt and chain transmissions. XII International Technical System Degradation Conferences, 03–06.04.2013, Liptowski Mikulas [Slovakia].
47. Keulen T. van, Jager B. de, Foster D., Steinbuch M.: Velocity trajectory optimization in Hybrid Electric trucks, In proceeding of: American Control Conference (ACC), 2010.
48. Skarka W.: Reducing the Energy Consumption of Electric Vehicles., 22nd Inc International Conference on Concurrent Engineering, Delft, Netherland 20–23.07.2015, [in:] TRANSDISCIPLINARY LIFECYCLE ANALYSIS OF SYSTEMS Book Series: Advances in Transdisciplinary Engineering, Volume: 2, Delft: 2015, p. 500–509.
49. Wąsik M., Skarka W.: Aerodynamic Features Optimization of Front Wheels Surroundings for Energy Efficient Car, Transdisciplinary Engineering: Crossing Boundaries Proceedings of the 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering October 3–7, 2016. Nel Wognum, Milton Borsato, Margherita Peruzzini, Josip Stjepandić and Wim J.C. Verhagen. Amsterdam: IOS Press, 2016.
50. Skarka W.: Application of numerical inverse model to determine the characteristics of electric race car. In: Tools and methods of competitive engineering. TMCE 2014 Symposium, Budapest, Hungary , May 19–23, 2014. Ed. by I. Horvath, Z. Rusak. 2014, p. 263–274.
51. Jałowiecki A., Skarka W.: Generative modelling in ultra-efficient vehicle design Transdisciplinary engineering: crossing boundaries. Proceedings of the 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering, October 3–7, 2016. Eds. by Milton Borsato, Nel Wognum, Margherita Peruzzini, Josip Stjepandić, Wim J.C. Verhagen. Amsterdam: IOS Press, 2016, p. 999–1008.
52. Deb, K.: Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Wiley, 2009.
53. Marler R.T., Arora J.S.: Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Struct. Multidiscip. O. 26, 2004, p. 369–395.
54. Strona www: Shell Eco-marathon Europe (SEM), Shell Eco-marathon Europe website, https://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/europe.html [dostęp: 8.04.2021].

9. MAGAZYNOWANIE ENERGII I ENERGETYKA WODOROWA

9.1. Wprowadzenie

Z uwagi na obserwowaną w ostatnich latach wysoką dynamikę przyrostu mocy instalowanej w ramach krajowych źródeł wytwórczych, wykorzystujących odnawialne źródła energii, w systemie elektroenergetycznym pojawiają się okresowe trudności związane z bilansowaniem energii. Wpływa to na wzrost ryzyka utraty ciągłości produkcji, a więc i powoduje zagrożenie dla bezpieczeństwa energetycznego kraju. Wspominany problem związany jest z losową dostępnością do energii elektrycznej produkowanej w ramach farm wiatrowych oraz instalacji fotowoltaicznych oraz elastycznością innych, pracujących w systemie, źródeł wytwórczych. Zagrożenie utraty ciągłości dostaw energii do poszczególnych gałęzi gospodarki, jak i do odbiorców indywidualnych, występuje w szczególności w tych państwach, w których system wytwórczy oparty jest głównie na paliwach węglowych. Raport przygotowany na zlecenie Komisji Europejskiej przez czołowe 32 firmy związane z rynkiem energetycznym wskazuje, że zapotrzebowanie na magazynowanie energii w Unii Europejskiej wzrośnie 10-krotnie do 2050 r., w stosunku do roku bazowego 2015 [1].

Obszar rozwoju systemów magazynowania energii, zarówno w skali niewielkich, przydomowych rozwiązań, jak również dużych systemów scentralizowanych, mających podlegać krajowym dyspozytorom systemów elektroenergetycznych, jest obecnie przez wielu ekspertów wskazywany jako obszar kluczowy dla transformacji energetyki, która jest niezbędna kontekście wyzwań stojących na drodze do osiągnięcia tzw. Europejskiego Zielonego Ładu. W Politechnice Śląskiej od wielu już lat prowadzone są badania nad technologiami, zarówno spopularyzowanymi przez wdrożone globalnie rozwiązania, jak również tymi, które zostały opracowane przez naukowców Uczelni. Niniejszy rozdział przybliża kilka istotnych kierunków prac badawczych zidentyfikowanych w ramach działalności badawczej Politechniki Śląskiej. W rozdziale przedstawiono zarówno wybrane wyniki prowadzonych prac badawczych, jak również rozwiązania, które zostały opracowane przez badaczy

Uczelni, często w kooperacji z podmiotami przemysłowymi. W rozdziale przybliżone są zagadnienia badawcze dotyczące systemów magazynowania energii w sprężonych gazach, jak i elektrowni szczytowo-pompowych. W obu przypadkach zespoły badawcze identyfikują potencjał wykorzystania w ramach tego typu systemów podziemnej infrastruktury pokopalnianej, co wpisuje się w coraz częściej podkreślaną potrzebę rekultywacji oraz efektywnego, gospodarczego wykorzystania górniczych terenów Metropolii Śląsko-Zagłębiowskiej. W rozdziale prezentowane są wybrane rezultaty analiz dla koncepcji wysokotemperaturowego magazynowania ciepła na drodze wykorzystania stopionej soli. Zespół naukowców działający w ramach Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych rozpatruje adaptację tej technologii magazynowania jako potencjalny sposób dla uelastycznienia krajowych bloków energetycznych, co jest wysoko pożądane w okresie transformacji energetycznej.

Pracownicy Politechniki Śląskiej uczestniczą w formułowaniu strategii rozwoju technologii nieodzownych dla osiągnięcia w Unii Europejskiej neutralności klimatycznej w 2050 r. Polega to na uczestnictwie przedstawicieli Uczelni w tzw. Grupach Wodorowych powołanych przez Ministra Klimatu i Środowiska w celu wypracowania krajowego porozumienia wodorowego, co w dłuższej perspektywie ma doprowadzić do budowy gospodarki wodorowej. Szereg zagadnień badawczo-wdrożeniowych, a w tym realizowanych w Politechnice Śląskiej projektów, dotyczy technologii produkcji, oczyszczania, magazynowania, konwersji oraz energetycznego wykorzystania wodoru, uważanego powszechnie za paliwo przyszłości. Politechnika Śląska bierze udział w kreowaniu strategii dekarbonizacji krajowej gospodarki z wykorzystaniem tego gazu oraz rozwija technologie hybrydowe, potencjalnie możliwe do adaptacji w ramach tzw. dolin wodorowych, których funkcjonowanie jest wpisane w strategię rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce [2]. Ten obszar reprezentują w niniejszym rozdziale przedstawione zagadnienia badawcze dotyczące elektrochemicznych metod wytwarzania wodoru oraz jego energetycznego wykorzystania. Prezentowane są również wybrane wyniki badań eksperymentalnych procesu metanizacji, który zakłada konwersję wodoru do tzw. syntetycznego gazu ziemnego. Przeprowadzenie takiej konwersji pozwala na uzyskanie paliwa o korzystniejszych cechach w kontekście transportu, magazynowania oraz energetycznego wykorzystania. W ostatniej sekcji rozdziału prezentowane są wybrane wyniki analiz, koncentrujących się na zagrożeniach związanych z magazynowaniem i transportem wodoru oraz paliw wysokowodorowych.

9.2. Magazynowanie energii w sprężonych gazach

Systemy magazynowania energii w sprężonym powietrzu, które najszerzej w obszarze badań reprezentują przedmiotową dla podrozdziału grupę technologiczną, wskazywane są jako rozwiązania o wysokim potencjale rozwoju. Technologia ta, reprezentowana na świecie przez dwa wielkoskalowe systemy (Huntorf w Niemczech oraz McIntosh w USA), charakteryzuje się wysokimi pojemnościami energetycznymi oraz wysokimi sprawnościami, jak również korzystnymi wartościami wskaźników efektywności ekonomicznej, na tle technologii konkurencyjnych. Na świecie obecnie prowadzi się wiele projektów, gdzie prace badawczo-rozwojowe koncentrują się głównie na technologii adiabatycznej, a więc takiej, która wyklucza z użycia paliwo gazowe. Wielkim wyzwaniem są tutaj głównie konstrukcje zasobników ciepła, których zadaniem jest akumulacja ciepła przejętego od gazu sprężanego na etapie ładowania systemu, celem umożliwienia jego wykorzystania na etapie rozładowywania systemu magazynowania energii. Ciepło to wykorzystywane jest wtedy dla podgrzewu sprężonego gazu, kierowanego do ekspandera. W działania mające na celu poprawę aspektów techniczno-ekonomicznych tego typu systemów, a tym samym zwiększenia ich konkurencyjności rynkowej, włączają się pracownicy Zespołu działającego we współpracy dwóch Wydziałów, tj. Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki oraz Wydziału Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej. Zespół wspierany jest wiedzą ekspercką pracowników Energoprojektu-Katowice. W okresie trzyletniej działalności Zespół wypracował wiele rozwiązań stanowiących zarówno komplementarne koncepcje systemów magazynowania energii, jak również rozwiązania mogące przyczynić się do wzrostu efektywności pracy przedmiotowych systemów. Członkowie zespołu są autorami dziewięciu procedowanych zgłoszeń patentowych (zarówno w UPRP, jak i w EPO) oraz trzech patentów. Wypracowali również szereg publikacji naukowych w przedmiotowej tematyce.

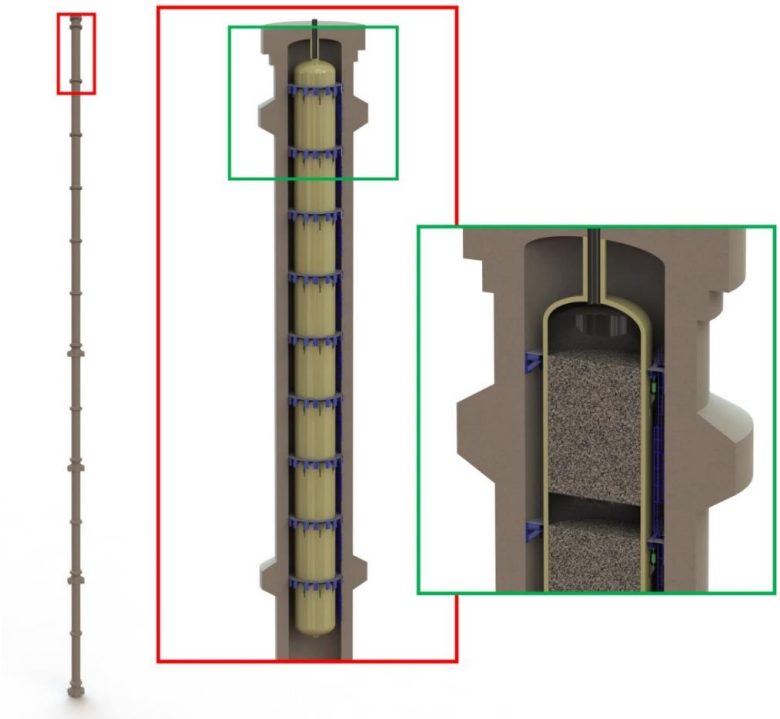
Działalność Zespołu koncentruje się również na projektowaniu oraz budowie stanowisk eksperymentalnych. Zespół utrzymuje stały kontakt z Energoprojektem--Katowice, który wraz z Politechniką Śląską zainicjował działania badawcze w ramach dwóch doktoratów wdrożeniowych, ściśle związanych z tematyką magazynowania energii w sprężonych gazach. Zespół utrzymuje również kontakt ze środowiskiem producentów oraz dystrybutorów maszyn i urządzeń (firma Siemens, Almig Kompressoren), jak i firm zajmujących się wydobyciem węgla oraz produkcją energii elektrycznej (Jastrzębska Spółka Węglowa, Tauron Wytwarzanie). Efektem są podejmowane działania mające na celu opracowanie wspólnych projektów oraz

promocja wypracowywanych rozwiązań. Wskazać należy również działalność w zakresie formułowania wniosków projektowych w konkursach europejskich, jak i krajowych.

Wśród wypracowanych rozwiązań na uwagę zasługuje zgłoszenie patentowe, które jest obecnie procedowane przez Europejski Urząd Patentowy [3]. Wynalazek zakłada wykorzystanie szybu pokopalnianego dla zabudowy hybrydowego rozwiązania stanowiącego połączenie wysokociśnieniowego rezerwuaru magazynowego dla sprężonego gazu oraz zasobnika na ciepło. Wizualizacja jednego z pełnoskalowych, wypracowanych rozwiązań, wykorzystujących szyb o głębokości 1000 m oraz średnicy 9 m, zaprezentowana jest na rys. 9.1. Rozwiązanie zakłada osiową zabudowę cylindrycznego zasobnika wypełnionego stałym materiałem akumulacyjnym, przez który może odbywać się transport gazu. Na etapie ładowania systemu magazynowania energii wprowadzane gorące powietrze, po energochłonnym procesie sprężania, przepływa przez złoże materiału akumulacyjnego, oddając ciepło i jako wychłodzone wprowadzane jest do objętości szybu. Na etapie rozładowywania powietrze opuszcza magazyn, przepływając po raz kolejny przez złoże materiału akumulacyjnego, tym razem odbierając od niego ciepło i jako wysokotemperaturowe, po opuszczeniu zasobnika, wprowadzane jest do zespołu ekspandera powietrznego, który produkuje energię elektryczną. Sprawność magazynowania energii przy wykorzystaniu zaproponowanego rozwiązania przekraczać może poziom 72%. Dużą korzyścią wynikającą z zaproponowanego rozwiązania jest możliwość zabudowy cylindrycznego zasobnika ciepła jako konstrukcji cienkościennej. Wynika to z braku występowania tutaj wysokich naprężeń odciśnieniowych, które miałyby miejsce przy naziemnej zabudowie zasobnika, a wynikałyby z dużej różnicy ciśnień występujących po dwóch stronach ścianki cylindra zasobnika. Ta własność wynalazku znacznie niweluje wydatek materiału wymaganego w konstrukcji zasobnika. Drugą zaletą jest ograniczenie strat ciepła identyfikowanych w cyklu pracy zasobnika – w przypadku przedmiotowego rozwiązania ciepło tracone z objętości zasobnika ciepła na drodze przewodzenia przez ściankę zasobnika oraz izolację jest kierowane w pierwszej kolejności do zakumulowanego powietrza, które stanowi w systemie nośnik energii.

Obecnie dużym wyzwaniem dla Zespołu badawczego jest opracowanie odpowiednich konstrukcji korków podszybi oraz korka głównego, mających utrzymać powietrze w zasobniku przy ciśnieniach rzędu 5–8 MPa. Analizy symulacyjne przeprowadzone przez Zespół potwierdziły, iż ciśnienie na poziomie 8 MPa, przy odpowiedniej konstrukcji szybu, może być bezpieczne podczas eksploatacji systemu. Innym zagadnieniem badawczym jest optymalizacja konstrukcji zasobnika ciepła,

która zapewnić ma minimalizację strat ciepła oraz minimalizację oporów przepływu, przy równoczesnej minimalizacji kosztów inwestycyjnych. Obecnie kończy się etap prac związanych z kompletowaniem elementów stanowiska do badań eksperymentalnych, którego zabudowa planowana jest w Hali Maszyn Cieplnych, stanowiącej infrastrukturę badawczą Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Wyniki pomiarów, jakie są planowane w trakcie prac eksperymentalnych, pozwolą na walidację opracowywanych modeli numerycznych.



Rys. 9.1. Wizualizacja hybrydowego zasobnika dla sprężonego powietrza oraz ciepła: widok struktury szybu (lewa strona), lokalizacja zasobnika ciepła (środek), przekrój przez zasobnik ciepła (prawa strona)
Fig. 9.1. Visualization of the hybrid reservoir for compressed air and heat: view of the shaft structure (left), location of the TES system (center), cross-section through the TES system (right)

Inną koncepcją wypracowaną przez pracowników Politechniki Śląskiej jest koncepcja hybrydowego systemu magazynowania energii, gdzie jako nośniki energii wykorzystuje się równocześnie wodór (podlegający konwersji do syntetycznego gazu ziemnego) oraz sprężone powietrze. Politechnika posiada patent na wynalazek [4]. W Urzędzie Patentowym RP aktualnie procedowane jest zgłoszenie patentowe [5], dotyczące innego rozwiązania hybrydowego, gdzie oprócz wodoru, w ramach jednego systemu, stosuje się nośnik energii, jakim jest sprężony dwutlenek węgla. Wynalazcy zwracają uwagę na wysoki potencjał rozwiązania w ramach regionów mocno zindustrializowanych, gdzie istnieje zapotrzebowanie na tworzenie klastrów przemysłowych integrujących podmioty o potrzebach utylizacji dwutlenku węgla, jak

również potrzebach pozyskiwania różnych nośników energii. Wynalazek szczególnie korzystnie wpisuje się w Region Górnego Śląska, gdzie z biegiem czasu, przybywać będzie wyrobisk pokopalnianych, mogących stanowić, po dostosowaniu, zbiorniki dla takich gazów jak wodór, metan, dwutlenek węgla, powietrze. Wśród rozwiązań, z którymi członkowie Zespołu wiążą duże nadzieje jest opracowany hybrydowy system magazynowania energii, wykorzystujący jako nośnik energii nadkrytyczny dwutlenek węgla [6]. W tym wypadku również zakłada się magazynowanie gazu w objętości szybu, przy czym tutaj wymagana jest zabudowa dwóch zbiorników ciśnieniowych, tj. zbiornika wysokociśnieniowego CO_2 oraz zbiornika niskociśnieniowego CO_2. Umieszczenie zbiornika wysokociśnieniowego na dnie szybu, przy odpowiedniej jego konstrukcji, pozwala na jego izobaryczny charakter, co jest dużą zaletą wynalazku. Innym wynalazkiem, w ostatnim czasie zgłoszonym do UP RP [7], jest koncepcja systemu izobarycznych zbiorników na CO_2, które przewidziane są dla zastosowania w ramach systemów magazynowania energii. W tym przypadku przedmiot zgłoszenia patentowego jest wypracowany w kooperacji Politechniki z Energoprojektem-Katowice. Zespół opracował wiele innych rozwiązań technologicznych, oprócz tych zaprezentowanych w rozdziale. Jako, że w wielu wypracowanych i analizowanych przez Zespół rozwiązaniach systemów energetycznych wykorzystuje strukturę pokopalnianą, w sposób naturalny i efektywny podczas prac rozwojowych łączone są kompetencje pracowników dwóch wspomnianych wcześniej Wydziałów. Zespół niemniej jednak identyfikuje pewne luki kompetencyjne i dla wypełnienia tych luk zabiega o współpracę z innymi jednostkami uczelni oraz podmiotami pozauczelnianymi.

Prezentowane koncepcje pozwalają nie tylko na efektywne magazynowanie energii, ale także na wykorzystanie podziemnych wyrobisk i infrastruktury kopalń, szczególnie węgla kamiennego, które zlokalizowane są zazwyczaj blisko dużych elektrowni lub stacji transformatorowych. Pozwalają na opracowanie alternatywnych sposobów likwidacji i rewitalizacji obszarów pogórniczych zgodnie z koncepcją gospodarki obiegu zamkniętego.

9.3. Możliwości realizacji elektrowni szczytowo-pompowych w likwidowanych Kopalniach Węgla Kamiennego

Przez wiele dekad elektrownie szczytowo-pompowe (ESP) były elementem istotnym z punktu widzenia wdrażanych elektrowni atomowych. Współpraca tych systemów gwarantowała stałe, optymalne obciążenie bloków jądrowych przy

równoczesnym bilansowaniu mocy względem zmian w zakresie zapotrzebowania rynku. Elektrownie szczytowo-pompowe stanowią obecnie dominujące i największe działające magazyny energii na świecie odpowiadając za ok. 95% możliwości pośredniego akumulowania wyprodukowanej energii elektrycznej.

Zasada działania ESP sprowadza się do pompowania wody w okresach nadmiaru energii elektrycznej w sieci na wzniesienie, do górnego zbiornika wodnego oraz jej spuszczanie poprzez turbiny wodne do zbiornika dolnego. Nowoczesne układy ESP dużych mocy charakteryzują się sprawnością przekraczającą 75%, kilkuminutowymi okresami rozruchu, wyłączania oraz bardzo długim okresem niezawodnej eksploatacji.

Zazwyczaj zbiorniki górne lokowane są na przystosowanych do tego górach i wzniesieniach, na szczycie których buduje się regularne, izolowane od podłoża i odgradzane powierzchniowo od otoczenia baseny. Zbiorniki dolne nie są tak wymagające i są to zazwyczaj naturalne , bądź modyfikowane zlewiska o wielokrotnie większej objętości. Wielkość zbiornika górnego oraz przyjęty system technologii pomp i turbin wodnych decyduje o kilkugodzinnej, w wymiarze doby, pracy generacyjnej układu. Brak emisyjności oraz niewielkie oddziaływanie na środowisko naturalne były powodem akceptacji społecznej dla elektrowni szczytowo-pompowych. Energetyka korzysta z tych rozwiązań od początków lat 30. XX wieku. Światowy potencjał mocy elektrowni szczytowo-pompowych wynosi około 130 GW z czego 25 GW w Japonii, 22 GW w USA, 15 GW w Chinach, ponad 40 GW w Europie z czego prawie 9 GW w samych Niemczech. Najwyższy realizowany spad 1772,5 m przypada na obiekt Kolbnitz w pobliżu austriackiego Kaprun, gdzie rurociąg o długości 4234 m zasila system 7 turbin typu Peltona ze zbiornika retencyjnego Reißeck. Elektrownia ta ma moc 138 MW.

W związku z sukcesywnym odchodzeniem od wydobywania węgla kamiennego, w szczególności na Górnym Śląsku, poddana została pod konsultacje koncepcja wykorzystania likwidowanej infrastruktury podziemnej kopalń na potrzeby elektrowni szczytowo-pompowych. W zamyśle zbiornik górny byłby osadzony na gruncie w pobliżu obecnych szybów kopalnianych, w szybach znajdowałyby się rurociągi, a na dole zrealizowano by budowę zbiornika dolnego. Koncepcja taka nie jest nowa, lecz praktyczne jej zastosowanie w dużej skali nie zostało dotychczas zrealizowane.

Jednym z nielicznych systemów jest instalacja o charakterze badawczym w kopalni Jeremenko w Ostrawie, która uruchomiona została 17 lipca 2015 r. i pracowała przez ponad cztery lata. Nie wyszła poza fazę badań doświadczalnych. Wykorzystano istniejący system odwadniania kopalni oraz nowo zainstalowaną turbinę wodną typu Peltona na poziomie ok. 580 metrów poniżej zrębu. Wydajność obliczeniowa wynosiła

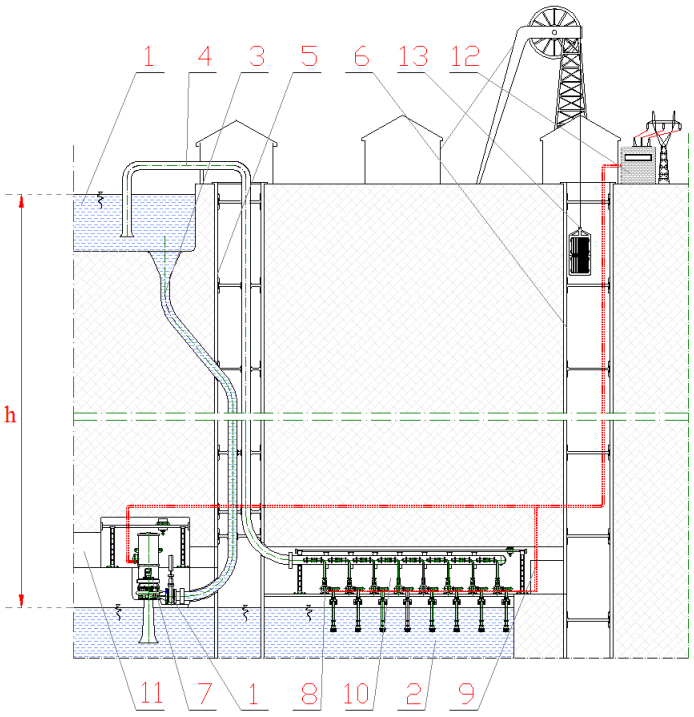
Q=0,14 m^3/s, prędkość obrotowa turbiny n=1500 obr/min. Układ z założenia miał pracować z mocą 732 kW, uzyskano jednak ok. 680 kW mocy elektrycznej (napięcie 400 V). W układzie krążyła woda kopalniana, zasolona o temperaturze ok. 26 stopni. Zbiornik powierzchniowy miał objętość ok. 4000 m^3 z czego objętość robocza wynosiła 3000 m^3, a rurociąg prowadzący wodę do turbiny średnicę DN300. W zestawieniu wniosków z prowadzonych badań określono moc docelowej elektrowni szczytowo-pompowej w likwidowanej infrastrukturze kopalni węgla kamiennego, uśrednioną dla warunków kopalń na 5–10 MW oraz wielkość zbiorników górnych na powierzchni około 20 tys. m^3.

Szerokie analizy techniczne, ekonomiczne, środowiskowe oraz prawne dla zlikwidowanych obiektów podziemnych przeprowadzono w Niemczech w ramach projektu „Magazynowanie energii wiatrowej poprzez ponowne wykorzystanie zlikwidowanych kopalń", finansowanego przez Federalne Ministerstwo Środowiska. Projekt był prowadzony przez grupę naukowców z Clausthal University of Technology (Clausthal-Zellerfeld, Dolna Saksonia, Niemcy) oraz przedstawicieli przemysłu. Wyznaczono 104 obiekty podziemne, które nadają się na elektrownie szczytowo-pompowe. Na podstawie przeprowadzonych analiz ustalono, że najwłaściwszymi będą geologicznie stabilne były kopalnie rud metali. Określono ograniczenia dla zlikwidowanych kopalń węgla kamiennego oraz soli: wybuchowy metan, pył węglowy oraz kwarcowy zawarty w pompowanej wodzie, zasolenie wody, możliwość wypłukiwania surowców (soli) oraz substancji toksycznych z górotworów. Wykluczono obiekty, w których miękka skała wymagać będzie budowy kosztownych wzmocnień. Jako kopalnie pilotażowe wskazano dawną kopalnię rudy Pöhla w Erzgebirge oraz szyb Wiemann nieczynnej kopalni rudy Grund w górach Harz. W zunifikowanym systemie każda z elektrowni ma dysponować mocą 100 MW oraz zbiornikami wodnymi umożliwiającymi produkcję 400 MWh energii elektrycznej rocznie. Założono spad o wysokości 700 m oraz objętość możliwych do wykorzystania/wykonania podziemnych tuneli i kanałów 240–260 tys. m^3. Opracowano dokumentację pompy i turbiny do takiego obiektu. Średnica największego elementu, który trzeba transportować w całości na dół kopalni wynosi 5,6 m. Dopuszczono wykonanie segmentowe kadłuba turbiny oraz pompy. Sprawność turbiny wodnej oszacowano na 91%, sprawność pompy 90%, sprawność generacji w pełnym obiegu to 75%. Oszacowano koszt utworzenia jednej elektrowni szczytowo-pompowej na 180 mln euro. Badania prowadzono od 2010 r. Nie dotrzymano terminu prowadzenia prac eksperymentalnych na wyznaczonych obiektach oraz nie uruchomiono ESP współpracującej z systemem energetycznym przy parametrach

scharakteryzowanych w opracowaniach, powołując się na ekonomiczną nieopłacalność inwestycji przy obowiązujących przepisach i cenach energii elektrycznej.

Obecnie w Polsce działa 20 kopalń węgla kamiennego. W większości już zlikwidowanych zakładów górniczych infrastruktura podziemna została zdewastowana poprzez zalanie, co czyni możliwość powrotu na zamknięte wyrobiska nieopłacalnym ekonomicznie. W obecnych warunkach rynku cen energii elektrycznej w Polsce oraz wciąż dużej przewagi sterowalnych źródeł energii nad chimerycznymi, nieopłacalne ekonomicznie jest budowanie, jak również eksploatacja istniejących elektrowni szczytowo-pompowych. Nie bez znaczenia jest nie uznawanie przez Urząd Regulacji Energetyki elektrowni szczytowo-pompowych jako źródeł OZE. Przywilej ten oraz związane z tym wsparcie finansowe jest zarezerwowane dla wodnych elektrowni grawitacyjnych.

Analizy ekonomiczne oraz ocena rentowności elektrowni szczytowo-pompowej na terenie likwidowanej od 1 grudnia 2016 r. kopalni węgla kamiennego Górnego Śląska prowadzone były przy założeniu poniesienia kosztu wybudowania elektrowni ze środków zewnętrznych i dalsze przekazanie nowego obiektu w użytkowanie do spółki celowej. W zależności od przyjętych modeli prognozowanych zmian cen energii w przyszłości zysk z tak prowadzonej działalności bez ciężaru postąpienia inwestycji oscylował wokół zera co jest zgodne z danymi światowymi. Podobnie balansujące na granicy opłacalności są obecnie duże elektrownie wodne w Polsce, którym wygasają dotychczasowe mechanizmy 15-letniego wsparcia finansowego. W zależności określającej moc możliwą do uzyskania z przepływu wody są dwie, wzajemnie proporcjonalne wielkości: wydajność oraz wysokość spadu, którymi można się posługiwać celem określenia mocy urządzeń hydraulicznych. Zwiększenie mocy uzyskuje się zwiększając wydajność, bądź różnicę wysokości poziomów cieczy w zbiorniku górnym i dolnym. Istotnym w związku z tym jest wykorzystanie maksymalnego potencjału kopalni i budowa maszynowni na najniższym możliwym poziomie, technicznie akceptowalnym. Poglądowy schemat takiego układu przedstawiono na rys. 9.2. Zakładając, że jeden z szybów zostanie całkowicie zabudowany rurociągami do przepływu wody konieczne jest funkcjonowanie drugiego szybu w celach transportowych, przesyłu energii elektrycznej oraz napowietrzania. W polskich kopalniach węglach kamiennego taki właśnie układ co najmniej dwóch szybów jest modelem podstawowym.

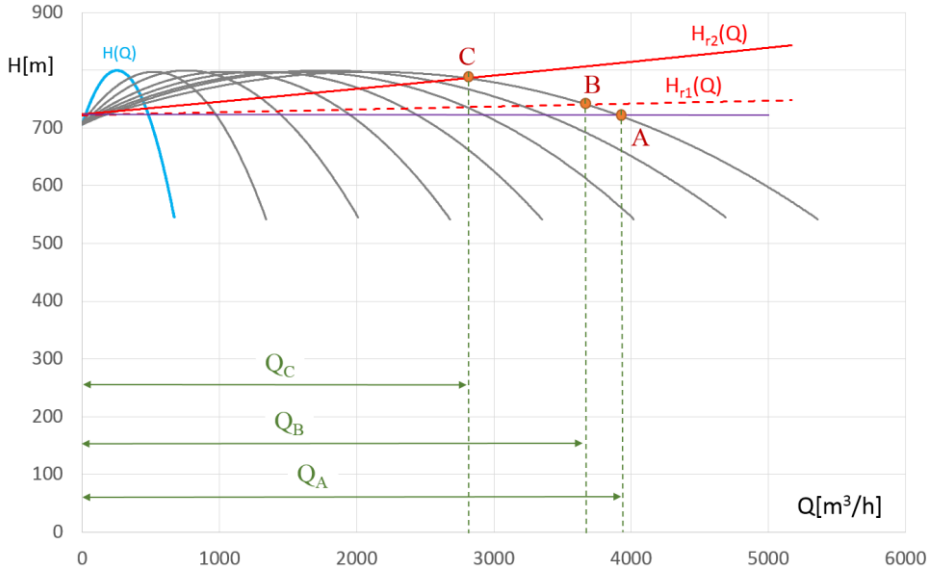


Rys. 9.2. Schemat elektrowni szczytowo–pompowej w infrastrukturze zlikwidowanej kopalni węgla kamiennego z układem pomp połączonych równolegle: 1 – zbiornik górny, 2 – zbiornik dolny, 3 – kanał opadowy, 4 – kanał tłoczny, 5 – szyb przepływu wody, 6 – szyb transportowy, 7 – turbina wodna, 8 – pompy wirowe, 9 – przewody energetyczne, 10 – komora pomp, 11 – chodnik transportowy, 12 – stacja transformacji napięcia, 13 – klatka transportowa

Fig. 9.2. Diagram of a pumped–storage power plant in the infrastructure of a liquidated hard coal mine with a system of parallel pumps: 1 – upper tank, 2 – lower tank, 3 – rainfall channel, 4 – discharge channel, 5 – water flow shaft, 6 – transport shaft, 7 – water turbine, 8 – centrifugal pumps, 9 – power lines, 10 – pump chamber, 11 – transport walkway, 12 – voltage transformation station, 13 – transport cage

Kolejne ograniczenia, które trzeba uwzględnić realizując ESP w kopalniach węgla kamiennego są zagrożenia metanowe, brak przepisów prawa uwzględniających ponowne wykorzystanie kopalń do celów innych niż wydobycie, konieczność wzmacniania kanałów podziemnych. Na rys. 9.3 przedstawiono charakterystykę współpracy równoległej podłączonych, istniejących pomp wirowych odśrodkowych, dostępnych na polskim rynku z prognozowaną charakterystyką rurociągu. Pompy te mają wobec postawionego zadania zbyt małe wydajności. Równoległe łączenie pomp jest ograniczone przepływowo charakterystyką rurociągu, która nie jest poziomą linią prostą, lecz przyrasta wykładniczo. Efektywność takiego układu w znaczącym stopniu zależy od (średnicy) rurociągu tłocznego układu pompowego. Przewymiarowanie średnicy rurociągu, pożądane energetycznie z uwagi na mały wzrost strat (punkt A na rys. 9.3) pociąga za sobą znaczący wzrost kosztu. W kolejnym analizowanym wariancie zaproponowano projektowanie, badania i produkcję dedykowanej dla takiego układu pompy na wariantowe parametry przepływowe (tab. 9.1), której

gabaryty umożliwią transport pompy na dół kopalni oraz stabilną, wieloletnią pracę, również we współpracy szeregowej. Obecnie zadanie to jest to całościowo technicznie możliwe do wykonania na terenie Polski.



Rys. 9.3. Charakterystyka współpracy równolegle połączonych pomp z rurociągiem
Fig. 9.3. Characteristics of cooperation of pumps connected in parallel with the pipeline

Tabela 9.1

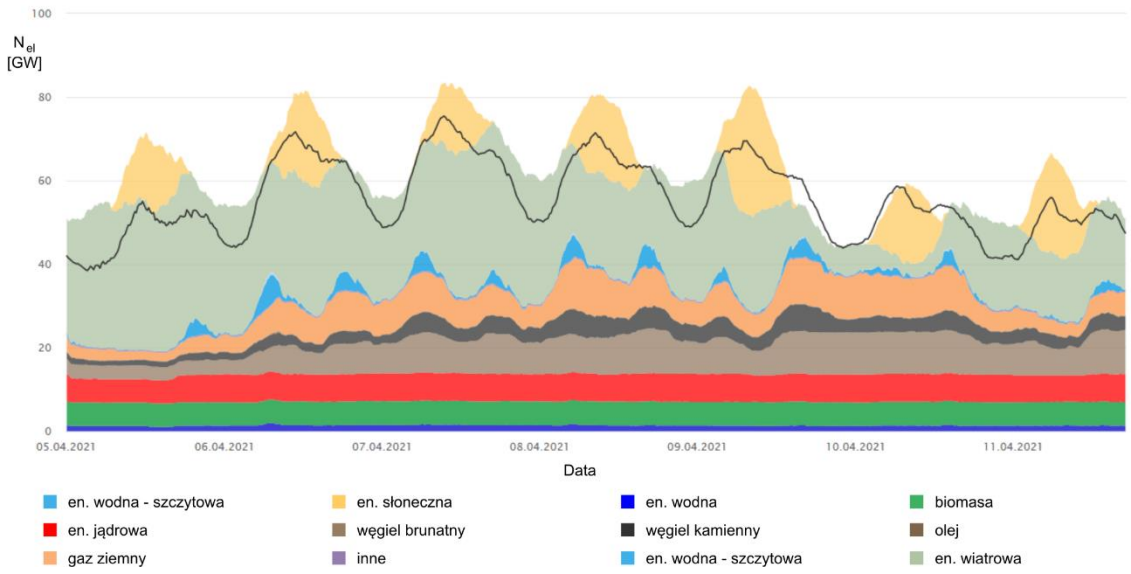
Geometria przykładowych wirników pomp wirowych odśrodkowych

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Wirnik 1	Wirnik 2	Wirnik 3
Wielkość założone					
Wydajność	Q	m^3/h	4500	10000	10000
Wysokość podnoszenia ze stopnia	H	m	73	100	400
Prędkość obrotowa	n	obr/min	1450	690	1450
Wyróżnik szybkobieżności	n_Q	-	65	50	27
Sprawność	η	%	85	85	85
Wielkości obliczane					
Średnica wału	d_w	mm	140	140	250
Średnica piasty	d_p	mm	165	165	315
Średnica wlotu łopatki	d_1	mm	385	480	550
	d_0	mm	472	660	611
Średnica wylotu łopatki	d_2	mm	590	925	1140
Liczba stopni pompy	i	-	10	8	2
Moc na wale	N_w	MW	10,5	25,6	25,6

9.4. Zastosowanie układów magazynowania energii dla zwiększania elastyczności bloków z turbinami parowymi

Jednym z efektów wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii w wytwarzaniu energii elektrycznej jest zmiana charakteru pracy konwencjonalnych bloków energetycznych. Wiele jednostek wytwórczych zmienia rolę podstawowego dostawcy mocy do zadań polegających na kompensacji zmian mocy ze strony OZE. Wynika to ze sposobu pracy najpopularniejszych i najbardziej powszechnych OZE, to znaczy maszyn i urządzeń wykorzystujących energię słoneczną i wiatrową.

Efekty przemian czekające polską energetykę można szacować bazując na przykładach sąsiednich krajów Unii Europejskiej ze znacznie większym udziałem OZE w produkcji energii elektrycznej. Na rys. 9.4 przedstawiono udziały głównych źródeł energetycznych w produkcji mocy elektrycznej w Niemczech.



Rys. 9.4. Udziały źródeł energii w produkcji mocy elektrycznej w Niemczech [8]
Fig. 9.4. Share of energy sources in electricity generation in Germany [8]

Niemcy są krajem o podobnych do Polski warunkach klimatycznych, lecz o zdecydowanie większym udziale OZE w produkcji mocy, zwłaszcza energetyki wiatrowej i słonecznej. Źródła odnawialne są traktowane priorytetowo, co oznacza, że wahania generowanej przez nie mocy są kompensowane przez inne źródła. Wykres z rys. 9.4 wybrano jako typowy dla niemieckiej energetyki. Proporcje na wykresie powtarzały się w innych tygodniach ubiegłych dwunastu miesięcy, uwzględniając mniejsze zapotrzebowanie na energię w okresie letnim.

Analiza wykresu wskazuje na kilka charakterystycznych cech systemu energetycznego o dużym zróżnicowaniu źródeł energii:

- energetyka jądrowa, źródła związane ze spalaniem biomasy oraz energetyka wodna w formie turbin wodnych montowanych na zaporach i w rzekach dostarcza moc na praktycznie stałym poziomie niezależnie od rzeczywistego zapotrzebowania,
- zadanie kompensacji zmian mocy z OZE jest realizowane przede wszystkim przez układy z turbinami gazowymi zasilane gazem ziemnym oraz elektrownie wodne szczytowo-pompowe,
- wahania mocy związane z kompensacją OZE są w znacznie mniejszym stopniu przerzucane na bloki zasilane węglem kamiennym i brunatnym.

Opisane podejście do sterowania systemem energetycznym wynika z elastyczności cieplnej maszyn i urządzeń przeznaczonych do produkcji energii elektrycznej. Pomijając elektrownie wodne szczytowo-pompowe, przeznaczone niejako z definicji do zadań kompensacji wahań mocy, największe gradienty mocy obserwuje się w układach gazowych. Instalacje gazowe umożliwiają bowiem przeprowadzenie rozruchu w czasie krótszym od jednej godziny nawet po długim postoju. Rozruch obiegu parowego z turbiną kondensacyjną zajmuje znacznie więcej czasu zgodnie z informacjami zebranymi w tabeli 9.2.

Tabela 9.2
Czas rozruchu bloku parowego

Czas postoju [h]	Czas rozruchu [h]		
	Kocioł	Turbina	Razem
50+	2,5	4,5	7
36	0,8	2,2	3
8	0,5	1,5	2

Czas postoju wymieniony w tabeli 9.2 dotyczy okresu przed uruchomieniem. Przekroczenie pięćdziesięciu godzin powoduje zwykle zakwalifikowanie rozruchu jako prowadzonego ze stanu „zimnego”, to znaczy w warunkach jak dla maszyny uruchamianej po raz pierwszy. Czas rozruchu dotyczący kotła obejmuje okres od pierwszych czynności związanych z kotłem, w tym między innymi uruchomienia palników olejowych, do momentu, kiedy kocioł może dostarczyć parę do turbiny o wymaganym ciśnieniu i temperaturze. Okres dotyczący turbiny rozciąga się od otwarcia zaworów odcinających na rurociągach pary świeżej i wtórnej do chwili osiągnięcia obciążenia nominalnego. Ten drugi okres obejmuje także kolejne etapy nagrzewania kotła.

Większe wahania mocy instalacji gazowych, pokazane na rys. 9.4, wynikają zatem z większej elastyczności instalacji z turbinami gazowymi, w tym krótszymi okresami rozruchu. Jednak pokazane warunki dotyczą systemu energetycznego ze znacznym zróżnicowaniem źródeł energii. W Polsce moc elektryczną dostarczają głównie elektrownie konwencjonalne z turbinami i kotłami parowymi zasilanymi węglem kamiennym lub brunatnym. Powoduje to konieczność rozdzielenia wahań mocy na większą liczbę bloków. Zmiany mocy muszą się mieścić w zakresie między obciążeniem maksymalnym poszczególnych bloków, a ich minimum technicznym, które zapewnia stabilne warunki pracy.

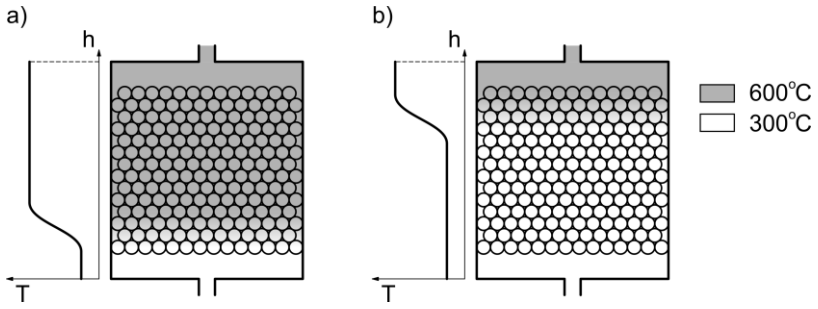
Problem kompensacji odnawialnych źródeł energii i stabilizacji systemu energetycznego można w znacznej mierze rozwiązać przez wykorzystanie magazynów energii [9]. Do dyspozycji pozostają różne formy gromadzenia energii w okresach nadwyżki produkcyjnej, na przykład w sprężonym powietrzu [10] lub płynnej soli [11]. Wspólną cechą magazynów energii jest możliwość szybkiego uruchomienia procedury rozładowania magazynu, co umożliwia natychmiastową reakcję na zmiany poziomu mocy dostarczanej przez OZE.

Magazyny energii mogą pracować jako samodzielne części systemu energetycznego pod względem lokalizacji i połączenia z pozostałymi elementami systemu. Do ładowania magazynu wykorzystuje się wtedy energię elektryczną pobieraną z sieci. Jednak zastosowanie magazynów energii może być bardziej efektywne zarówno pod względem sprawności, jak i kosztów konstrukcji przy zintegrowaniu z innymi instalacjami energetycznymi.

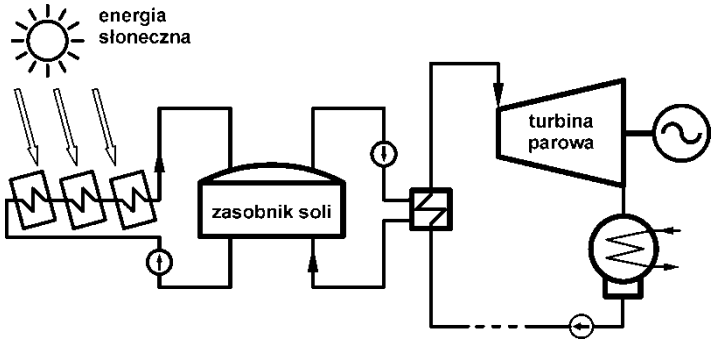
Ze względu na specyfikę polskiego systemu energetycznego i dużą liczbę obiegów parowo-wodnych należy rozważać integrację magazynów energii z turbinami parowymi. Jedną z technologii, która umożliwia taką integrację, jest magazynowanie energii w ciekłej soli. Ta technologia znalazła zastosowanie w pierwszym rzędzie w krajach o dobrym nasłonecznieniu. Sól zostaje nagrzana przez promienie słoneczne skupione przez odpowiednio ukształtowane lustra. Dostępne technologie umożliwiają nagrzewanie soli do temperatury przekraczającej 600°C przy korzystnych warunkach atmosferycznych. Energia jest przechowywana w postaci ciepła zakumulowanego w soli. Przykład zasobnika soli pokazano na rys. 9.5.

Rozwiązanie konstrukcyjne przedstawione na rys. 9.5 wykorzystuje różnicę gęstości między solą o wysokiej i niskiej temperaturze. Nagrzana sól jest dostarczana do górnej części zbiornika, a zimna wypływa dolnym wylotem. Zbiornik zawiera dodatkowo wkład krzemieniowy, który ułatwia akumulację ciepła. Na rys. 9.5 zaznaczono również rozkład temperatury soli wzdłuż wysokości zbiornika. Naładowany zasobnik zawiera przede wszystkim gorącą sól z niewielką ilością zimnej

soli w dolnej części. Podczas rozładowania gorąca sól wypływa górnym wylotem, a po oddaniu ciepła wraca do dolnej części zbiornika. Ciepło można wykorzystać do wytworzenia pary wodnej w obiegu, którego schemat pokazano na rys. 9.6.



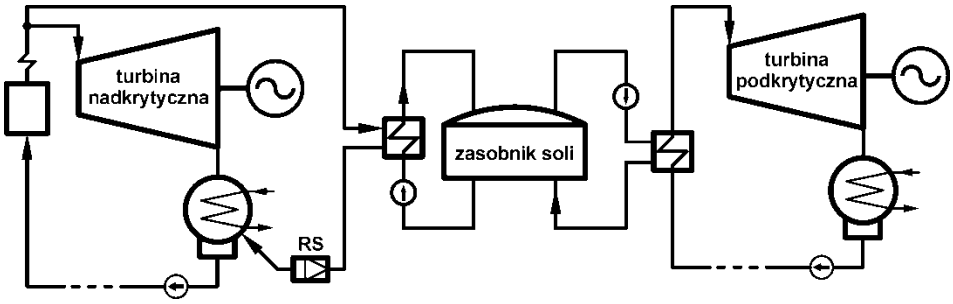
Rys. 9.5. Magazyn ciekłej soli z pojedynczym zbiornikiem: załadowany (a) i rozładowany (b)
Fig. 9.5. Single liquid salt storage tank: charged (a) and uncharged (b)



Rys. 9.6. Obieg cieplny z magazynem soli
Fig. 9.6. Thermal cycle with salt storage

Ilość wytworzonej pary zależy wyłącznie od wielkości zbiornika i ilości zmagazynowanej soli. Oznacza to, że magazyn energii z ciekłą solą można dopasować pod względem rozmiaru do zapotrzebowania.

W polskich warunkach klimatycznych nagrzewanie soli promieniami słonecznymi nie dawałoby tak dobrych efektów, jak w strefach geograficznych bliższych równikowi. Jednak samą technologię magazynowania można z powodzeniem wykorzystać, tym bardziej iż w dotychczasowych zastosowaniach jest ona łączona z turbinami parowymi. Koncepcję wykorzystania zasobnika soli pokazano na rys. 9.7.



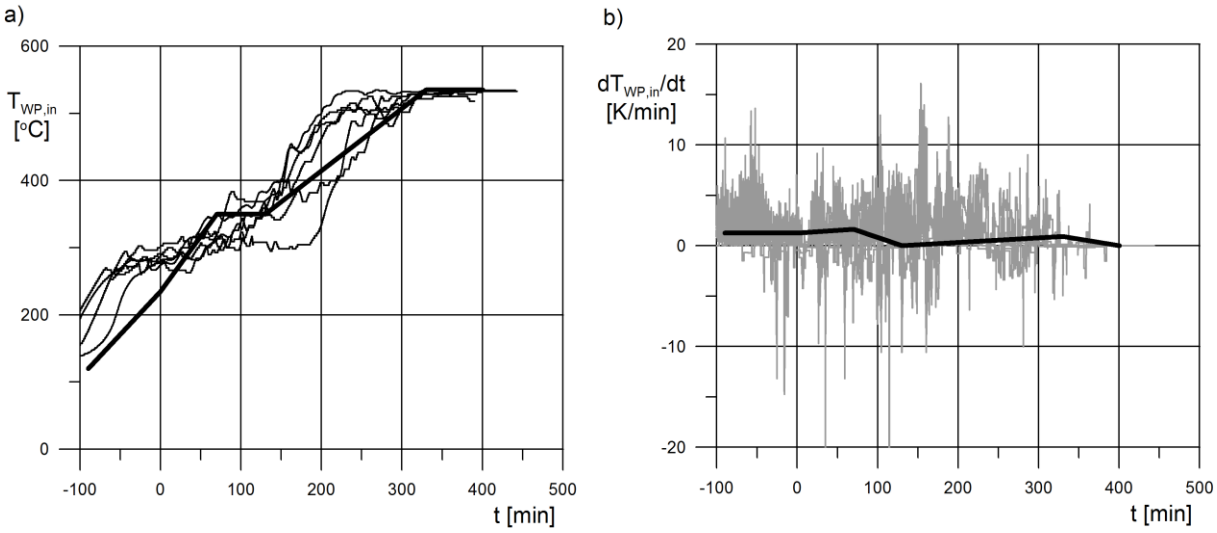
Rys. 9.7. Turbina nadkrytyczna, magazyn energii i turbina podkrytyczna
Fig. 9.7. Supercritical turbine, energy storage system and subcritical turbine

Przedstawiona koncepcja bazuje na obserwacji, iż w polskiej energetyce istnieje spora liczba bloków z podkrytycznymi turbinami parowymi, które w najbliższych latach zostaną przeznaczone do likwidacji. W zdecydowanej większości z nich, przyczyną likwidacji jest brak możliwości spełnienia wymogów w zakresie emisji spalin. Jednak turbiny parowe w tych blokach nie wyczerpały jeszcze swojej żywotności. Wiele z nich znajduje się w zakładach energetycznych, które uruchomiły obiegi z nadkrytycznymi turbinami parowymi. Lokalizacja nowych bloków nadkrytycznych w pobliżu turbin podkrytycznych daje możliwość stworzenia układu z magazynem energii do stabilizacji systemu energetycznego przy kosztach obniżonych wyłącznie do kosztów samego zasobnika energii.

W obiegu z rys. 9.7 magazyn soli wprowadzono do obiegu zamiast wycofanego z eksploatacji kotła parowego w obiegu podkrytycznym. Nadkrytyczny kocioł parowy pracuje zawsze przy pełnym obciążeniu. W tych warunkach kocioł posiada najniższą jednostkową emisję szkodliwych substancji. Moc turbiny nadkrytycznej jest regulowana w zależności od zapotrzebowania w systemie energetycznym. Jeżeli moc turbiny spada, to nadmiar pary wytwarzanej w kotle nagrzewa sól. Zakumulowane ciepło służy do produkcji pary dla turbiny podkrytycznej w okresach wysokiego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Podstawową zaletę magazynowania energii w tej formie jest możliwość produkcji pary wodnej praktycznie od początku procesu rozładowania zasobnika. W ten sposób czas rozruchu zostaje skrócony o okres wymieniony w tabeli 9.2 w kolumnie „Kocioł”. Dodatkowo proces wymiany ciepła między solą i wodą/parą wodną w generatorze pary przebiega znacznie bardziej stabilnie, niż produkcja pary w kotle parowym. Pozwala to na regulację zmian temperatury pary świeżej zgodnie z charakterystykami rozruchowymi. Dla porównania na rys. 9.8a zestawiono linię zmian temperatury pary świeżej (T_{WP}) według charakterystyki z rzeczywistymi przebiegami temperatury pary dostarczanej przez kocioł węglowy. Prędkości nagrzewania pary dla rozruchów z rys. 9.8a zebrano na rys. 9.8b.

Porównanie z rys. 9.8 wskazuje, że temperatura pary świeżej w trakcie rozruchu może znacznie odbiegać od linii określonej przez projektanta maszyny. Rozruchy bywają zanadto przyspieszone lub opóźnione. Wynika to z dostępności pary produkowanej w kotle oraz stabilności pracy kotła. Efektem są skoki prędkości nagrzewania pary widoczne na rys. 9.8b. Mimo iż średnia prędkość nagrzewania oznaczona grubą czarną linią pozostaje poniżej wartości dopuszczalnych, to bardzo często dochodzi do przekroczeń poziomu prędkości uznanej za prawidłową.



Rys. 9.8. Temperatura pary świeżej według charakterystyki rozruchowej i rzeczywistych pomiarów
Fig. 9.8. Live steam temperature according to the start-up characteristic and actual measurements

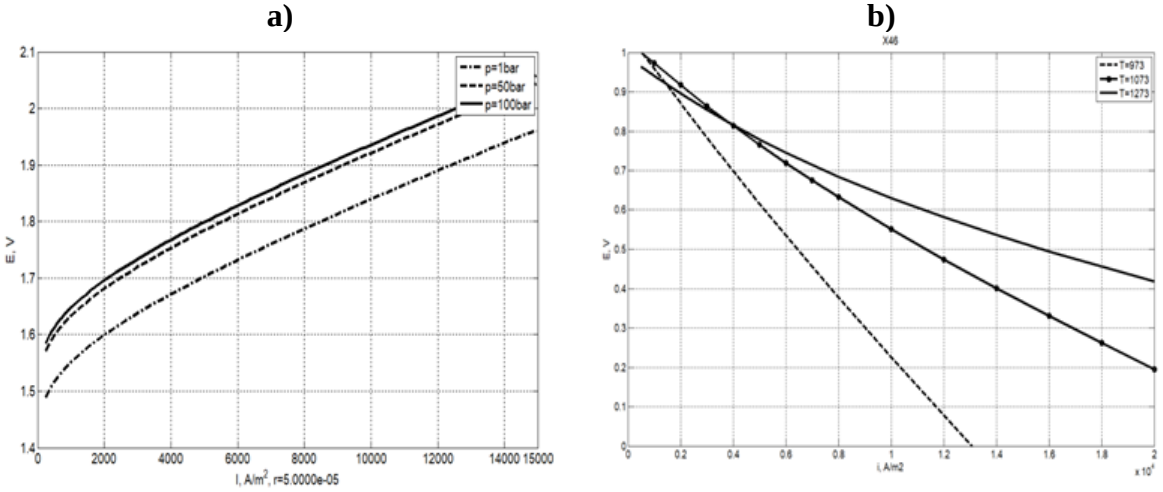
Wysokie gradienty zmian temperatury pary świeżej skutkują wysokimi wartościami naprężenia cieplnego w głównych elementach turbiny omywanych tą parą. Produkcja pary w generatorze zasilanym solą pozwala utrzymać temperaturę zgodnie z wymaganiami narzuconymi przez charakterystykę rozruchową. W tej sytuacji możliwe jest nawet dalsze skrócenie rozruchu przez modyfikację charakterystyki rozruchowej [12]. Jeżeli bowiem zostanie usunięta niestabilność temperatury czynnika roboczego, to można przyjąć mniejszy margines błędu określenia temperatury pary świeżej w kryterium wytrzymałościowym, a w efekcie zwiększyć średnią prędkość nagrzewania.

9.5. Wytwarzanie i wykorzystanie wodoru w hybrydowych układach energetycznych

Projektowanie innowacyjnych technologii energetycznych w zakresie systemów wykorzystujących wodór jest możliwe między innymi dzięki możliwościom przewidywania ich charakterystyk w oparciu o modele matematyczne o różnym stopniu zaawansowania. W zależności od celu prowadzenia analiz, poszczególne części mogą wykorzystywać modele uproszczone tzw. 0D lub bardziej rozbudowane, uwzględniające trójwymiarowe efekty transportu masy, pędu i przepływu ciepła.

W zakresie poszukiwania optymalnych struktur układów hybrydowych wykorzystujących wodór jak i systemów z magazynowaniem energii szczególnie ważne są modele pozwalające określić główne wymiary modułów, jak i ich

efektywność energetyczną czy straty ciśnienia przy przepływie czynników. Przykładem rezultatów modelowania, mogących umożliwić efektywne projektowanie czy analizy systemów wodorowych są charakterystyki elektrolizerów i ogniw paliwowych. Na rys. 9.9 przedstawiono zależność napięcia od natężenia powierzchniowego prądu elektrycznego dla elektrolizera polimerowego i ogniwa paliwowego ceramicznego. Uwzględnienie w analizach ciśnienia czy temperatury pracy umożliwia efektywne projektowanie technologii ładowania magazynów gazu i produkcji energii elektrycznej z wodoru.

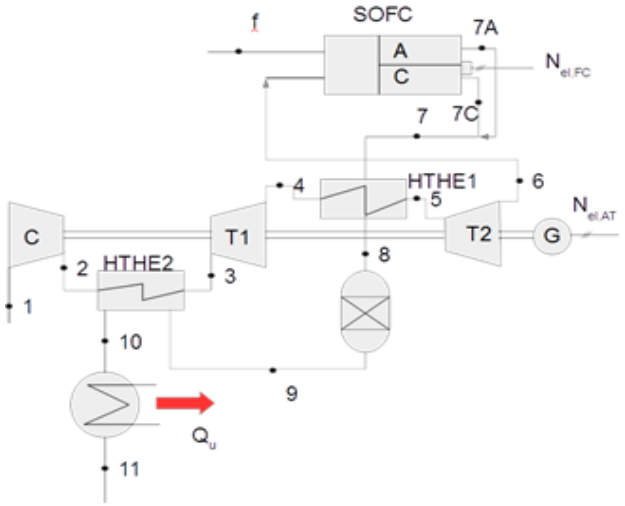


Rys. 9.9. Charakterystyka napięciowo-prądowa elektrolizera polimerowego dla różnych ciśnień pracy (a) oraz charakterystyka napięciowo-prądowa E=f(i) dla różnych temperatur pracy ogniwa paliwowego ceramicznego (b) [13]

Fig. 9.9. Voltage-current characteristics of a polymer electrolyser for various operating pressures (a) and voltage-current characteristics E=f(i) for various operating temperatures of a ceramic fuel cell (b) [13]

Rozpatrując różne technologie wodorowe, na szczególną uwagę zasługują technologie integrujące technologie ogniw paliwowych i obiegów cieplnych. Można zauważyć, że ich odpowiednie połączenie pozwala uzyskać wysokie sprawności. Jest to cecha pozwalająca zbudować systemy zrównoważone pod względem efektywności ekonomicznej i ekologicznej. Przykład hybrydowego układu wykorzystania wodoru przedstawiono na rys. 9.10. Układ zbudowany jest z wysokotemperaturowego ogniwa paliwowego (SOFC) oraz obiegu turbiny gazowej z zewnętrznym dostarczaniem ciepła. Wodór do układu dostarczany jest do układu ogniwa paliwowego. Produkty spalania (para wodna) nadmiar paliwa i powietrza przepływają do wymiennika wysokotemperaturowego układu gazowego. Niewykorzystany wodór zostaje dopalony w komorze katalitycznej umożliwiając uzyskanie dodatkowych ilości ciepła wysokotemperaturowego do obiegu gazowego. Uzyskanie wysokich wartości

sprawności całkowitej możliwe jest dzięki wykorzystaniu ciepła spalin do celów ciepłowniczych lub przemysłowych.

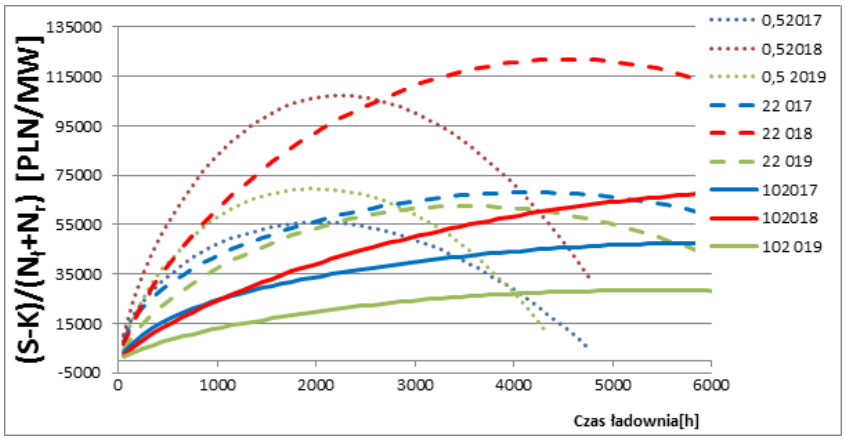


Rys. 9.10. Hybrydowy układ wytwarzania energii elektrycznej z wodoru (SOFC – ogniwo paliwowe, HTHE1, HTHE2 – wysokotemperaturowe wymienniki ciepła, C – sprężarka, T1,T2 – turbina wysokoprężna i niskoprężna, G – generator) [14]

Fig. 9.10. Hybrid system for generating electricity from hydrogen (SOFC – fuel cell, HTHE1, HTHE2 – high-temperature heat exchangers, C – compressor, T1, T2 – high-pressure and low-pressure turbine, G – generator) [14]

Istotną cechą układów z obiegiem turbiny gazowej jest określenie optymalnych wartości ciśnienia w poszczególnych częściach układu. Optymalizacja ta dotyczyć może uzyskania maksymalnej sprawności systemu (gwarantującej niskie koszty eksploatacji i niewielką emisję zanieczyszczeń) lub maksymalnej pracy jednostkowej gwarantującej najczęściej niewielkie wymiary i koszty budowy tej części systemu. Systemy tego typu mogą osiągnąć sprawność wytwarzania energii elektrycznej przekraczającą 60% i sprawność całkowitą przekraczającą 80% dla układów o mocy elektrycznej rzędu kilku megawatów, co stanowi ciekawą alternatywę dla innych technologii wykorzystania wodoru.

Istotnym elementem analizy, na który trzeba zwrócić uwagę podczas doboru parametrów systemów magazynowania energii jest stosunek mocy ładowania do mocy rozładowania. Na przykład na rys. 9.11 przdstawiono stosunek różnicy przychodów i kosztów do sumy mocy układu ładowania i rozładowania w funkcji czasu ładowania magazynu w roku. Wyniki te dotyczą układu magazynowania o sprawności magazynowania 50% funkcjonującego na rynku dnia następnego TGE. Dodatkowe parametry analiz to stosunek mocy układu ładownia i rozładowania dla układów pracujących w latach 2017–2019. Brak powtarzalności wartości znacznie utrudnia możliwości optymalnego doboru parametrów urządzeń.



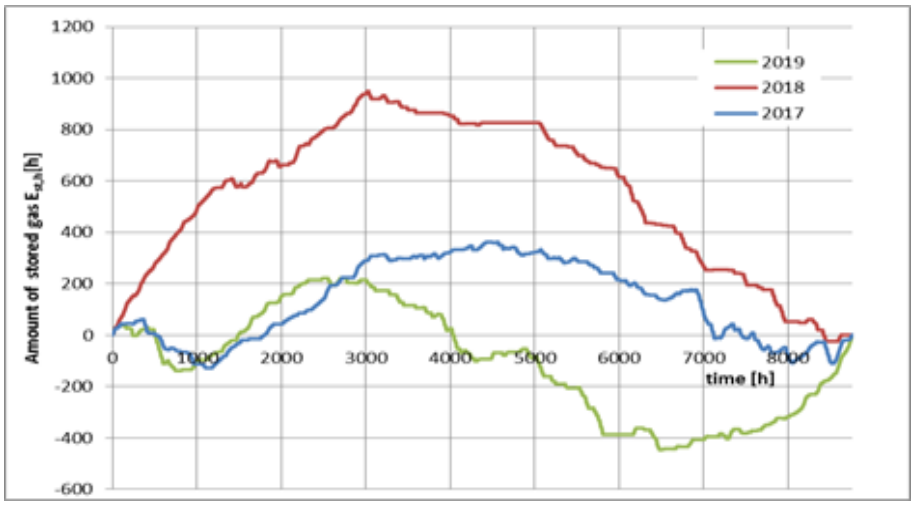
Rys. 9.11. Zależność stosunku różnicy przychodów i kosztów energii elektrycznej do wartości sumy mocy układu ładującego i rozładowującego w funkcji czasu ładowania magazynu w roku dla różnych wartości stosunku mocy rozładowania do ładowania w latach 2017–2019 [15]

Fig. 9.11. The ratio of the difference in revenues and costs of electricity to the value of the sum of the power of the charging and discharging system as a function of the storage charging time per year for different values of the discharge-to-charging power ratio in 2017–2019 [15]

Układy hybrydowe zastosowane w układach magazynowania wodoru powinny być analizowane i projektowane w połączeniu przede wszystkim z charakterystykami rynku energii. Zmiany na rynku energii mogą w istotny sposób wpływać na optymalne wartości pojemności magazynowanej oraz na optymalny stosunek mocy ładowania i rozładowania. Niepewność związaną z funkcjonowaniem układu magazynowania na rynku energii ilustruje rys. 9.12. Zobrazowano tu ilość zgromadzonej energii w postaci wodoru wyrażoną w godzinach pracy układu ładowania magazynu w czasie roku. Wykres ten powstał w trakcie badań układów wytwarzania magazynowania i wykorzystanie pracującego w oparciu o rynek dnia następnego TGE dla systemu o sprawności magazynowania 50%. Można zauważyć, że zmiany na rynku energii w latach 2017–2019 istotnie zmieniły charakter krzywej, co znacznie utrudnia analizy optymalnych rozwiązań układów z magazynowania energii.

Projektowanie zrównoważonych układów magazynowania energii z wykorzystaniem wodoru, jako nośnika energii, wymaga uwzględnienia w analizach złożonych (najczęściej wielowymiarowych) modeli matematycznych, pozwalających określić oprócz podstawowych charakterystyk, także inne efekty najczęściej związane ze stratami egzergii.

Badania układów wytwarzania i użytkowania wodoru w szczególności z wykorzystaniem układów hybrydowych wymagają, oprócz wiedzy z zakresu klasycznych technologii energetycznych, także wiedzy i wyników badań między innymi rynku energii. Badania te muszą ponadto w znacznej mierze przewidywać przyszłe regulacje prawne i zachowania konsumentów.



Rys. 9.12. Zależność ilości energii w magazynie (wyrażonej w czasie pracy układu ładowania) w roku zakładając pusty magazyn w pierwszej godzinie roku [15]

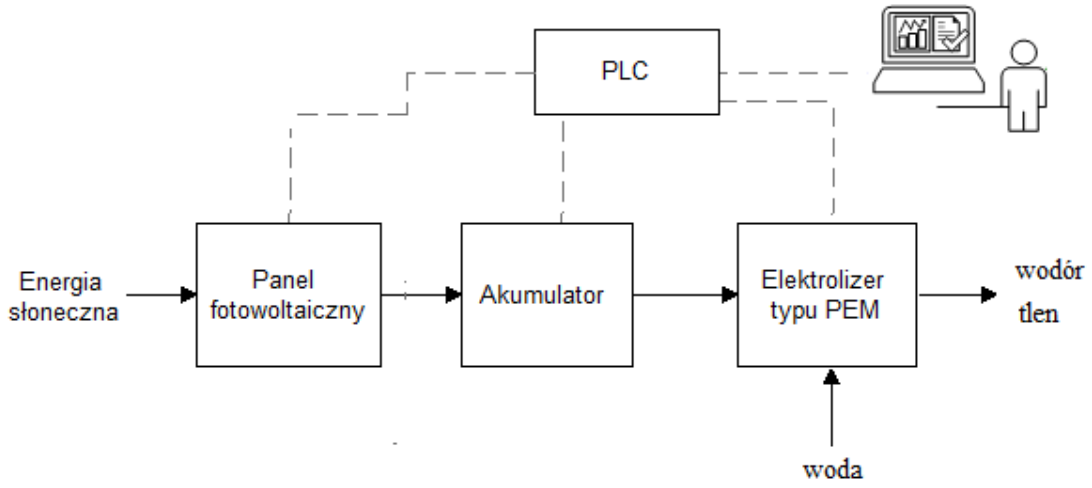
Fig. 9.12. Dependence of the amount of energy in the hydrogen storage system (expressed during the operation of the charging system) in a year, assuming an empty system in the first hour of the year [15]

9.6. Badania eksperymentalne i modelowe zeroemisyjnej produkcji wodoru

Stale rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną jest konsekwencją nie tylko dynamicznej industrializacji i rozwoju gospodarczego kraju, ale także zauważalnych zmian klimatycznych. Polska energetyka w głównej mierze opiera się na paliwach kopalnych. Ograniczone rezerwy oraz redukcja emisji gazów cieplarnianych wymuszają zwiększenie roli odnawialnych źródeł energii (OZE). Przez wzgląd na niestabilny charakter pracy OZE, który silnie zależny jest od warunków pogodowych konieczne jest magazynowanie energii, które zagwarantowałoby zwiększenie wykorzystania potencjału OZE. Jednym z istotnych kierunków dla integracji systemu energii odnawialnej i Krajowego Systemu Elektroenergetycznego jest rozwój energetyki wodorowej. Magazynowanie energii pod postacią energii chemicznej wodoru staje się strategiczne dla przyszłości energetyki i jest obecnie przedmiotem intensywnych badań w wielu krajach. Na szerokie zainteresowanie tą tematyką wpływa potencjał energetyczny wodoru oraz możliwość uzyskania zeroemisyjnych reakcji pozwalających wygenerować energię elektryczną. Aktualnie większość wodoru produkowanego na świecie pozyskiwana jest przy użyciu paliw kopalnych, jednak uniezależnienie jego wytwarzania od obróbki paliw kopalnych pozwoliłoby na szersze zastosowanie w gospodarstwach domowych czy transporcie. Wodór może być produkowany w procesie elektrolizy, gdzie dochodzi do rozbicia cząsteczki wody na

tlen i wodór pod wpływem doprowadzonej energii elektrycznej. Wykorzystanie instalacji OZE w procesie produkcji wodoru wydaje się aktualnie jedynym ekonomicznie i energetycznie uzasadnionym rozwiązaniem. Wyprodukowany wodór można wykorzystać jako nośnik energii, a następnie zużyć np. w ogniwach paliwowych, gdzie w reakcji z tlenem uwalnia znaczną ilość energii, podczas gdy jedynym produktem reakcji (poza energią elektryczną) jest woda.

Planowane jest przeprowadzenie badań na stanowisku, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 9.13. Stanowisko składa się z następujących elementów: (1) panelu PVT Ensol E-PVT 2.0, (2) elektrolizera Hy PEM XP 480 AC, (3) bufora DC – akumulatora kwasowo-ołowiowego, (4) systemu zbierania danych WAGO.

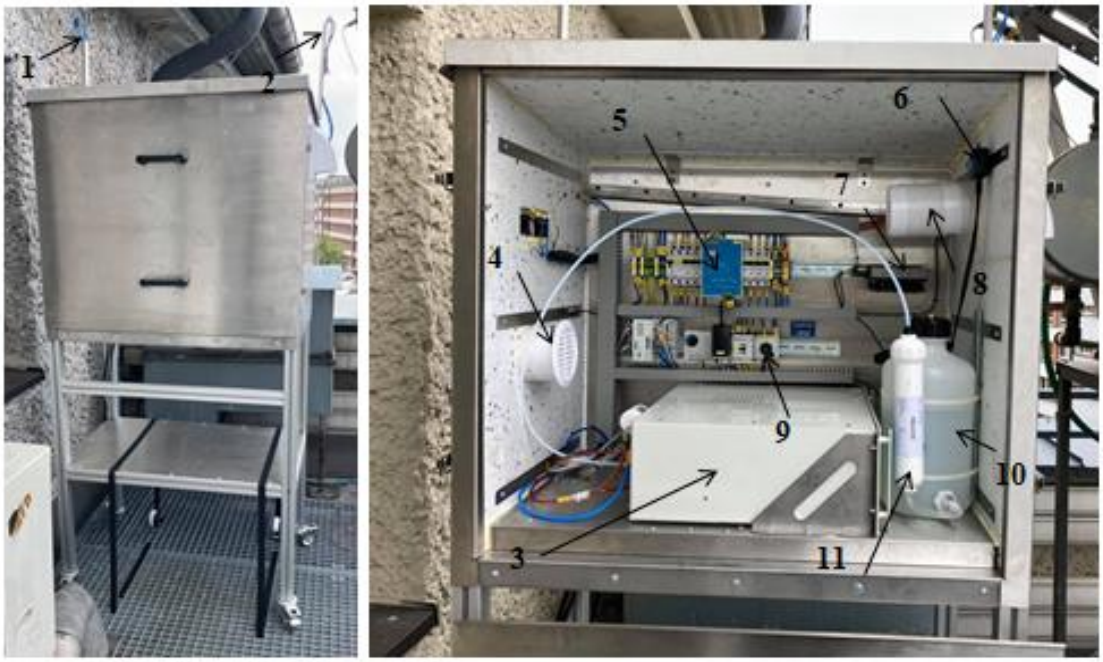


Rys. 9.13. Schemat blokowy stanowiska eksperymentalnego
Fig. 9.13. Block diagram of the experimental rig

Na rys 9.14 przedstawiono stanowisko pomiarowe będące obiektem badań. Układ pomiarowy znajduje się w zamykanej szafie pomiarowej. Zasadniczym elementem układu jest elektrolizer membranowy typu PEM (ang. *Proton Exchange Membrane*) zasilany energią elektryczną wygenerowaną przy wykorzystaniu panelu PVT, z uwzględnieniem akumulatora kwasowo-ołowiowego (stanowiącego bufor dla energii generowanej przez panel). W przyszłych badaniach zakłada się również opcjonalne wykorzystanie małej turbiny wiatrowej w celu zbadania komplementarności wykorzystywanych źródeł odnawialnych.

Celem podejmowanych badań jest wyznaczenie wartości sprawności elektrolizera zasilanego OZE oraz wyznaczenie jego charakterystyk pracy. Określony zostanie wpływ warunków atmosferycznych na łańcuch technologiczny wytwarzania wodoru odnawialnego. Pod uwagę brane będzie nasłonecznienie, prędkość i kierunek wiatru oraz ilość opadów. Dane będą pochodzić ze stacji meteorologicznej znajdującej się na

terenie laboratorium OZE Katedry Techniki Cieplnej. Analizie poddana zostanie również moc elektryczna panelu PVT, moc turbiny wiatrowej oraz parametry pracy elektrolizera (ciśnienie wodoru na wylocie, temperatura i natężenie przepływu produkowanego wodoru, prąd i napięcie elektrolizera). Uzyskane dane zostaną poddane walidacji statystycznej i wykorzystane do walidacji modelu matematycznego pracy elektrolizera opracowanego przez autorów.



Rys. 9.14. Stanowisko eksperymentalne: Z lewej – widok z zewnątrz. Z prawej – widok z wewnątrz: 1 – wylot tlenu; 2 – wylot wodoru, 3 – generator wodoru Hy–PEM XP Rack 480; 4 – wlot powietrza wentylowanego; 5 – panel sterowania; 6 – detektor wodoru; 7 – nagrzewnica powietrza; 8 – wylot powietrza wentylowanego; 9 – przełącznik zasilania; 10 – zbiornik wody dejonizowanej; 11 – dejonizator wody

Fig. 9.14. Experimental station: Left – external view. Right – internal view: 1 – oxygen outlet; 2 – hydrogen outlet, 3 – Hy–PEM XP Rack 480 hydrogen generator; 4 – vented air inlet; 5 – control panel; 6 – hydrogen detector; 7 – air heater; 8 – vented air outlet; 9 – power switch; 10 – deionized water tank; 11 – water deionizer

Proponowane badania dostarczą informacji i scenariuszy dla zrównoważonej produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych w warunkach polskich i będą odpowiedzią na postulowaną przez naukowców potrzebę prowadzenia badań w tym zakresie. Wyniki badań będą miały bezpośredni wpływ na rozwój dyscyplin energetycznych w kontekście produkcji paliwa wodorowego, w procesie magazynowania energii oraz w aspekcie wykorzystania OZE do celów produkcyjnych. Pośrednio wyniki projektu będą miały wpływ na ochronę środowiska, gdyż produkcja wodoru wpisuje się w proces dekarbonizacji sektora energetycznego, a także wzmocnią proekologiczną ideę produkcji energii z odnawialnych źródeł energii. Otrzymane wnioski pozwolą

udoskonalić proces elektrolizy hybrydowej opartej na zasilaniu źródłami odnawialnymi.

9.7. Magazynowanie energii w postaci odnawialnego gazu ziemnego wytwarzanego w procesie metanizacji

Technologia power-to-gas (PtG) umożliwia magazynowanie nadwyżek energii w postaci paliw gazowych. Konwersja energii elektrycznej na energię chemiczną zachodzi w procesie elektrolizy wody, której produktami są wodór i tlen w postaci gazowej [16]. Wodór powstały w procesie elektrolizy można zmagazynować, a następnie wykorzystać do produkcji energii elektrycznej oraz ciepła. Kolejnym etapem procesu PtG może być dalsza konwersja wodoru w procesie metanizacji, co może być uzasadnione wieloma komplikacjami związanymi z buforowaniem, transportem i wykorzystywaniem czystego wodoru. Paliwo w postaci syntetycznego gazu ziemnego (Synthetic Natural Gas, SNG) wytworzone w procesie metanizacji ma skład zbliżony do konwencjonalnego gazu ziemnego, dzięki czemu można je zatłaczać do sieci gazowej bez ograniczeń lub wykorzystać bezpośrednio do wytwarzania energii elektrycznej. Metan może być wytworzony na bazie wodoru w efekcie następujących reakcji (9.1) i (9.2):

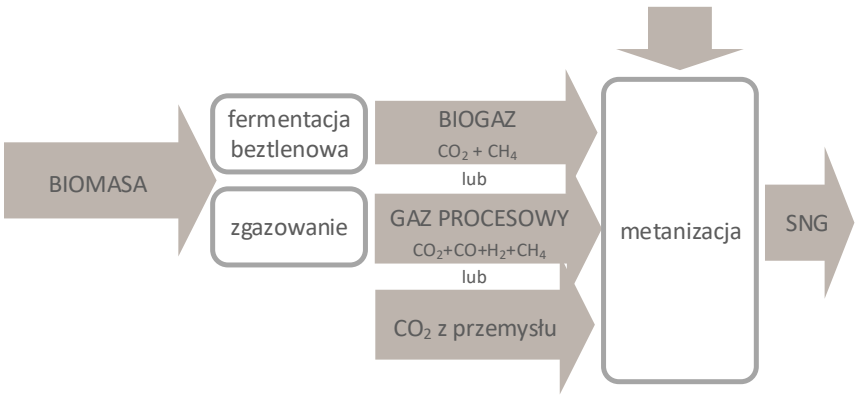
$$\mathrm{CO_2} + 4\mathrm{H_2} \leftrightarrow \mathrm{CH_4} + 2\mathrm{H_2O}, \tag{9.1}$$

$$\mathrm{CO} + 3\mathrm{H_2} \leftrightarrow \mathrm{CH_4} + \mathrm{H_2O}. \tag{9.2}$$

W procesie metanizacji dwutlenek węgla (9.1) i/lub tlenek węgla (9.2) reagują z wodorem, tworząc metan i wodę. Istnieją dwie technologie przekształcania wodoru i tlenków węgla w metan – metanizacja biologiczna i termochemiczna (katalityczna) [17]. Technologie te różnią się zastosowanymi katalizatorami reakcji i warunkami procesu. W przypadku metanizacji biologicznej do katalizowania reakcji metanizacji wykorzystywane są mikroorganizmy metanogenne. Reaktory biologiczne, aby uzyskać optymalne warunki wzrostu dla tych mikroorganizmów, pracują w temperaturach od 35°C do 65°C i pod ciśnieniem od 1 do 15 bar [17]. Reakcja termochemicznej metanizacji jest silnie egzotermiczna, dlatego równowaga termodynamiczna przesuwa reakcję w kierunku produktów o niskiej temperaturze i wysokim ciśnieniu [18]. Jednak wysokie ciśnienie reakcji jest nieekonomiczne, a niska temperatura reakcji wymaga aktywnego katalizatora, co jest jednym z wyzwań katalitycznej reakcji metanizacji. Wybór odpowiedniego katalizatora zależy nie tylko od ciśnienia pracy reaktora, ale

również od temperatury, która nie może być niższa niż temperatura aktywacji katalizatora.

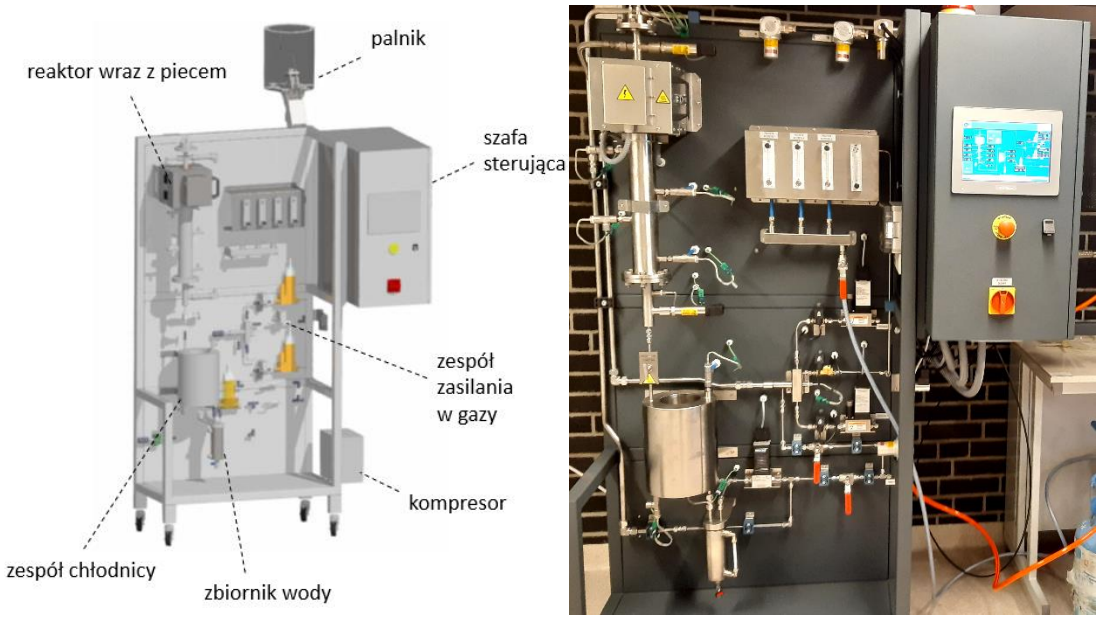
Przetwarzanie strumieni odpadowych bogatych w CO_2 na paliwa syntetyczne przyczynia się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i rozwoju dywersyfikacji paliw. Istnieją różne sposoby produkcji SNG pod względem używanego surowca węglowego. Najpopularniejszą metodą jest stosowanie paliw stałych, w tym węgla i biomasy [19]. Aby uzyskać produkt o niskim śladzie węglowym, niezbędne jest wykorzystanie biomasy. Produkcja biometanu z biomasy jako surowca węglowego do procesu metanizacji pozwala na zamknięty obieg węgla, ponieważ spalanie SNG ze źródeł biogennych powoduje emisję CO_2 równą pochłoniętego CO_2 podczas wzrostu biomasy [20]. Zastosowane technologie produkcji tlenków węgla do procesu metanizacji mogą różnić się od rodzaju rozpatrywanego rodzaju biomasy. Jednym ze sposobów pozyskiwania tlenków węgla jest beztlenowa fermentacja biomasy, w wyniku której powstaje biogaz złożony głównie z dwutlenku węgla i metanu. Następnie biogaz może być dalej uszlachetniany i poddawany procesowi metanizacji, lub też dwutlenek węgla może zostać odseparowany i wykorzystany jako surowiec węglowy do procesu [20]. Innym sposobem jest zgazowanie, czyli proces termochemiczny, który zapewnia uzyskanie gazu procesowego składającego się głównie z wodoru, tlenku węgla, dwutlenku węgla, metanu, pary wodnej i azotu. Inną opcją uzyskania surowca węgla do procesu metanizacji jest rozważenie dwutlenku węgla pochodzącego z odseparowania gazów odpadowych z instalacji przemysłowych z wykorzystaniem technologii separacji dwutlenku węgla. Rysunek 9.15 przedstawia możliwe metody pozyskiwania źródła węglowego do produkcji SNG.



Rys. 9.15. Potencjalne źródła strumieni bogatych w CO_2, które mogą stanowić wsad węglowy do procesu metanizacji

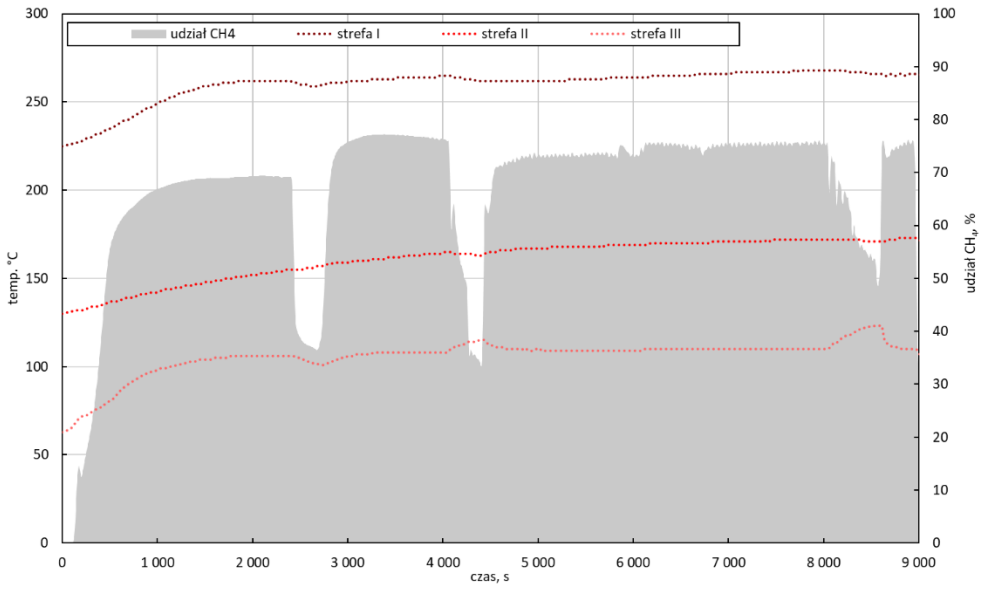
Fig. 9.15. Potential sources of CO_2-rich streams that may be used as a carbon feedstock for the methanation process

Do badań eksperymentalnych zaplanowanych przez Zespół, w skład którego wchodzą pracownicy Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych, zaprojektowano stanowisko generatora metanu (rys. 9.16). Reagentami procesu są dwutlenek węgla i wodór dostarczane z butli. Do przepłukiwania instalacji używany jest azot. Gaz procesowy ogrzewany jest w piecu przed wlotem do reaktora. W reaktorze zainstalowano trzy termopary mierzące temperaturę na trzech poziomach wysokości złoża katalizatora. Reaktor jest chłodzony powietrzem. Następnie zabudowywana jest chłodnica podłączona do zbiornika wody. Całość podłączona jest do palnika, w którym spalany jest wytwarzany gaz. Obecnie instalacja pozwala uzyskiwać ciśnienie do 10 bar i temperaturę do 300°C. Maksymalne przepływy CO_2 i H_2 to odpowiednio 2 i 8 l/min.



Rys. 9.16. Instalacja generatora metanu
Fig. 9.16. Methane generator installation

Obecnie używany katalizator – gęsto usypany proszek niklowy, charakteryzuje się dużą bezwładnością cieplną, co przekłada się na czasochłonne uzyskanie odpowiedniej temperatury w całej objętości reaktora. W związku z tym, aby przyspieszyć proces i poprawić rozkład temperatury w reaktorze, opracowano system dodatkowego ogrzewania reaktora. Maty grzejne zostały zainstalowane na zewnątrz reaktora, a następnie zaizolowane. Koncepcja ta miała na celu zmniejszenie strat ciepła do otoczenia. Dodatkowo przed wlotem do reaktora zastosowano kabel grzejny. Na ten moment instalacja jest w fazie testowej. Na rys. 9.17 przedstawiono wyniki serii pomiarowej wykonanej dla ciśnienia równego 5 bar. Udział metanu w wygenerowanym gazie wynosił maksymalnie 75%.



Rys. 9.17. Wyniki serii pomiarowej procesu metanizacji wykonanej dla ciśnienia równego 5 bar
Fig. 9.17. Results of the measurement series of the methanation process performed for a pressure of 5 bar

Obecnie planuje się modernizację stanowiska oraz dokupienie dodatkowego reaktora z systemem ogrzewania zamontowanym na całej długości rury reaktora w celu równomiernego ogrzewania złoża. Planuje się również zwiększenie strumieni gazów.

W ramach realizowanych przez zespół badawczy prac prowadzone są szerokie analizy techno-ekonomiczne dotyczące produkcji biometanu, w szczególności zaś rozwiązań bazujących na wykorzystaniu procesu metanizacji, np. [21–23]. W realizowanym projekcie jako źródło surowca węgla zakłada się wykorzystanie procesu zgazowania biomasy, co pozwala uzyskać syntetyczny gaz ziemny o bardzo niskim śladzie węglowym. Gaz ten ma szerokie spektrum zastosowań w istniejących i przyszłych układach generacji energii, ale także w transporcie czy przemyśle chemicznym. Pozwala też rozszerzyć zakres wykorzystania wodoru powstającego w procesie elektrolizy o bardziej elastyczne rozwiązania.

9.8. Zagrożenia związane z transportem i magazynowaniem wodoru oraz paliw zawierających wodór

W trakcie produkcji, magazynowania, transportu, jak i energetycznego wykorzystywania gazów o wysokim udziale wodoru lub czystego wodoru występuje zawsze ryzyko pojawienia się awarii, co stanowi potencjalne zagrożenie dla ludzi

i otoczenia. Niekontrolowane uwolnienie takich gazów może prowadzić do zdarzeń niebezpiecznych w postaci pożaru, wybuchu oraz transportu w atmosferze chmury o toksycznym stężeniu. W procesach wykorzystujących instalacje wytwarzania, magazynowania i transportu tych substancji pojawić się mogą również zagrożenia związane np. z oddziaływaniem czynników chorobotwórczych. Ponadto należy uwzględnić zagrożenia mechaniczne (związane np. z obrotowymi maszynami) oraz zagrożenia związane z instalacją elektryczną. Do powstania tych zagrożeń przyczyniają się między innymi błędy popełniane na etapie projektowania, obsługi, zarządzania i kontroli [24, 25].

Awaria skutkująca niekontrolowanym uwolnieniem wodoru lub paliw zawierających wodór (gaz syntezowy, mieszanina wodór/metan itd.) w zależności od przebiegu zdarzenia może skutkować trzema podstawowymi sytuacjami. Są to sytuacje, w których nie nastąpi zapłon, bądź nastąpi natychmiastowy lub opóźniony zapłon wodoru/paliwa [25, 26]. Zdarzenia awaryjne związane z uwolnieniem substancji niebezpiecznych generalnie można więc uszeregować w dwóch podstawowych grupach. Pierwsza z nich to zdarzenia prowadzące do pożarów i wybuchów, druga – zdarzenia prowadzące do skażenia. Należy również pamiętać o możliwości wystąpienia zdarzenia awaryjnego związanego z przechowywaniem substancji, np. wodoru, w niskich temperaturach. Jest to możliwość bezpośredniego zetknięcia z zimnym strumieniem uwolnionej substancji [25, 26].

Pożar to niekontrolowany w czasie i przestrzeni proces spalania substancji. O jego wystąpieniu decyduje pojawienie się trzech podstawowych czynników tworzących tzw. trójkąt pożarowy (przekroczenie wartości dolnej granicy palności dla substancji palnej, przekroczenie minimalnego stężenia dla utleniacza oraz źródło zapłonu) [25–28].

W przypadku analiz zagrożeń pożarowych dla awarii instalacji przemysłowych, w tym służących do magazynowania i transportu paliw, rozróżnia się następujące kategorie pożarów:

- pożar powierzchniowy (*pool fire*),
- pożar strumieniowy (*jet fire*),
- kula ognista (*fire ball*),
- BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*),
- pożar błyskawiczny (*flash fire*).

Wszystkie ww. charakteryzują się różnym przebiegiem, dotyczą substancji o różnym stanie skupienia oraz różnych instalacji (zbiorników, rurociągów). Jednakże analizując ich konsekwencje należy zwrócić uwagę na zagrożenie dla ludzi,

infrastruktury oraz środowiska związane z bezpośrednim oddziaływaniem powstałego płomienia oraz z generowanym z pożaru strumieniem cieplnym [25–28].

Z kolei wybuch to mająca gwałtowny przebieg reakcja utleniania lub rozkładu wywołująca wzrost temperatury i/lub ciśnienia. W przypadku wybuchu oprócz parametrów tworzących trójkąt pożarowy są dwa dodatkowe czynniki warunkujące wystąpienie wybuchu, tj. ograniczenie (zamknięcie) przestrzeni, w której dochodzi do procesu spalania oraz wymieszanie substancji palnej i czynnika utleniającego w dużej objętości [25, 26, 28].

W ocenie zagrożeń związanych z wystąpieniem awarii instalacji przemysłowych, w tym służących do magazynowania i transportu paliw, wyróżnia się przede wszystkim wybuch w przestrzeni ograniczonej/nieograniczonej *(Vapour Cloud Explosion/ Unconfined Vapour Cloud Explosion)*. Jest to spalanie mieszaniny palnej zachodzące w przestrzeni ograniczonej/nieograniczonej najczęściej zapoczątkowane wypływem gazu (przegrzanej cieczy) ze zbiornika ciśnieniowego [25, 26, 28].

Analizując konsekwencje wybuchu dla ludzi i otoczenia należy zwrócić uwagę na bezpośrednie oddziaływanie generowanej fali ciśnieniowej oraz latające odłamki np. instalacji technicznej rozerwanej na skutek wybuchu [28]. W analizie zagrożeń w procesach magazynowania i transportu paliw należy również uwzględnić proces transportu chmury uwolnionej substancji. O charakterze tego zjawiska decydują między innymi właściwości fizykochemiczne tej substancji oraz chemiczne i fizyczne zmiany występujące w trakcie transportu, tj. warunki topograficzne (ukształtowanie terenu, jego nachylenie oraz zagospodarowanie przestrzenne) i meteorologiczne (wiatr oraz stabilność pogodowa). W przypadku zagadnień związanych z awariami instalacji przemysłowych istotnym czynnikiem wpływającym na poziom zagrożenia związanego z uwolnieniem substancji niebezpiecznych jest również rodzaj uwolnienia. Może ono przybrać charakter uwolnienia ciągłego lub natychmiastowego (chwilowego) [29].

Jak już wspomniano na przebieg awarii zapoczątkowanej niekontrolowanym uwolnieniem substancji, w tym wodoru i paliw zawierających wodór, wpływ będą miały właściwości fizykochemiczne tych substancji, takie jak np. granica palności, minimalna energia zapłonu czy też temperatura samozapłonu. Istotnymi czynnikami warunkującymi przebieg awarii będą również parametry pracy (ciśnienie, temperatura) instalacji oraz jej geometria.

Poniżej przedstawiono przykładowe strefy zagrożenia dla ludzi i otoczenia związane z niekontrolowanym uwolnieniem oraz zapłonem wodoru, a także paliw zawierających wodór (gaz syntezowy, mieszanina wodór/metan).

Wodór to bezbarwny, bezwonny gaz charakteryzujący się najmniejszą masą atomową. Wodór jest gazem łatwopalnym. Charakteryzuje się znacznie wyższą wartością ciepła spalania niż inne paliwa gazowe (np. metan) oraz znacznie niższą minimalną energią zapłonu. Ma również szeroki zakres palności. Są więc to wielkości znacząco wpływające na bezpieczeństwo jego użytkowania, magazynowania i transportu.

Realizując wszystkie procesy związane z wykorzystywaniem wodoru należy pamiętać, że nierozerwalnie wiążą się one ze sposobem i kosztem jego wytwarzania. Znaczącymi problemami w przesyłaniu i magazynowaniu tego gazu są bowiem kwestie utrzymania czystości wodoru, zapobiegania jego wyciekom, minimalizacji kosztów oraz zapewnienie bezpieczeństwa.

Na wstępie realizacji wszystkich założeń przyszłościowej gospodarki wodorowej stoi więc zarówno rozwinięcie, jak i budowa odpowiedniej infrastruktury. Każdy z jej elementów powinien spełniać odpowiednie warunki techniczne i ekonomiczne. Każdy z nich stanowi również źródło potencjalnego zagrożenia dla ludzi i otoczenia, szczególnie w przypadku awarii i niekontrolowanego uwolnienia się wodoru do atmosfery i powinien uwzględniać także aspekty bezpieczeństwa [24, 30, 31]. Na rys. 9.18 i 9.19 przedstawiono przykładowe strefy zagrożenia związane z pożarem oraz wybuchem wodoru uwolnionego z rurociągów przesyłowych oraz zbiorników magazynowych [32]. W analizowanych przypadkach uwzględniono – dla pożaru – oddziaływanie strumienia ciepła na poziomie [28]:

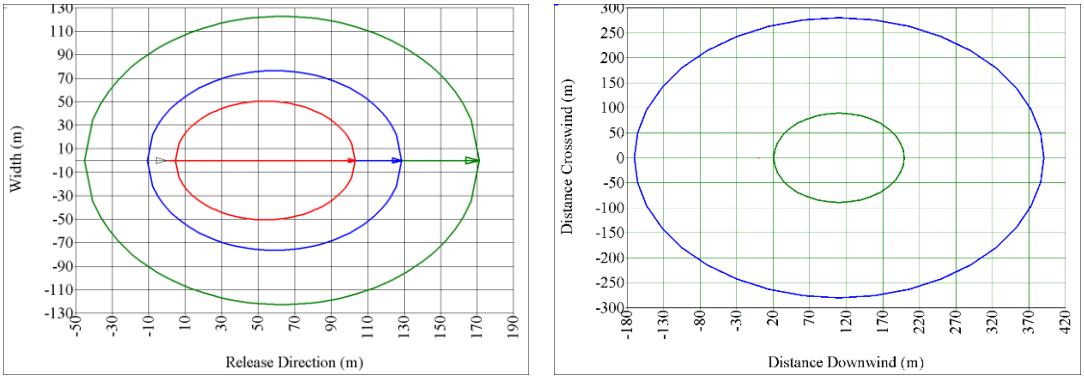
- 25 kW/m^2 (wartość, która powoduje 100% śmiertelności w ciągu 1 minuty) – kolor czerwony,
- 12,5 kW/m^2 (wartość, która powoduje poparzenia I stopnia po 10 sekundach) – kolor niebieski,
- 5 kW/m^2 (wartość, która powoduje ból przy 20-sekundowej ekspozycji) – kolor zielony,

oraz – dla wybuchu – oddziaływanie fali ciśnieniowej na poziomie:

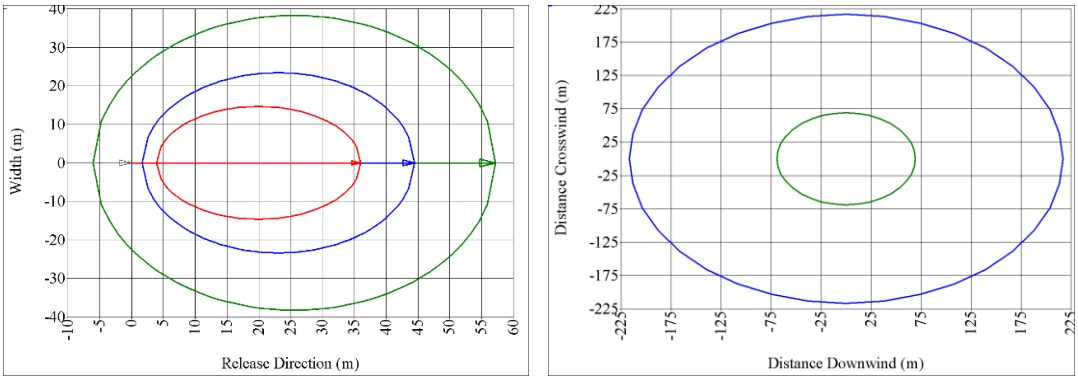
- 199,8 kPa (wartość, która powoduje 99% zgonów wskutek uszkodzenia płuc) – kolor czerwony,
- 13,8 kPa (wartość, która powoduje częściowe zawalenie się ścian i dachów budynków oraz uszkodzenie błony bębenkowej ucha człowieka) – kolor niebieski,
- 2,7 kPa (wartość niestwarzająca zagrożenia dla budynku) – kolor zielony.

Istotnym problemem badawczym związanym z ciągłym rozwojem zagadnień wykorzystania wodoru i budowy infrastruktury wodorowej jest również kwestia wprowadzenia wodoru do istniejącej sieci gazu ziemnego i transport mieszaniny.

Prowadzone dotychczas badania wskazują, że przy stosunkowo niskiej koncentracji wodoru jego dodatek do sieci przesyłowej może wymagać jedynie niewielkich modyfikacji w konstrukcji i eksploatacji poszczególnych elementów i rurociągów. Przykładowo w Holandii dopuszczalne stężenie wodoru w sieci wynosi 2%, a w Niemczech – 5%.



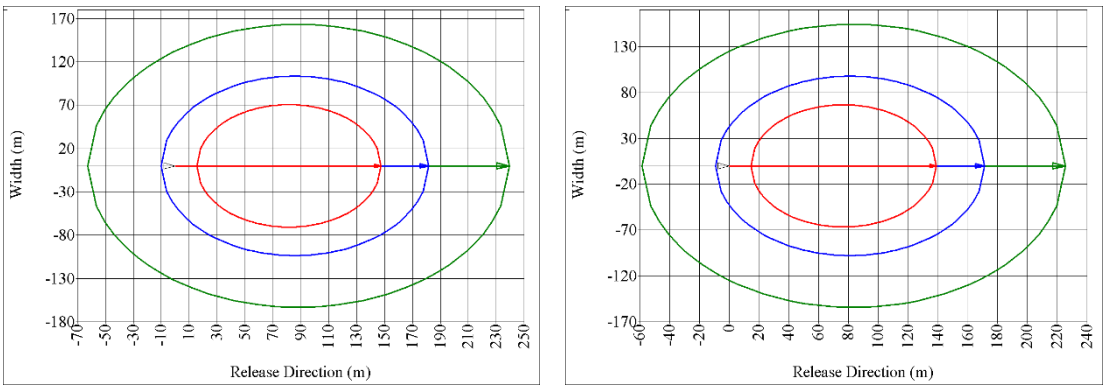
Rys. 9.18. Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego wodoru (lewa strona) oraz dla wybuchu wodoru (prawa strona), rurociąg, p=10 MPa, L=10 km, d=200 mm
Fig. 9.18. Hazard zones for hydrogen jet fire (left side) and for hydrogen explosion (right side), pipeline, p=10 MPa, L=10 km, d=200 mm



Rys. 9.19. Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego wodoru (lewa strona) oraz dla wybuchu wodoru (prawa strona), zbiornik, p=5 MPa, V=50 m^3
Fig. 9.19. Hazard zones for hydrogen jet fire (left side) and for hydrogen explosion (right side), tank, p=5 MPa, V=50 m^3

Niezależnie od wyboru scenariusza działania, problem dodatku wodoru do gazu ziemnego wymaga więc przeanalizowania wielu zagadnień zarówno technologicznych, jak i tych związanych z bezpieczeństwem. Zjawisko kruchości wodorowej związane z występowaniem wodoru w rurociągu może bowiem przyczynić się do wzrostu częstotliwości wystąpienia awarii rurociągu w porównaniu do częstotliwości awarii w przypadku przesyłu tylko i wyłącznie gazu ziemnego (metanu) [33–36]. Na rys. 9.20 przedstawiono przykładowe strefy zagrożenia związane z pożarem metanu oraz mieszaniny metan/wodór w stosunku 80/20% [32]. Przyjęte

poziomy zagrożenia odnoszą się do strumieni ciepła generowanych z pożaru na poziomie 25, 12.5 i 5 kW/m^2 (kolor czerwony, niebieski i zielony).

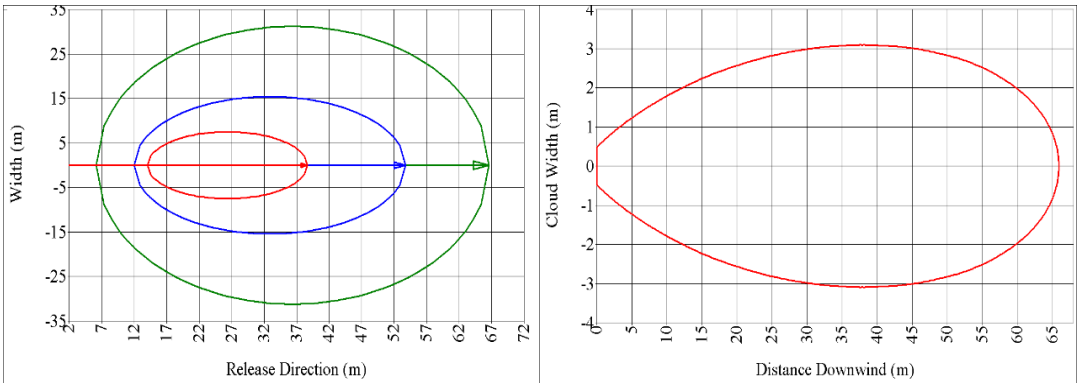


Rys. 9.20. Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego metanu (lewa strona) oraz mieszaniny metan/wodór (prawa strona), rurociąg, p=10 MPa, L=10 km, d=200 mm
Fig. 9.20. Hazard zones for hydrogen jet fire (left side) and for methane/hydrogen mixtures jet fire (right side), pipeline, p=10 MPa, L=10 km, d=200 mm

Gazy syntezowe, stanowiące także nośniki wodoru, po wytworzeniu najczęściej są przekazywane bezpośrednio do instalacji użytkowania. Ten fakt powoduje, że magazynowanie i transport tych gazów nie są często praktykowane, co też przekłada się na potrzebę prowadzenia badań nad bezpieczeństwem ich prowadzenia. Techniczna realizacja, atrakcyjność ekonomiczna i bezpieczeństwo użytkowania instalacji gazu syntezowego, zależą przede wszystkim od jego właściwości, określonych poprzez jego skład. Uwolniony w trakcie awarii instalacji gaz syntezowy może bowiem, ze względu między innymi na występowanie w jego składzie wodoru i tlenku węgla, powodować zagrożenie pożarem lub wybuchem oraz zagrożenie toksyczne [37–39]. Na rys. 9.21 przedstawiono przykładowe strefy zagrożenia związane z pożarem oraz toksycznością gazu syntezowego o składzie CO – 22%, CO_2 – 30%, H_2 – 38%, CH_4 – 9,5%, N_2 – 0,5% (uzyskanego w procesie zgazowania węgla) [32]. W analizowanych przypadkach uwzględniono te same (jak dla wodoru) poziomy szkodliwe w przypadku pożaru i oddziaływania strumienia ciepła oraz poziom stężenia toksycznego powodującego śmierć ludzi na skutek występowania w składzie syngazu tlenku węgla.

Wykorzystanie wodoru i alternatywnych paliw zawierających wodór może znacząco przyczynić się do rozwoju technologii wytwarzania energii w sposób czysty i bezemisyjny. Niewątpliwe uzyskiwane w procesach konwersji i gazyfikacji substancje posiadają wiele zalet determinujących ich użytkowanie w sposób ekonomiczny i ekologiczny, a także pozwalający na ciągły rozwój technologii. Budowa i projektowanie nowych instalacji technicznych wykorzystujących wodór

i paliwa zawierające wodór powinny jednak również uwzględniać prace badawcze dotyczące zagadnień bezpieczeństwa. Właściwości fizykochemiczne tych substancji mogą bowiem w przypadku niekontrolowanego uwolnienia przyczyniać się do powstania niebezpiecznych dla ludzi i otoczenia zjawisk w postaci pożarów, wybuchów i skażeń. Przedstawione przykładowe analizy wskazują, że poziom tego zagrożenia zależny będzie przede wszystkim od właściwości substancji, ale również warunków pracy i wielkości instalacji.



Rys. 9.21. Strefy zagrożenia dla pożaru strumieniowego gazu syntezowego (lewa strona) oraz strefa zagrożenia związana z toksycznym oddziaływaniem stężenia gazu syntezowego (prawa strona), rurociąg, p=0,17 MPa, L=1 km, d=400 mm

Fig. 9.21. Hazard zones for synthetic gas jet fire (left side) and dazard zone related to the toxic effect of the synthesis gas concentration (right side), pipeline, p=0,17 MPa, L=1 km, d=400 mm

Bibliografia

1. Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking: Commercialisation of energy storage in European market to 2030 and beyond. Final report, 2015.
2. Projekt Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.
3. Bartela Ł., Lutyński M., Smolnik G., Waniczek S.: Underground storage of compressed air, in particular in the post-mining mine shaft. EPO Patent application, No 20000302.8, 2020.
4. Bartela Ł., Chmielniak T., Kotowicz J.: Sposób integracji systemu magazynowania energii w wodorze oraz sprężonym powietrzu. Patent UPRP, nr 235565, 2018.
5. Bartela Ł., Skorek-Osikowska A.: System i sposób magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze. Zgłoszenie patentowe w UPRP, nr P.433271, 2020.
6. Bartela Ł., Skorek-Osikowska A., Dykas S.: System i sposób magazynowania energii w ciekłym dwutlenku węgla. Zgłoszenie patentowe w UPRP, nr P.433012, 2020.
7. Bartela Ł., Brzuszkiewicz M., Waniczek S., Stanek B., Ochmann J.: System izobarycznych zbiorników dwutlenku węgla dla systemów magazynowania energii. Zgłoszenie patentowe w UPRP, nr P.437305, 2021.
8. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. [online] www.ise.fraunhofer.de
9. Sarbu I., Sebarchievici C.: A comprehensive review of thermal energy storage. Sustainability, 10, 2018, 191.

10. Bartela, Ł.: A hybrid energy storage system using compressed air and hydrogen as the energy carrier. Energy, 196, 2020, 117088.
11. Kosman W., Rusin A.: The Application of Molten Salt Energy Storage to Advance the Transition from Coal to Green Energy Power Systems. Energies, 13, 2020, 2222.
12. Rusin A., Nowak G., Łukowicz H., Kosman W., Chmielniak T., Kaczorowski M.: Selecting optimal conditions for the turbine warm and hot start-up. Energy, 214, 2021, 118836.
13. Chmielniak T., Remiorz L.: Entropy analysis of hydrogen production in electrolytic processes. Energy, 211, 2020, 118468.
14. Lepszy S., Chmielniak T.: Analysis of fuel cell – gas turbine hybrid cycles. Proceedings of the 6th International Conference Contemporary Problems of Thermal Engineering. CPOTE 2020, Poland, 21–24 September 2020. Ed. by Wojciech Stanek, Paweł Gładysz, Sebastian Werle, Lucyna Czarnowska.
15. Lepszy S.: Analysis of the storage capacity and charging and discharging power in energy storage systems based on historical data on the day-ahead energy market in Poland. Energy, 213, 2020, 118815.
16. Jentscha M., Trosta T., Sternerb M.: Optimal Use of Power-to-Gas Energy Storage Systems in an 85% Renewable Energy Scenario. Energy Procedia, 46, 2014, p. 254–261.
17. Thema M., Weidlich T., Hörl M., Bellack A., Mörs F., Hackl F., Kohlmayer M., Gleich J., Stabenau C., Trabold T., Neubert M., Ortloff F., Brotsack R., Schmack D., Huber H., Hafenbradl D., Karl J., Sterner M.: Biological CO_2-Methanation: An Approach to Standardization. Energies, 12(9), 2019, 1670, https://doi.org/10.3390/en12091670.
18. Ghaiba K., Ben-Faresb F.-Z.: Power-to-Methane: A state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 2018, p. 433–446.
19. Kopyscinski J., Schildhauer T.J., Biollaz S.M.A.: Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009. Fuel, 89(8), 2010, p. 1763–1783, ISSN 0016-2361, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.027.
20. Zhang X., Witte J., Schildhauer T, Bauera C.: Life cycle assessment of power-to-gas with biogas as the carbon source. Sustainable Energy Fuels, 4, 2020, p. 1427–1436, doi.org/10.1039/C9SE00986H.
21. Skorek-Osikowska A.: Thermodynamic and Environmental Study on Synthetic Natural Gas Production in Power to Gas Approaches Involving Biomass Gasification and Anaerobic Digestion. International Journal of Hydrogen Energy, 2021. In press. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.002
22. Katla D., Bartela Ł., Skorek-Osikowska A.: Evaluation of electricity generation subsystem of power-to-gas-to-power unit using gas expander and heat recovery steam generator. Energy, 212, 2020, 118600.
23. Uchman W., Skorek-Osikowska A., Jurczyk M., Węcel D.: The analysis of dynamic operation of power-to-SNG system with hydrogen generator powered with renewable energy, hydrogen storage and methanation unit. Energy, 213, 2020, 118802.
24. Rusin A., Stolecka K.: Hazards associated with hydrogen infrastructure. Journal of Power Technologies, 97(2), 2017, p. 153–157.
25. Borysiewicz M., Potempski S.: Ryzyko poważnych awarii rurociągów przesyłowych substancji niebezpiecznych: metody oceny, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2002.
26. Lesiak P., Porowski R.: Ocena skutków awarii przemysłowej w instalacjach procesowych, w tym efektu domino, część 1. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 3, 2012, s. 13–26.
27. Yellow Book, Ed. C.J.H. Bosch, R.A.P.M. Weterings, Haque 2005.

28. LaChance J., Tchouvelev A., Engebo A.: Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. International Journal of Hydrogen Energy, 36, 2011, p. 2381–238.
29. UDM Theory Document, DNV Software, 2009.
30. Rusin A., Stolecka K.: Modelling the effects of failure of pipelines transporting hydrogen. Chemical and Process Engineering, 32, 2011, p. 117–134.
31. Surygała J.: Wodór jako paliwo, WNT, Warszawa 2008.
32. PHAST v6.7, DNV Software.
33. Castagnet S., Grandidier J.C., Comyn M., Benoit G.: Effect of long-term hydrogen exposure on the mechanical properties of polymers used for pipes and tested in pressurized hydrogen. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 89, 2012, p. 203–209.
34. Chaczykowski M., Osiadacz A.J.: Technologie Power-to-Gas w aspekcie współpracy z systemami gazowniczymi. VI Konferencja Naukowo-Techniczna Energetyka Gazowa, Zawiercie 2016.
35. Witkowski A., Rusin A., Majkut M., Stolecka K.: Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 166, 2018, p. 24–34.
36. Stolecka K.: Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network. Journal of Power Technologies, 98(4), 2018, p. 329–335.
37. Stolecka K., Rusin A.: Analysis of hazards related to syngas production and transport. Renewable Energy, 146, 2020, p. 2535–2555.
38. Pierorazio A.J., Baqer Q.A.: Hazards for Syngas Fires and Explosions, Process Safety Progress, 29(4), 2010, p. 288–292.
39. Pańczyk M., Borowiecki T.: Otrzymywanie i zastosowanie gazu syntezowego [Syngas production and application], Adsorbenty i katalizatory: wybrane technologie a środowisko [Adsorbents and catalysts: selected technologies vs. the environment], Ryczkowski J. (ed.), The University of Rzeszów, 2012, p. 275–287.

10. KSZTAŁTOWANIE ŚRODOWISKA WEWNĘTRZNEGO I INTELIGENTNE BUDYNKI

10.1. Wprowadzenie

W Europie budynki odpowiadają za 40% zużycia energii i 36% emisji gazów cieplarnianych. Kluczowymi elementami unijnego planu działania do 2050 r. są niskoemisyjna transformacja sektora budowlanego i modernizacja istniejących zasobów budowlanych. Modernizacja budynków, poza poprawą światowego bilansu energetycznego, może mieć również kluczowe znaczenie dla użytkowników budynków. Ludzie większość czasu (około 90% doby) spędzają w pomieszczeniach zamkniętych, których środowisko wpływa zarówno na komfort, zdrowie oraz wydajność pracy, jak i na zużycie energii oraz środowisko naturalne [1–4].

Na środowisko wewnętrzne składa się jakość powietrza wewnątrz budynku, komfort cieplny, komfort akustyczny i wizualny w połączeniu z jakością oświetlenia. Utrzymanie komfortowych warunków w pomieszczeniach możliwe jest dzięki zastosowaniu odpowiednich systemów technicznego wyposażenia budynku, głównie ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC, ang. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*). Wybór konkretnego rozwiązania oraz sposób jego eksploatacji rzutuje w praktyce na zużycie energii przez budynek oraz jakość środowiska wewnętrznego. Szacuje się, że systemy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji odpowiadają za 50–70% zużycia energii w zależności od klimatu. Pomimo tak dużych nakładów energii, ponad połowa użytkowników budynków nie jest zadowolona z jakości środowiska wewnętrznego [5, 6]. Dlatego należy poszukiwać nowych rozwiązań w zakresie technicznego wyposażenia budynków, które poprawią komfort wizualny, akustyczny i cieplny, a jednocześnie będą miały wpływ na poprawę efektywności energetycznej budynków. Kluczowe znaczenie mają w tym zakresie urządzenia, które odpowiadają za sterowanie różnego typu instalacjami znajdującymi się w budynku oraz jego otoczeniu. Nowoczesne technologie pozwalają opracować tzw. inteligentny budynek, czyli zintegrowany system zarządzania, który pozwala optymalizować pracę większości urządzeń elektrycznych. Podnosi to komfort życia, poziom

bezpieczeństwa, ale przede wszystkim poprawia efektywność energetyczną eksploatowanego budynku.

Prace prowadzone w tym zakresie obejmują badania mikrobiologicznych i chemicznych zanieczyszczeń powietrza, modelowanie komfortu cieplnego i hałasu, doskonalenie systemów HVAC i ich automatyki na potrzeby optymalnego sterowania energią i kształtowania mikroklimatu w pomieszczeniach. W rozdziale zaprezentowano wyniki wybranych prac oraz plany badawcze na przyszłość.

10.2. Jakość powietrza

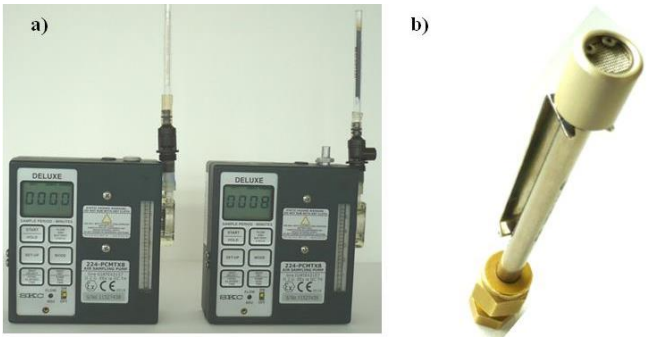
10.2.1. Zanieczyszczenia chemiczne

Jakość powietrza w środowisku wewnętrznym jest ściśle związana z występowaniem różnych zanieczyszczeń chemicznych w postaci gazowej i pyłowej. Spośród nich do oceny jakości powietrza wewnętrznego Światowa Organizacja Zdrowia (WHO, ang. *World Health Organization*) wymienia radon, tlenki węgla, tlenki siarki i tlenki azotu, pyły i aerozole, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) oraz lotne związki organiczne (LZO), w tym formaldehyd. Obecność znacznej liczby zanieczyszczeń, nawet w niskich stężeniach, może stwarzać zagrożenie dla zdrowia człowieka ze względu na ich synergiczne działanie lub/i zdolność do kumulacji w organizmie. Do głównych czynników mających wpływ na stężenia zanieczyszczeń wewnątrz pomieszczeń należą wartości strumienia zanieczyszczonego powietrza wprowadzonego do pomieszczenia oraz intensywność jego usuwania. Jednym z najistotniejszych czynników kształtujących jakość powietrza wewnętrznego są emisje związków organicznych. Największa liczba badaczy interesuje się wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi, szczególnie zaadsorbowanymi na pyłach, ze względu na udowodnione właściwości mutagenne i kancerogenne oraz lotnymi związkami organicznymi stanowiącymi największą grupę zanieczyszczeń (50–300 związków) wpływających negatywnie na zdrowie człowieka nawet w śladowych ilościach (podobnie jak WWA). Za wskaźniki narażenia ludzi na LZO uważane są związki z grupy BTEX (benzen, toluen, etylobenzen, ksyleny). Benzen i etylobenzen zostały sklasyfikowane przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC, ang. *International Agency for Research on Cancer*) jako rakotwórcze dla ludzi (Grupa 1) i narażenie na te substancje jest związane ze zwiększonym ryzykiem białaczki i nowotworów układu krwiotwórczego.

W ramach zadania badawczego prowadzone są, między innymi, pomiary stężeń zanieczyszczeń wyżej wymienionych grup zanieczyszczeń, tj.: WWA zaadsorbowanych na cząstkach pyłów oraz wybranych LZO, w różnego rodzaju pomieszczeniach, takich jak: biura, mieszkania, sale dydaktyczne czy też przemysłowe stanowiska pracy [7–11].

WWA związane z pyłem, w pomieszczeniach o niewielkiej kubaturze, pobierane są za pomocą aspiratorów niskoprzepływowych z głowicami do poboru PM4 i/lub TSP [7] lub w pomieszczeniach o dużej kubaturze za pomocą aspiratorów wysokoprzepływowych [8]. W celu wyodrębnienia WWA, pył pobrany na materiał filtracyjny jest ekstrahowany dichlorometanem za pomocą ultradźwięków. Surowy ekstrakt poddawany jest procedurze oczyszczania (ekstrakcja do fazy stałej – SPE) i zagęszczania do niewielkiej objętości. Otrzymane ekstrakty analizowane są metodą chromatografii gazowej z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (FID) przy użyciu chromatografu Clarus 500 (w wersji nastrzyku cieczy) firmy Perkin Elmer (rys. 10.1).

Rys. 10.1. Chromatograf gazowy Clarus 500 z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (FID) połączony z desorberem termicznym Turbo-Matrix 100 firmy Perkin Elmer
Fig. 10.1. Gas chromatograph Clarus 500 with a flame ionization detector (FID) conected with a Turbo-Matrix 100 thermal desorber (Perkin Elmer)

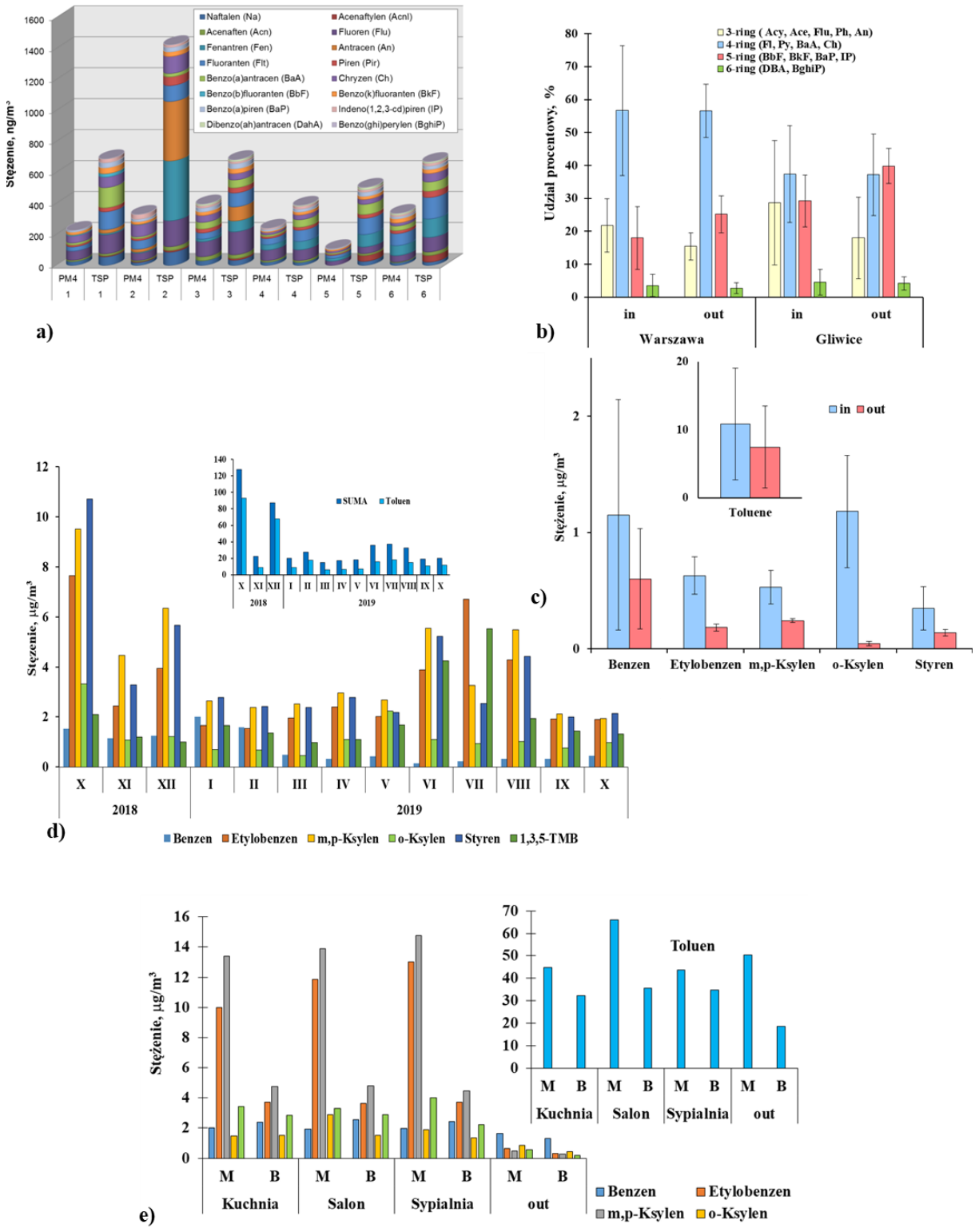


Rys. 10.2. Aspiratory do poboru prób powietrza metodą aktywną wraz z rurkami sorpcyjnymi (a); rurka sorpcyjna z nakładką dyfuzyjną do poboru prób powietrza metodą pasywną (b)
Fig. 10.2. Aspirators for air sampling using the active method with sorption tubes (a); sorption tube with diffusion cap for air sampling using the passive method (b)

Wybrane LZO, pobierane są aktywnie na złoże typu Tenax GR, Tenax TA lub węgiel aktywny przy użyciu aspiratorów (rys. 10.2a) [9]. Lepszym rozwiązaniem są rurkowe próbniki pasywne (rys. 10.2b) zawierające również złoża sorpcyjne [10, 11]. W metodzie pasywnej wykorzystuje się zjawisko dyfuzji analitów przez powietrze, a szybkość transportu zanieczyszczeń jest zgodna z I prawem Ficka. Istotną zaletą próbników pasywnych jest brak emisji hałasu i długi czas ekspozycji (zależny od stężenia substancji zanieczyszczających), co podczas pomiarów wewnątrz pomieszczeń, gdzie przebywają użytkownicy, jest bardzo ważne. Ze względu na niskie stężenia LZO w powietrzu wewnątrz pomieszczeń i stosowane selektywne złoża adsorpcyjne (w stosunku do wybranych LZO) do desorpcji analitów stosowana jest desorpcja termiczna, pozwalająca na wyznaczenie stężeń zanieczyszczeń nawet na poziomie ng/m^3. Do tego celu używany jest desorber termiczny Turbo-Matrix 100 połączony z chromatografem gazowym Clarus 500.

Wybrane wyniki badań zaprezentowane są na rys. 10.3. Badano wpływ źródeł wewnętrznych i zewnętrznych na stężenia pyłu PM4 i TSP oraz zaadsorbowane na nich WWA w sześciu punktach rozmieszczonych w hali przetwórstwa drewna oraz w powietrzu atmosferycznym (rys. 10.3a) [7]. Oceniono, że wewnętrzne źródła emisji pyłu nie stanowiły istotnego zagrożenia dla pracowników tartaku, natomiast zaadsorbowane na pyłach WWA pochodzące z zewnętrznych przemysłowych źródeł emisji są poważnym problem. Prowadzono również pomiary stężeń 16-tu priorytetowych WWA związanych z pyłem PM1 w salach dydaktycznych uczelni i w powietrzu zewnętrznym. (rys. 10.3b). Wyniki posłużyły do oceny i porównania zagrożenia zdrowia użytkowników w dwóch lokalizacjach – Gliwicach i Warszawie [8].

Z kolei wybrane LZO oznaczano w biurach w różnych lokalizacjach, a wyniki tych badań są zamieszczone w pracach [9, 10]. Na rys. 10.3c przedstawiono stężenia benzenu, toluenu, etylobenzenu, styrenu i ksylenów oznaczone w sześciu biurach. Otrzymane wyniki wskazują, że stężenia tych związków w pomieszczeniach są wyższe niż w powietrzu atmosferycznym. Taka sama prawidłowość występuje w mieszkaniach czy budynkach mieszkalnych – rys. 10.3c i 10.3e [9, 11]. Wykazano, że prace remontowe prowadzą do wzrostu stężeń wybranych LZO, które po upływie dłuższego czasu ulegają obniżeniu, a także, że pora roku ma wpływ na wielkość stężeń LZO wewnątrz pomieszczeń. W mieszkaniach i budynkach mieszkalnych na stężenie LZO istotny wpływ mają takie elementy jak: lokalizacja, prowadzone prace termomodernizacyjne, rodzaj kuchenek używanych do przygotowania posiłków, posiadanie kominka czy też garaż zintegrowany z budynkiem [11].



Rys. 10.3. a) Średnie stężenia WWA związanych z pyłem TSP i PM4 w sześciu punktach w hali tartaku [7], b) udziały procentowe WWA ze względu na ilość pierścieni w salach dydaktycznych [8], c) i d) stężenia wybranych LZO w biurach [9, 10] oraz e) w mieszkaniach i budynkach mieszkalnych [11]

Fig. 10.3. a) Average concentrations of PAH for PM4- and TSP-bound PAHs at the six sampling points in the sawmill hall [7], b) mass percentages of PAHs due to the number of rings in the air of the teaching rooms [8], c) and d) concentration of selected VOCs in offices [9, 10], e) in flats and residential buildings [11]

Przyszłe badania

Planuje się, że obiektem badań będą, uważane za specyficzne środowiska wewnętrzne, wnętrza pojazdów samochodowych, gdzie stężenia LZO mogą być 5–10 krotnie wyższe niż w powietrzu atmosferycznym i 3-krotnie wyższe niż w pomieszczeniach publicznych czy budynkach prywatnych. Biorąc pod uwagę fakt, że obecnie ludzie spędzają dużo czasu w pojazdach, zarówno podczas wykonywania czynności służbowych jak i prywatnych, a w wielu przypadkach kabina pojazdu może być uznawana za miejsce pracy, określenie zatem narażenia na LZO użytkowników pojazdów, będzie w przyszłości interesującym tematem badań.

10.2.2. Zanieczyszczenia biologiczne

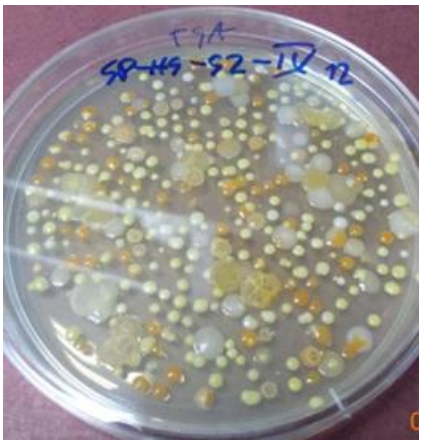
Szczególnym rodzajem zanieczyszczeń powietrza są zanieczyszczenia biologiczne (tzw. bioaerozole), a ich głównym źródłem w pomieszczeniach są organizmy (ludzie, zwierzęta, rośliny), a także elementy konstrukcyjne, wyposażenie budynków, instalacje wentylacyjne (klimatyzacyjne) oraz powietrze zewnętrzne. Pojęcie „bioaerozol" definiuje się jako układ dwufazowy, składający się z mieszaniny zarówno żywych, jak i martwych komórek mikroorganizmów, ich fragmentów oraz związków przez nie wytwarzanych (np. endotoksyn, mykotoksyn itd.) zawieszonych w powietrzu. Cząstki aerozoli biologicznych mogą być różnej wielkości. Najmniejszymi spośród biocząstek są wirusy, których długość waha się od 0,02 μm do 0,3 μm. Z kolei średnica komórek bakteryjnych wynosi od 1 do 2 μm, a średnica grzybów mikroskopijnych (w zależności od gatunku) od 2 do 8 μm [12].

Wyznaczenie stężenia aerozoli biologicznych to złożony proces, obejmujący między innymi, zliczanie cząstek biologicznych w ustalonej objętości powietrza oraz ich identyfikację. Zawsze jednak pierwszym i podstawowym etapem jest pobór biocząstek zawieszonych w powietrzu, odpowiednio dobranym urządzeniem. W prowadzonych pomiarach wykorzystywane są urządzenia aktywnego poboru mikroorganizmów zawieszonych w powietrzu (rys. 10.4). Przyrządy te działają na zasadzie wytrącania cząstek biologicznych z pobranej objętości powietrza na skutek oddziaływania na strugę powietrza siły zewnętrznej, zwykle siły bezwładności.

Wytrącane z powietrza cząstki biologiczne osadzają się na powierzchni odpowiednio dobranego podłoża mikrobiologicznego wypełniającego szalki Petriego, gdzie po określonym czasie inkubacji rozrastają się w kolonie (rys. 10.5). Następnie, ich ilość dzielona jest przez objętość powietrza pobranego przez impaktor. Jako

wyróżnik stężenia bioaerozolu przyjmuje się ilość wyrosłych kolonii na podłożach stałych, odniesioną do jednostki objętości powietrza, CFU/m^3 (ang. *Colony Forming Units*).

Rys. 10.4. Mikrobiologiczny sześciostopniowy impaktor kaskadowy typu Andersena wraz z pompą ssącą (po lewej) oraz mikrobiologiczny jednostopniowy impaktor Air Ideal z szalką Petriego (po prawej)
Fig. 10.4. Microbial six-stage Andersen-type cascade impactor with suction pump (on the left) and microbial single-stage Air Ideal impactor with Petri dish (on the right)



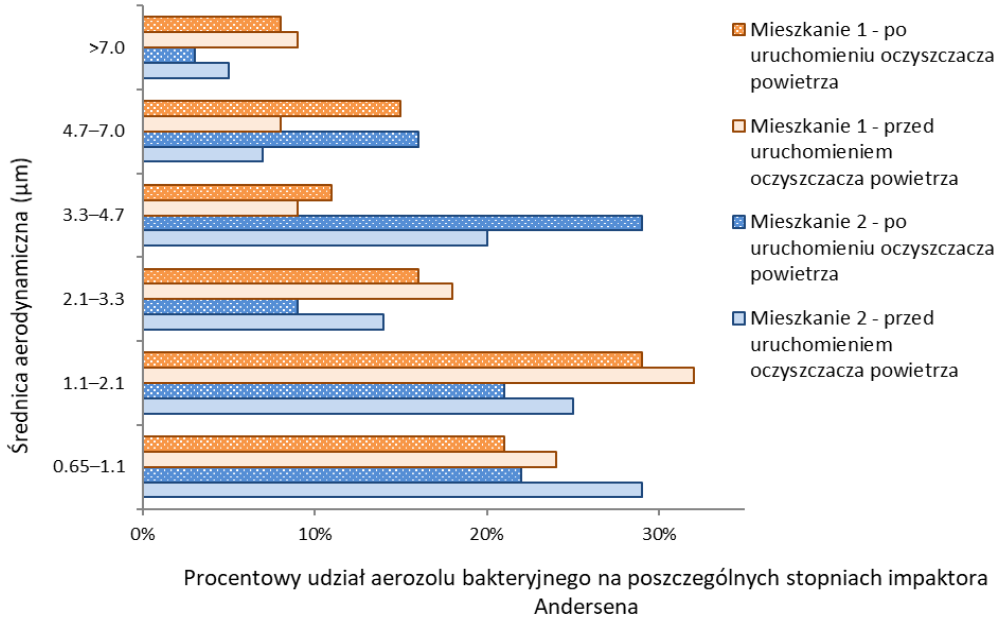
Rys. 10.5. Hodowla mikroorganizmów bakteryjnych pobranych z powietrza wewnętrznego
Fig. 10.5. Cultivation of bacterial microorganisms taken from indoor air

W celu wykonania analizy jakościowej pobranych mikroorganizmów stosowane są głównie metody biochemiczne, jak np. metoda biochemicznych testów API, wspomaganych komputerowym systemem analizy API web (bioMérieux, Marcy-l'Etoile, Francja), czy też metoda z zastosowaniem mikropłytek GEN III OmniLog systemu BIOLOG (Harward, California, USA). W prowadzonych badaniach określa się również antybiotykooporność pobranych izolatów, przy użyciu różnych klas antybiotyków.

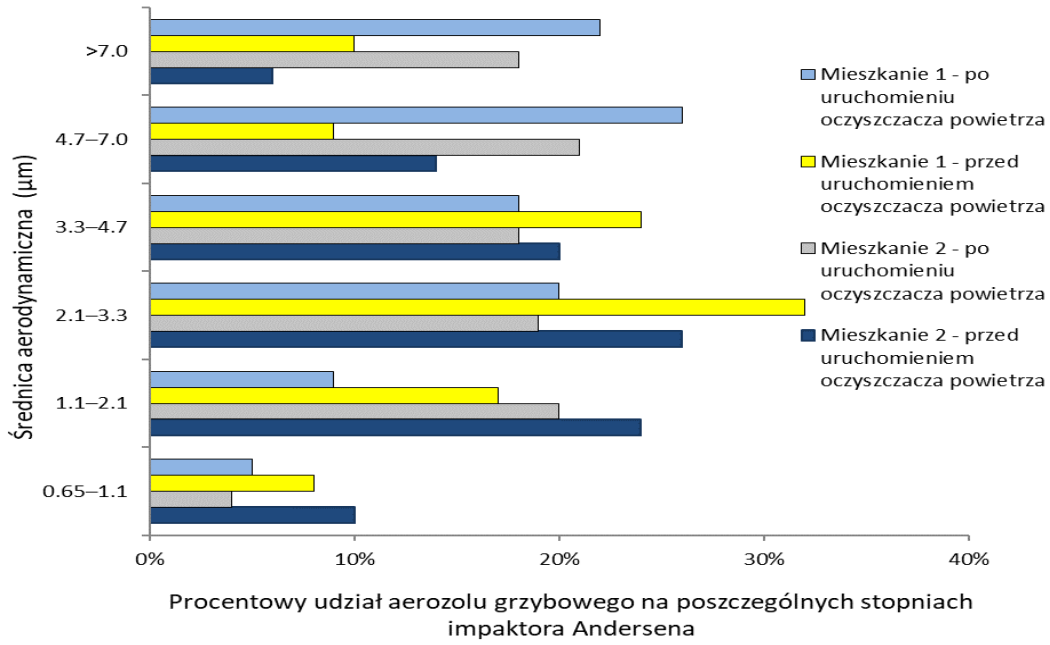
W ramach zadania badawczego prowadzone są pomiary związane z analizą zanieczyszczeń biologicznych obecnych w powietrzu pomieszczeń mieszkalnych, obiektów edukacyjnych, stanowisk pracy oraz w powietrzu atmosferycznym [13–17], a także badania związane z oceną skuteczności urządzeń oczyszczających powietrze wewnętrzne (działanie naukowe w ramach konkursu MINIATURA 3, finansowane przez Narodowe Centrum Nauki) [18, 19].

Ważnym elementem niniejszych badań jest analiza udziału frakcji respirabilnej pobranych mikroorganizmów w całkowitym stężeniu bioerozolu. Frakcja respirabilna (cząstki o średnicy aerodynamicznej <3,3 μm) stanowić może istotny problem zdrowotny, gdyż wraz z wdychanym powietrzem dociera ona w głąb układu oddechowego.

W badaniach wykazano, że udział frakcji respirabilnej aerozolu grzybowego w obiekcie edukacyjnym przed uruchomieniem oczyszczaczy powietrza stanowił aż 77% mikrogrzybów, natomiast po uruchomieniu oczyszczaczy powietrza udział frakcji respirabilnej obniżał się stanowiąc 29% stężenia całkowitego grzybów mikroskopijnych. Tendencję spadkową udziału frakcji respirabilnej bioaerozoli związanej z działaniem oczyszczaczy powietrza, zaobserwowano także podczas badań prowadzonych w pomieszczeniach mieszkalnych na terenie województwa śląskiego (rys. 10.6 i 10.7).



Rys. 10.6. Rozkład frakcyjny aerozolu bakteryjnego pobranego z powietrza w mieszkaniach
Fig. 10.6. The size distribution of bacterial aerosols in dwellings



Rys. 10.7. Rozkład frakcyjny aerozolu grzybowego pobranego z powietrza w mieszkaniach
Fig. 10.7. The size distribution of fungal aerosol in dwellings

Przyszłe badania

Obecnie podejmowanych jest szereg działań mających na celu poprawę jakości powietrza wewnętrznego w placówkach edukacyjnych. W walce o czyste powietrze na terenie województwa śląskiego prowadzona była kampania edukacyjna ogłoszona przez Urząd Marszałkowski Województwa Śląskiego – „Mogę! Zatrzymać Smog – Przedszkolaku złap oddech". Dzięki tej kampanii do przedszkoli trafiło ponad 500 oczyszczaczy powietrza. Wydaje się więc, że niezwykle interesującym tematem dalszych badań jest monitoring i kontrola jakości powietrza wewnętrznego oraz skuteczności działania, coraz powszechniej stosowanych oczyszczaczy powietrza w obiektach edukacyjnych. Te badania mogą przyczynić się do promocji i realizacji programów prewencyjnych zdrowia publicznego oraz sformułowania zaleceń mających na celu zapewnienie zdrowszego środowiska wewnętrznego.

10.3. Komfort cieplny

Komfort cieplny to stan umysłu, który wyraża zadowolenie ze środowiska termicznego, przy czym jest to ocena subiektywna [20]. Modelowanie komfortu cieplnego jest kluczowym elementem w procesie projektowania, eksploatacji i optymalizacji budynku.

W normach dotyczących warunków cieplnych środowiska wewnętrznego [20, 21] wykorzystują dwa tradycyjne modele odczuć cieplnych: model przewidujący średnią ocenę odczuć cieplnych (PMV, ang. *Predicted Mean Vote*) [22] oraz modele adaptacyjne [23, 24]. Oba podejścia posiadają ograniczenia. PMV wymaga danych, które są trudne do uzyskania na poziomie budynku, dlatego muszą być szacowane, co może prowadzić do błędnej oceny. Oba modele nie nadają się do przewidywania indywidualnych odczuć cieplnych, gdyż opracowane zostały dla średniej populacji i nie uwzględniają indywidualnych czynników wpływających na odczucia cieplne [25].

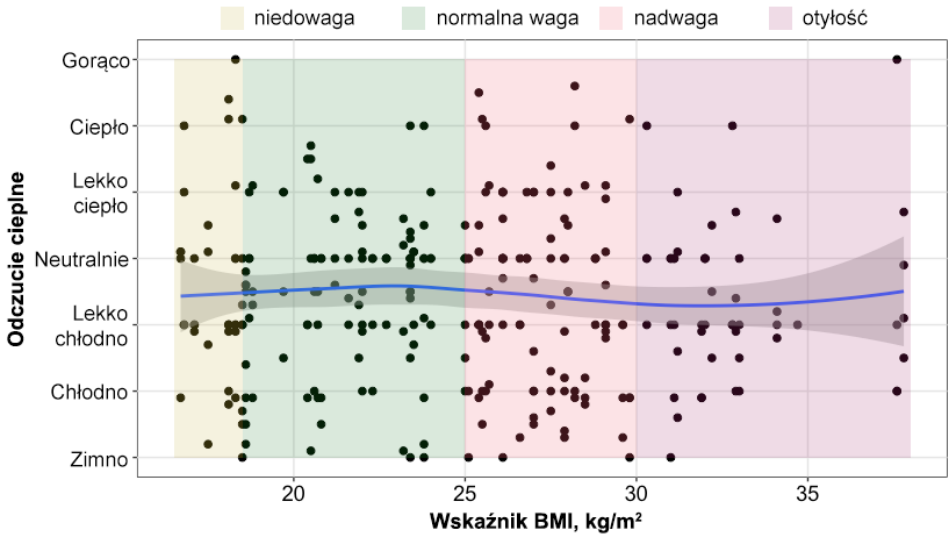
Celem prac prowadzonych w tym zakresie jest poprawa satysfakcji z warunków cieplnych przez:

- aktualizację zawartych w normach ogólnych modeli odczuć cieplnych, na bazie których działają obecnie używane strategie kontroli;
- upowszechnienie osobistych systemów HVAC;
- opracowanie innowacyjnych metod kontroli, które dopasowują się do indywidualnych preferencji użytkowników.

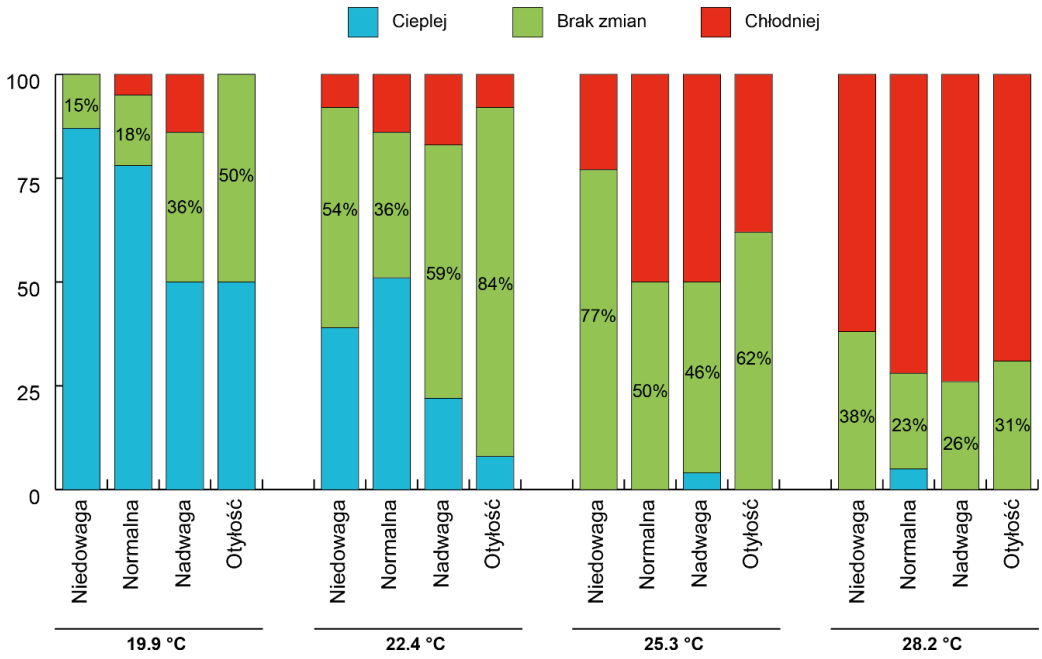
W pierwszym etapie prac, wykonano badania w komorze klimatycznej. Badania te miały na celu sprawdzenie czy i w jaki sposób wskaźnik BMI (ang. *Body Mass Index*) jest powiązany z komfortem cieplnym, odczuciami i preferencjami oraz parametrami fizjologicznymi dla typowych warunków termicznych występujących w pomieszczeniu. Komora klimatyczna została zaaranżowana jako przestrzeń biurowa dla 6 osób. W badaniach uczestniczyło 76 osób we wszystkich kategoriach wskaźnika BMI – od 17 do 37 kg/m^2. Każdy uczestnik odbył te same cztery sesje w średnich temperaturach operacyjnych 19,9°C, 22,4°C, 25,3°C i 28,2°C, przy wilgotności względnej 55±5%. Wybrane warunki w przybliżeniu odpowiadały przewidywanemu odczuciu termicznemu „chłodno", „lekko chłodno", „neutralnie" i „lekko ciepło". Rysunek 10.8 przedstawia trend zmian w odczuciu cieplnych wraz ze wzrostem BMI. Nie znaleziono żadnego praktycznego wpływu BMI na odczucia cieplne dla całego zestawu danych. Analogiczne trendy, nie przedstawione tutaj, uzyskano dla odczucia termicznego w stosunku do całkowitej zawartości tłuszczu w ciele.

W praktyce preferencje cieplne są istotniejszym parametrem niż same odczucia cieplne, ponieważ są bezpośrednim wskazaniem tego, jakie warunki ludzie preferują. Wyniki wskazują (rys. 10.9), że osoby z nadwagą i otyłe preferowały chłodniejsze środowisko. Przy nastawie temperatury 19,9°C, otyli uczestnicy w 50% odpowiedzi wskazywali na „brak zmian". Natomiast uczestnicy z niedowagą i normalną wagą zdecydowanie preferowali cieplejsze warunki (odpowiednio 85% i 77%). Nastawa

temperatury 22,4°C była najbardziej korzystna dla osób z nadwagą (59%) i otyłością (84%). Korzystnym warunkiem dla uczestników z niedowagą i normalną wagą była nastawa temperatury na 25,3°C (odpowiednio 77% i 50% odpowiedzi na „brak zmian"). Analizy pokazały też (rys. 10.10), że osoby o wysokim wskaźniku BMI są bardziej tolerancyjne w stosunku do niższych wartości temperatury panującej w pomieszczeniu, podczas gdy osoby o niższym wskaźniku BMI preferują temperatury w zakresie od 22°C do 27°C.

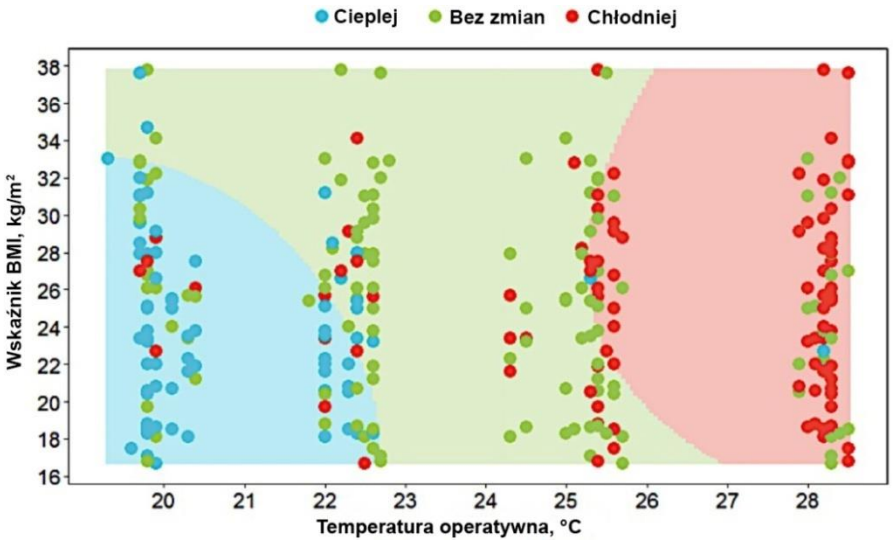


Rys. 10.8. Odczucia cieplne w funkcji wskaźnika masy ciała (BMI)
Fig. 10.8. Thermal sensation in the function of the body mass index (BMI)



Rys. 10.9. Preferencje odczuć cieplnych w zależności od kategorii wskaźnika BMI dla poszczególnych warunków pomiarowych
Fig. 10.9. Thermal sensation preferences depending on the BMI category at each experimental condition

Po dostosowaniu kryteriów poziomu istotności ze względu na mnogość testów, nie zaobserwowano statystycznie istotnych różnic w odczuciu termicznym z powodu zmian wskaźnika BMI. Jednak przyjęcie neutralnego odczucia cieplnego jako preferowanej temperatury może wprowadzać w błąd. Wyniki przeprowadzonych badań w warunkach laboratoryjnych potwierdziły wnioski z badań terenowych, w których osoby o wyższych wartościach wskaźnika BMI preferowały niższe wartości zadane temperatury [26, 27]. Biorąc pod uwagę rosnące rozpowszechnienie nadwagi i otyłości w populacji, może to ograniczyć strategie oszczędzania energii w klimacie gorącym, podczas gdy w klimacie umiarkowanym i zimnym wspierać energooszczędne strategie kontroli.



Rys. 10.10. Klasyfikacja preferencji termicznych w zależności od wskaźnika BMI i temperatury operatywnej (parametr uwzględniający temperaturę powietrza i temperaturę promieniowania otaczających przegród)

Fig. 10.10. Thermal preference classification with BMI and operative temperature (parameter taking into account air temperature and mean radiant temperature of surrounding surfaces) as inputs

Przyszłe badania

W dalszych etapach realizowanych prac kontynuowane będą analizy uzyskanych wyników, na podstawie których przygotowane zostaną kolejne publikacje naukowe. Oprócz badań w komorach klimatycznych, przygotowywane są badania wykorzystujące długotrwałą obserwację wolontariuszy w środowisku, w którym na co dzień przebywają. Badania te mają na celu opracowanie modeli osobistych odczuć cieplnych. Jest to nowa technika badawcza wykorzystywana w dziedzinie inżynierii środowiska, która używa techniki „Internet rzeczy" (Internet of Things–IoT) oraz metody uczenia maszynowego. IoT pozwala na gromadzenie bardzo szczegółowych

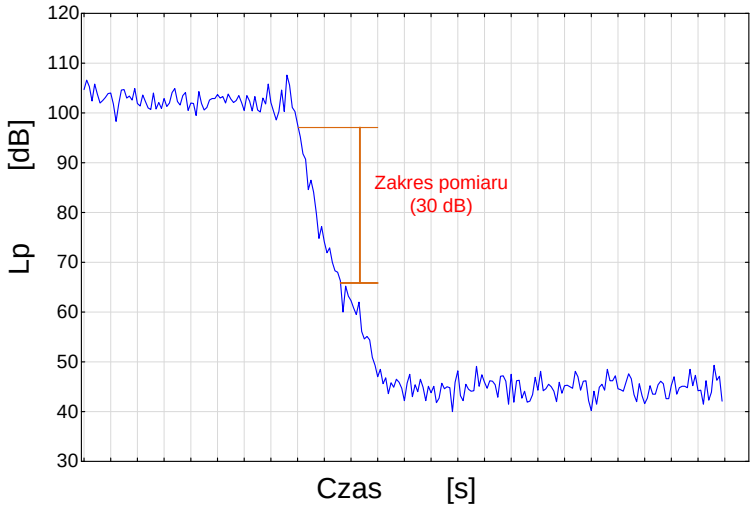
danych istotnych w tworzeniu indywidualnych modeli cieplnych. Modele te będą również opierać się na wynikach badań przeprowadzonych w komorach klimatycznych. Przewiduje się, że użycie osobistych modeli poprawi dokładność przewidywania odczuć cieplnych oraz umożliwi zastosowanie zaawansowanych systemów kontroli w inteligentnych systemach HVAC dopasowujących się do zmieniających się potrzeb użytkowników.

10.4. Komfort akustyczny

Hałas występujący w budynkach może mieć negatywny wpływ zarówno na możliwość wypoczynku jak i pracy. Ponadto hałas ma negatywny wpływ na skutki zdrowotne człowieka takie jak: zaburzenie snu [28], problemy z uczeniem [29], irytację [30, 31] nadciśnienie [32], chorobę niedokrwienną serca [33]. We wnętrzach budynków identyfikuje się dwa problemy związane z akustyką. Pierwszym jest hałas od dźwięków powietrznych, dźwięków uderzeniowych oraz hałasu pogłosowego. Zbyt niska izolacyjność przegród budowlanych powoduje nadmierny hałas w pomieszczeniach. Natomiast hałas pogłosowy skutkuje zmniejszeniem zrozumiałości mowy lub spotęgowaniem hałasu w pomieszczeniach [34]. Drugim zagadnieniem wpływającym na akustykę wnętrz jest kształtowanie akustyczne pomieszczeń przeznaczonych do odbioru dźwięku słownego, czy też muzycznego. Można do nich zaliczyć budynki sakralne [35], klasy szkolne [36], audytoria [37].

Prowadzone w tym zakresie zadania badawcze opierają się głównie na pomiarach. Pomiary dotyczą izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych, izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych oraz czasu pogłosu. Procedura badawcza izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych opiera się głównie na nadawaniu sygnału testowego w tak zwanym pomieszczeniu nadawczym i odbieraniu go w tak zwanym pomieszczeniu odbiorczym. Przy czym charakterystyka źródła dźwięku jest wszechkierunkowa i obejmuje pełny zakres pasm częstotliwości 1/3 oktawy. Wyniki pomiarów metodami obliczeniowymi zamienia się na odpowiednie wskaźniki izolacyjności akustycznej. Podobnie prowadzi się badania izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych. Z tym, że w tym przypadku źródłem sygnału testowego jest stukacz młotkowy. Sekwencja uderzeń takiego stukacza to najczęściej 10 impulsów na sekundę. Procedura badawcza czasu pogłosu w pomieszczeniu polega na pobudzeniu wnętrza pomieszczenia za pomocą szerokopasmowego szumu ukształtowanego tak, aby uzyskać w przybliżeniu różowe

widmo dźwięku pogłosowego w stanie ustalonym dla zakresu obejmującego 1/3-oktawowe. Pomiaru dokonywać można przy pomocy metody szumu przerywanego. Efektem takiego pomiaru jest krzywa zaniku dźwięku pokazana na rys. 10.11.



Rys. 10.11. Krzywa zaniku dźwięku
Fig. 10.11. Sound decay curve

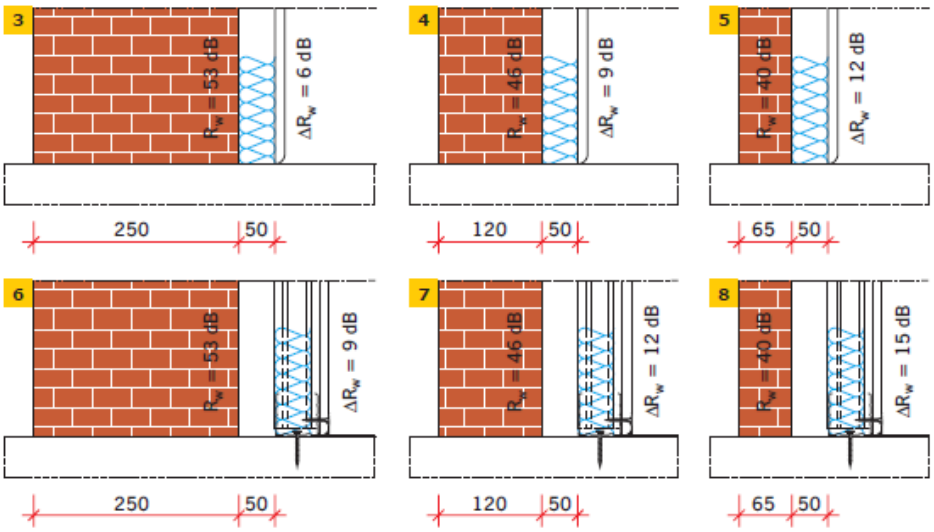
Szereg badań wykonanych w laboratorium akustyki Politechniki Śląskiej pozwoliło określić wpływ adaptacji akustycznej na poprawę izolacyjności akustycznej przegród budowlanych. Wyniki przykładowych obliczeń wskaźnika poprawy izolacyjności akustycznej właściwej ΔR_w dotyczącego wykonania dodatkowych warstw ustroju rezonansowego na murowanej ścianie ceglanej o różnej grubości przedstawiono na rys. 10.12. Widać wyraźnie, że ta sama adaptacja wykonana na różnych ścianach daje inny efekt końcowy poprawy izolacyjności. Na rys. 10.13 przedstawiono poprawę izolacyjności akustycznej stropu żelbetowego uzyskaną dzięki zastosowaniu sufitu podwieszonego wykonanego na bazie płyt STG i wełny mineralnej.

Czas pogłosu w pomieszczeniu wpływa znacząco na odbiór dźwięku słownego wyrażanego zrozumiałością mowy. Podejście obiektywne w badaniach zrozumiałości mowy opiera się na funkcji MTF (ang. *Modulation Transfer Funkction*). Na bazie tej funkcji powstał algorytm, który przewiduje wskaźnik transmisji mowy na podstawie wyrażenia (10.1):

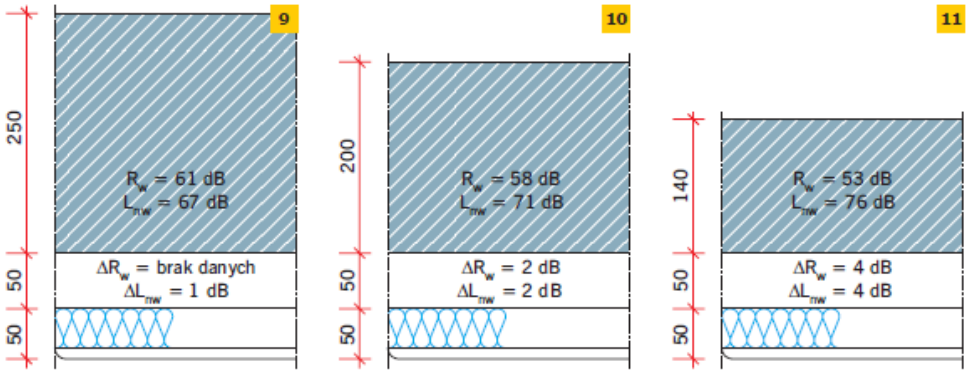
$$\mathrm{STI} = -0,2078 \ln \mathrm{T} + 0,6488 \tag{10.1}$$

gdzie T jest czasem pogłosu.

Model (10.1) został [38] porównany z innymi znanym modelami w świecie. Wyniki tego porównania przedstawiono na rys. 10.14.



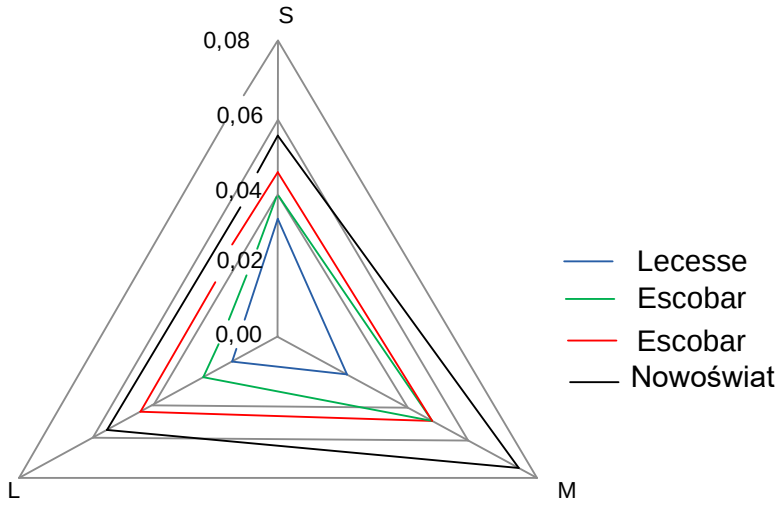
Rys. 10.12. Wyniki przykładowych obliczeń jednoliczbowego wskaźnika poprawy izolacyjności akustycznej właściwej [34]
Fig. 10.12. Results of exemplary calculations of a single-number index of specific acoustic insulation improvement [34]



Rys. 10.13. Wartości wskaźnika poprawy izolacyjności akustycznej właściwej oraz wskaźnika zmniejszenia poziomu uderzeniowego uzyskane dzięki adaptacji stropu żelbetowego [34]
Fig. 10.13. The values of the index of specific acoustic insulation improvement and the index of reduction of the impact level obtained by the adaptation of the reinforced concrete ceiling [34]

Przyszłe badania

W dalszych etapach realizowanych prac, kontynuowane będą badania izolacyjności akustycznej przegród wykonanych z nowoczesnych materiałów budowlanych. W szczególności takich, które mają znacząco poprawione parametry izolacyjności cieplnej. Drugim etapem badań będzie szerokie zastosowanie algebry perturbacyjnej w szacowaniu parametrów akustycznych wnętrz w szczególności w zastosowaniach metod promieniowych. Oba rodzaje badań są wyzwaniem dla polepszenia komfortu przebywania w pomieszczeniach wewnątrz budynków.



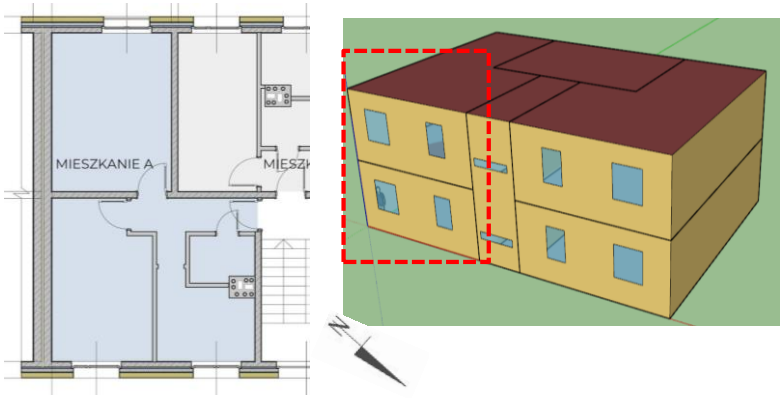
Rys. 10.14. Porównanie modeli STI w funkcji częstotliwości dla trzech rodzajów pomieszczeń: S – małe (V<350 m^3), M – średnie (350 m^3<V<650 m^3), L – duże (V>650 m^3) [38]
Fig. 10.14. Comparison of STI models as a function of frequency for three types of rooms: S – small (V <350 m^3), M – medium (350 m^3 <V <650 m^3), L – large (V> 650 m^3) [38]

10.5. Kształtowanie środowiska cieplnego – systemy pasywne

W celu zapewnienia odpowiednich warunków cieplnych, powietrze w pomieszczeniu musi zostać ogrzane lub schłodzone w zależności od obciążeń cieplnych. W XXI wieku prognozowana globalna średnia temperatura powierzchni Ziemi ma wzrosnąć o co najmniej 1,5°C [39]. Takie zmiany będą powodować, że w klimacie umiarkowanym przez coraz większą część roku, temperatura powietrza wewnętrznego w budynkach będzie zbyt wysoka, odmiennie niż dotychczas. Spowodowało to rozpoczęcie poszukiwań tanich inwestycyjnie i eksploatacyjnie rozwiązań chłodzenia budynków w Polsce. Alternatywnym rozwiązaniem do klasycznej mechanicznej klimatyzacji jest stosowanie chłodzenia pasywnego, z wykorzystaniem powietrza zewnętrznego. Strumień powietrza może dopływać do pomieszczeń w budynku naturalnie (przez otwarte okna) lub może być wymuszony za pomocą wentylatorów.

Prowadzone w tym obszarze zadanie badawcze opiera się głównie na obliczeniach numerycznych z wykorzystaniem programów EnergyPlus [40] (obliczenia cieplne) i Contam [41] (obliczenia strumienia powietrza wentylacyjnego). Wszystkie symulacje uwzględniają chwilową (z krokiem godzinowym) zmienność wewnętrznych zysków ciepła (użytkowanie budynku) oraz osłony przeciwsłoneczne wewnętrzne lub zewnętrzne. Do tej pory badania przeprowadzono dla budynków mieszkalnych

wielorodzinnych i jednorodzinnych. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki dla mieszkań budynku wielorodzinnego zlokalizowanego w Gliwicach (rys. 10.15).



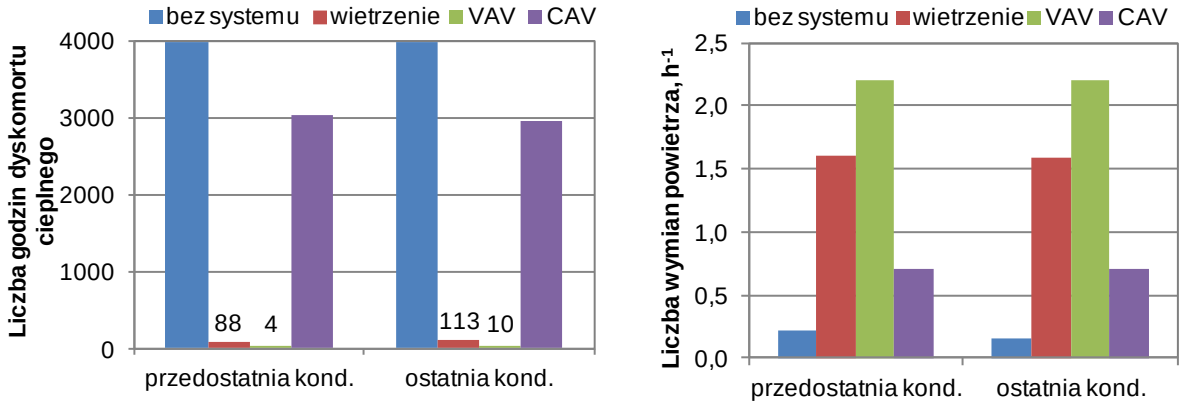
Rys. 10.15. Fragment kondygnacji budynku (po lewej) oraz geometria modelu cieplnego (po prawej)
Fig. 10.15. Part of the building storey (on the left) and geometry of the thermal model (on the right)

Zbadano 3 warianty pasywnego chłodzenia powietrzem zewnętrznym:

- wietrzenie mieszkań przez „ręczne" otwieranie okien (stopień i częstość otwarcia zależały od temperatury zewnętrznej, odczucia komfortu cieplnego mieszkańców, prędkości wiatru oraz wielkości strumienia powietrza wentylacyjnego w danej chwili, uwzględniono też stochastyczne zachowanie ludzi w zakresie otwierania okien);
- ścienne wentylatory nawiewne o zmiennym strumieniu powietrza wentylacyjnego, VAV (ang. *Variable Air Volume*); wentylatory uruchamiają się automatycznie, jeśli temperatura w pomieszczeniach przekroczy 24,5°C oraz temperatura zewnętrzna jest niższa od wewnętrznej, a wyłączają się przy temperaturze 23,5°C; zamodelowano 2 stopnie pracy: 189 m^3/h i 378 m^3/h;
- system wentylacji mechanicznej nawiewno-wywiewnej o stałym strumieniu powietrza 126 m^3/h, CAV (ang. *Constant Air Volume*).

Na rys. 10.16 zestawiono liczbę godzin dyskomfortu cieplnego oraz średnią liczbę wymian powietrza zewnętrznego dla mieszkania na ostatniej i przedostatniej kondygnacji (patrz rys. 10.15). Przypadek „bez systemu" (tylko infiltracja przez nieszczelności w oknach) jest teoretyczny, ponieważ w rzeczywistych warunkach przy braku wentylacji mechanicznej mieszkańcy zwykle otwierają okna (jednak najczęściej bez żadnej ustalonej zasady). Przypadek ten w zaprezentowanych badaniach pozwolił pokazać pewne zależności i potencjał proponowanych rozwiązań pasywnych. Wietrzenie mieszkań (wg ustalonego algorytmu) ma ogromny wpływ na komfort cieplny odczuwalny przez mieszkańców. Liczba godzin dyskomfortu cieplnego maleje aż o 97%. Średnia ilość świeżego powietrza wzrasta w mieszkaniu na ostatniej

kondygnacji 10-krotnie (rys. 10.16). Jednak stosowanie przewietrzania wymaga obowiązkowości i regularności pracy ze strony mieszkańców.



Rys. 10.16. Liczba godzin dyskomfortu cieplnego (po lewej) oraz średnia liczba wymian powietrza wentylacyjnego w czasie działania systemu (po prawej)
Fig. 10.16. Number of thermal discomfort hours (on the left) and mean air change rates during system operation (on the right)

Zastosowanie odpowiednio automatycznie sterowanych wentylatorów VAV wpływa na poprawę komfortu cieplnego. Otrzymane wyniki wskazują na poprawę komfortu cieplnego dla wszystkich mieszkań średnio o około 90% w stosunku do wariantu z „ręcznym" wietrzeniem przez okna. Uzyskuje się poprawę komfortu cieplnego na zbliżonym poziomie zarówno dla mieszkań na ostatniej jak i przedostatniej kondygnacji. Natomiast system ze stałym strumieniem powietrza przez całą dobę jest najgorszym rozwiązaniem z trzech proponowanych. System działa w trybie ciągłym, czyli dostarcza powietrze również w okresach gorących, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest wyższa od temperatury w pomieszczeniu, a tym samym stanowi dodatkowy zysk ciepła. Systemy z wentylatorami zużywają dodatkowo energię elektryczną.

Przyszłe badania

Część realizowanych prac zostało wykonanych przy współudziale studentów z trzech kierunków: inżynierii środowiska, budownictwa i architektury w ramach pracy PBL (ang. *Project Based Learning*). Kolejne badania w przedstawionej tematyce będą obejmować analizę systemów sterowania rozwiązań pasywnego chłodzenia oraz symulacje dla przyszłych prognozowanych danych klimatycznych. Pozwoli to na opracowanie wytycznych i wskazówek dla inwestorów i projektantów w zakresie projektowania budynków efektywnych energetycznie i środowiskowo oraz systemów ich technicznego wyposażenia.

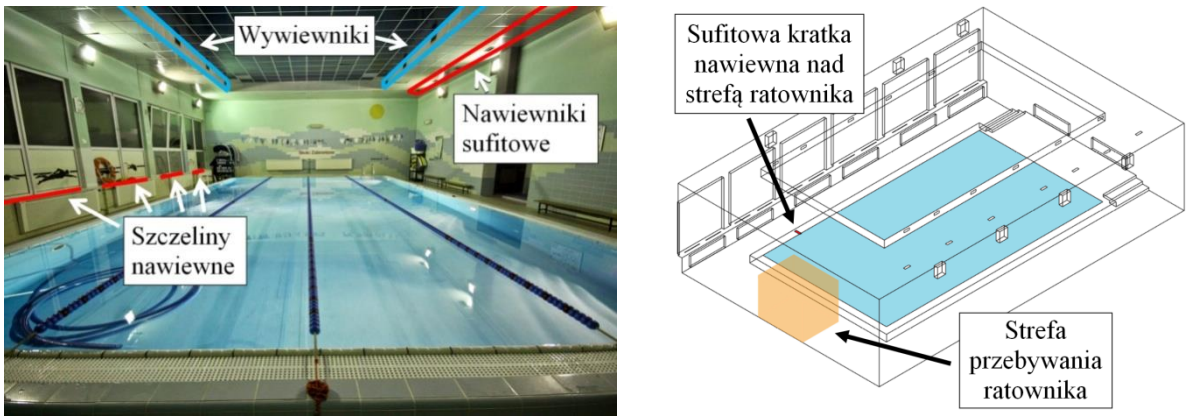
10.6. Kształtowanie środowiska cieplnego – systemy aktywne

Głęboka termomodernizacja budynków w Polsce wymaga nie tylko zapewnienia stanu ochrony cieplnej budynków zgodnie z aktualnymi wymaganiami, ale również stosowania rozwiązań niekonwencjonalnych i innowacyjnych w zakresie technicznego wyposażenia. Może to doprowadzić do poprawy ich sprawności energetycznej i tym samym do zmniejszenia sezonowego zapotrzebowania budynków na energię końcową. Podjęta w tym zakresie tematyka badawcza obejmuje zagadnienia związane z doskonaleniem mechanicznych systemów HVAC dla obniżenia energochłonności i poprawy mikroklimatu w budynkach. Prowadzone są badania naukowe obejmujące między innymi eksperymentalną identyfikację warunków cieplno-wilgotnościowych w pomieszczeniach oraz badania numeryczne z wykorzystaniem takich programów, jak: Ansys CFX [42] – do wielowariantowych analiz środowiska wewnętrznego oraz IDA ICE [43] – do analiz energetycznych związanych z różnymi rozwiązaniami technicznymi w ramach systemów HVAC.

Jako przykład, przedstawiono wyniki badań warunków mikroklimatu oraz zużycia energii na potrzeby wentylacji w hali pływalni. Ze względu na duże zużycie energii przez tego typu obiekty, przy projektowaniu, istnieje tendencja do obniżania wartości strumienia powietrza wentylacyjnego. Takie podejście to kompromis poparty tym, że osoba przebywająca w basenie nie odczuwa przekroczenia granicznej wartości wilgotności właściwej powietrza, ponieważ przez większość czasu jest ona zanurzona w wodzie. Jednak zmniejszona ilość powietrza nawiewanego przyczynia się do dyskomfortu cieplnego ratowników, którzy spędzają wiele godzin na brzegu niecki basenowej.

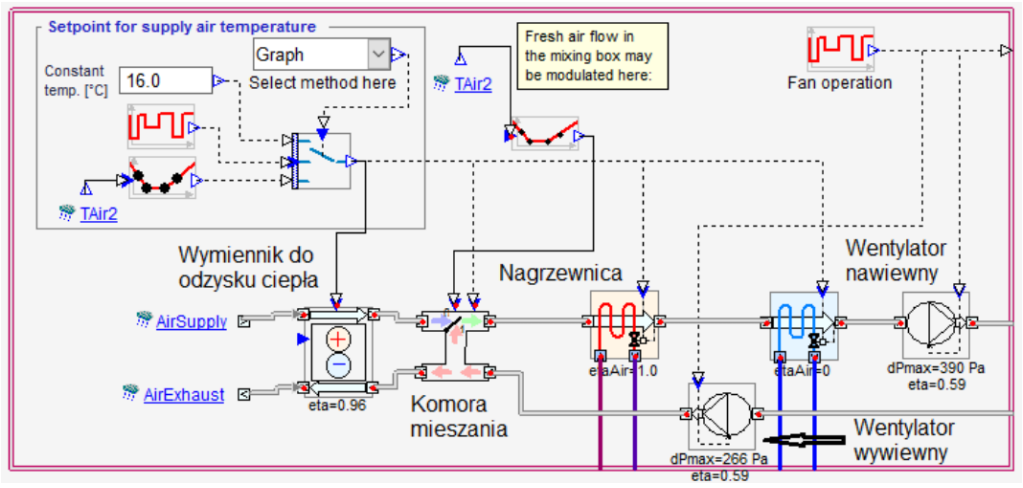
Dla przyszkolnej pływalni w Gliwicach (rys. 10.17), należącej do grupy obiektów treningowych i rekreacyjnych, przeprowadzono symulacje komputerowe mające na celu sprawdzenie możliwości obniżenia energochłonności hali krytej pływalni przez zmniejszenie strumienia objętości powietrza wentylacyjnego nawiewanego do budynku [44]. Warianty obliczeniowe do symulacji obejmowały cztery wartości strumienia objętości powietrza wentylacyjnego: 7120 m^3/h (D1), 5621 m^3/h (D2), 3113 m^3/h (D3) i 3193 m^3/h (D4, nawiew ogólny + miejscowy do strefy ratowników, rys. 10.17), oraz dwie metody odzysku ciepła w centrali klimatyzacyjnej: jednostopniowy z recyrkulacją powietrza wywiewanego i dwustopniowy z recyrkulacją i wymiennikiem ciepła (rys. 10.18). W badaniu uwzględniono koszty energetyczne związane z wprowadzeniem lokalnego nawiewu na stanowisko

ratowników przy jednoczesnym ograniczeniu wymiany powietrza w pozostałej części obiektu (wariant D4).



Rys. 10.17. Widok wnętrza badanej hali szkolnej pływalni (po lewej) oraz model 3D z programu Ansys CFX z zaznaczoną lokalizacją strefy przebywania ratownika wraz z miejscowym nawiewem powietrza (po prawej)

Fig. 10.17. The view of the interior of the analysed indoor swimming pool (on the left) and the 3D model created in the Ansys CFX software with the location of the lifeguard zone with local air supply (on the right)

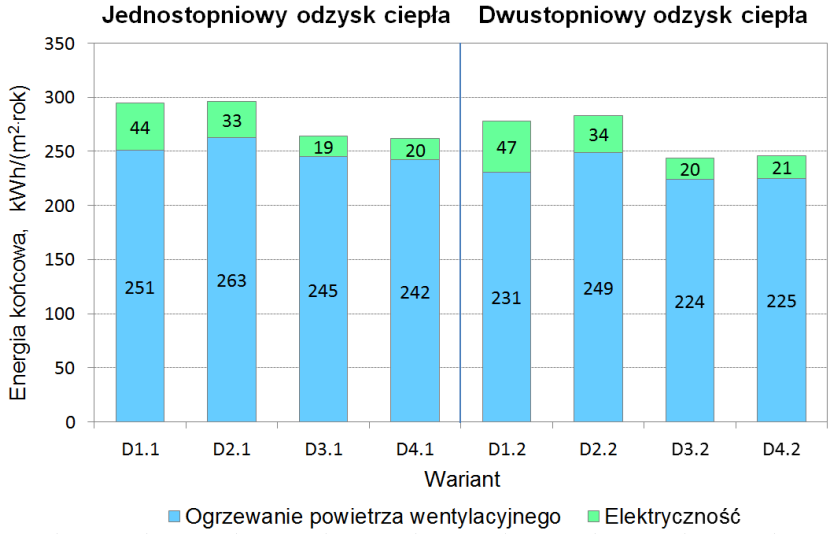


Rys. 10.18. Przykład konfiguracji centrali wentylacyjnej dla wariantów z dwustopniowym odzyskiem ciepła w programie IDA ICE

Fig. 10.18. An example of an air handling unit configuration for variants with two-stage heat recovery in the IDA ICE software

Wyniki badań (rys. 10.19) wykazały, że ograniczenie strumienia powietrza wentylacyjnego nawiewanego do hali pływalni wpłynęło na zmniejszenie zapotrzebowania na energię końcową. Wyniki badań potwierdziły także, że zastosowanie dwustopniowego odzysku ciepła przyczyniło się do większej oszczędności energii w porównaniu do jednostopniowego odzysku ciepła. Zastosowanie miejscowego nawiewu powietrza do strefy ratowników jedynie nieznacznie (o 1%) wpłynęło na zapotrzebowanie na energię końcową systemu

wentylacyjnego. Takie rozwiązanie wymaga dalszych badań ze względu na spodziewaną poprawę warunków mikroklimatu w strefie przebywania jedynie przy nieznacznym wzroście zapotrzebowania na energię końcową.



Rys. 10.19. Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię końcową
Fig. 10.19. Indicators of final energy demand

Dotychczasowe wstępne badania dotyczące poprawy mikroklimatu w hali pływalni objęły swoim zakresem pomiar parametrów powietrza wewnętrznego w hali pływalni, w tym temperatury, szybkości i wilgotności względnej [45] powietrza, zarówno wokół niecki basenowej, jak i nad powierzchnią wody. Ponadto przeprowadzono pomiary termowizyjne przegród zewnętrznych budynku w celu zweryfikowania między innymi możliwości wykroplenia wilgoci na powierzchni przegród [46]. Wyniki pomiarów zostały wykorzystane do określenia warunków cieplno-wilgotnościowych w hali oraz do zweryfikowania poprawności opracowanego modelu numerycznego obiektu w programie Ansys CFX [47, 48]. Model ten może być wykorzystany do dalszych badań nad poprawą mikroklimatu w hali pływalni.

Kontynuacja zaprezentowanych badań obejmie badania numeryczne, za pomocą programu Ansys CFX, wpływu strumienia objętości powietrza wentylacyjnego na warunki cieplno-wilgotnościowe i przepływowe w hali pływalni. W badaniach zostaną uwzględnione te same warianty obliczeń odnośnie wartości strumienia objętości powietrza wentylacyjnego, które przyjęto w analizach energetycznych. Celem jest sprawdzenie, jak obniżanie wartości tego strumienia, dla zmniejszenia energochłonności obiektu, wpływa na warunki cieplno-wilgotnościowe i przepływowe w hali pływalni. Ponadto interesujące jest to, czy zaproponowany sposób poprawy tych warunków przez dodatkowy miejscowy nawiew powietrza bezpośrednio do strefy

przebywania ratowników może wpłynąć na poprawę bezpieczeństwa użytkowników hali pływalni. Zakłada się, że efektem naukowym i praktycznym wykonanych prac będzie dobór optymalnych urządzeń do przygotowania i rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali pływalni pod kątem minimalizacji zużycia energii przy równoczesnym zapewnieniu wymaganych warunków mikroklimatu.

Przyszłe badania

W ramach kolejnych etapów pracy przewiduje się przeprowadzenie badań w innych typach budynków, które różnią się rozwiązaniami technicznymi w zakresie systemów HVAC, jak i możliwościami poprawy efektywności energetycznej przez ich modernizację lub wymianę.

10.7. Kształtowanie środowiska wewnętrznego – warunki panujące na drogach ewakuacyjnych

Najważniejszym aspektem dotyczącym bezpieczeństwa pożarowego budynków jest zapewnienie bezpiecznej ewakuacji wszystkim użytkownikom. Dotyczy to również osób z niepełnosprawnościami, które uczestniczą w życiu społecznym i powinny mieć dostęp do wszystkich budynków. Aby ewakuacja była bezpieczna, na drogach ewakuacyjnych muszą panować odpowiednie warunki (tab. 10.1), które zapewnia, przez określony czas, system wentylacji pożarowej. Jeśli w ewakuacji wezmą udział osoby z niepełnosprawnościami to czas ewakuacji wydłuży się, dlatego jego określenie jest kluczowe dla właściwego zaprojektowania systemu wentylacji pożarowej.

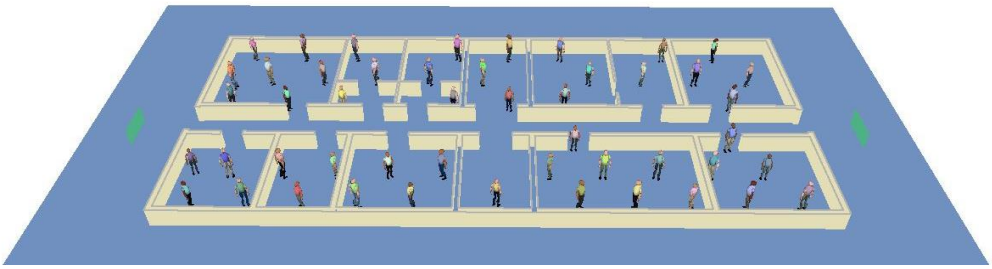
Tabela 10.1

Warunki bezpiecznej ewakuacji

Temperatura	60°C
Widzialność	10 m
Stężenie tlenu	14% obj.
Stężenie tlenku węgla	700 ppm
Wysokość strefy wolnej od dymu	1,8 m

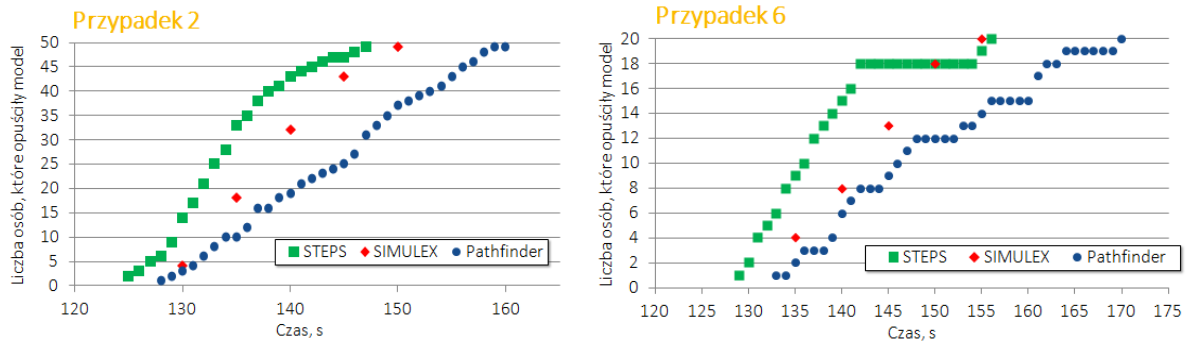
Do wyznaczenia wymaganego czasu ewakuacji stosuje się odpowiednie modele matematyczne realizowane przez dedykowane programy komputerowe (rys. 10.20), których liczba przekracza 60. Do prezentowanych badań wybrano trzy programy takie

jak: STEPS [49], Simulex [50], Pathfinder [51], które wykorzystano do przeanalizowania sześciu przykładów (tab. 10.2). Przyjęto stałą geometrię obiektu a zmieniała się całkowita liczba osób oraz liczba osób z niepełnosprawnościami. Sprawdzono możliwości implementacji do modelu różnych użytkowników, w szczególności osób mających trudności z poruszaniem się.



Rys. 10.20. Przykładowe rozmieszczenie osób w programie Pathfinder
Fig. 10.20. A sample arrangement of people in Pathfinder

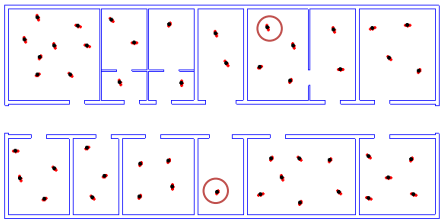
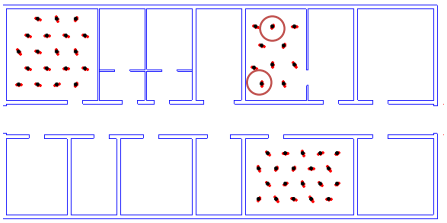
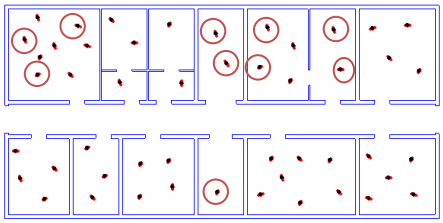
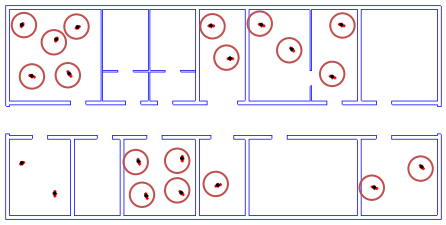
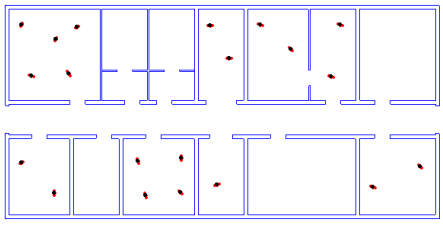
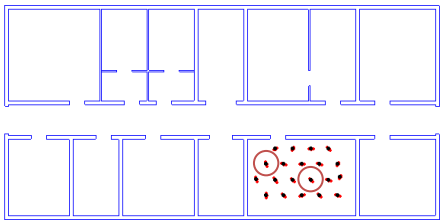
Całkowity czas ewakuacji, obliczony z wykorzystaniem trzech programów, różnił się w poszczególnych przypadkach. Największe różnice pojawiły się dla przypadku szóstego przy wykorzystaniu programu Pathfinder. Oznacza to, że wybór narzędzia obliczeniowego może mieć wpływ na uzyskane wyniki, które będą podstawą do projektowania systemu wentylacji pożarowej. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 10.21.



Rys. 10.21. Liczba osób, które ukończyły ewakuację dla przypadku 2 i 6
Fig. 10.21. The number of people that left the model in case 2 and 6

Efektem badań jest wybór programu, który będzie wykorzystywany w dalszych analizach. Programem tym jest Pathfinder, który daje duże możliwości modelowania z uwzględnieniem osób z różnym stopniem niepełnosprawności. Pozwoli to na analizy wydłużenia się czasu ewakuacji w zależności od stopnia niepełnosprawności osób przebywających w budynku. Pathfinder daje też możliwości połączenia symulacji z wynikami uzyskanymi w programie FDS (PyroSim) [52], który z kolei pozwala na analizy warunków środowiskowych panujących na drogach ewakuacyjnych.

Tabela 10.2
Zestawienie analizowanych przypadków, osoby niepełnosprawne są w czerwonych kołach

Przypadek	Całkowita liczba osób	Liczba osób z niepełnosprawnościami	Rozmieszczenie osób w pomieszczeniach
1	49	2	
2	49	2	
3	49	10	
4	20	18	
5	20	0	
6	20	2	

Przyszłe badania

W najbliższym czasie planowane są eksperymenty polegające na ewakuacji osób z niepełnosprawnościami z wykorzystaniem krzesła ewakuacyjnego. Dane dotyczące czasu pozyskanego w takim wariancie zostaną implementowane do programu Pathfinder. Poszerzy to analizy wymaganego czasu ewakuacji o nowy system wsparcia ewakuacji osób z niepełnosprawnościami.

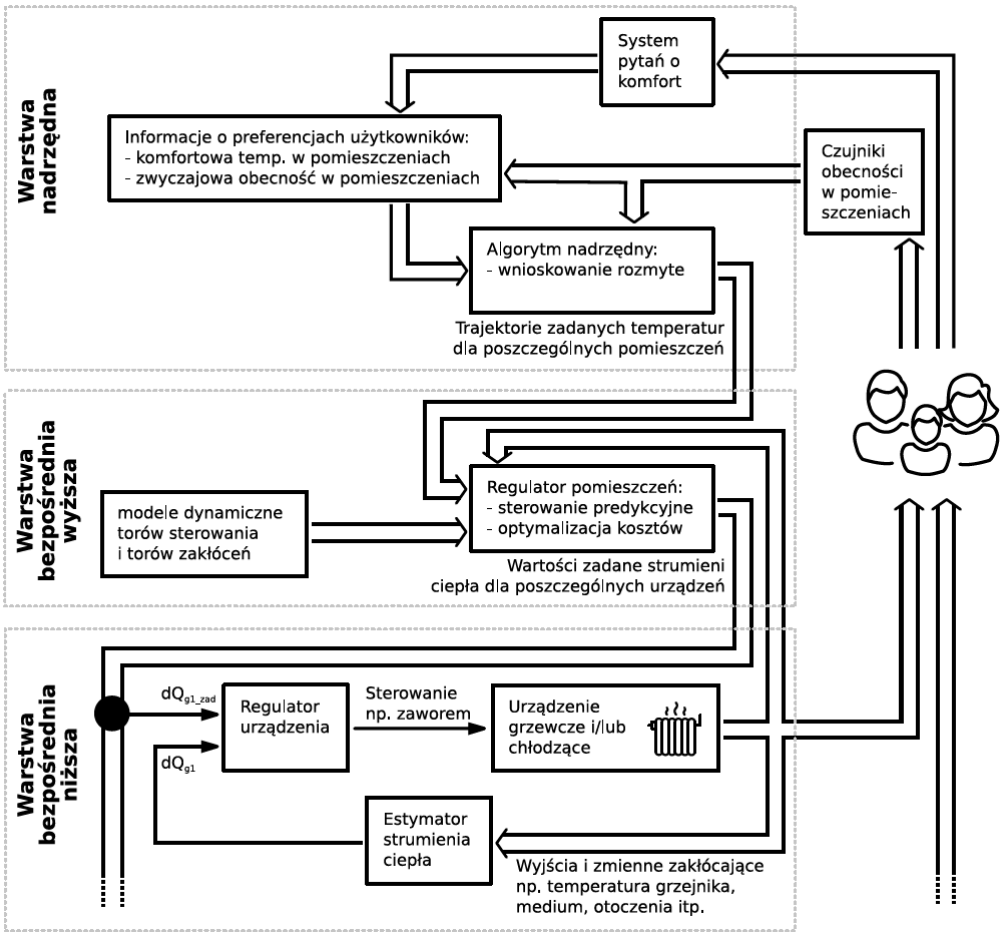
10.8. Pomiary i algorytmy sterowania w automatyce budynkowej

Automatyka budynkowa to dziedzina automatyki, która zajmuje się zagadnieniami związanymi ze sterowaniem w obiektach budowlanych. W zakres automatyki budynkowej wchodzą systemy nadzoru dyspozytorskiego oraz różne instalacje technologiczne budynku (systemy HVAC, oświetlenie, kontrola dostępu, monitoring). Duże budynki niemieszkalne, na mocy Dyrektywy UE 2018/844, będą musiały posiadać centralne systemy zarządzania. Automatyka budynków i elektroniczne monitorowanie systemów technicznych są skutecznymi środkami wykrywania awarii, w szczególności w przypadku rozległych systemów. Integracja różnych systemów pozwala na opracowanie zaawansowanych algorytmów sterowania uwzględniających wiele czynników. Skuteczne algorytmy sterownia przyczyniają się do zmniejszenia zużycia energii i kosztów eksploatacji obiektu. Rozwijane są algorytmy pracy instalacji technologicznych budynków [53] oraz systemy pomiarowe umożliwiające eksperymentalną weryfikację ich działania.

Celem przedstawionych badań było zbudowanie schematu wnioskowania rozmytego nadrzędnego i bezpośredniego w algorytmie sterowania minimalizującym koszty ogrzewania/chłodzenia. Opracowany algorytm jednocześnie uwzględnia preferencje użytkownika oraz zapewnia komfort cieplny. Automatyczne określanie komfortu w pomieszczeniu jest wykonywane na podstawie pomiaru temperatury oraz wilgotności względnej powietrza. Założeniem do budowy modelu komfortu była potrzeba wnioskowania w czasie rzeczywistym oparta na pomiarach (dostępne czujniki w systemie automatyki).

Opracowano algorytm sterowania podzielony na trzy warstwy (rys. 10.22): nadrzędną, bezpośrednią wyższą oraz bezpośrednią niższą. W warstwie nadrzędnej algorytm bazuje na trzech źródłach danych: (i) informacji o dostępnych źródłach ciepła, (ii) zidentyfikowanych modelach pomieszczeń oraz (iii) zebranych

informacjach o preferencjach użytkowników. Informacje o preferencjach użytkowników są przechowywane w dwóch formach: (i) preferowanych temperaturach w danych pomieszczeniach zapewniających komfort (w funkcji pory dnia), przy założeniu, że przebywa w nich człowiek oraz (ii) zwyczajowych godzinach obecności w funkcji pory dnia i dni tygodnia.



Rys. 10.22. Schemat ideowy opracowanego algorytmu regulacji
Fig. 10.22. Diagram of the designed control algorithm

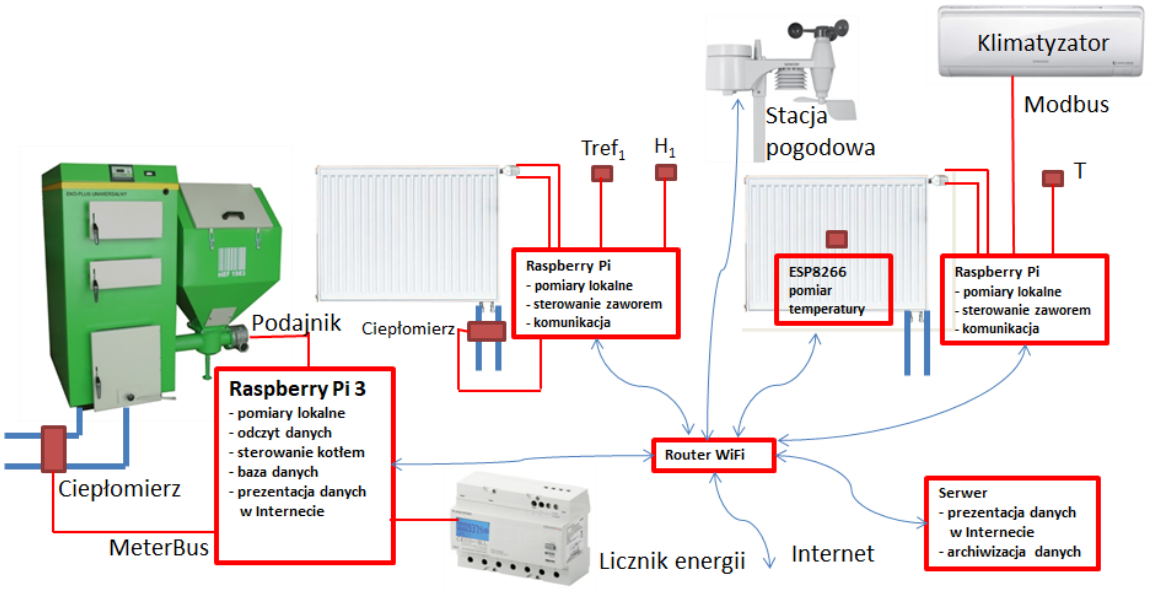
Zadaniem warstwy nadrzędnej jest wypracowanie i aktualizacja trajektorii zadanych temperatur powietrza w pomieszczeniach i przekazanie ich warstwie bezpośredniej wyższej. Działanie warstwy nadrzędnej opiera się o informacje o obecności lub nieobecności użytkowników w danych pomieszczeniach. Używane są aktualne dane pobierane z czujników. Jeśli użytkownik jest obecny, to algorytm utrzymuje komfortową temperaturę w pomieszczeniu. Jeśli nie jest obecny, to wykorzystywana jest wyliczona informacja o preferencjach użytkowników względem zwyczajowych godzin przebywania w pomieszczeniach w odpowiednich godzinach. Dane o zwyczajach uzyskiwane są poprzez obliczenia statystyczne danych historycznych. Algorytm wykorzystuje również informacje o pożądanych

komfortowych wartościach temperatur w pomieszczeniach – te informacje pozyskiwane są za pomocą pytań zadawanych użytkownikowi o jego komfort.

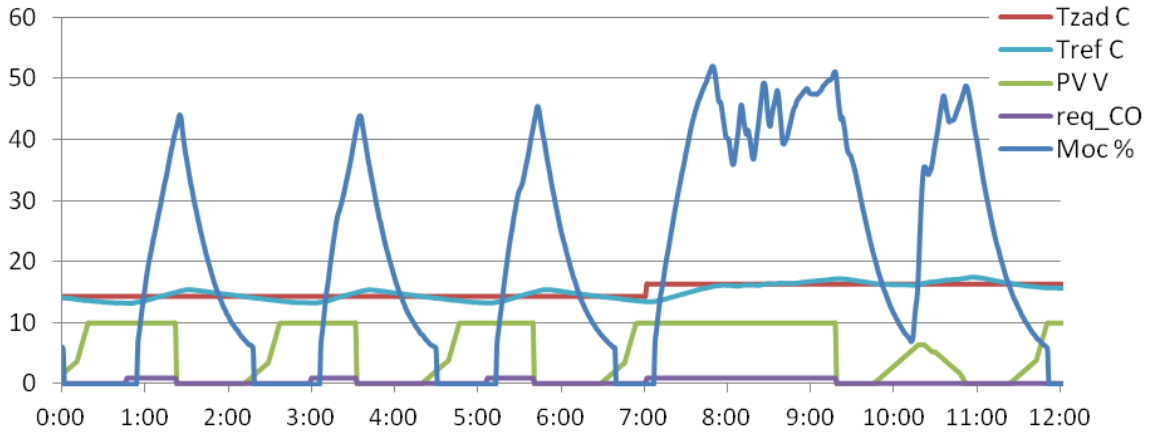
W warstwie nadrzędnej do kontroli komfortu zastosowano schemat wnioskowania rozmytego Mamdaniego z metodą wyostrzania typu środek ciężkości. W bazie reguł zaszeregowano stan komfortu cieplnego (ocenę stopnia odczuwania komfortu) do wielkości reprezentujących zbiory odczucia komfortu przez użytkownika [53]. Kiedy użytkownik przebywa w pomieszczeniu, algorytm utrzymuje temperaturę przyjętą jako komfortową. Z czasem stopniowo obniża tą temperaturę, pytając użytkownika czy nadal czuje się komfortowo. Przy pozytywnej odpowiedzi, proces ten jest kontynuowany. W przeciwnym wypadku temperatura jest ustalona lub podniesiona. W razie wykrycia nieobecności użytkownika przez wystarczający okres czasu, algorytm rozpoczyna wychładzanie pomieszczenia, szczególnie wtedy, kiedy jest to zgodne z dotychczas zaobserwowanym harmonogramem. Decyzja, czy rozpocząć wychładzanie i w jakim stopniu, jest oparta o algorytm wnioskowania rozmytego. Na jego podstawie określany jest współczynnik pewności, oceniający czy nieobecność użytkownika będzie dłuższa. Algorytm przewiduje też powrót użytkownika, tak aby w porę rozgrzać pomieszczenia do temperatury komfortowej, przygotowując się na jego przybycie. Algorytm został szerzej opisany w zgłoszeniu patentowym [54].

Zbudowano systemy do identyfikacji parametrów pomieszczeń oraz eksperymentalnej weryfikacji działania opracowanych algorytmów, umożliwiające sterowanie urządzeniami HVAC (rys. 10.23). Systemy te mogą być też stosowane w budynkach z ciepłem sieciowym i ogrzewaniem elektrycznym. Otrzymane dane eksperymentalne porównano z wynikami symulacji warunków środowiska w pomieszczeniach budynku. Pozwoliło to na zweryfikowanie działania i wstępny dobór parametrów algorytmu sterowania [55, 56]. Weryfikacja eksperymentalna możliwa była dzięki opracowanemu uniwersalnemu modułowi kontrolno-pomiarowemu. Pozwala on na podłączenie wielu czujników określających warunki panujące w budynku i na zewnątrz (temperatury, wilgotności) oraz na sterowanie różnego typu siłownikami zaworów grzejników. Moduł ten umożliwiał także komunikację, za pomocą protokołów Modbus i Meter-Bus, z urządzeniami takimi jak ciepłomierze, klimatyzatory, liczniki energii. Połączenie z Internetem pozwoliło na przesyłanie danych pomiarowych, odczyt sterowań online oraz zapis pomiarów w bazie danych. Dodatkowo akwizycja danych pogodowych i prognoz pogody z serwisów internetowych umożliwia zastosowanie algorytmów sterowania ciepłem uwzględniających w sterowaniu warunki, jakie będą panowały na zewnątrz budynku w najbliższym czasie. Przykładowe wyniki działania algorytmu regulacji

przedstawiono na rys. 10.24. Pokazano na nim działanie regulatora warstwy bezpośredniej sterującego siłownikiem zaworu grzejnika.



Rys. 10.23. Schemat ideowy systemu pomiarowego i sterowania dla obiektu z kotłem na paliwo stałe
Fig. 10.23. Schematic diagram of the measurement and control system for a facility with a solid fuel boiler



Rys. 10.24. Przykładowe przebiegi prezentujące działanie algorytmu sterowania
Fig. 10.24. Sample chart showing the operation of the control algorithm

Przyszłe badania

Dalsze badania będą koncentrować się wokół integracji systemów automatyki w celu opracowania efektywnego, całościowego sterowania budynkiem z wykorzystaniem takich protokołów jak np. BACnet, MBus, Modbus, DALI, EnOcean, MPBus, KNX, Ethernet. Wykonywane są badania czujników parametrów fizykochemicznych powietrza stosowanych w automatyce budynkowej. Rozwijane i badane są algorytmy kontrolujące wybrane systemy automatyki, jak np. rekuperacja

czy inteligentne oświetlenie. Budowane są systemy kontrolno-pomiarowe umożliwiające sterowanie urządzeniami w budynku na potrzeby weryfikacji rozwijanych algorytmów.

Bibliografia

1. Frontczak M., Schiavon S., Goins J., Arens E., Zhang H., Wargocki P.: Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. Indoor Air, 22, 2012, p. 119–131.
2. Allen J.G., MacNaughton P., Laurent J.G.C., Flanigan S.S., Eitland E.S., Spengler J.D.: Green Buildings and Health. Current Environmental Health Reports, 2, 2015, p. 250–258.
3. Lipczynska A., Schiavon S., Graham L.T.: Thermal comfort and self-reported productivity in an office with ceiling fans in the tropics. Building and Environment, 135, 2018, p. 202–212.
4. Geng Y., Ji W., Lin B., Zhu Y.: The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. Building and Environment, 121, 2017, p. 158–167.
5. Sekhar S.C.: Thermal comfort in air-conditioned buildings in hot and humid climates – why are we not getting it right? Indoor Air, 26, 2016, p. 138–152.
6. Zhang H., Arens E., Fard S.A., Huizenga C., Paliaga G., Brager G., Zagreus L.: Air movement preferences observed in office buildings. International Journal of Biometeorology, 51, 2007, p. 349–360.
7. Rogula-Kopiec P., Rogula-Kozłowska W., Kozielska B., Sówka I.: PAH concentrations inside a wood processing plant and the indoor effects of outdoor industrial emissions. Polish Journal of Environmental Studies, 24, 2015, p. 1867–1873.
8. Rogula-Kozłowska W., Kozielska B., Majewski G., Rogula-Kopiec P., Mucha W., Kociszewska K.: Submicron particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in the Polish teaching rooms: concentrations, origin and health hazard. Journal of Environmental Sciences, 64, 2018, p. 235–244.
9. Kozielska B., Brągoszewska E., Kaleta D.: Investigation of indoor air quality in offices and residential homes in an urban area of Poland. Air Quality, Atmosphere and Health, 13, 2020, p. 131–141.
10. Kozielska B., Kaleta D.: Assessment of indoor benzene and its alkyl derivatives concentrations in offices belonging to University of Technology (Poland). Atmosphere, 12, 2021, 51.
11. Kozielska B., Mainka A., Żak M., Kaleta D., Mucha W.: Indoor air quality in residential buildings in Upper Silesia, Poland. Building and Environment, 177, 2020, 106914.
12. Nasir Z.A., Colbeck I.: Assessment of bacterial and fungal aerosol in different residential settings. Water Air Soil Pollut, 211, 2010, p. 367–377.
13. Brągoszewska E.: The dose of fungal aerosol inhaled by workers in a waste-sorting plant in Poland: a case study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17, 2020, 177.
14. Brągoszewska E.: Exposure to bacterial and fungal aerosols: microorganism indices in a waste-sorting plant in Poland. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16, 2019, 3308.

15. Brągoszewska E., Biedroń I., Kozielska B., Pastuszka J.: Microbiological indoor air quality in an office building in Gliwice, Poland: analysis of the case study. Air Quality, Atmosphere & Health, 11, 2018, p. 729–740.
16. Brągoszewska, E., Biedroń, I.: Indoor Air Quality and Potential Health Risk Impacts of Exposure to Antibiotic Resistant Bacteria in an Office Rooms in Southern Poland. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15, 2018, 2604.
17. Brągoszewska E., Mainka A., Pastuszka J., Lizończyk K., Desta Y.G.: Assessment of bacterial aerosol in a preschool, primary school and high school in Poland. Atmosphere, 9, 2018, 87.
18. Brągoszewska E., Bogacka M., Pikoń K.: Efficiency and eco-costs of air purifiers in terms of improving microbiological indoor air quality in dwellings – a case study. Atmosphere, 10, 2019, 742.
19. Brągoszewska E., Bogacka M., Pikoń K.: Effectiveness and eco-costs of air cleaners in terms of improving fungal air pollution in dwellings located in Southern Poland – a preliminary study; Atmosphere, 11, 2020, 1255.
20. ANSI/ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, GA [USA] 2017.
21. PN-EN ISO 7730:2006 Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego. PKN, 2006.
22. Fanger P.O.: Komfort cieplny, Arkady, Warszawa 1974.
23. de Dear R., Brager G.S.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, in: ASHRAE Transactions, 104, 1998, p. 145–167.
24. Nicol J.F., Humphreys M.A.: Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy and Buildings, 34, 2002, 563–572.
25. Wang Z., de Dear R., Luo M., Lin B., He Y., Ghahramani A., Zhu Y.: Individual difference in thermal comfort: A literature review. Building and Environment, 138, 2018, p. 181–193.
26. Daly M.: Association of ambient indoor temperature with body mass index in England, Obesity, 22, 2014, p. 626–629.
27. Rupp R.F., de Dear R., Ghisi E.: Field study of mixed-mode office buildings in Southern Brazil using an adaptive thermal comfort framework. Energy and Buildings, 158, 2018, p. 1475–1486.
28. Muzet A.: Environmental noise, sleep and health. Sleep Medicine Reviews, 11, 2007, p. 135–142.
29. Lercher P., Evans G.W., Meis M.: Ambient noise and cognitive processes among primary schoolchildren. Environment and Behavior, 35, 2003, p. 725–735.
30. Miedema H.M., Oudshoorn C.G.: Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. Environmental Health Perspectives, 109, 2001, p. 409–416.
31. Licitra G., Friedianelli L., Petri D., Vigotti M.A.: Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas. Science of the Total Environment, 568, 2016, p. 1315–1325.
32. Babisch W., Swart W., Houthuijs D., Selander J., Bluhm G., et al.: Exposure modifiers of the relationships of transportation noise with high blood pressure and noise annoyance. The Journal of the Acoustical Society of America, 132, 2012, p. 3788–3808.
33. Babisch W., Beule B., Schust M., Kersten N., Ising H.: Traffic noise and risk of myocardial infarction. Epidemiology, 16, 2005, p. 33–40.
34. Dulak L.: Możliwość poprawy izolacyjnosci akustycznej budynków. Izolacje, 10, 2015.

35. Nowoświat A., Olechowska M., Marchacz M.: The effect of acoustical remedies changing the reverberation time for different frequencies in a dome used for worship: A case study. Applied Acooustics, 160, 2020, 107143.
36. Nowoświat A., Olechowska M.: Estimation of reverberation time in classrooms using the residual minimization method. Archives of Acoustics, 42, 2017, p. 609–617.
37. Nowoświat A., Olechowska M., Ślusarek J.: Prediction of reverberation time using the residual minimization method. Applied Acoustics, 106, 2016, p. 42–50.
38. Leccese F., Rocca M., Salvadori G.: Fast estimation of Speech Transmission Index using the Reverberation Time: Comparison between predictive equations for educational rooms of different sizes. Applied Acoustics, 140, 2018, p. 143–149.
39. IPCC. Summary for Policymakers. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press: Cambridge [UK]; New York, NY [US].
40. Engineering Reference, EnergyPlus™ Version 8.7 Documentation; US Department of Energy: Washington, DC, USA, 2016. [online] https://energyplus.net/sites/all/ modules/custom/nrel_custom/pdfs/ pdfs_v8.7.0/EngineeringReference.pdf.
41. Walton W.G.N., Dols S.: CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2005.
42. Ansys CFX, [online] https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx
43. IDA Indoor Climate and Energy 4.0. 2009. EQUA Simulation AB.
44. Ciuman P., Lipska B.: Experimental validation of the numerical model of air, heat and moisture flow in an indoor swimming pool. Building and Environment, 145, 2018, p. 1–13.
45. Ciuman P.: Experimental assessment of thermal, humidity and flow conditions in the indoor swimming pool. Instal, 4, 2020, p. 32–38.
46. Ciuman P.: Application of infrared thermography measurements in thermal diagnostics of the swimming pool. Instal, 5, 2020, p. 22–29.
47. Ciuman P., Kaczmarczyk J.: Numerical analysis of the energy consumption of ventilation processes in the school swimming pool. Energies, 14, 2021, 1023.
48. Ciuman P.: Experimental-numerical method of selecting the model of moisture emission from the surface of water in a swimming pool basin. Instal, 2, 2021, 24–31.
49. Peacock R.D., Kuligowski E.D., Averill J.D., Eds.: Pedestrian and Evacuation Dynamics. Springer, Boston, MA [US] 2011.
50. SIMULEX User Guide.
51. Pathfinder Resources. Pathfinder Technical Reference Manual. Thunderhead Engineering, [online] https://files.thunderheadeng.com/support/documents/ pathfinder-user-manual-2020-5.pdf.
52. PyroSim, [online] https://pyrosim.pl/interfejs-uzytkownika-fds/
53. Jabłoński K., Grychowski T.: Fuzzy inference system for the assessment of indoor environmental quality in a room. Indoor and Built Environment, 27, 2018, p. 1415–1430.
54. Borowka M., Kolosowski A., Pawelczyk M., Kozyra A., Grychowski T., Wrona S., Wiora J.: Method and system for controlling heating, ventilation and air conditioning. Zgłoszenie patentowe US20210033299A1.
55. Andersen K.K., Madsen H., Hansen L.H.: Modelling the heat dynamics of a building using stochastic diferential equations. Energy and Buildings, 31, 2000, p. 13–24.
56. Walek B., Žáček J., Janošek M., Farana R.: Adaptive fuzzy control of thermal comfort in smart houses. Proceedings of the 15th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2014, p. 675–678.

11. STRATEGIA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU ENERGETYKI I ENERGETYKA GAZOWA

11.1. Wprowadzenie

Zrównoważony rozwój jest ważnym zadaniem, przed którym stoi krajowa energetyka. W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki badań pokazujących możliwą drogę przejścia do miksu energetycznego odpowiadającego na wyzwania jakie stoją przed polską gospodarką. W ramach przeprowadzonych badań określono optymalne warunki pracy systemu energetycznego z dużym udziałem odnawialnych źródeł wytwórczych. Omówiono problemy związane z optymalizacją rozruchów turbiny. Wyniki przedstawionych badań obejmują także określenie procedury planowania rozwoju systemu elektroenergetycznego oraz intensyfikację wykorzystania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Ważną część rozdziału stanowi analiza możliwości zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego poprzez wprowadzenie nowych konstrukcji turbogeneratorów dostosowanych do pracy regulacyjnej. Przedstawione wyniki badań obejmują także problem jakości energii elektrycznej.

11.2. Modelowanie matematyczne miksów energetycznych

Trendy w energetyce światowej mają istotny wpływ na proces transformacji energetyki krajów członkowskich Unii Europejskiej, w tym także Polski. Obserwowana duża dynamika w strategicznym sektorze energetycznym wynika przede wszystkim z Ustaleń Konferencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz z regulacji prawnych przyjętych przez państwa członkowskie Unii Europejskiej [1].

Struktura energetyczna Polski zdecydowanie jest inna od pozostałych krajów Unii Europejskiej ze względu na znaczny udział węgla w produkcji energii elektrycznej. Udział samego węgla w bilansie energetycznym wynosi 78% i w większości jest on wydobywany w kraju, podczas gdy w pozostałych krajach UE dominuje import.

Rygorystyczne wymagania przyjęte przez kraje członkowskie UE stanowią dla Polski znaczne wyzwanie i wymagają wdrożenia nowych, wysoko sprawnych technologii prowadzących do sytuacji, w której węgiel może stać się społecznie akceptowalnym i stopniowo coraz bardziej czystym źródłem energii.

Polska, realizując w ramach Unii Europejskiej ambitne cele polityki klimatycznej, staje przed potrzebą przygotowania planów w zakresie możliwości osiągania dalszej redukcji emisji gazów, ponieważ w przypadku zawarcia globalnego porozumienia w tej sprawie nasz kraj znajdzie się w grupie państw wspomagających kraje rozwijające się w przejściu do niskoemisyjnego rozwoju oraz przejmujących większość wysiłku redukcyjnego w najbliższym półwieczu. Ze względu na wysokie koszty inwestycyjne, proces przemian w systemie energetycznym powinien zostać rozłożony w długiej perspektywie czasowej, ponieważ węgiel jako paliwo energetyczne w najbliższych latach w Polsce nadal będzie miał istotne znaczenie w sektorze energetyki. Określenie optymalnej drogi przejścia do miksu energetycznego, odpowiadającego na wyzwania stojące przed polską gospodarką, stanowi aktualny i ważny problem badawczy [2–5].

Metodologia prognozowania zużycia surowców energetycznych

Proces budowy modeli teoretycznych zużycia energii pierwotnej i finalnej jest wieloczłonowy. W początkowym etapie należy przeanalizować zagadnienia ekonomiczne, środowiskowe, polityczne i społeczne. Stąd też w pierwszym etapie badań przeanalizowano akty prawne określające sposób podziału zasobów kopalin w Polsce oraz przedstawiono wybrane zagadnienia gospodarki surowcami mineralnymi w celu identyfikacji potencjału zasobowego Polski i wskazano optymalne zasoby do wykorzystania w bilansie energetycznym. W etapie drugim badań wykonano analizę SWOT bazy paliwowo-surowcowej w celu wykazania wad i zalet dostępnych surowców energetycznych. Zidentyfikowano mocne i słabe strony dostępnych źródeł energii, co bezpośrednio warunkuje proces decyzyjny w trakcie budowy optymalnego bilansu energetycznego Polski, wykazano jednocześnie bogate złoża węgla, które są dostępne na terytorium Polski, co stanowi kluczowy atut dla dalszego wykorzystywania tego surowca w bilansie energetycznym. W ramach etapu trzeciego przedstawiono przegląd dostępnych opracowań i symulacji budowy przyszłego bilansu energetycznego dla Polski. W czwartym etapie badań poddano analizie kwestie bezpieczeństwa energetycznego kraju, w tym szczegółowo zbadano uwarunkowania prawne.

Dane statystyczne dotyczące zużycia: ciepła, energii elektrycznej, węgla, ropy naftowej, gazu ziemnego, energii wodnej, słonecznej, wiatrowej, geotermii, biopaliw i odpadów, biomasy zostały poddane szczegółowej analizie statystycznej. Zmienne zużycia surowców energetycznych są realizacją klasycznych nieliniowych modeli szeregów czasowych i silnie zależą od założeń statystycznych. To z kolei zmniejsza ich możliwości predykcyjne, szczególnie kiedy te założenia są również realizacją nieliniowych funkcji. Z tym problemem radzą sobie sztuczne sieci neuronowe. Techniki te próbują naśladować zachowanie zmiennych przez neurony, które z założenia są nieliniowe [6–8]. Sztuczne sieci neuronowe są oparte na danych, które mają funkcję samodostosowania. Ta zdolność adaptacyjna czyni je odpowiednimi do analizy problemów, w których dane nie są kompletne lub gdy nie ma odpowiednio dużej liczby [9, 10]. Biorąc pod uwagę, że sztuczne sieci neuronowe pozwalają na zbliżenie prawie wszystkich nieliniowych procesów, to nadają się do prognozowania sprzedaży i zużycia. Uwzględniając ich korzystne zastosowania do analizy nieliniowych zjawisk, modele zużycia surowców energetycznych zbudowane zostały w oparciu o sztuczne sieci neuronowe w architekturze LSTM (Long Short-Term Memory).

Dane zużycia surowców energetycznych zostały wprowadzone do modelu sieci LSTM. Wygenerowane wartości teoretyczne przeanalizowano średniokwadratowym i bezwzględnym błędem ex post, a oceny zgodności danych empirycznych z danymi uzyskanymi ze zbudowanych modeli dokonano na podstawie ocen parametrów struktury stochastycznej takich jak:

- odchylenie standardowe składnika resztowego, który informuje, o ile średnio wartości prognozowane odchylają się od wartości rzeczywistych w przedziale weryfikacji,
- współczynnik zmienności resztowej, czyli określenia w jakim stopniu na zmienną prognozowaną mają wpływ czynniki losowe (przypadkowe),
- współczynnik zbieżności, który opisuje, jaka część przebiegu zmienności wartości prognozowanej nie jest opisana przez model,
- współczynnik determinacji liniowej, który informuje, jaka część przebiegu zmienności wartości prognozowanej jest opisana przez model.

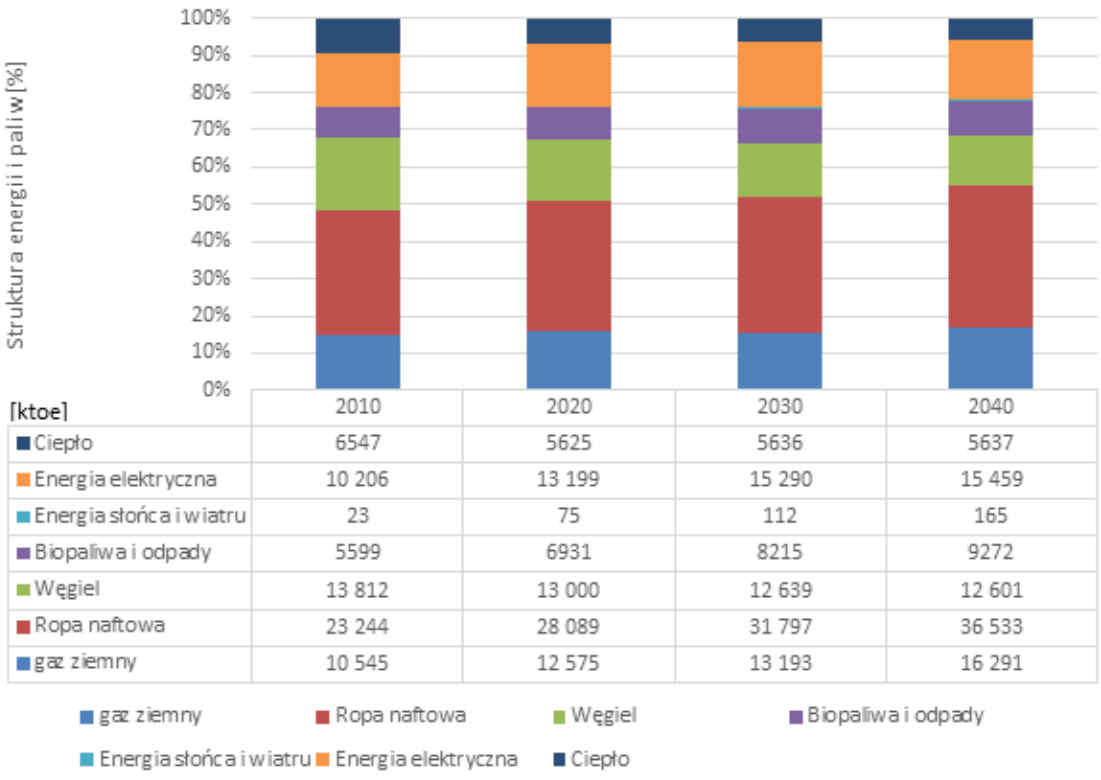
Analizę prognoz przeprowadzono również współczynnikiem Theila, który posłużył do określenia jakości modelu prognostycznego pod względem obciążoności prognoz, niedostatecznej elastyczności oraz niewystarczającej zgodności z rzeczywistym kierunkiem zmian zmiennej prognozowanej (nieodgadnięcie kierunku tendencji rozwojowej).

Przy odniesieniu wyników teoretycznych do aktualnie obowiązującego stanu procesu i przy uwzględnianiu zdroworozsądkowych horyzontów model mógł zostać zaakceptowany lub odrzucony. Odrzucenie modelu powodowało ponowną analizę parametrów wejściowych lub struktury sieci neuronowej LSTM.

Zapotrzebowanie na surowce energetyczne – stan obecny i perspektywy do 2040 r.

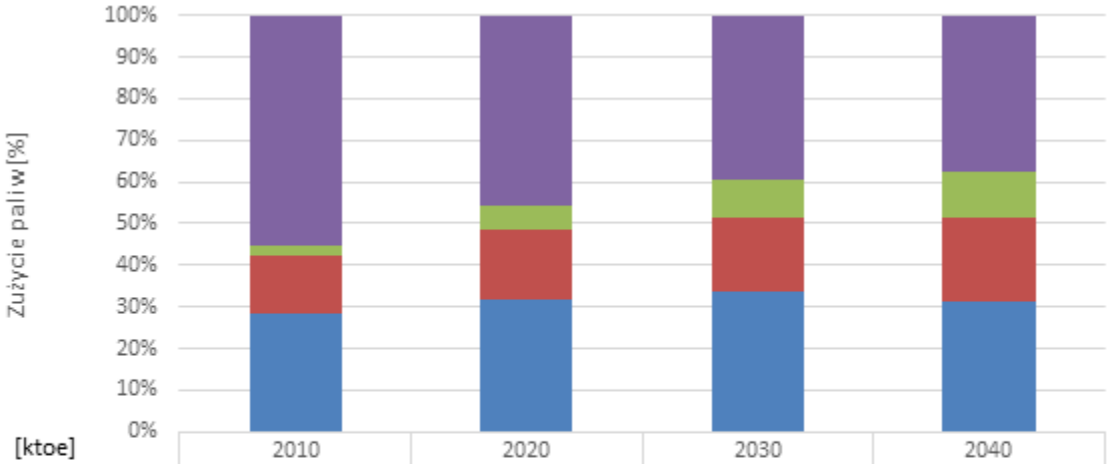
Zapotrzebowanie na surowce energetyczne z perspektywą do 2040 r. zaprezentowano na rys. 11.1 i 11.2.

W opracowanym bilansie energii finalnej dla Polski do 2040 r. następuje stopniowe przechodzenie z węgla na gaz oraz odnawialne źródła energii, które do 2030 r. rozwijają się bardzo gwałtownie zwiększając znacznie swój udział. Wynika to ze wzrostu potencjału w inwestowanie w rozwój innowacyjnych technologii przyjaznych dla środowiska. Zwiększa się również udział biopaliw i ropy naftowej, głównie za sprawą transportu. Widoczny jest również wzrost zużycia energii elektrycznej o 1,5% rocznie i nieznaczny spadek zużycia ciepła o 1,2%, które mogą być wytworzone nadal z węgla tylko przy wykorzystaniu czystych technologii węglowych. Zapotrzebowanie na energię finalną rośnie.



[ktoe]	2010	2020	2030	2040
Ciepło	6547	5625	5636	5637
Energia elektryczna	10 206	13 199	15 290	15 459
Energia słońca i wiatru	23	75	112	165
Biopaliwa i odpady	5599	6931	8215	9272
Węgiel	13 812	13 000	12 639	12 601
Ropa naftowa	23 244	28 089	31 797	36 533
gaz ziemny	10 545	12 575	13 193	16 291

Rys. 11.1. Miks zapotrzebowania na energię finalną do 2040 r.
Fig. 11.1. Final energy demand mix by 2040



[ktoe]	2010	2020	2030	2040
Węgiel	55,08	46,89	44,96	44,95
OZE	2,46	6,01	10,41	13,44
Gaz ziemny	13,96	17,04	20,31	23,73
Ropa naftowa	28,51	32,49	38,81	37,73

Rys. 11.2. Miks zużycia energii pierwotnej
Fig. 11.2. Primary energy consumption mix

Prognozy miksu energii pierwotnej wskazują również trend wzrostowy zużycia surowców do 2040 r. Wynika to ze zwiększenia popytu na energię finalną. Zapotrzebowanie to będzie zaspokajane przez energetykę odnawialną, gaz i ropę naftową, co może doprowadzić do dywersyfikacji struktury i zmniejszenia się roli węgla do 39% w 2030 r. Pomimo restrykcji klimatycznej węgiel nadal pozostanie kluczowym źródłem energii pierwotnej dla polskiej gospodarki. Udział 39-procentowy pozostanie utrzymany do 2040 r.

Podsumowanie

Obecne uwarunkowania ekologiczne, które zadecydowały o przyjętych aktach prawnych w ramach Unii Europejskiej, wymagają transformacji energetycznej krajów członkowskich, w szczególności Polski, w celu osiągnięcia założonych celów. Zmiany muszą przebiegać jednak w tempie dostosowanym do możliwości ekonomicznych poszczególnych systemów gospodarczych, gdyż energetyka stanowi gałąź gospodarczą o wysokich i kapitałochłonnych inwestycjach. W pracy przedstawiono badania aktualnych problemów dotyczących zagadnienia modelowania matematycznego miksów energetycznych Polski. Poruszona problematyka jest złożona i dotyczy wielu aspektów, w tym bazy zasobowo-surowcowej, uwarunkowań prawnych, aktualnych megatrendów determinujących przyszłość energetyki, jak również kwestie bezpieczeństwa energetycznego kraju, które należy uwzględniać

w długoterminowym planowaniu strategicznym. Zaprezentowano też metodologię budowy modelu matematycznego z wykorzystaniem metod i technik *deep learning*, które wykorzystano do opracowania modeli zużycia surowców energetycznych.

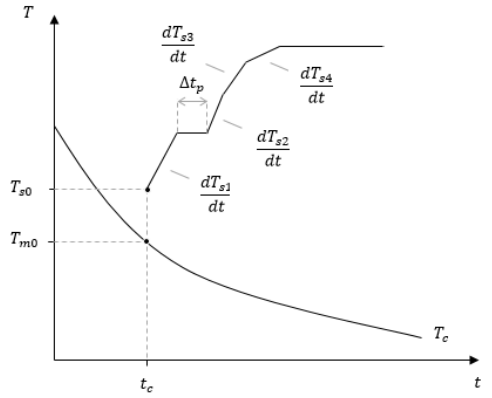
11.3. Zwiększenie niezawodności wytwarzania energii przez system z dużym udziałem źródeł odnawialnych poprzez zwiększenie elastyczności pracy bloków energetycznych

Elastyczna praca bloków energetycznych

Zmieniająca się struktura systemów energetycznych i rola węglowych bloków energetycznych, które w obecnych systemach pełnią rolę źródeł bilansujących zapotrzebowanie na energię wymaga zmiany charakteru ich eksploatacji [11]. Sytuacja ta jest spowodowana zwiększającym się udziałem odnawialnych źródeł energii, w tym zwłaszcza energii wiatrowej w całkowitej produkcji energii. Jak dotychczas największy udział w produkcji energii mają bloki węglowe, które równocześnie muszą zwiększać produkcję energii elektrycznej w sytuacji braku możliwości produkcji energii z wiatru. Oznacza to, że bloki te muszą być zdolne do szybkich i głębokich zmian mocy, a także do skracania czasu rozruchów, zwłaszcza po kilku lub kilkunastu godzinach postojów. Biorąc pod uwagę te wymagania skutkujące zwiększeniem obciążenia termicznego elementów tych bloków, a także stosunkowo długi dotychczasowy okres ich pracy, to dalsza bezpieczna eksploatacja wymaga starannego ustalenia nowych, optymalnych warunków tej eksploatacji [12]. Te nowe warunki powinny pozwolić na zwiększenie elastyczności ich pracy, w tym w szczególności pozwolić na przyspieszanie rozruchów. Z drugiej strony warunki te powinny zapewnić bezpieczeństwo tej eksploatacji tzn. zapewnić w trakcie całego rozruchu utrzymanie stanu naprężenia w głównych elementach turbiny i kotła poniżej wartości dopuszczalnych. Zagadnienia optymalizacji warunków eksploatacji bloków energetycznych były tematem wielu badań i publikacji naukowych [13–20]. W dalszej części rozdziału omówiono problemy związanie z optymalizacją rozruchów turbiny ze stanów ciepłych i gorących, które to rozruchy będą dominowały w obecnych realiach pracy systemów energetycznych. W analizach wykorzystano symulacje komputerowe stanów cieplnych i wytrzymałościowych w elementach turbin, wykonane metodą elementów skończonych. Modele numeryczne elementów turbiny a także szczegóły analiz cieplno-przepływowych i doboru warunków brzegowych opisano między innymi w artykułach [19, 20].

Optymalizacja rozruchu turbiny ze stanu ciepłego

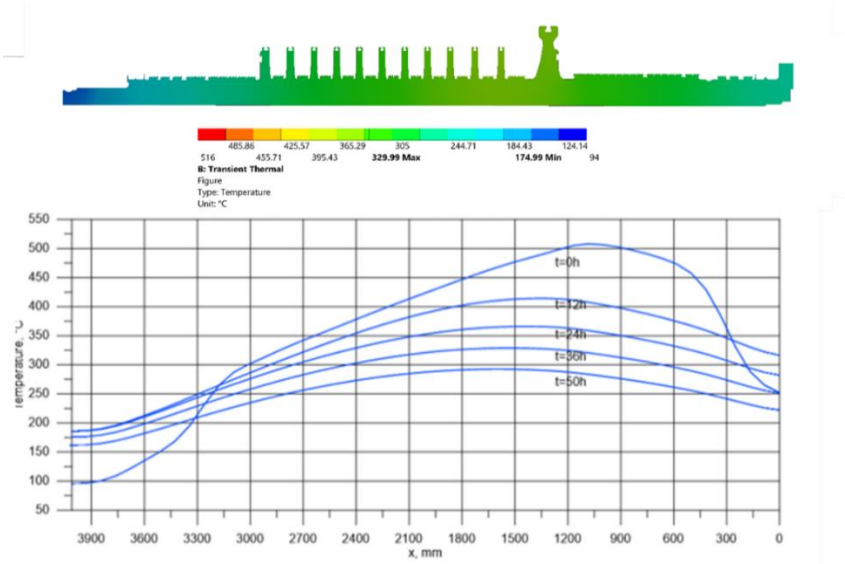
Proces optymalizacji rozruchów turbiny ze stanu ciepłego jest procesem bardziej złożonym niż rozruchy ze stanu zimnego. Wynika to z faktu, że rozruch z tego stanu obejmuje rozruchy zarówno po kilkunastu jak i po kilkudziesięciu godzinach postoju, a w związku z tym stan termiczny elementów po takich okresach stygnięcia może być różny. Stąd też procedura optymalizacyjna w pierwszym etapie musi zawierać analizę procesu stygnięcia elementów. Z uwagi na fakt, że nawet dla tych samych bloków energetycznych, turbiny mogą różnić się rozwiązaniami konstrukcyjnymi, sposobem organizacji przepływu pary dodatkowej do uszczelnień, a także np. jakością izolacji, to proces stygnięcia może przebiegać w różny sposób. Wynikiem tej analizy powinny być krzywe odzwierciedlające zmiany temperatury poszczególnych elementów turbiny w czasie stygnięcia. Szczególnie ważne jest określenie tej zmiany w obszarach wlotowych poszczególnych elementów, w tym wirników, ponieważ to te obszary przy powtórnym uruchomieniu zetkną się z parą wpływającą do układu przepływowego. Różnica temperatur ΔT_{pm} pomiędzy temperaturą pary i temperaturą metalu elementu będzie miała wpływ na generowane, w tym obszarze, naprężenia termiczne. A zatem pierwszą wielkością optymalizowaną będzie różnica temperatur ΔT_{pm}. Kolejnymi wielkościami optymalizowanymi przy nagrzewaniu wirnika ze stanu ciepłego są pochodne zmiany temperatury pary dTp_1/dt, dTp_2/dt, dTp_3/dt, oraz dTp_4/dt, a także czas stabilizacji temperatury t_p (rys. 11.3). W kolejnym kroku dla zoptymalizowanej krzywej zmiany temperatury dobierane są krzywe zmian ciśnienia, mocy i obrotów wirnika.



Rys. 11.3. Wielkości optymalizowane charakterystyki nagrzewania wirnika ze stanu ciepłego
Fig. 11.3. Optimized quantities of the characteristic of the rotor heating from the warm state

Jako przykład doboru optymalnych parametrów prowadzenia rozruchu ze stanu ciepłego omówiono proces nagrzewania wirnika wysokoprężnego turbiny 200 MW

po 36 godzinach stygnięcia. W pierwszym etapie wykonano symulacje komputerowe procesu stygnięcia wirnika WP. Rysunek 11.4 w części dolnej przedstawia rozkład temperatury na powierzchni otworu centralnego wirnika w trakcie procesu stygnięcia. W części górnej pokazano rozkład temperatury w wirniku po 36 godzinach stygnięcia.W drugim etapie dla takiego stanu termicznego wirnika dobrano krzywą nagrzewania, która pozwala na najszybsze jego nagrzanie przy zachowaniu maksymalnych naprężeń poniżej wartości dopuszczalnych. Wartość naprężeń dopuszczalnych mieszczących się w zależności od temperatury w przedziale od 250 MPa do 300 MPa, ustalono na podstawie badań mikro próbek materiału wirnika wykonanych metodą SPT. Przedstawiony powyżej model optymalizacji rozruchów turbiny wskazuje, że możliwe jest bezpieczne przyspieszenie procesu nagrzewania głównych elementów turbiny, a tym samym możliwe jest skrócenie czasu rozruchu.



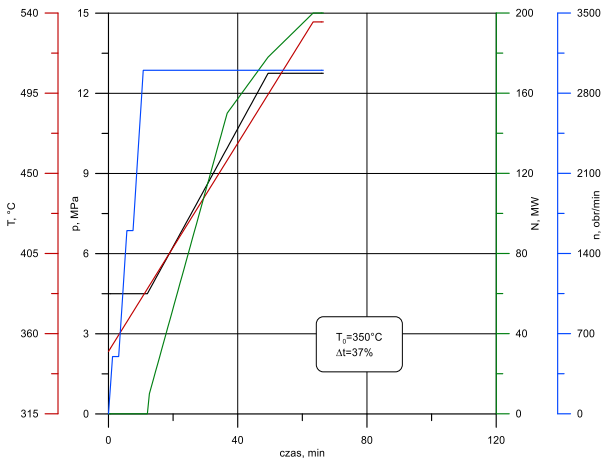
Rys. 11.4. Pole temperatury po 36 godzinach stygnięcia wirnika oraz rozkład temperatury na powierzchni otworu centralnego w czasie stygnięcia

Fig. 11.4. Temperature field in after 36 hour of cooling and the temperature distribution on the central bore surface during the cooling process

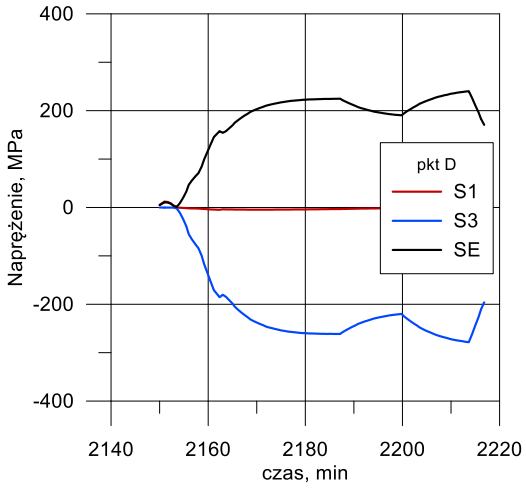
Zoptymalizowaną dla takich warunków krzywą zmian temperatury pary świeżej, a także krzywe opisujące zmianę ciśnienia i obroty wirnika pokazano na rys. 11.5 Przebieg czasowy naprężeń składowych i zredukowanych w obszarze uszczelnień, w którym naprężenia osiągają maksymalne wartości pokazano na rys. 11.6.

Zaprezentowane wyniki dotyczące rozruchów ze stanu ciepłego wskazują na możliwości skrócenia ich czasu nawet o 50% względem rozruchów prowadzonych według charakterystyk producenta. Dostosowane do aktualnego stanu termicznego turbiny charakterystyki rozruchowe zapewniają istotne skrócenie czasu rozruchu

turbiny przy jednoczesnym utrzymaniu poziomu naprężeń poniżej wartości dopuszczalnych, ustalonych dla każdego konkretnego elementu.



Rys. 11.5. Zoptymalizowany przebieg parametrów rozruchowych turbiny po 36 godzinach stygnięcia
Fig. 11.5. Optimized history of changes in the turbine start-up parameters after 36 hours of cooling



Rys. 11.6. Przebieg maksymalnych naprężeń w wirniku WP podczas zoptymalizowanego rozruchu
Fig. 11.6. Histories of maximum stresses in HP rotor during the optimized start-up

11.4. Procedura planowania rozwoju systemu elektroenergetycznego

Zadaniem systemu elektroenergetycznego jest umożliwienie współpracy pomiędzy wytwórcami i odbiorcami energii elektrycznej. Do realizacji tego zadania służy sieć elektroenergetyczna, do której przyłączone są współpracujące synchronicznie urządzenia elektryczne wytwórców i odbiorców. Współpraca ta ma wymiar bieżący – operacyjny oraz przyszły – planistyczny. Połączenia sieciowe, które umożliwiają przesył energii elektrycznej od węzłów wytwórczych do węzłów odbiorczych z uwagi

na swoje parametry nie zawsze mogą sprostać oczekiwaniom użytkowników systemu. Ograniczenie możliwości przesyłu jest jednym z bodźców rozwojowych systemu elektroenergetycznego. Planowanie rozwoju sieci elektroenergetycznej ma za zadanie likwidację ograniczeń sieciowych.

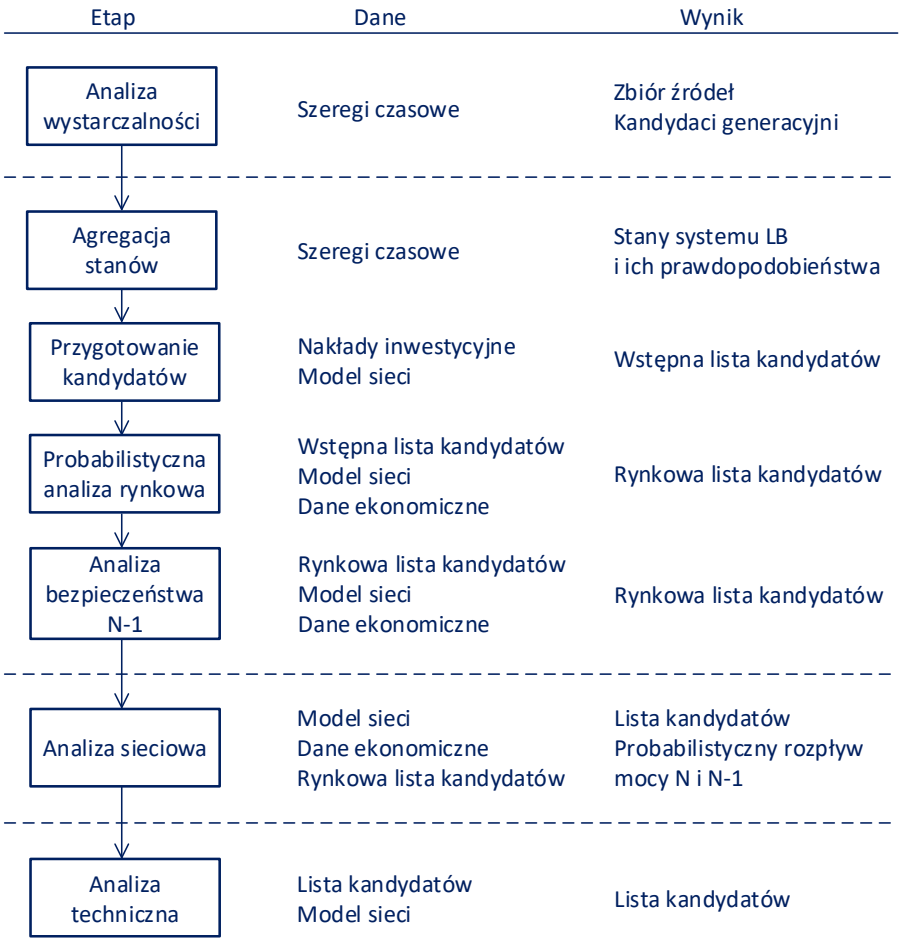
Modelując proces planowania rozwoju należy przede wszystkim uwzględnić [21, 22]:

- warunki rynkowe (przy spełnieniu wymogów środowiskowych), w których wskazanym jest odwzorowanie struktury „podażowej" energii na rynku, wyróżniając rodzaj i konkurencyjność źródeł wytwórczych. Swoboda wyboru sprzedawcy na rynku energii oznacza, że szczególnym zainteresowaniem odbiorców cieszą się te źródła, które są efektywne rynkowo.
- działania po stronie popytowej, tj. reakcję odbiorców w zakresie zmiany zapotrzebowania i wyboru sposobu pokrycia zapotrzebowania na energię. W szczególności należy tu uwzględnić inne nośniki energii, które mogą stać się substytutem energii elektrycznej przetwarzanej do postaci użytkowej a wykorzystywanej bezpośrednio przez odbiorcę w miejscu jej konsumpcji.
- niepewność przyszłych uwarunkowań pracy sieci przesyłowej i sieci dystrybucyjnej poprzez wieloaspektowe podejście, polegające na tworzeniu scenariuszy: popytu, podaży, wymiany międzyobszarowej oraz ich kombinacji.
- kryteria ekonomiczne pozwalające na wybór strategii optymalnych dla poszczególnych scenariuszy i badanych obszarów, a następnie strategii suboptymalnej (preferowanej), która zawierać będzie spójną ścieżkę rozwoju sieci.

Wymogi ustawy Prawo energetyczne zobowiązują podmioty pełniące obowiązki operatorów sieciowych do prowadzenia samodzielnej, w oderwaniu od zasad monopolistycznych, polityki rozwoju sieci. W tej sytuacji zadania związane z analizami przedsięwzięć rozwojowych, pokrywania kosztów inwestycji i ich opłacalność należą do operatorów właściwych danym obszarom sieci. W świetle sprostania nowym wymaganiom procesu planowania należy zauważyć i założyć, że przy wielokryterialności zadania planowania podstawowym kryterium optymalizacji rozwoju powinien być rachunek ekonomiczny, w którym można uwzględnić poszczególne wymiary procesu.

Na podstawie przyjętych założeń przygotowano ścieżkę analityczną prowadzonych obliczeń [23]. Podejście przedstawione na rys. 11.7 uwzględnia elementy stochastyczne i losowe w procesie analitycznym na etapie poszukiwania rozwiązań optymalnych, które w tym przypadku mają doprowadzić do wypracowania harmonogramu inwestycji sieciowych. Na rysunku tym wyróżniono trzy kolumny

informacji wskazując na zadanie analityczne, sposób przygotowania i wykorzystania danych oraz spodziewane wyniki. Przedstawiony proces rozwoju Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) uwzględnia elementy wprowadzające (analiza wystarczalności) jak i elementy wieńczące (analiza techniczna).



Rys. 11.7. Procedura opracowania planu rozwoju KSE [23]
Fig. 11.7. Procedure for the preparation of the PPS development plan [23]

Przygotowana procedura rozszerza opracowaną i stosowaną aktualnie [24]. Głównym elementem zmian jest wprowadzenie analizy wystarczalności stosowanej przez ENTSO-E oraz analizy agregującej dane wejściowe [23]. Analiza wystarczalności pozwala na ocenę potrzeb i dostępności mocy wytwórczych w perspektywie wieloletniej. Ocena ta następuje bez udziału sieci, a więc porównaniu podlega zdolność wytwórcza z uwzględnieniem struktury źródeł z prognozą zapotrzebowania. W zakresie agregacji danych zaproponowano procedury klasteryzacyjne, których zastosowanie istotnie zmniejsza liczebność danych, przy zachowaniu poprawności odwzorowania warunków pracy systemu elektroenergetycznego.

Dodatkowo proponuje się uwzględnienie niepewności w procesie planowania, co zostaje wdrożone w ramach probabilistycznego podejścia do planowania rozwoju KSE [25]. Elementy probabilistyki wprowadzono do oceny wystarczalności generacji oraz do oceny obciążeń gałęziowych, co rzutuje na potrzeby inwestycyjne w sieci przesyłowej. Takie ujęcie tematu rozwija dotychczas stosowane tradycyjne podejście deterministyczne oparte na stanach charakterystycznych. Pozwala to na uwzględnienie istotnych czynników wpływających na przyszłą jakość pracy systemu elektroenergetycznego, w tym na bezpieczeństwo i jego niezawodność [26]. Podejście probabilistyczne zabezpiecza również wymagania użytkowników systemu ograniczając poziom kosztów przeinwestowania (strended cost) podnosząc tym samym wiarygodność i użyteczność rozwijanych procedur planistycznych.

11.5. Nowe konstrukcje turbogeneratorów dostosowane do pracy regulacyjnej

Zmniejszenie emisji dwutlenku węgla oraz innych szkodliwych substancji wymaga zwiększania udziału, w systemie elektroenergetycznym, energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Moc generatorów wiatrowych i paneli fotowoltaicznych silnie zależy od warunków pogodowych. Zarówno prędkość wiatru, jak i poziom nasłonecznienia ulegają dużym i ciągłym zmianom. Zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego wymaga zatem odpowiedniej rezerwy mocy w systemie, pochodzącej ze źródeł o regulowanej wydajności niezależnej od warunków pogodowych. Turbogeneratory z opracowanymi nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi spełniają podane wymagania.

Zaprojektowane i wdrożone innowacyjne rozwiązania zapewniły wieloletnią bezawaryjną pracę turbogeneratorów przy częstych odstawieniach i załączeniach do systemu oraz dużej i ciągłej regulacji mocy. Rozwiązania te powstały w wyniku 30-letniej współpracy Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z firmą EthosEnergy Poland SA w Lublińcu mającą silną pozycję na światowym rynku elektroenergetyki.

Efektem badań naukowych wykonanych na Politechnice Śląskiej było między innymi opracowanie nowej metody zmodyfikowanych sieci cieplnych do obliczeń pola temperatury w dużych maszynach prądu przemiennego [27]. Na bazie tej metody wykonano programy zaimplementowane w systemach komputerowego wspomagania projektowania turbogeneratorów. Przy ich wykorzystaniu opracowano projekty

modernizacji wielu typów turbogeneratorów o mocy od 6 MW do 600 MW w celu dostosowania do pracy regulacyjnej przy jednoczesnym podwyższeniu mocy, w niektórych przypadkach nawet o ponad 20%.

Na rys. 11.8 i 11.9 przedstawiono efekt przykładowej modernizacji wirnika turbogeneratora o mocy 120 MW. Przejście turbogeneratora do pracy regulacyjnej przy częstych odstawieniach, powodowało powstawanie powtarzających się rozległych uszkodzeń czół uzwojenia wirnika (rys. 11.8), nawet już po kilku miesiącach od wykonania remontu. Wprowadzone innowacyjne rozwiązanie uzwojenia wirnika całkowicie wyeliminowało to zjawisko. Po 5 latach eksploatacji zmodernizowanego turbogeneratora wyjęto wirnik i zdjęto kołpaki (rys. 11.9). W uzwojeniu wirnika nie stwierdzono żadnych zmian.

Rys. 11.8. Czoła uzwojenia wirnika turbogeneratora fabrycznego o mocy 120 MW
Fig. 11.8. The coil outhangs of turbogenerator rated originally at 120 MW

Rys. 11.9. Czoła uzwojenia wirnika zmodernizowanego turbogeneratora o mocy podwyższonej do 130 MW po 5 latach eksploatacji
Fig. 11.9. The coil outhangs of modernized turbogenerator, the power increased up to 130 MW after 5 years of operation

Wykonane projekty nowych rozwiązań konstrukcyjnych turbogeneratorów wdrożono przy rewitalizacji bloków energetycznych w elektrowniach w ramach rządowego programu dla polskiej energetyki „Bloki 200+”. Naukowcy z Wydziału

Elektrycznego brali udział w projekcie Feniks, w ramach którego w latach 2012–2020 przeprowadzono gruntowną modernizację sześciu bloków energetycznych w Elektrowni Połaniec [28], podwyższając ich moc z 200 MW do 242 MW przy jednoczesnym zwiększeniu żywotności poprzez dostosowanie konstrukcji (w szczególności turbogeneratorów [29]) do pracy regulacyjnej.

Efektem współpracy firmy EthosEnergy Poland SA w Lublińcu z Wydziałem Elektrycznym Politechniki Śląskiej jest opracowanie licznych nowych rozwiązań konstrukcyjnych turbogeneratorów [30–32]. Zmodernizowane turbogeneratory pracują w wielu krajach Unii Europejskiej (między innymi w Finlandii, Grecji, Bułgarii i Słowenii), a także w Korei Południowej i Chinach. Turbogeneratory te są eksploatowane zwykle doraźnie przy dużej regulacji mocy, zapewniając bilansowanie mocy w systemie elektroenergetycznym w okresach zwiększonego zapotrzebowania połączonego ze zmniejszeniem wydajności źródeł odnawialnych na skutek złych warunków pogodowych.

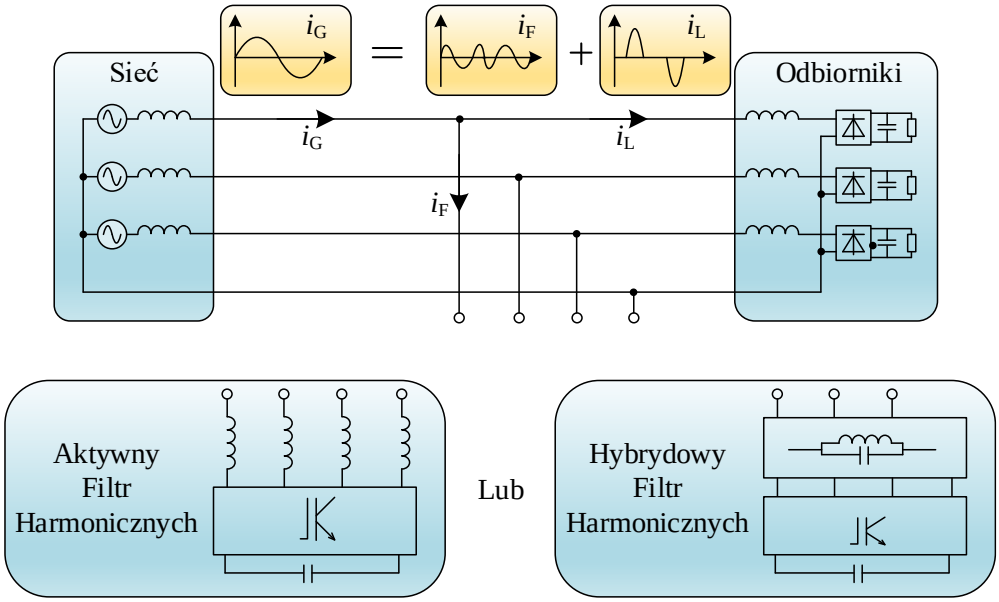
Uzyskane wyniki badań naukowych dotyczących doskonalenia konstrukcji turbogeneratorów zakończone wieloma wdrożeniami umożliwiają bezpieczne przejście od produkcji energii elektrycznej opartej głównie na paliwach kopalnych do wytwarzania jej ze źródeł odnawialnych, przyczyniając się tym sposobem do ochrony środowiska naturalnego.

11.6. Jakość energii elektrycznej – zapewnienie parametrów i niezawodności, w tym kompensacja mocy biernej i filtracja wyższych harmonicznych

Poprawa jakości energii elektrycznej jest obecnie tematem wielu prac naukowych. Problem jakości energii elektrycznej stał się wyraźniejszy, od kiedy większość urządzeń podłączanych do sieci stanowią odbiorniki nieliniowe. Przykładem takich odbiorników może być każde urządzenie, którego stopniem wejściowym jest prostownik diodowy z filtrem pojemnościowym. Taki odbiornik charakteryzuje się poborem prądu odkształconego, gdyż prądy płyną tylko w przypadku, gdy chwilowe napięcie sieciowe przekracza wartość napięcia na kondensatorze obwodu DC. Prąd sieciowy przybiera kształt impulsowy, a na potrzeby analizy matematycznej badany przebieg czasowy rozbija się na składowe harmoniczne: podstawową o częstotliwości napięcia zasilającego i kolejne o częstotliwościach będących wielokrotnością

składowej podstawowej. Parametr THD (Total Harmonics Distortion), wskazuje procentowy udział składowych harmonicznych prądu o wyższych częstotliwościach.

Dostarczanie energii za pomocą odkształconych prądów wiąże się ze zwiększonymi stratami w torze przesyłania. Z jednej strony pobudza to rozwój urządzeń zasilających i projektowanie ich w sposób zmniejszający odkształcenie pobieranego prądu. Z drugiej strony wiele odbiorników nieliniowych już pracuje i konieczne jest przeciwdziałanie ich wpływowi. Wśród dostępnych środków można wymienić pasywne i aktywne filtry wyższych harmonicznych. Rozwiązania pasywne, dobierane do konkretnej mocy i charakteru odbiornika, są stosowane głównie w dużych instalacjach trójfazowych. Rozwiązania filtrów aktywnych (rys. 11.10) charakteryzują się większą elastycznością. W ich skład wchodzą przekształtniki energoelektroniczne sterowane w taki sposób, aby prąd pobierany z sieci, będący sumą prądu odbiornika i filtra, a miał charakter quasi-sinusoidalny i był współfazowy z przebiegiem napięcia.



Rys. 11.10. Zasada podłączenia filtrów aktywnych do sieci elektroenergetycznej
Fig. 11.10. The principle of connecting active filters to the power grid

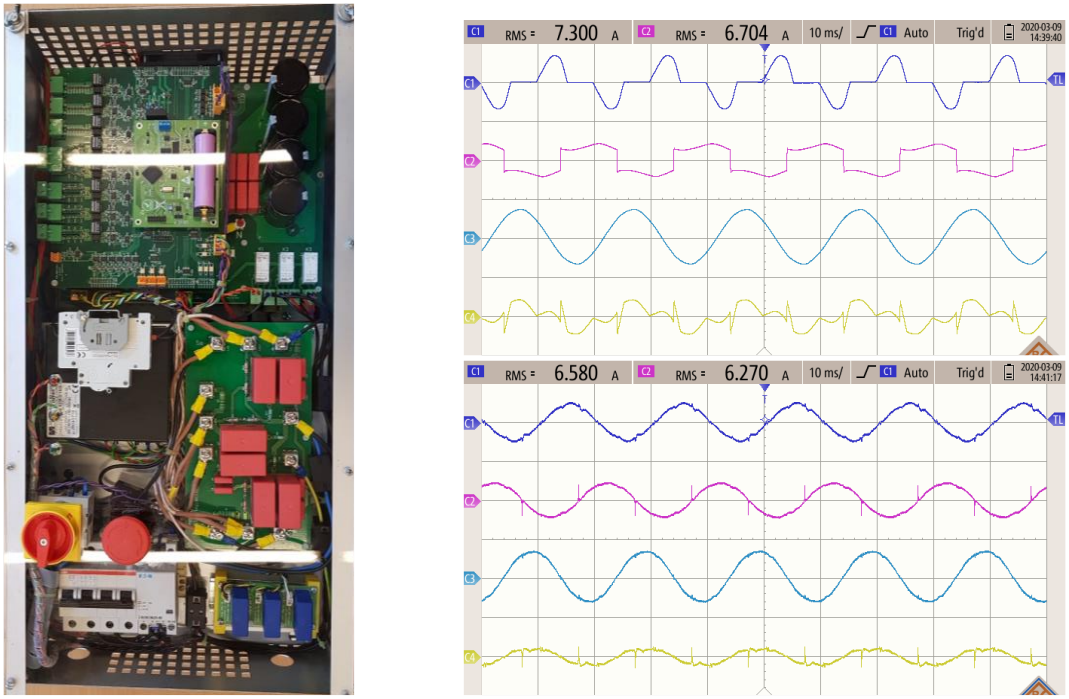
Jako typowe urządzenia pobierające prąd odkształcony wymienia się najczęściej napędy elektryczne i urządzenia elektrotermiczne. Obecnie problemem staje się wzrastająca liczba urządzeń jednofazowych z prostownikowym stopniem wejściowym. Są nimi np. zasilacze urządzeń elektroniki użytkowej, ale także współczesne pralki, lodówki, klimatyzatory oraz energooszczędne źródła światła. Źródła odkształcenia prądu mają więc charakter rozproszony. W gospodarstwie

domowym jest to kilkanaście odbiorników losowo włączanych do sieci, w budynkach użyteczności publicznej i firmach może to być kilkadziesiąt odbiorników.

Zespół pracowników Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej ma duże doświadczenie w opracowywaniu i wdrażaniu konstrukcji filtrów aktywnych, w tym filtrów hybrydowych. W latach 2016–2019 prowadzono dwa projekty zlecone przez odbiorców przemysłowych. Dla firmy Rabbit Sp. z o.o. specjalizującej się w systemach zasilania i sterowania oświetleniem ulicznym opracowano Aktywny Filtr Harmonicznych małej mocy (do 20A). Celem prowadzonych prac było opracowanie i uruchomienie prototypowego aktywnego filtra wyższych harmonicznych, przeznaczonego do poprawy jakości energii pobieranej przez budynki biurowe, czy też oświetlenie uliczne. Wśród podstawowych założeń przyjęto przede wszystkim wysoką sprawność urządzenia. Kolejnym ważnym założeniem, wynikającym z potencjalnego zastosowania filtrów aktywnych, była możliwość pracy z odbiornikami niesymetrycznymi. W takim przypadku prąd każdej fazy musi być analizowany niezależnie, a jednocześnie założono, że urządzenie nie będzie symetryzowało obciążenia. Takie założenia sprawiają, że konieczne jest zastosowanie przekształtnika czterogałęziowego, z dostępnym punktem neutralnym. Ostatnim założeniem była kompaktowa konstrukcja filtra aktywnego. Z uwagi na to, że znaczną część objętości przekształtników sieciowych zajmują pasywne filtry wejściowe zapewniono minimalizację wymaganych wartości indukcyjności i pojemności. Można to osiągnąć zwiększając częstotliwość przełączeń lub stosując przekształtniki wielopoziomowe [33].

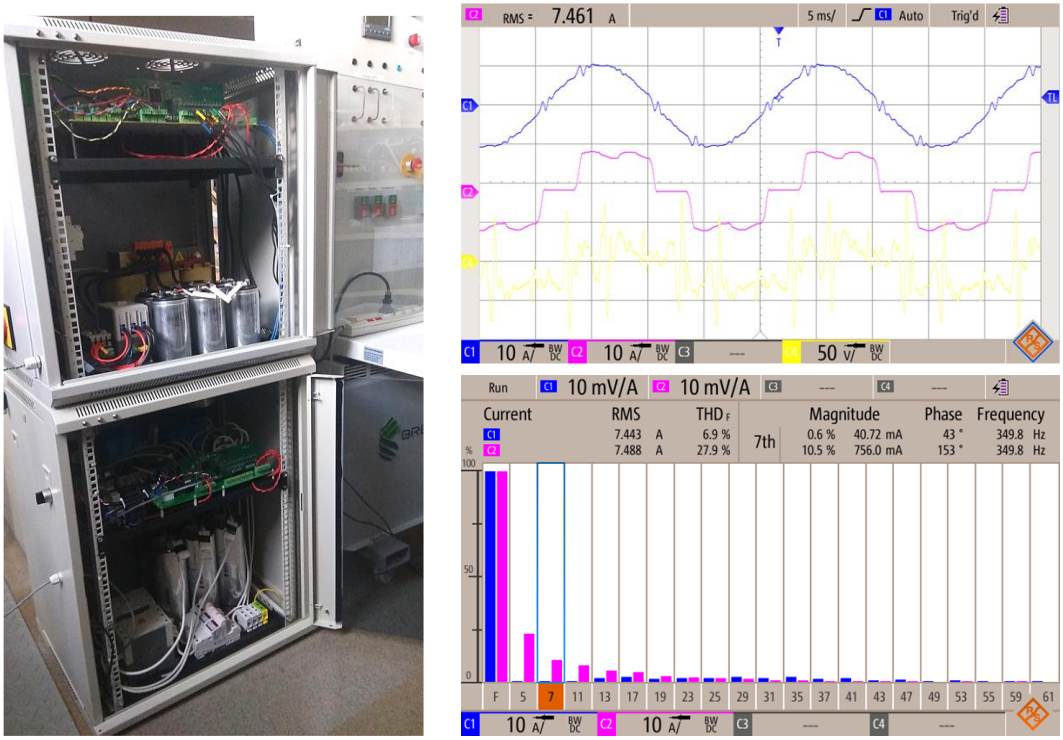
W opracowanym rozwiązaniu stopień energoelektroniczny zbudowano w oparciu o przekształtnik o topologii NPC-T. Wykorzystano zarówno trójpoziomowy charakter napięcia wyjściowego przekształtnika, jak i występowanie w nim dzielonego obwodu napięcia stałego, którego punkt środkowy można podłączyć do przewodu neutralnego. Zaprojektowany filtr może pracować w trzech trybach kompensacji: tylko mocy biernej, tylko wyższych harmonicznych lub obu parametrów jednocześnie. Ilustrację działania układu przedstawiono na rys. 11.11 i 11.12. Zamieszczone przebiegi czasowe prądów w poszczególnych fazach potwierdzają poprawną kompensację zarówno wyższych harmonicznych (faza 1 i 2), jak i mocy biernej (faza 3).

W projekcie realizowanym we współpracy z Ośrodkiem Pomiarów i Automatyki S.A. opracowano filtr o strukturze hybrydowej. Filtr taki składa się z części pasywnej, dostrojonej do filtracji piątej harmonicznej i części aktywnej, odpowiedzialnej za pozostałe harmoniczne [34]. Przy połączeniu szeregowym części pasywnej i aktywnej klasa napięciowa przekształtnika może być niższa.



Rys. 11.11. Opracowany prototyp Aktywnego Filtra Harmonicznych oraz przebiegi czasowe prądów fazowych (C1-C3) i w przewodzie neutralnym (C4) po stronie odbiorników (na górze) i po stronie sieci (na dole)

Fig. 11.11. The developed prototype of the Active Harmonic Filter and the phase (C1-C3) and neutral (C4) currents on the receivers side (top) and on the mains side (bottom)



Rys. 11.12. Opracowany prototyp Hybrydowego Filtra Harmonicznych oraz przebiegi czasowe prądów fazowych po stronie sieci (C1) i po stronie odbiorników (C2) oraz ich widmo harmonicznych

Fig. 11.12. The developed prototype of the Hybrid Harmonic Filter and the waveforms of the phase currents on the mains side (C1) and on the receivers (C2) and their harmonic spectrum

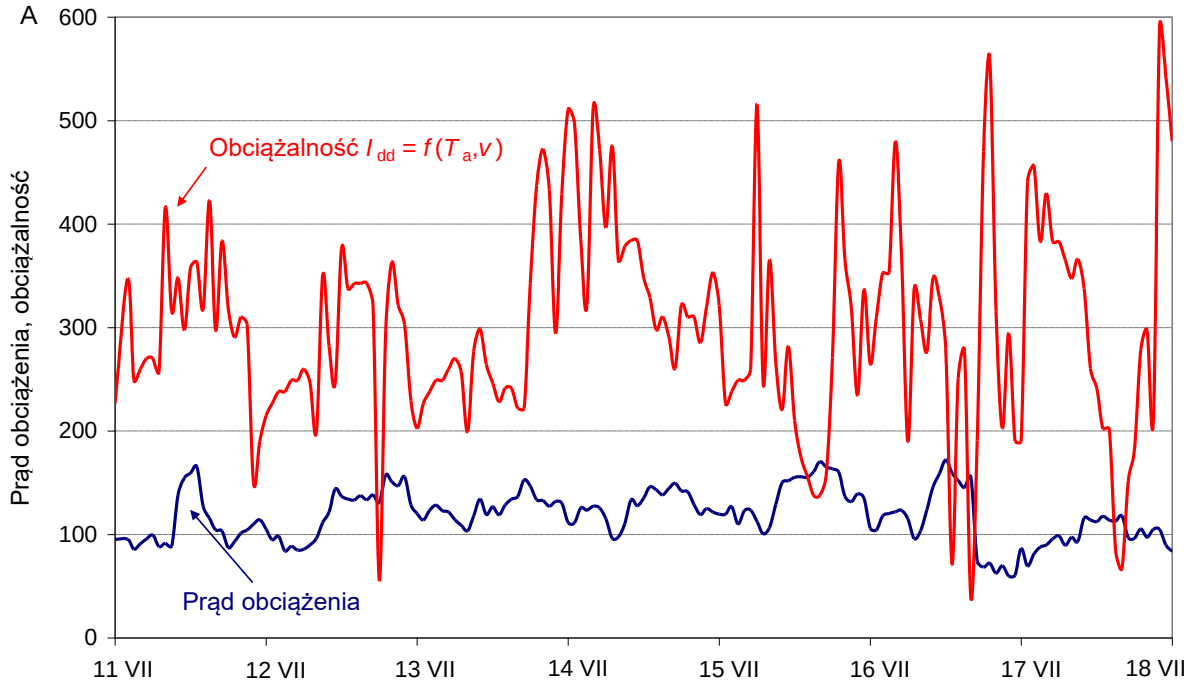
11.7. Intensyfikacja wykorzystania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego

Linie napowietrzne wysokiego i najwyższego napięcia są budowane na długi czas eksploatacji. W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) można wskazać wiele linii napowietrznych wybudowanych przed kilkudziesięciu laty, które aktualnie wymagają podjęcia działań modernizacyjnych w celu zachowania ich dalszej bezpiecznej i niezawodnej pracy. Przez cały okres pracy linii napowietrznej, przewody robocze i odgromowe poddawane są oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym. Do wspomnianych oddziaływań można zaliczyć osadzanie oblodzenia oraz działanie siły wiatru, jak również nagrzewanie się przewodów do wysokich temperatur, głównie podczas szczytowego obciążenia letniego. Głównym zadaniem linii napowietrznych jest przesłanie energii elektrycznej pomiędzy węzłami KSE przy zapewnieniu bezpieczeństwa ludzi i obiektów znajdujących się w przestrzeni pod przewodami, stąd niezwykle istotne jest zachowanie odpowiedniej koordynacji odległości pionowych pomiędzy przewodami fazowymi a obiektami pod linią.

Jednym z podstawowych parametrów linii napowietrznej, oprócz napięcia znamionowego i charakterystycznych cech konstrukcyjnych, jest obciążalność prądowa. Obciążalność prądowa linii napowietrznej to taka wartość prądu przy której przewody fazowe nagrzewają się do temperatury granicznej roboczej, a więc do najwyższej możliwej temperatury determinującej odległości pionowe względem krzyżowanych obiektów [35, 36]. Rzeczywista obciążalność prądowa linii zależy od parametrów zastosowanego przewodu roboczego oraz od czynników atmosferycznych wpływających na bilans cieplny przewodu, a więc od temperatury powietrza, intensywności promieniowania słonecznego oraz prędkości i kąta natarcia wiatru względem przewodów.

Zmiany w sektorze wytwórczym, polegające między innymi na intensywnym instalowaniu źródeł energetyki odnawialnej, jak również rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną w okresie letnim sprawiają, że prądy obciążenia linii wysokich i najwyższych napięć zmieniają się w szerokim zakresie, powodując tym samym powstawanie ograniczeń sieciowych widocznych w liniach o niewystarczającej przepustowości. Sytuacja ta dotyczy głównie linii zaprojektowanych dla temperatury granicznej roboczej równej 40°C. Rozwiązaniem problemu niskiej obciążalności prądowej tych linii, może być wykorzystanie probabilistycznych modeli obciążalności prądowej, pozwalających na wyznaczenie obciążalności linii dla aktualnie występujących warunków pogodowych, z uwzględnieniem akceptowanego ryzyka

przekroczenia temperatury granicznej roboczej linii. Na rys. 11.13 pokazano przebieg dynamicznej obciążalności prądowej linii 110 kV w wybranym okresie letnim, na tle prądu obciążenia zarejestrowanego w rozpatrywanej linii.



Rys. 11.13. Dynamiczna obciążalności prądowa linii napowietrznej 110 kV w wybranym okresie letnim [36]
Fig. 11.13. Dynamic thermal rating of the 110 kV overhead line in the selected summer period [36]

Odejście od obciążalności sezonowej, a więc wykorzystywania dwóch wartości dopuszczalnego prądu linii z podziałem na sezon letni i zimowy na rzecz obciążalności dynamicznej, pozwala na średni 50% wzrost obciążalności linii w okresie letnim. W przypadku linii 110 kV pozwoli to na zwiększanie średniej mocy przesyłanej linią z 57 MW (325 A, cosφ=0,93) do 86 MW (486 A). W sytuacji kiedy wymagane jest kilkukrotne zwiększenie obciążalności prądowej linii, możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie przewodów nowej generacji, cechujących się wysoką odpornością cieplną aluminium stanowiącego oplot tych przewodów oraz niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej rdzeni tych przewodów. Wykorzystanie nowoczesnych stopów aluminium do budowy oplotu przewodu oraz zastosowanie kompozytu węglowo-szklanego czy wysokowytrzymałej stali do budowy rdzenia, pozwala na otrzymanie przewodów umożliwiających 2–3 krotne zwiększenie obciążalności prądowej linii w sezonie letnim, przy zachowaniu aktualnie występujących poziomów zwisów. Wymiana istniejących przewodów na przewody nowej generacji jest możliwa w stosunkowo krótkim czasie, bez konieczności przebudowy konstrukcji wsporczych. Obie opisane powyżej metody pozwalają na zwiększenie obciążalności istniejących

linii napowietrznych w sieci WN i NN poprzez pełniejsze wykorzystanie całkowitych zdolności przesyłowych tych linii. Intensyfikacja wykorzystania istniejącej infrastruktury sieciowej pozwala na przesunięcie w czasie budowy nowych linii, co z uwagi na bariery natury formalnej i prawnej jest trudnym i czasochłonnym zadaniem.

Inną formą intensyfikacji wykorzystania infrastruktury sieciowej jest budowa linii o rożnych napięciach na jednej wspólnej konstrukcji wsporczej [37]. Takie linie nazywa się liniami wielotorowymi wielonapięciowymi. Linie te charakteryzują się większą efektywnością zajętości terenu pod ich budowę w stosunku do osobno prowadzonych linii w tym samym pasie technologicznym, dlatego z punktu widzenia środowiskowego są bardzo korzystne. Również aspekty kosztowe ich budowy przemawiają za ich rozwojem. Z racji tego, że są elementem nietypowym należy dokonać ich szerokiej analizy w procesie pracy systemu elektroenergetycznego. Konstrukcja linii napowietrznych sprawia, że są one elementami niesymetrycznymi elektrycznie i dlatego mogą niekorzystnie wpływać na pracę ich otoczenia oraz na jakość energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców. Aby zminimalizować ten wpływ dokonuje się zwykle symetryzacji linii poprzez wykonanie przeplotów faz. W przypadku linii wielotorowych z torami o różnych napięciach jest to bardzo utrudnione, dlatego należy poszukiwać minimalnych koniecznych przeplotów, aby zminimalizować ich niekorzystny wpływ na otoczenie. Ważnym aspektem jest również analiza oddziaływania elektromagnetycznego na otoczenie, przez wyznaczenie wartości natężeń pól elektrycznego i magnetycznego w sąsiedztwie takich linii. Aktualnie prowadzone są prace nad modelowaniem parametrów elektrycznych tych linii oraz badaniami ich wpływu na otoczenie sieciowe i środowisko naturalne.

Bibliografia

1. Manowska A.: Modelowanie zmian struktury miksu energetycznego Polski wynikających ze światowych megatrendów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2021.
2. Manowska A.: Analysis and forecasting of the primary energy consumption in Poland using deep learning. Inżynieria Mineralna, 21(1), 2020, p. 217–222.
3. Manowska A.: Identification of diagnostic variables for research into the level of development of energy markets, 6th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2020), 7–11 September 2020, Prague, Czech Republic [online]. Eds. Isik Yilmaz, Marian Marschalko, Marian Drusa. Adres wydawniczy: Bristol: Institute of Physics, 2020, p. 1–11.

4. Manowska A.: Using the LSTM network to forecast the demand for electricity in Poland. Applied Sciences, 10(23), 2020, p. 1–16.
5. Manowska A.: Using the LSTM network to forecast the demand for hard coal. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 36(4), 2020, p. 33–48.
6. Adhikari R., Agrawal R.K.: An introductory study on time series modeling and forecasting. LAP Lambert Academic Publishing, [Germany] 2013.
7. Graves A., Liwicki M., Fernández S., Bertolami R., Bunke H., Schmidhuber J.: A Novel Connectionist System for Unconstrained Handwriting Recognition. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 31(5), 2008, p. 855–868.
8. Hosking J.R.M.: Demand forecasting problems in production planning. Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise. International Series in Operations Research & Management Science, 151, 2011.
9. Cho K., van Merrienboer B., Gulcehre C., Bahdanau D., Bougares F., Schwenk H., Yoshua B.: Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation. The Large Text Compression Benchmark, 2014.
10. Hochreiter S., Schmidhuber J.: Long short-term memory. Neural Computation, 9(8), 1997, p. 1735–1780.
11. Rusin A., Wojaczek A.: Trends of changes in the power generation system structure and their impact on the system reliability. Energy, 92, 2015, p. 128–134.
12. Łukowicz H., Rusin A.: The impact of the control method of cyclic operation on the power unit efficiency and life. Energy, 150, 2018, p. 565–574.
13. Ji D., Sun J., Sun Q., Guo H-C., Ren J.: Optimization of start-up scheduling and life assessment for a steam turbine, Energy, 160, 2018, p. 19–32.
14. Richter M., Oeljeklaus G., Gorner K.: Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage. Applied Energy, 236, 2019, p. 607–621.
15. Sun Y-J., Liu X-Q., Hu L-S., Tang X-Y.: Online life estimation for steam turbine rotor. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26, 2013, p. 272–279.
16. Du Q-W., Zheng Z-L., Xie Y-H.: Optimization on start-up process of high-pressure rotor for large power steam turbine. Thermal Science, 20, 2016, p. 815–822.
17. Ji D-M., Sun J-Q., Dui Y., Ren J-X.: The optimization of the start-up scheduling for a 320 MW steam turbine. Energy, 125, 2017, p. 345–355.
18. Nowak G., Rusin A., Łukowicz H., Tomala M.: Improving the power unit operation flexibility by the turbine start-up optimization. Energy, 198, 2020.
19. Rusin A., Łukowicz H., Kosman W.: Transient Temperature and Thermal Stresses in Turbine Components, [in:] Hetnarski R. (ed.): Encyclopaedia of Thermal Stresses, Springer Science, [Netherlands] 2015.
20. Chmielniak T., Nowak G., Łukowicz H., Rusin A.: Analysis of Thermal and Stress States in Transient Operation of a Turbine Co-operating with Twinboiler, Heat Transfer Engineering, 39 (13-14), 2017, p. 1251–1259.
21. Lubicki W., Przygrodzki M.: Planning process of Polish transmission grid under non-deterministic conditions. CIGRE Session C1-109, Paris 2018.
22. Przygrodzki M., Gwóźdź R., Wakuliński Ł.: Selection of chosen model parameters for technical and economic analyzes of the power system. 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), DOI: 10.1109/EPE.2019.8777997, IEEE Xplore, 2019.
23. Przygrodzki M., Kubek P.: The Polish Practice of Probabilistic Approach in Power System Development Planning. Energies, 14(1), 2021, 161.
24. Procedura tworzenia i aktualizacji Planu Rozwoju Sieci Przesyłowej (PRSP). Nr procedury 104.003.DS/Z/2014. PSE S.A.

25. Kubek P., Przygrodzki M.: Wybrane aspekty wykorzystania elementów probabilistycznych w planowaniu rozwoju sieci przesyłowej. Przegląd Elektrotechniczny, 94(12), 2018.
26. Przygrodzki M., Kubek P., Gwóźdź R.: The Use of Probabilistic Approach in Power System Security Analyses. 21th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269201, IEEE Xplore, 2020.
27. Krok R.: Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
28. Kwiatkowski A.: Ekoinwestycje Enei Elektrowni Połaniec. Energetyka, 6, 2020, p. 257–259.
29. Krok R., Pasko M.: The modernization of turbogenerators as a method of decreasing electrical energy production costs. Technical Transactions, 112, 2015, p. 191–201.
30. Krok R., Pasko M.: Continuation of Prof. Władysław Lateks research – revitalization of old power units. Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, 64(4), 2016, p. 957–962.
31. Adamek J., Krok R., Maniara R., Baron D.: Układ chłodzenia wirnika turbogeneratora, patent na wynalazek nr 224128. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, 2016.
32. Sieradzki S., Adamek J., Kardas D., Kapinos J., Krok R.: Przewód uzwojenia wzbudzenia generatora, patent na wynalazek nr 218474. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, 2014.
33. Vodyakho O., Mi Ch.: Three-Level Inverter-Based Shunt Active Power Filter in Three-Phase Three-Wire and Four-Wire Systems. Power Electronics, IEEE Transactions on. 24. 1350–1363. 10.1109/TPEL.2009.2016663.
34. Buła D., Pasko M.: Hybrid power filter with single tuned passive filter – dynamical properties. International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, 2010, p. 80–83.
35. Kocot H., Kubek P.: Krótkoterminowe prognozowanie obciążalności prądowej linii napowietrznych WN i NN. Przegląd Elektrotechniczny, 95(8), 2019, s. 17–20.
36. Kubek P.: Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia. Rozprawa doktorska. Gliwice 2015.
37. Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: Construction and modeling of multi-circuit multi-voltage HVAC transmission lines. Energies, 14(2), 2021, 421.

OCHRONA KLIMATU I ŚRODOWISKA, NOWOCZESNA ENERGETYKA

Streszczenie

Przedstawiona praca prezentuje potencjał szóstego Priorytetowego Obszaru Badawczego (POB6) *Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka* w zakresie osiągnięć naukowo-badawczych i opracowanych technologii.

W rozdziale 1 przedstawiono badania w zakresie energooszczędnych i ekologicznych rozwiązań architektonicznych, uwzględniających wymagania ochrony środowiska, wpływu deformacji na terenach zdegradowanych eksploatacją podziemną na konstrukcje budowlane, zagospodarowania odpadów pogórniczych i wykorzystania ich do rekultywacji terenów, wpływu migracji gruntów na zachowanie się zrekultywowanych składowisk odpadów poprzemysłowych, stosowania ekologicznych bezcementowych spoiw dla budownictwa, określenia stopnia zagrożenia wynikającego ze stosowania pestycydów na podstawie badań zmian metabolizmu wtórnego roślin, oceny efektywności oczyszczania wody w zaawansowanych procesach utleniania, oceny zanieczyszczenia powietrza pierwiastkami i frakcjami pyłowymi szkodliwymi dla zdrowia, między innymi w sąsiedztwie zakładów energetycznych i koksowniczych oraz badań dedroklimatycznych w celu opisania i oceny zmian klimatycznych.

W rozdziale 2 zawarto przegląd wybranych zagadnień z zakresu gospodarki wodno-ściekowej, które są przedmiotem badań pracowników Politechniki Śląskiej (PŚ). Zaprezentowano także zagadnienia dotyczące metod usuwania związków azotu ze ścieków o zróżnicowanej charakterystyce, problematykę sterowania w procesach biotechnologicznych, bioługowanie umożliwiające odzysk pierwiastków należących do grupy surowców krytycznych, a także przedstawiono znaczenie grzybów w usuwaniu zanieczyszczeń organicznych.

W rozdziale 3 zaprezentowano główne osiągnięcia zespołów naukowych Politechniki Śląskiej w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym, które koncentrują się między innymi na odzysku i recyklingu surowców oraz sterowaniu procesami produkcyjnymi w celu osiągnięcia optymalnych cech ubocznych produktów

w kontekście ich późniejszego wykorzystania np. w budownictwie, medycynie, przemyśle paliwowym i innych. W Politechnice Śląskiej przywiązuje się ogromną uwagę do aktywnego kształtowania postaw proekologicznych wśród wszystkich grup społecznych i wiekowych poprzez inicjatywy, badania i projekty edukacyjne.

Rozdział 4 prezentuje wyniki badań w zakresie fotowoltaiki, zastosowania ogniw paliwowych oraz wykorzystania biomasy. Realizowane badania, łącząc ze sobą wiedzę z dziedzin fizyki (mechanika, optoelektronika), chemii, matematyki i ekonomii oraz inżynierii materiałowej i technologii produkcyjnych, ukierunkowane są przede wszystkim na poprawę jakości i stylu życia przez efektywną produkcję i wykorzystanie energii elektrycznej z uwzględnieniem zasad ochrony środowiska.

Rozdział 5 przedstawia rezultaty badań z zakresu przetworników elektromechanicznych i użytkowania energii, układów sensorowych w różnej skali, układów pomiarowych w skali mikro i nano, fotonicznych struktur sensorowych, zagadnień z zakresu zastosowań akustyki w urządzeniach chłodniczych oraz zagadnień związanych z optymalizacją kształtu budowli.

W rozdziale 6 przedstawiono działania edukacyjne prowadzone w ramach ochrony klimatu i środowiska oraz nowoczesnej energetyki. Opisano prowadzone przez uczelnię projekty edukacyjne, seminaria i warsztaty, kierowane do różnych grup, począwszy od uczniów szkół podstawowych i ponadpodstawowych, a skończywszy na przedsiębiorcach, przedstawicielach Jednostek Samorządu Terytorialnego, grupach czynnych zawodowo i seniorach.

W rozdziale 7 scharakteryzowano cechy obiektów poprzemysłowych i uwarunkowania dotyczące ich możliwego wykorzystania. Przedstawiono najważniejsze zagadnienia badawcze i rozwiązania aplikacyjne umożliwiające skuteczną rewitalizację terenów poprzemysłowych na przykładzie Górnego Śląska.

Rozdział 8 przedstawia wyniki wybranych badań dotyczących efektywności energetycznej w budownictwie. Poruszono zagadnienia związane z poprawą jakości cieplnej przegród zewnętrznych oraz poprawą jakości energetycznej przegród w budynkach historycznych. W rozdziale 8 przedstawiono także wyniki związane z analizą zużycia energii, kosztów cyklu życia oraz wpływów środowiskowych w budynkach mieszkalnych w Polsce, przedstawiając rezultaty badań dotyczących analizy porównawczej śladu węglowego i zużycia energii i kosztów cyklu życia budynków w Polsce. Rozdział ten zawiera także zagadnienia projektowania pojazdów elektrycznych w kontekście dążenia do minimalizacji zużycia energii przez te pojazdy w trakcie jazdy.

W rozdziale 9 przybliżone zostały zagadnienia badawcze dotyczące systemów magazynowania energii w sprężonych gazach, jak i elektrowni szczytowo-pompowych. Zaprezentowano wybrane rezultaty analiz dla koncepcji wysokotemperaturowego magazynowania ciepła na drodze wykorzystania stopionej soli. Przedstawiono także zagadnienia badawcze dotyczące elektrochemicznych metod wytwarzania wodoru oraz jego energetycznego wykorzystania. Zaprezentowano również wybrane wyniki badań eksperymentalnych procesu metanizacji, który zakłada konwersję wodoru do tzw. syntetycznego gazu ziemnego. W ostatniej sekcji rozdziału opisano wybrane wyniki analiz, koncentrujących się na zagrożeniach związanych z magazynowaniem i transportem wodoru oraz paliw wysokowodorowych.

Rozdział 10 przedstawia wyniki badań mikrobiologicznych i chemicznych zanieczyszczeń powietrza, modeli komfortu cieplnego i hałasu, doskonalenie systemów HVAC i ich automatyki na potrzeby optymalnego sterowania energią i kształtowania mikroklimatu w pomieszczeniach. W rozdziale zaprezentowano wyniki wybranych prac oraz plany badawcze na przyszłość.

W rozdziale 11 zaprezentowano wyniki badań pokazujących możliwą drogę przejścia do miksu energetycznego odpowiadającego na wyzwania jakie stoją przed polską gospodarką. W ramach przeprowadzonych badań określono optymalne warunki pracy systemu energetycznego z dużym udziałem odnawialnych źródeł wytwórczych. Omówiono problemy związane z optymalizacją rozruchów turbiny. Wyniki przedstawionych badań obejmują także określenie procedury planowania rozwoju systemu elektroenergetycznego oraz intensyfikację wykorzystania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Ważną część rozdziału stanowi analiza możliwości zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego poprzez wprowadzenie nowych konstrukcji turbogeneratorów dostosowanych do pracy regulacyjnej. Przedstawione wyniki badań obejmują także problem jakości energii elektrycznej.

CLIMATE AND ENVIRONMENT PROTECTION, MODERN ENERGY

Abstract

The presented work presents the potential of the Sixth Research Priority Area (POB6) Climate and environmental protection, modern energy in the field of scientific and research achievements and developed technologies.

Chapter 1 presents research in the field of energy-saving and ecological architectural solutions taking into account environmental protection requirements, the impact of deformation in areas degraded by underground mining on building structures, post-mining waste management and use for land reclamation, the impact of land migration on the behavior of reclaimed post-industrial waste dumps, the use of ecological cementless binders for construction, determining the degree of threats resulting from the use of pesticides on the basis of studies on changes in secondary metabolism of plants, assessment of the effectiveness of water purification in complex oxidative processes, assessment of air pollution with elements and dust fractions harmful to health, e.g. in the vicinity of power plants and coke plants and dedroclimatic research to describe and assess climate change.

Chapter 2 contains an overview of selected issues in the field of water and wastewater management, which are the subject of research by employees of the Silesian University of Technology (SUT). The issues related to the methods of removing nitrogen compounds from various types of wastewater, control issues in biotechnological processes, bioleaching enabling the recovery of elements belonging to the group of critical raw materials, as well as the importance of fungi are also presented.

Chapter 3 presents the main achievements of the research teams of the Silesian University of Technology in the field of circular economy, which focus, among others, on on recovery and recycling of raw materials and control of production processes in order to achieve optimal by-products in the context of their subsequent use, e.g. in construction, medicine, fuel industry and others. The Silesian University of

Technology pays great attention to actively shaping pro-ecological attitudes among all social and age groups through initiatives, research and educational projects.

Chapter 4 presents the results of research in the field of photovoltaics, the use of fuel cells, and the use of biomass. The conducted research, combining knowledge in the fields of physics (mechanics, optoelectronics), chemistry, mathematics and economics, as well as material engineering and production technologies, are primarily aimed at improving the quality and lifestyle through effective production and use of electricity taking into account the principles of environmental protection.

Chapter 5 presents the results of research in the field of electromechanical transducers and energy use, sensor systems at various scales, measuring systems in the micro and nano scale, photonic sensor structures, issues related to the use of acoustics in cooling devices and issues related to the optimization of the shape of buildings.

Chapter 6 presents educational activities carried out within the framework of climate and environmental protection and modern energy. Educational projects, seminars and workshops conducted by the university, addressed to various groups, ranging from primary and secondary school students to entrepreneurs, representatives of Local Government Units, professionally active groups and seniors were discussed.

Chapter 7 describes the features of post-industrial facilities and the conditions for their possible use. The most important research issues and application solutions enabling the effective revitalization of post-industrial areas on the example of Upper Silesia were presented.

Chapter 8 presents the results of selected studies on energy efficiency in construction. Issues related to the improvement of thermal quality of external partitions and improvement of the energy quality of partitions in historical buildings were discussed. Chapter 8 also presents the results related to the analysis of energy consumption, life cycle costs and environmental impacts of residential buildings in Poland, presenting the results of research on the comparative analysis of the carbon footprint and energy consumption and life cycle costs of buildings in Poland. This chapter also covers the issues of designing electric vehicles in the context of minimizing the energy consumption of these vehicles while driving.

Chapter 9 covers research issues related to energy storage systems in compressed gases and pumped storage power plants. The chapter presents selected results of analyzes for the concept of high-temperature heat storage through the use of molten salt. Research issues concerning electrochemical methods of hydrogen production and its energetic use are also presented. Selected results of experimental studies of the methanation process, which involve the conversion of hydrogen to the so-called

synthetic natural gas. The last section of the chapter presents selected results of analyzes focusing on the risks related to the storage and transport of hydrogen and high-hydrogen fuels.

Chapter 10 presents the results of microbiological and chemical studies of air pollutants, thermal comfort and noise models, and the improvement of HVAC systems and their automation for optimal energy control and shaping the microclimate in rooms. The chapter presents the results of selected works and research plans for the future.

Chapter 11 presents the results of research showing a possible path to transition to the energy mix corresponding to the challenge issues facing the Polish economy. As part of the research, the optimal operating conditions of the power system with a large share of renewable generation sources were determined. Problems related to optimization of turbine start-ups are discussed. The results of the presented research also include the definition of the power system development planning procedure and the intensification of the use of the National Power System. An important part of the chapter is the analysis of the possibilities of ensuring energy security by introducing new designs of turbogenerators adapted to the regulatory operation. The presented research results also include the problem of electricity quality.

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
tel. (32) 237-13-81, faks (32) 237-15-02
www.wydawnictwopolitechniki.pl

UIW 48600

Sprzedaż i Marketing
tel. (32) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Sprawy wydawnicze
tel. (32) 237-13-81
wydawnictwo@polsl.pl

Nakł. 100 + 44	Ark. wyd. 27	Ark. druk. 22,75	Papier 80 g

Zam. 74/21

ISBN 978-83-7880-790-2
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Seria: Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza

Politechnika Śląska

UCZELNIA BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI