

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI



DOSKONALENIE OGRZEWANIA I WENTYLACJI PASYWNYCH BUDYNKÓW MIESZKALNYCH

Streszczenie rozprawy doktorskiej

mgr inż. Dawid Tąta

Promotor:
dr hab. inż. Henryk Foit

Promotor pomocniczy:
dr hab. inż. Joanna Ferdyn-Grygierek, prof. PS

Gliwice 2019

1 Wstęp

O powstaniu idei budynków pasywnych zadecydowały rosnąca świadomość wpływu działalności człowieka na środowisko oraz chęć oszczędności zużycia energii na ogrzewanie, czyli minimalizowania kosztów eksploatacyjnych budynku. W dzisiejszych czasach idea wznoszenia budynków niskoenergetycznych to już nie luksus, na który może pozwolić sobie tylko dobrze sytuowana część społeczeństwa, ale przy malejących kosztach inwestycyjnych kształtujący się standard budynków. Dodatkowym bodźcem do popularyzacji tego typu budownictwa są powstające i planowane przepisy prawne, o zasięgu krajowym, czy europejskim.

Projektowanie i konstruowanie (a częściowo również użytkowanie) budynków energooszczędnych, a szczególnie pasywnych jest dalece bardziej skomplikowane w porównaniu do projektowania budynków tradycyjnych. Niemożliwe wydaje się prawidłowe zaprojektowanie takiego budynku przy braku współpracy projektantów różnych branż. Konieczne jest patrzenie na budynek, jego część konstrukcyjno-budowlaną, instalacyjną oraz wyposażenie jak na układ naczyń połączonych. Podczas projektowania wydaje się konieczne stosowanie odpowiednich programów wspierających projektowanie budynków pasywnych, a etap wykonania budynku wymaga zachowania wysokiej jakości prac. Popęlnienie ewentualnych błędów będzie powodować znaczny spadek efektywności użytkowania budynku, a może nawet spowodować utratę charakterystyki budynku pasywnego, co może prowadzić do nieotrzymania odpowiedniego certyfikatu. Konstrukcje tego typu są niezwykle wrażliwe na błędy projektowe i wykonawcze.

Jako budynek pasywny rozumie się budynek, w którym pozyskanie energii odbywa się w sposób bierny. Wymagane jest tu korzystanie z odnawialnych źródeł energii, jakimi są promieniowanie słoneczne, oraz ciepło otoczenia i ziemi. W tym celu stosuje się odpowiednie urządzenia i instalacje, jak np. instalacja pompy ciepła, kolektorów słonecznych, czy ogniwo fotowoltaicznych. Innym sposobem pasywnego korzystania z promieniowania słonecznego jest ogrzewanie pomieszczeń (i ciężkich przegród, które są akumulatorami ciepła) poprzez odpowiednio dobrane przeszklenia fasady południowej. W celu zachowania komfortu cieplnego w polskiej strefie klimatycznej konieczne jest zachowanie odpowiedniej ochrony cieplnej, między innymi przez zastosowanie przegród zewnętrznych o odpowiedniej izolacyjności cieplnej. Równie ważne jest zachowanie odpowiedniej szczelności budynku, co wymaga zastosowania wentylacji mechanicznej. Taki układ wentylacji pozwala na odzysk ciepła z powietrza usuwanego z budynku i jednocześnie odpowiednie przygotowanie świeżego powietrza nawiewanego. Wymienione wymagania zostały uszczegółowione i zestawione w odpowiedni zbiór.

2 Przegląd literatury dotyczącej budynków pasywnych

Przeprowadzenie analizy całościowej budynku pasywnego wymagało dokładnego określenia właściwości budynku pasywnego. Ogólna idea budownictwa pasywnego została określona w Niemczech. Dla niej został opracowany zbiór cech, którym powinny odpowiadać budynki pasywne.

Autorem definicji budynku pasywnego jest dr W. Feist, który swoją koncepcję sformułował następująco: *dom pasywny jest budynkiem o bardzo niskim zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania wnętrza $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$, w którym komfort termiczny zapewniony jest przez pasywne źródła ciepła (mieszkańcy, urządzenia elektryczne, ciepło słoneczne, ciepło odzyskane z wentylacji), tak że budynek nie potrzebuje autonomicznego, aktywnego systemu ogrzewania. Potrzeby cieplne realizowane są przez odzysk ciepła i dogrzewanie powietrza wentylującego budynek [79].*

2.1 Cechy budynku pasywnego

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury opracowano zbiór najważniejszych cech budynku pasywnego [83]:

bryła budynku powinna być zwarta – iloraz powierzchni powłoki zewnętrznej budynku (przez którą tracone jest ciepło do otoczenia) do jego kubatury powinien być jak najmniejszy,

powinna być zastosowana bardzo dobra termoizolacja - izolacja termiczna powinna być tak dobrana, by wartość współczynnika przenikania ciepła U nie przekraczała $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; izolacja powinna być konstruowana od strony zewnętrznej przegrody, dzięki czemu dąży się do eliminacji mostków cieplnych, zmniejsza się ryzyko wykraplania wilgoci w przegrodzie,

konstruowanie połączeń przegród budowlanych, naroży budynku oraz otworów w ścianach powinno być wykonane tak, aby eliminować lub minimalizować występowanie mostków cieplnych, co również obniża ryzyko wykraplania wilgoci na wewnętrznych powierzchniach przegród zewnętrznych,

- sezonowe zapotrzebowanie na energię do ogrzewania nie powinno przekraczać $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$,

nominalne zapotrzebowanie na ciepło nie powinno przekraczać $10 \text{ W}/\text{m}^2$,

całkowite zapotrzebowanie energii pierwotnej dla funkcjonowania budynku (czyli wykorzystywanej do ogrzewania, wentylacji, przygotowania ciepłej wody użytkowej, obsługi urządzeń elektrycznych i na oświetlenie) nie powinno przekroczyć $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$,

- przegrody powinny być konstruowane z materiałów o dużej pojemności cieplnej – możliwe do uzyskania również przy wykorzystaniu tradycyjnych (naturalnych) materiałów budowlanych (możliwe jest stosowanie materiałów o wysokim oporze cieplnym, a niewielkiej pojemności cieplnej, przykładem mogą być coraz popularniejsze przegrody wielowarstwowe, o konstrukcji szkieletowej-drewnianej). dodatkowo możliwe jest stosowanie akumulacyjnych pokryć ścian wewnętrznych – tynki zawierające kapsułki wypełnione materiałami o wysokiej temperaturze krzepnięcia (np. wosk) – pokrycie nagrzewa się od promieniowania słonecznego w ciągu dnia, a gdy promieniowanie zanika, zaczyna oddawać ciepło,

powinna zostać użyta odpowiednia stolarka okienna i drzwiowa – stosowanie drzwi i okien certyfikowanych, odznaczających się współczynnikiem U poniżej $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, a współczynnik g nie mniejszym niż 50%,

- promieniowanie słoneczne powinno być wykorzystywane do ogrzewania budynku - ogrzewanie pomieszczeń od strony południowej przez okna o dużej powierzchni oraz stosowanie odpowiednich elementów zacieniających - zaciemnienia mogą być w formie stałej, jako konstrukcje budynku wystające poza jego obrys (przykładem może być strzecha dachu), mogą być stosowane również konstrukcje niezależne od budynku, jak na przykład balkon wzniesiony w konstrukcji osobnej; zaleca się również stosowanie zaciemnień aktywnych w formie rolet, żaluzji, rozwiązania takie zasłaniają okna w okresie dużego natężenia promieniowania słonecznego,
- powinna być zachowana szczelna bryła budynku - liczba wymian powietrza infiltrującego do budynku przy różnicy 50 Pa (w trakcie próby szczelności) nie może przekraczać 0.6 h^{-1} , powietrze czerpane z zewnątrz powinno być podgrzewane pasywnie – powietrze podgrzewane w gruntowym wymienniku ciepła a także podczas odzysku ciepła z powietrza usuwanego z budynku (rekuperacja),
- pomieszczenia powinny być odpowiednio lokalizowane względem kierunków świata – w części południowej pomieszczenia wymagające większego nasłonecznienia i wyższej temperatury, po stronie północnej pomieszczenia mniej wymagające lub wręcz cieniawca po tej stronie całkowicie bez okien,
- rezygnacja z podpiwniczenia - dla ograniczenia strat ciepła do gruntu, budynki pasywne wznosi się na płycie fundamentowej, rezygnując całkowicie z piwnicy,
- stosowanie sprzętu domowego o wysokich klasach energooszczędności (ograniczenia zużycia energii dotyczą nie tylko zaopatrzenia w ciepło, ale także zużycia energii elektrycznej),
- odpowiednie kształtowanie otoczenia budynku - stosowanie odpowiedniej roślinności, od strony południowej poleca się nasadzenie krzewów i drzew liściastych, które w okresie lata będą tworzyły dodatkowe zaciemnienie, w okresie zimy, po zrzuceniu liści, promienie słoneczne będą mogły ogrzewać budynek; natomiast od strony północnej zaleca się obsadzenie drzew i krzewów zimozielonych, których korony będą osłaniać dom od wiatru przez cały okres roku.

Instytut Budownictwa Pasywnego w Dramstadt opracował certyfikat budynku zgodny ze swoimi wytycznymi. Budynek spełniający wymagania uzyskuje stosowny dokument, dzięki czemu możliwe jest ubieganie się o wsparcie finansowe inwestycji z różnych instytucji.

W przeglądzie literatury szczególnie skupiono się na wymaganiach stawianych instalacją i źródłom ciepła dla budynków pasywnych. Rozważano również kwestie usytuowania budynku,

czyli jego położenia na działce budowlanej, odpowiedniego ukierunkowania względem różny wiatrów, otoczenia budynku. Inną podjętą kwestią było zaopatrzenie w wodę: przygotowanie ciepłej wody użytkowej, sposób prowadzenia instalacji wewnątrz budynku. Przedstawiono również przykładowe domy pasywne wzniesione w Polsce.

2.2 Wskazanie luki badawczej

Przytoczone w rozprawie przykłady literatury pokazują, że prowadzone były badania pojedynczych elementów budynków niskoenergetycznych, w tym budynków pasywnych z uwzględnieniem wymagań stawianych tym budynkom. Określano było zapotrzebowanie na energię dla budynku, zarówno dotyczące ogrzewania, jak również wentylacji i chłodzenia. Inne badania dotyczyły analiz konstrukcji budynku, termoizolacji czy wielkości i położenia okien. Badania te prowadzone były głównie dla obiektów zlokalizowanych w warunkach klimatycznych odmiennych od klimatu występującego w Polsce. Klimat w Polsce jest bardziej wymagający niż w Europie Zachodniej.

Przedstawione badania potwierdzają zainteresowanie tematyką budownictwa pasywnego na świecie. Problem ten jest aktualny również w Polsce, co wynika z rosnącej świadomości oddziaływania na środowisko, chęci ograniczania kosztów, jak również z wymaganiami stawianymi nowym budynkom. Zauważalny jest brak analiz całościowych budynku pasywnego zlokalizowanego w warunkach polskiego klimatu. Wskazuje to na obszar oryginalnych badań w tej dziedzinie, co jest przyczyną podjęcia poniższych analiz. Potrzebne wydaje się przeprowadzenie badań całego budynku, z uwzględnieniem jego konstrukcji i instalacji ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji.

3 Cel i zakres pracy

Celem rozprawy było opracowanie zasad kształtowania wybranych elementów konstrukcyjnych oraz systemu grzewczego i wentylacyjnego typowego pasywnego budynku jednorodzinnego zlokalizowanego w Polsce. Wybranymi elementami konstrukcyjnymi są powierzchnia szklenia fasady południowej oraz sposób zacięcia okien.

Cele szczegółowe

1. Określenie optymalnej powierzchni przeszklenia ścian budynku pasywnego; przyjęcie metody postępowania, program badań i analiza wyników z wnioskami.
2. Analiza stanu istniejącego sposobów ogrzewania i wentylacji mieszkalnych budynków pasywnych; ustalenie kierunków działań doskonalących ogrzewanie i wentylację mieszkalnych budynków pasywnych.
3. Zaproponowanie zmodyfikowanych systemów ogrzewania, ich ocena energetyczna i ekonomiczna oraz analiza wyników z wnioskami.
4. Sformułowanie wniosków obejmujących wskazanie najkorzystniejszych rozwiązań spośród przedstawionych analiz.

Zakres rozprawy

Zauważalny wzrost zainteresowania budownictwem energooszczędnym, skłonił do wykonania analiz budynku pasywnego położonego na terenie Polski oraz przygotowanie zasad pomocnych projektantom, architektom i budowniczym takich obiektów. Przygotowanie zasad kształtowania konstrukcji i elementów systemu grzewczego i wentylacyjnego budynku pasywnego wykonano po przesłedzeniu opracowań dotyczących idei budynku pasywnego (rozdział 2). W ramach tych prac skomasowano ogólne zasady projektowania i wznoszenia budynków pasywnych, oraz wymagania, które są stawiane tym obiektom. Szczególna uwaga została skupiona na wymaganiach konstrukcyjnych (szczególnie zachowaniu odpowiedniej termoizolacyjności i szczelności budynku), wymaganiach dla stolarki okiennej, wytycznych dotyczących ograniczenia zapotrzebowania na energię, a także gospodarowania energią w budynku (ogrzewanie, wentylacja, przygotowanie ciepłej wody użytkowej). Wykonano przegląd niektórych istniejących budynków pasywnych w Polsce.

Wykonano przegląd rozwiązań budowlanych (wznoszenia ścian zewnętrznych), które są dostępne na polskim rynku i pozwalają na wzniesienie budynku pasywnego – rozdział 4. W ramach przeglądu zestawiono koszty wznoszenia ścian z poszczególnych materiałów oraz wybrano technologię na potrzeby dalszych badań. Określono model budynku, dla którego przeprowadzono analizy. Określenie dotyczyło geometrii budynku, rozmieszczenia pomieszczeń, wybrania technologii konstrukcji przegród (ścian, dachu, stropów, podłogi na gruncie, okien), a także sposobu i harmonogramu użytkowania budynku i danych klimatycznych – rozdział 5 i 6.

Pierwsza szczegółowa analiza dotyczyła określenia najkorzystniejszej powierzchni przeszklenia elewacji południowej - rozdział 7. Wyniki badań pozwoliły na określenie wielkości przeszklenia, przy których zapotrzebowanie na energię do napędu pompy ciepła (odpowiedzialnej za ogrzewanie i chłodzenie budynku) jest najmniejsze, oraz koszty użytkowania budynku w pełnym cyklu życia są najmniejsze. Badaniu poddano różne powierzchnie okien, z uwzględnieniem różnego typu zacięnień. Symulacje zapotrzebowania na ciepło i chłód przeprowadzono programem ESP-r. Wykonano również walidację tego programu symulacyjnego. Analiza wpływu powierzchni okien na zapotrzebowanie na energię została uzupełniona o zbadanie wpływu otoczenia budynku (zacięnień budynku) na zyski energii od promieniowania słonecznego – rozdział 8.

W ramach drugiej analizy (rozdział 9) opracowano różne układy grzewczo-wentylacyjne dla jednorodziennego budynku pasywnego. Efektywność układów zbadano z wykorzystaniem programu symulacyjnego EnergyPlus. Poszukiwano korzystnego rozwiązania ze względu na zużycie energii podczas użytkowania budynku (uwzględniano zużycie energii związane z ogrzewaniem, wentylacją, chłodzeniem i przygotowaniem c.w.u.) oraz pod względem kosztów pełnego cyklu życia budynku.

Powyższe prace pozwoliły na wskazanie korzystnych rozwiązań, których zastosowanie pozwoli projektantom, architektom i budowniczym domów pasywnych wznosić jeszcze atrakcyjniejsze domy.

4 Rozwiązania konstrukcyjne elementów powłoki zewnętrznej budynku pasywnego przyjęte do analiz energetycznych

W ramach prac badawczych dokonano rozpoznania stosowanych elementów i wyselekcjonowania oraz opisu rozwiązań najczęściej spotykanych lub bardzo pozytywnie ocenianych w celu ich priorytetowego uwzględniania w zamierzonych analizach energetycznych.

Głównym kryterium oceny ścian zewnętrznych było spełnienie warunku dotyczącego współczynnika $U_e < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Obliczenia cieplne zmierzające do sprawdzenia wymienionego kryterium i korekty grubości izolacji cieplnej wykonano w programie ArCADia - TERMO PRO 6.0.

Z analizy przedstawionych rozwiązań wynikało, że najkorzystniejszą ze względu na współczynnik U_e konstrukcji przegród było rozwiązanie oparte o Thermomur 250. Najtańszym rozwiązaniem okazał się mur wzniesiony z bloczków YTONG, co przy zadowalającym współczynniku U skłoniło do wyboru tej technologii w dalszych analizach.

5 Podstawowe założenia dotyczące realizacji celu pracy

Na potrzeby przeprowadzenia analizy doskonalenia ogrzewania i wentylacji jednorodzinnego mieszkalnego budynku pasywnego przyjęto przykładowy, dwukondygnacyjny budynek proponowany jako obiekt projektowy w [99]. Zmieniono nieco rozlokowanie pomieszczeń, ustalono jednakowe wymiary pomieszczeń południowej części budynku, założono odpowiednią dla budynków pasywnych konstrukcję balkonów oraz dachu z jego okapem.

Dla rozważanego budynku przyjęto konstrukcje ścian zewnętrznych - uwzględniając wyniki analizy przegród stosowanych w budynkach pasywnych, oraz pozostałych przegród. Dane klimatyczne potrzebne do analiz oparto o opracowanie wykonane przez prof. Henryka Foita w [20]. Dane zostały wybrane z danych reprezentujących 30-sto lecie. Przebieg roczny składa się z zestawień miesięcznych przebiegów. Kryterium wyboru poszczególnych danych była średnia temperatura miesięczna porównywana ze średnimi temperaturami miesięcznymi z 30-stolecia. Dodatkowymi kryteriami były: średnia suma miesięczna promieniowania całkowitego na płaszczyznę poziomą porównywana z danymi z wielolecia, średnia miesięczna prędkość wiatru porównywana ze średnimi z wielolecia oraz średnia miesięczna wartość amplitudy wahań dobowych temperatury porównywana z odpowiadającymi jej średnimi z wielolecia.

6 Kierunek działań doskonalących ogrzewanie i wentylację jednorodzinnych budynków pasywnych

Na podstawie przeprowadzonej analizy istniejących założeń i stosowanych rozwiązań ogrzewania i wentylacji budynków pasywnych jednorodzinnych lub wielopokoleniowych przyjęto, że doskonalenie w obszarze ogrzewania i wentylacji tych budynków powinno dotyczyć:

poszukiwania najkorzystniejszego rozwiązania pasywnego wykorzystywania promieniowania słonecznego do ogrzewania pomieszczeń,

- usprawnienia aktywnego systemu grzewczego, wentylacyjnego z uwzględnieniem potrzeb instalacji ciepłej wody użytkowej.

W obszarze pasywnego ogrzewania słonecznego najefektywniejsze wydaje się bezpośrednio wykorzystanie zysków ciepła od promieniowania słonecznego [31]. Wobec tego problemem, wymagającym analizy było ustalenie najkorzystniejszego stopnia przeszklenia przegród fasady południowej wraz z systemem zacięnięć. W niniejszej pracy problem podjęto w związku z poszukiwaniem kompleksowego rozwiązania ograniczenia kosztów i właściwości przeszklenia oraz elementów zacięcia okien w warunkach krajowych.

Doskonalenie aktywnego systemu grzewczego obejmuje holistyczne traktowanie ogrzewania i wentylacji zimą, a także ewentualnego chłodzenia latem oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. Poszukuje się również odpowiednio efektywnego źródła ciepła. Z analizy istniejących zaleceń i stosowanych rozwiązań ogrzewania i wentylacji budynków pasywnych jednorodzinnych lub wielopokoleniowych wynika, że doskonalenie ogrzewania i wentylacji tych budynków powinno obejmować:

- wskazanie racjonalnego ekonomicznie i ekologicznie źródła ciepła dla budynku pasywnego,
- wskazanie skutecznej i racjonalnej ekonomicznie instalacji c.o. oraz układu przygotowania c.w.u.,
- problem dostosowania strumienia powietrza wentylacyjnego do aktualnego zapotrzebowania,
- wskazanie korzystnego w cyklu życia budynku i bezpiecznego dla użytkowników systemu wstępnej obróbki powietrza wentylacyjnego w połączeniu z ustaleniem efektywnego ekonomicznie zabezpieczenia ciągłej pracy wymiennika ciepła w okresie zimy.

7 Określenie najkorzystniejszej powierzchni przeszklenia elewacji południowej

Zalecenia projektowe dla budynków pasywnych wskazują na maksymalizowanie powierzchni przeszklenia elewacji południowej z elementami ochrony przed promieniowaniem latem. Niewiele jest opracowań dotyczących przegrzewania pomieszczeń latem w naszych warunkach klimatycznych. W związku z tym w celu ustalenia najkorzystniejszego układu: optymalna powierzchnia okna – odpowiednia wielkość i typ zacięnięcia, przeprowadzono odpowiednie analizy. Badania opierały się na obliczeniach symulacyjnych z wykorzystaniem programu ESP-r [24, 70]. Na potrzeby wykonywanych obliczeń poczyniono szereg założeń, które następnie zostały odpowiednio zadane w programie obliczeniowym.

7.1 Walidacja programu symulacyjnego

Wykonana została również walidacja programu symulacyjnego dla określenia wiarygodności symulacji komputerowych z wykorzystaniem programu ESP-r. Konstrukcja budynku niewiele odbiegała od budynku pasywnego. Źródłem ciepła w badanym budynku była pompa ciepła, której dolnym źródłem ciepła są dwie sondy pionowe o głębokości 107 m, zlokalizowane w odległości 5 metrów od domu po jego stronie północnej. Odległość między sondami wynosi 10 metrów. Celem przeprowadzonych analiz było określenie odchylenia wyników uzyskanych za pomocą programu ESP-r względem wielkości zmierzonych. Wartościami uzyskanymi z pomiarów budynku były: zapotrzebowanie na energię do napędu pompy ciepła wraz z podziałem na c.w.u. i c.o., a także wartości temperatury i wilgotności w wybranych pomieszczeniach (dane z czujników, które na potrzeby analizy zostały zamontowane w budynku). Dane rzeczywiste zestawiono z wynikami obliczeń przeprowadzonych w programie ESP-r dla badanego budynku. Wykonano dwie serie pomiarów oraz dwie serie symulacji komputerowych. Odchylenia wyników są znacząco różne w obu seriach pomiarowych. Bardziej wiarygodne wydają się wyniki z serii pierwszej. W tej serii pomiarowej system ogrzewania działał przez większą część doby, przez co rozdział zużycia energii na ogrzewanie i przygotowanie c.w.u. była bliska wartości 78:22, czyli wartości podawanej przez sterownik urządzenia. W drugim okresie system ogrzewania był praktycznie nie potrzebny (włączał się głównie w okresach nocy), co było spowodowane stosunkowo wysoką wartością temperatury zewnętrznej. Stąd można przyjąć, iż miarodajna była wartość z serii 1, czyli błąd obliczeń na poziomie 6,83%. Taką wartość odchylenia wyników uzyskanych w programie od wartości uzyskanych w rzeczywistości można uznać za bardzo dobrą.

7.2 Przyjęte założenia

W programie zbudowano model budynku opisanego w rozdziale 5 rozprawy doktorskiej. Przyjęto takie same założenia i zależności fizyczne jak w walidowanym modelu. Poszukiwanymi wartościami było zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku.

W pierwszej fazie obliczeń analizowano wpływ wielkości zacięń stałych na zapotrzebowanie na energię. Zacięciem dla okien parteru był balkon, natomiast dla okien pierwszego piętra okap dachu. Rozpatrywano 4 wysokości zacięń poza obrys budynku: 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m. Obliczenia przeprowadzono również dla przypadku bez zacięć.

Analizy symulacyjne obejmowały dwa zasadnicze przypadki:

1. Poszukiwanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku bez uwzględnienia wewnętrznych zysków ciepła.
2. Poszukiwanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku z uwzględnieniem wewnętrznych zysków ciepła.

W drugiej fazie obliczeń analizie poddano wpływ zastosowania zacięń aktywnych w celu zmniejszenia zapotrzebowania na chłód dla budynku w okresie letnim. Zacięcia skonstruowano jako:

- a) rolety zewnętrzne metalowe zintegrowane z oknem,
- b) rolety wewnętrzne wykonane z tkaniny.

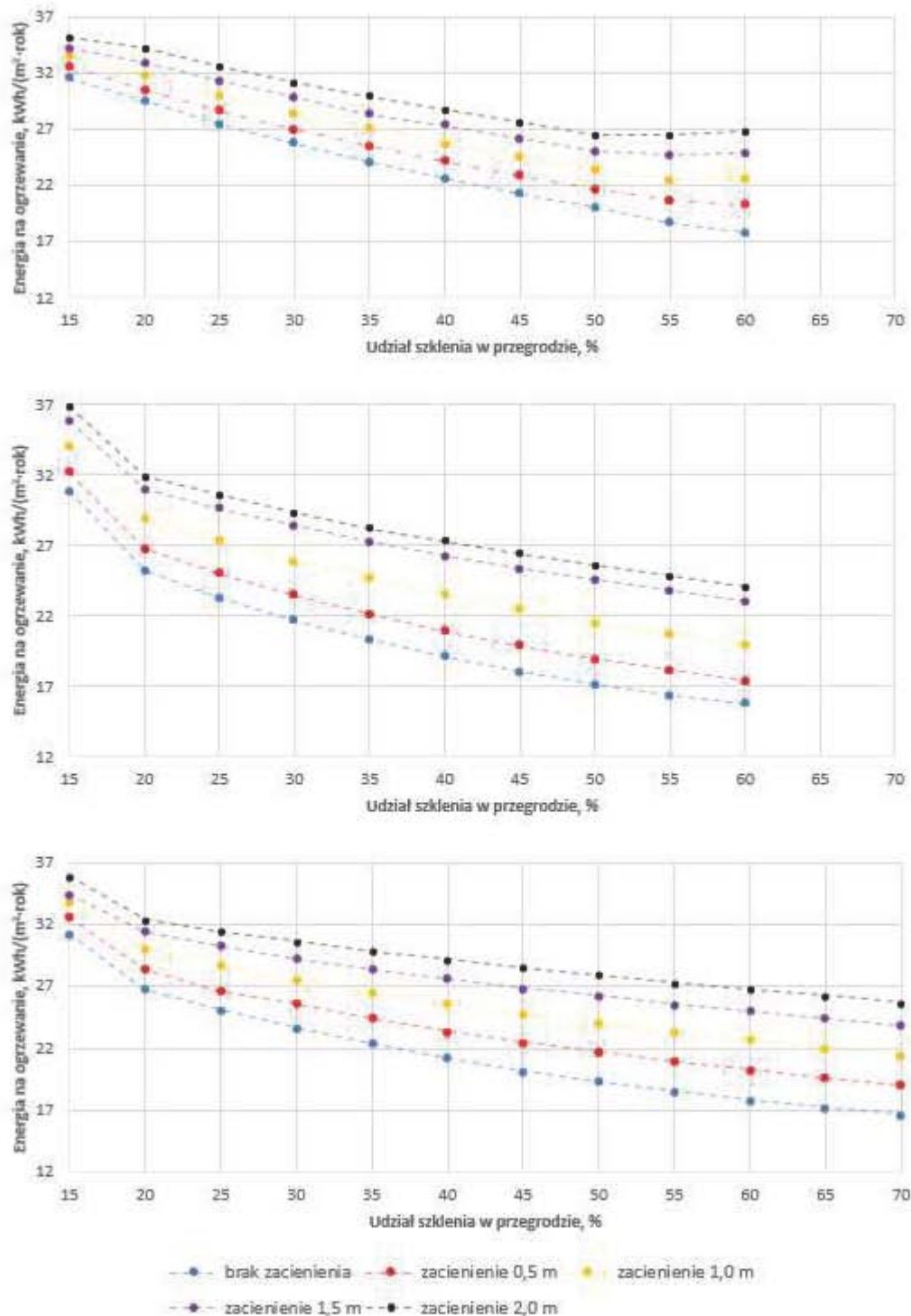
Uwzględniono standardowe zyski ciepła pochodzące od ludzi, urządzeń oraz oświetlenia. Zyski ciepła od ludzi przyjęto zgodnie z [33]. Ustalono również scenariusz przebywania ludzi w domu i ich aktywności. Zyski ciepła pochodzące od pracujących urządzeń ustalono na podstawie [82]. Natomiast zyski ciepła związane z pracującym oświetleniem przyjęto za [55] z uwzględnieniem harmonogramu.

7.3 Analiza wyników poszukiwania najkorzystniejszej wielkości okien przy zastosowaniu stałych zacięnię

Uzyskane wyniki przeanalizowano w zestawieniu w 3 grupach. Dwie z nich wynikają ze sposobu prowadzenia obliczeń (czyli poszukiwania zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia), ostatnia związana była z wyznaczeniem zapotrzebowania na energię elektryczną do napędu pompy ciepła, odpowiedzialnej za dostarczenia ciepła i chłodu.

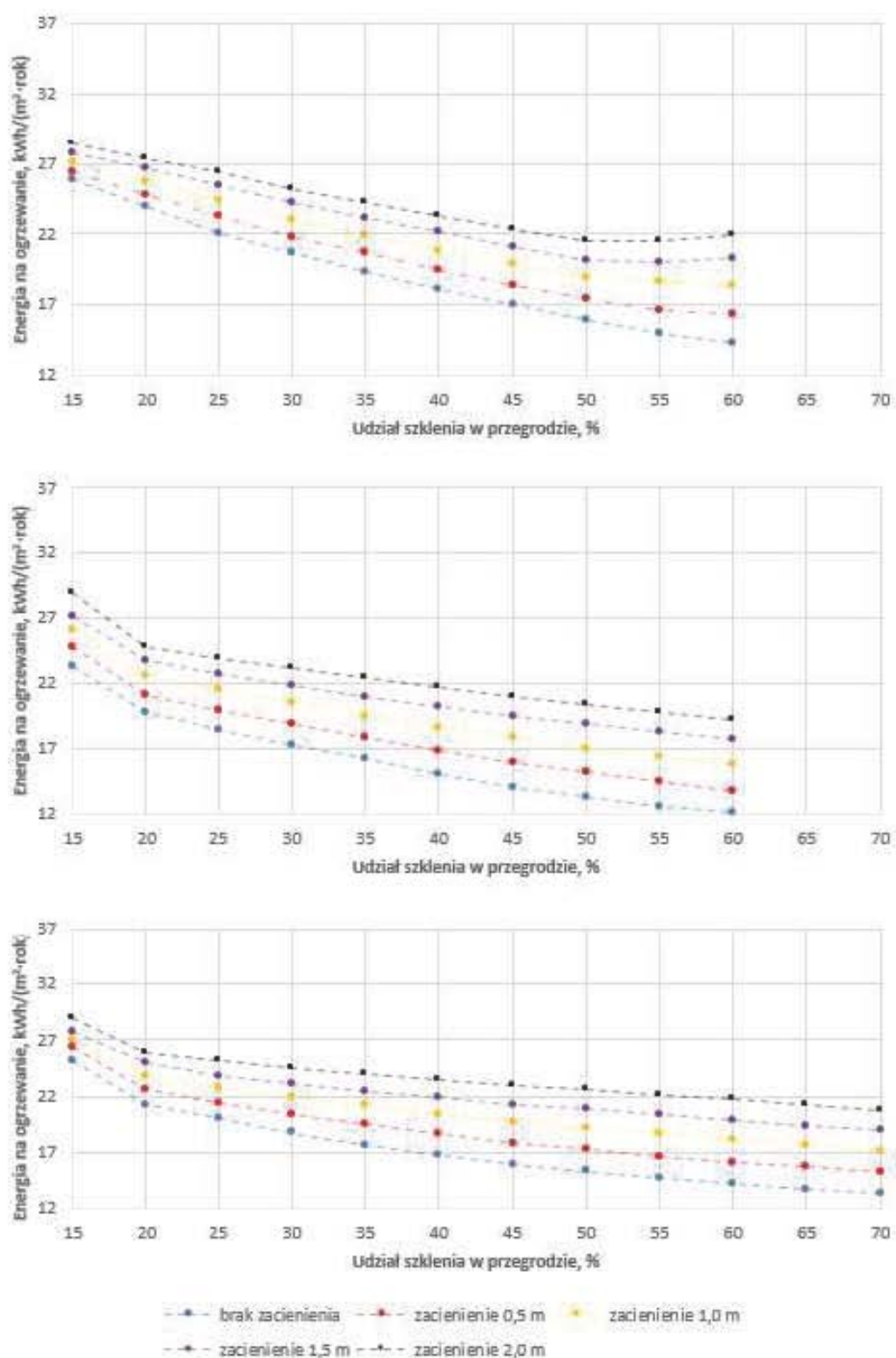
1. **Wpływ wielkości okien na zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania** Uzyskane wyniki zestawiono na rys. 1 i 2. Analiza wyników wskazuje na dwa przewidywalne, spodziewane wcześniej główne trendy: zmniejszanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania wraz ze zwiększającą się powierzchnią okien oraz zwiększanie zapotrzebowania na ciepło przy zwiększaniu stałego zacięnięcia okien. Pewnym wyjątkiem są przypadki dotyczące okien o wysokości 1,7 m oraz największych wysięgów zacięnię 1,5 m i 2 m przy uwzględnieniu wewnętrznych zysków ciepła oraz co najmniej równych 1 m przy braku uwzględniania zysków ciepła. Dla tych przypadków można zauważyć pewne minimum przebiegu wyników. Zwiększanie zapotrzebowania na ciepło przy największych powierzchniach okien związane jest z niekorzystnym stosunkiem powierzchni słabiej izolującej cieplnie w postaci okien (porównując okna do ścian) do dużej powierzchni zacięnionej, a więc nie zyskującej ciepła od bezpośredniego promieniowania słonecznego. Ujmując sprawę inaczej – większa ilość ciepła jest tracona przez słaboizolującą powierzchnię okien, niż zyskiwana od promieniowania słonecznego.

Oprócz analizy charakteru przebiegu zmienności zapotrzebowania na energię wraz ze zmianą stopnia przeszklenia powierzchni ścian, istotna jest również ocena i interpretacja uzyskanych wartości. W takim ujęciu najważniejszym czynnikiem oceny jest jednostkowe roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania nie przekraczające $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$, zgodnie z wymaganiem dotyczącym budynków pasywnych. Wynik taki uzyskano jedynie dla stanu pracy budynku z uwzględnieniem wewnętrznych zysków ciepła (co wydaje się uzasadnione) dla przypadków o zacięnięciu mniejszym niż 1 m i przeszkleniu ponad 40% powierzchni przegrody zewnętrznej. Przy mniejszych przeszkleniach lub większych zacięnięciach ilość ciepła pochodząca od promieniowania słonecznego jest niewystarczająca. Najkorzystniejszą



Rys. 1: Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, bez uwzględnienia wewnętrznych zysków ciepła.

Od góry: wysokość okna 1,7 m, 2 m, 2,31 m.



Rys. 2: Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, z uwzględnieniem wewnętrznych zysków ciepła.

Od góry: wysokość okna 1,7 m, 2 m, 2,31 m.

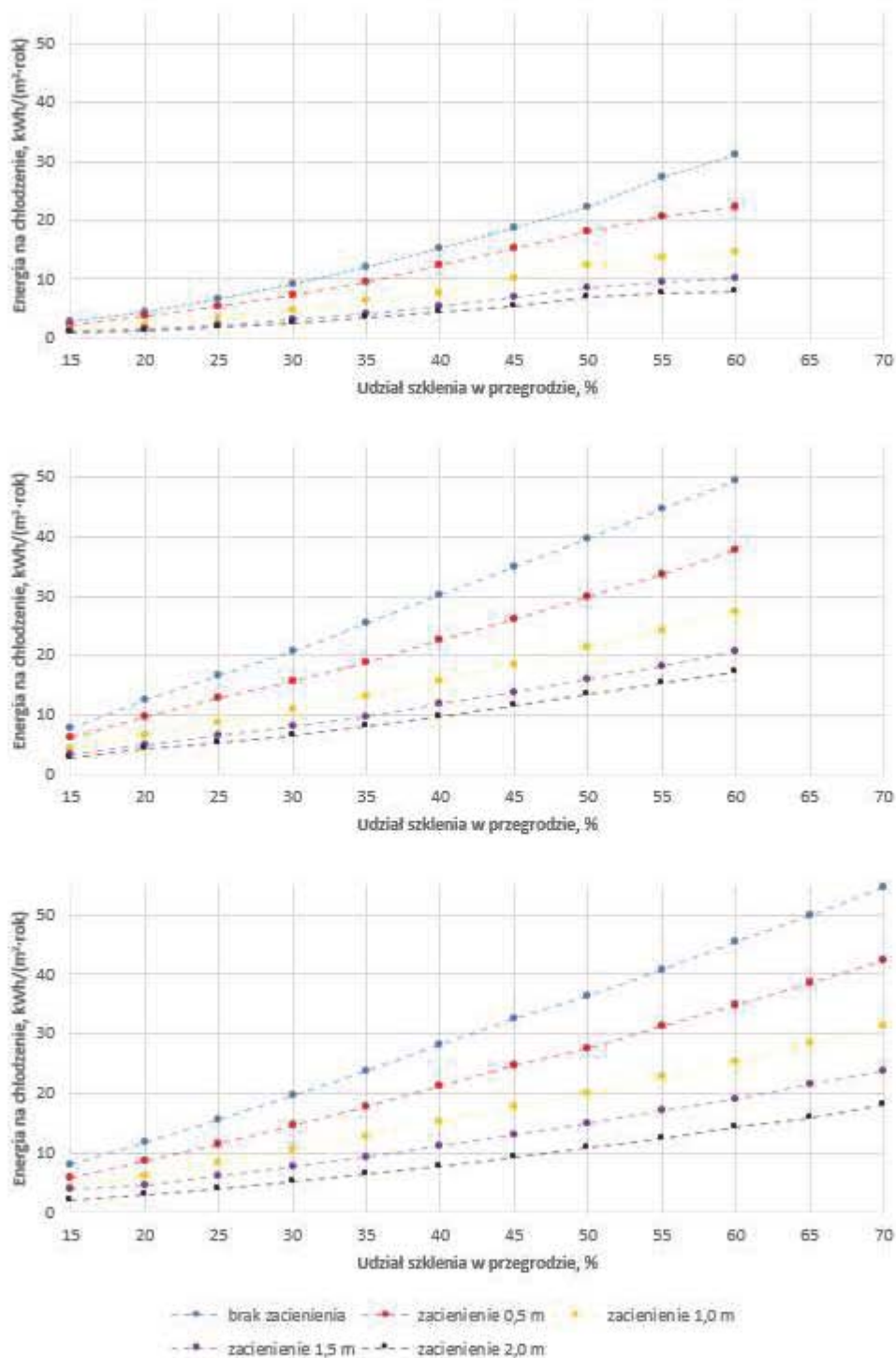
wysokością okna była wysokość 2 m – dla tej wysokości uzyskano największą liczbę przypadków spełniających podany warunek rocznego zużycia jednostkowego ciepła na ogrzewanie. Przy mniejszej powierzchni okien ograniczona jest ilość docierającego do wnętrza promieniowania słonecznego, a w przypadku największej wysokości straty ciepła przez przeszklenia okazują się większe niż zyski ciepła.

2. Wpływ wielkości okien na zapotrzebowanie na chłód przy zastosowaniu stałych zacięnię okien Obliczenia zapotrzebowania na energię do chłodzenia dały odwrotny stan wyników (rys. 3 i 4). Wraz ze wzrostem przeszklenia wzrasta zapotrzebowanie na chłód, które maleje przy zwiększaniu zacięnięcia. Dokonując porównania trendów tej grupy wyników z wartościami dotyczącymi ogrzewania, w przypadku chłodzenia można zauważyć, iż wraz ze zwiększeniem wysokości okien, przebiegi zapotrzebowania na chłód, wraz ze wzrostem powierzchni przeszklenia stają się coraz bardziej strome. Było to szczególnie dobrze widoczne przy porównaniu uzyskanych wyników dla okien o wysokości 1,7 m i zacięnię o wysięgu 1,5 m i 2 m (rozkład wyników jest wtedy bardzo zbliżony do płaskiego) z wynikami dla okien o wysokości 2,31 m i takich samych zacięnię.

3. Wpływ wielkości okien na zapotrzebowanie na energię elektryczną do ogrzewania i chłodzenia przy zastosowaniu stałych zacięnię okien Jednoznaczne wskazanie najkorzystniejszego udziału przeszklenia w całej powierzchni ściany elewacji południowej na podstawie dotychczas przedstawionych wyników nie było możliwe. Uzyskane rozkłady wyników dla ogrzewania i chłodzenia mają przeciwne przebiegi: rozwiązanie korzystne ze względu na ogrzewanie okazuje się niekorzystne ze względu na chłodzenie pomieszczeń. Wobec tego w celu ustalenia rozwiązania najkorzystniejszego określono całkowity koszt energetyczny ogrzewania i chłodzenia badanego budynku z zastosowaniem pompy ciepła. W tym celu założono wykorzystanie elektrycznej sprężarkowej pompy ciepła, współpracującej z dolnym źródłem ciepła w postaci wymiennika gruntowego. W podstawowym trybie pracy urządzenie będzie odpowiedzialne za ogrzewanie budynku, a w trybie rewersyjnym za chłodzenie. Przyjęto współczynniki efektywności pracy pompy ciepła (*coefficient of performance*). Przeprowadzone analizy ograniczono jedynie do przypadków powierzchni przeszklenia fasady południowej, które w obrębie jednostkowego rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania spełniały kryterium graniczne stawiane budynkom pasywnym. Ograniczono się również do przypadku uwzględniającego wewnętrzne zyski ciepła.

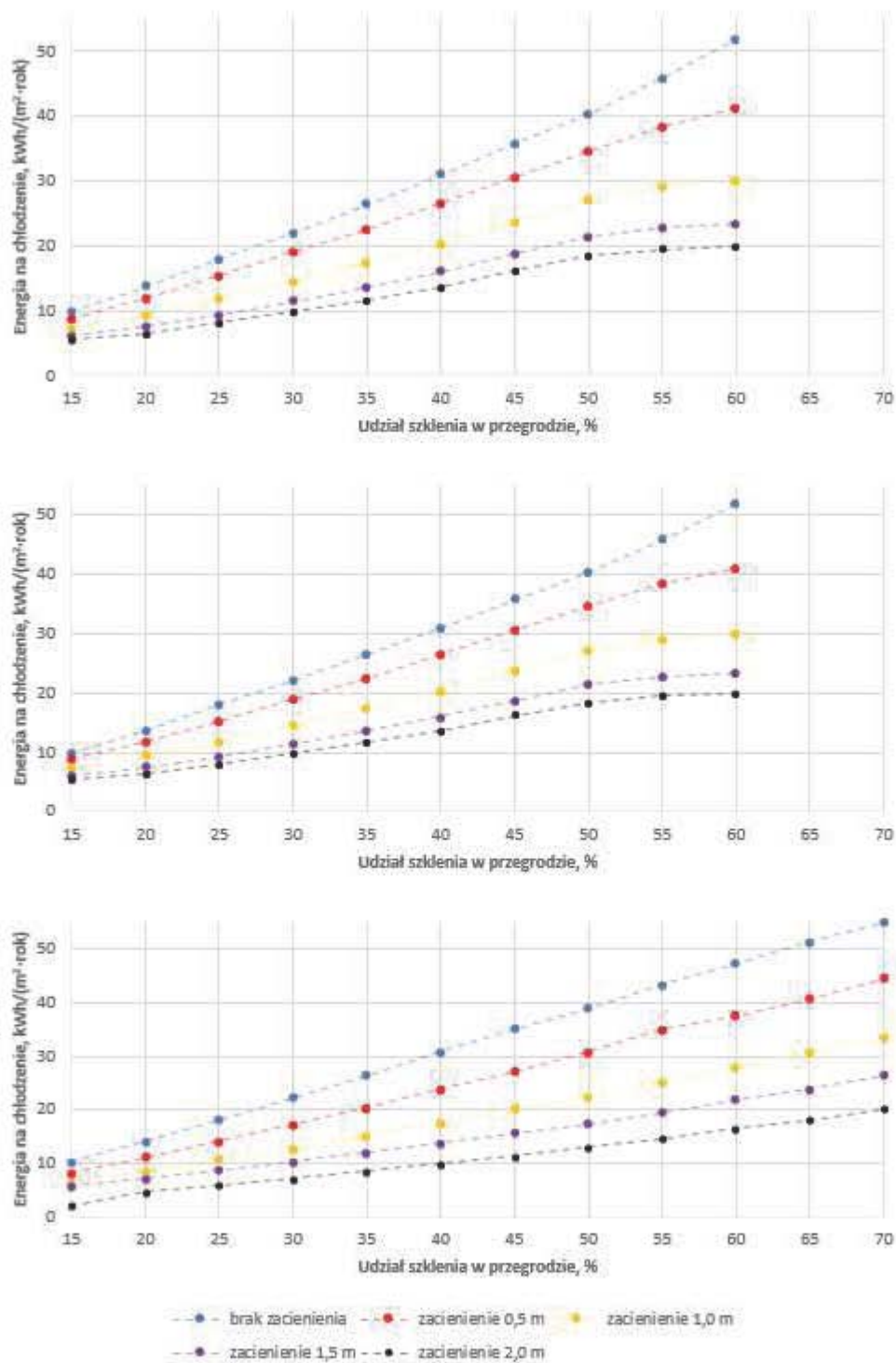
Z rys. 5 wynika, że przy poczynionych założeniach najkorzystniejszy był układ: wysokość okna 2 m, wysięg zacięnięcia 1 m, powierzchnia szklenia zajmująca 60% powierzchni ściany. Nieznacznie wyższe wartości uzyskano dla innych przypadków okien o wysokości 2 m.

W rozwiązaniach z oknami o mniejszych powierzchniach oraz większymi zacięnięciami, ograniczone są zyski ciepła od promieniowania słonecznego, przez co wymagane jest dostarczenie do budynku większej ilości ciepła. W przypadku okien o większej powierzchni i niewielkim zacięnięciu, zwiększana jest strata ciepła w okresach chłodnych (szklenie okien



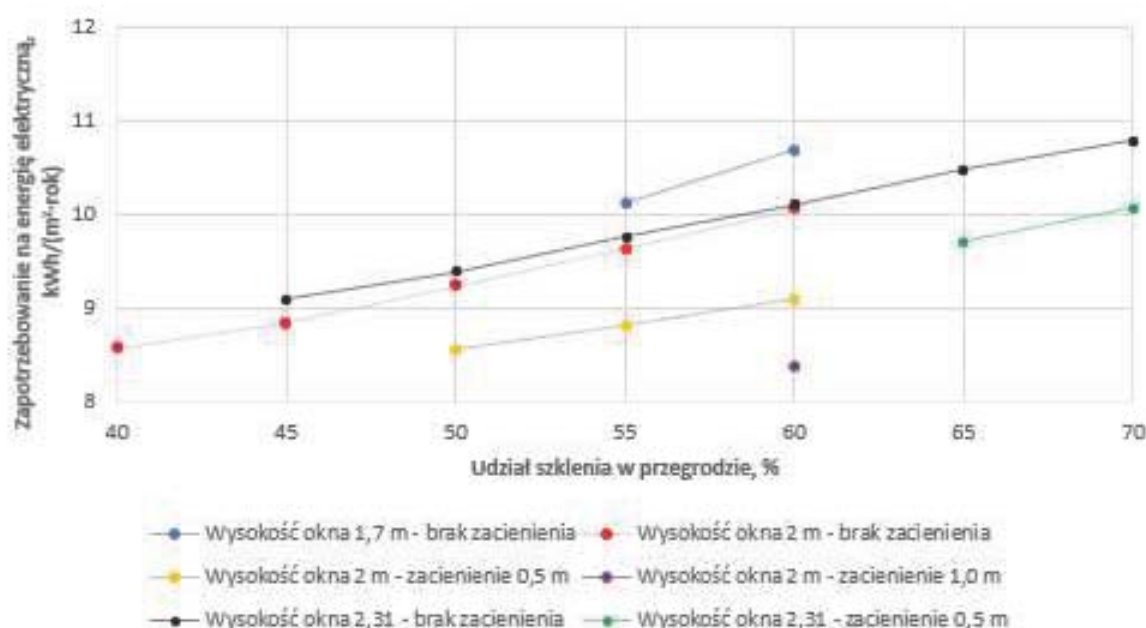
Rys. 3: Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię do chłodzenia, bez uwzględnienia wewnętrznych zysków ciepła.

Od góry: wysokość okna 1,7 m, 2 m, 2,31 m.



Rys. 1: Roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię do chłodzenia, z uwzględnieniem wewnętrznych zysków ciepła.

Od góry: wysokość okna 1,7 m, 2 m, 2,31 m.



Rys. 5 Zapotrzebowanie na energię do napędu pomp ciepła

odznacza się wyższym współczynnikiem przenikania ciepła w porównaniu do ściany), a jednocześnie zwiększane są zyski ciepła od słońca w okresach letnich.

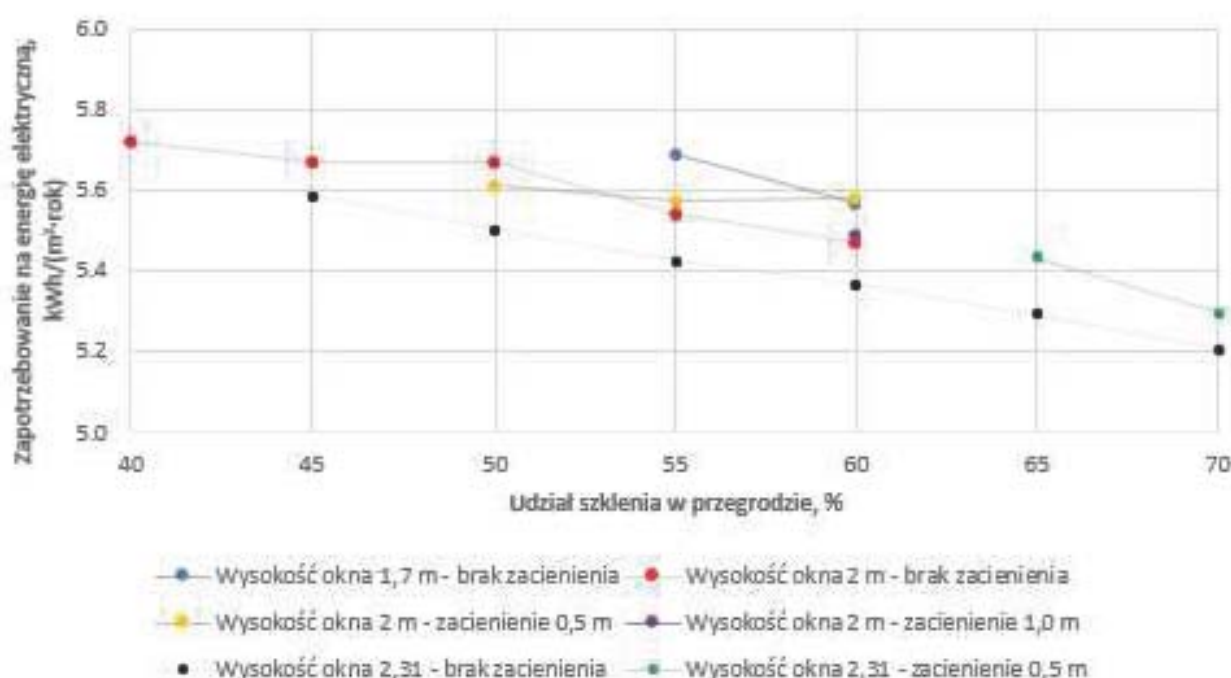
1. **Wpływ zastosowania aktywnego systemu zacięnięcia** Wprowadzenie aktywnego systemu zacięnięcia powinno skutkować zmniejszeniem zapotrzebowania na energię do chłodzenia. Taki system skuteczniej niż zacięnięcia stałe, ogranicza ilość promieniowania słonecznego dostającego się do pomieszczeń i podgrzewającego go w okresach letnich. Zacięnięcia są używane w płaszczyźnie dzień, w związku z czym ich działanie nie jest zależne od kąta padania promieniowania słonecznego. Dzięki możliwości podniesienia i zwinięcia rolet w okresie zimowym sterowań energii promieniowania docierającego do wnętrza budynku może nie być zmniejszany, w wyniku czego nie musi pojawiać się w tym okresie zwiększenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania, tak jak częściej występuje to w przypadku zacięnięcia stałych. Do analiz założono system zacięnięcia w postaci:

- metalowych rolet zewnętrznych,
- tkaninowych rolet wewnętrznych.

W analizie założono, że rolety są zacięnięte w okresie od czerwca do września w ciągu dnia.

Zastosowanie rolet odwraca trend, wynikowy (rys. 6 i 7). Zastosowanie rolet zewnętrznych znacząco ogranicza ilość ciepła – promieniowanie słoneczne jest odbijane przez przesłonięcie pomieszczenia, a nagrzewający się materiał rolety nie ma możliwości przekazania ciepła

do powietrza wewnętrznego. Najkorzystniejszym rozwiązaniem wydaje się tutaj rozwiązanie z powierzchnią okien (wysokość okna 2,31 m i okno zajmujące 70% powierzchni przegrody zewnętrznej pomieszczenia) bez zacięcia stałego. Potwierdza to powyższe dążenie do maksymalizacji powierzchni okien elewacji południowej z zastosowaniem zacięć aktywnych. Zacięcia opisane w legendzie wykresu (0,5 m, 1,0 m, brak zacięcia) dotyczą zacięć stałych występujących w budynku.

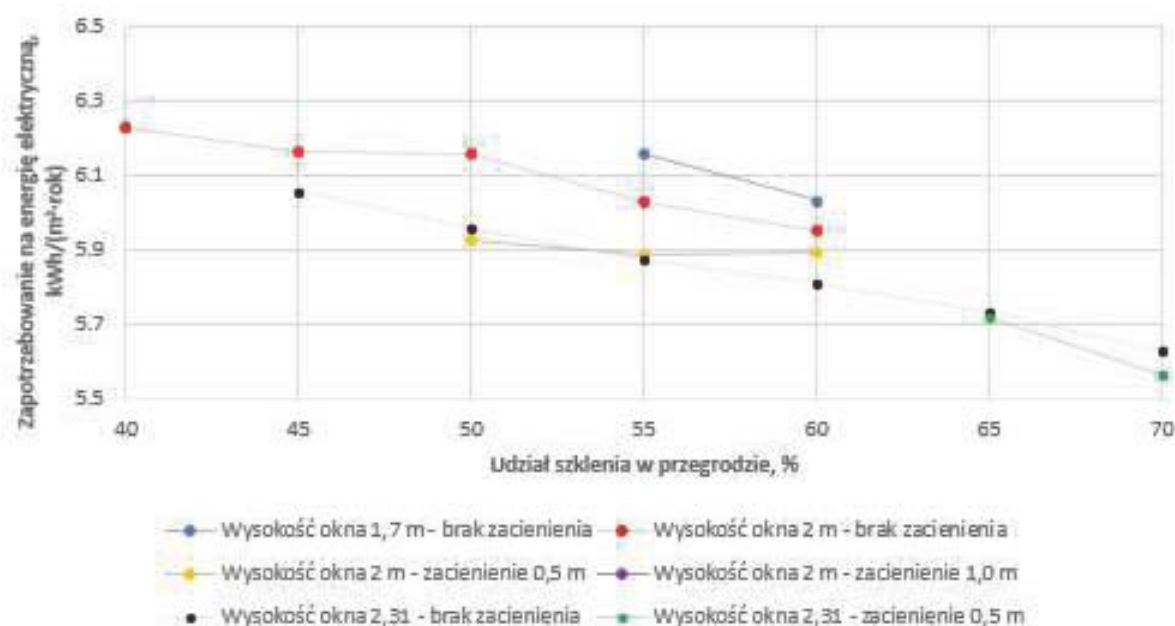


Rys. 6: Zapotrzebowanie na energię elektryczną od napędu pompy ciepła dla przypadków z zacięciem w postaci rurek zewnętrznych.

3. Analiza kosztów całkowitych w poszukiwaniu najkorzystniejszej wielkości okien

Analizę energetyczną dotyczącą najkorzystniejszej wielkości okien elewacji południowej budynku pasywnego rozszerzono o badanie uwzględniające koszty całkowite zastosowania okna o założonej powierzchni. W badaniu tego kryterium istotna była suma całkowitych przeciętnych w okresie życia kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych okien oraz kosztów tań. Szacunki zastępowanej przez powiększoną powierzchnię okien i wznikającej z powiększenia powierzchni okien zmiany zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia budynku. Analizę przeciętnych rocznych kosztów całkowitych ograniczono do przypadków wielkości przeszczepia i całony przed nadmiernymi zyskami ciepła od promieniowania słonecznego spełniających warunek jednostkowego rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania nie przekraczającego $16 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$.

Określono koszty wytworzenia i zużycia, wszystkie nakłady pieniężne, które występują w ciągu jednego roku działania budynku, czyli w ciągu 100 lat. W tak dłu-



Rys. 7 Zapotrzebowanie na energię elektryczną do napędu pompy ciepła dla przypadków z zacięnięciem w postaci rolet wewnętrznych

pod tym względem zmienia się wartość pieniądza – zmienia się wartość pieniądza, oraz wstępują zmiany cen elementów. Aby uwzględnić te zmiany wprowadzono odpowiednie współczynniki i sprowadzono całkowite koszty do reprezentatywnego roku, nazwanego rokiem zero-wym. Wykorzystana metoda bazuje na metodzie przedstawionej w [20].

W obliczeniach uwzględniono koszty związane z wykonaniem ściany ciepłej południowej z montażem okien w tej ścianie oraz kosztami montażu zacięnięć (zarówno stałych w postaci balkonu i okapu dachu, jak i aktywnych w postaci rolet). Drugim głównym składnikiem są koszty użytkowania budynku, na które składają się koszty zakupu energii elektrycznej do napędu pompy ciepła (w trybie grzania i chłodzenia) oraz koszty modernizacji i remontów.

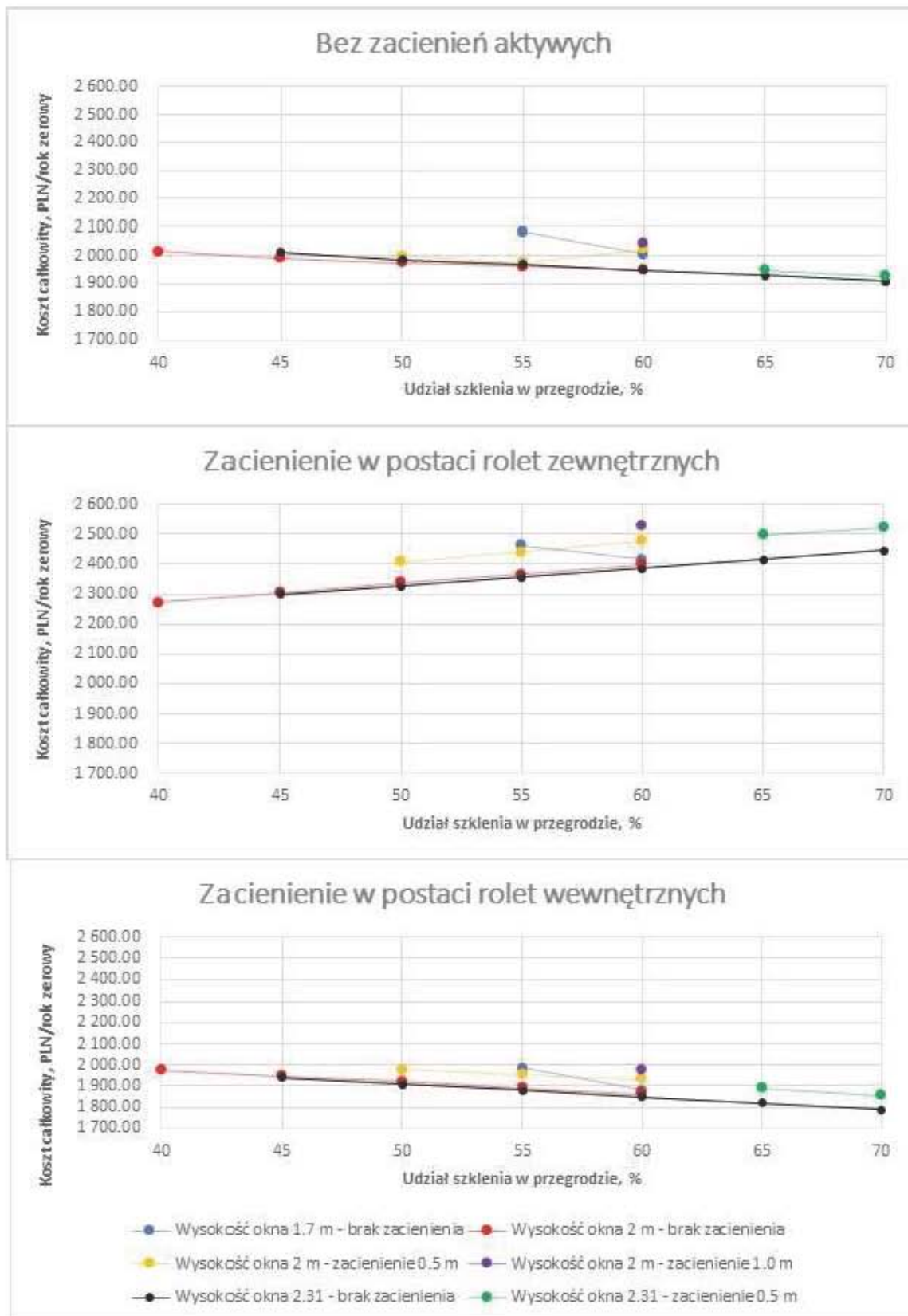
Wyróżniono trzy grupy wielkości powierzchni szklenia oraz typu i wielkości zacięnięć na koszty całkowite przedstawiono na rys. 8. W przypadku okien o wysokości 1,7 m nieważnym okazało się zacięnięcie stałe – następuje spadek kosztów całkowitych, bez względu na stosowanie zacięnięć stałych. W tym przypadku, zwiększenie powierzchni okna odnosi pozytywny skutek obniżenia kosztów całkowitych. Zestawienie wyników dla pozostałych przypadków wskazuje, że korzystnym rozwiązaniem było skonstruowanie maksymalnie długiego okna, pozbawionego zacięnięć stałych, wyposażonego jednak w zacięnięcie aktywne w postaci rolet wewnętrznych. Wprowadzenie zacięnięć aktywnych zmniejsza zapotrze-

bowanie na energię do chłodzenia budynku, co za tym idzie, ogranicza nakłady finansowe związane z zakupem energii do napędu pompy ciepła w trybie chłodzenia. Zauważalna jest tutaj przewaga rolet wewnętrznych materiałowych nad zewnętrznymi. Wynika to ze znacząco niższych kosztów zakupu i montażu rozwiązania wewnętrznego, wykonanego z tkaniny.

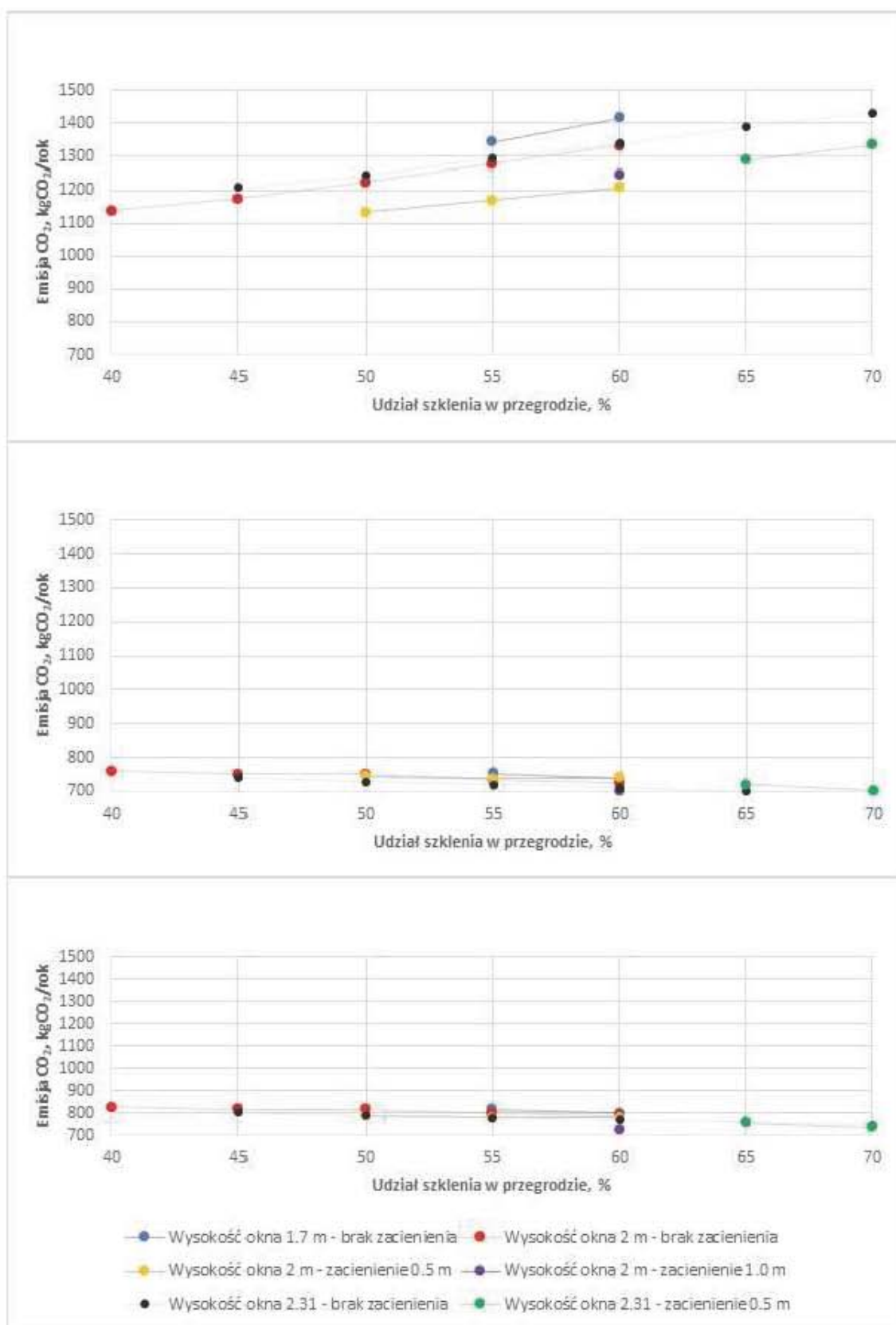
Najkorzystniejszym rozwiązaniem spośród wszystkich analizowanych przypadków było okno o wysokości 2,31 metra, pozbawione zacieniń stałych, korzystające z zacieniń aktywnych wewnętrznych, którego powierzchnia odpowiada 70% powierzchni ściany zewnętrznej południowej. Istotne zauważenia wydaje się niekorzystny wpływ wprowadzania zacieniń stałych na koszty całkowite.

- 6. Analiza kosztów ekologicznych** Kolejna analiza dotyczyła zmiany oddziaływania na środowisko budynku o różnej powierzchni okien elewacji południowej. W analizach wyznaczono emisję CO₂ związaną z wytwarzaniem energii elektrycznej potrzebnej do napędu pompy ciepła w trybie ogrzewania i chłodzenia w funkcji powierzchni okien i zastosowania zacieniń. W celu wyznaczenia emisji CO₂ określono zużycie paliwa pierwotnego. Emisję CO₂ związaną z wytworzeniem, przetworzeniem i przesyłaniem energii elektrycznej wyznaczono wykorzystując wskaźnik emisji z raportu opublikowanego przez Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy [91]. Zgodnie z raportem dostarczenie do odbiorcy 1 MWh energii elektrycznej w warunkach polskich wiąże się z emisją 823,257 kgCO₂. W analizach wyznaczono roczną emisję CO₂ związaną z ogrzewaniem i chłodzeniem całego budynku w różnych wariantach wielkości okien, typu i wielkości zacieniń. Uzyskane wyniki zestawiono na wykresach na rys. 9. Najkorzystniejszymi rozwiązaniami (podobnie jak poprzednio) są przykłady dotyczące dużej powierzchni przeszkleń (60-70%).

Ostatnią analizą wykonaną w ramach poszukiwania najkorzystniejszej powierzchni przeszklenia elewacji południowej budynku pasywnego było badanie wpływu otoczenia roślinnego na zyski ciepła od promieniowania słonecznego. W analizach poszukiwano wysokości drzewa przy różnych odległościach szczytu korony drzewa od ściany. Przyjęto, iż szczyt korony pokrywa się ze środkiem pnia. Wyniki wskazały, że zacienienie okien możliwe jest w przypadku bardzo wysokich drzew zlokalizowanych blisko budynku. Uwzględniając, iż górna krawędź okna na piętrze w analizowanym budynku znajduje się na wysokości ok 5 m, to w przypadku drzewa znajdującego się w odległości od budynku równej 2 m (odległość raczej niebezpieczna, ze względu na niekorzystne działanie układu korzeniowego) ich wysokość dla pełnego przysłonięcia okien powinna wynosić około 12,5 m. Korona drzewa o takiej wysokości również będzie znaczna, przy dodatkowym zagrożeniu dla budynku w postaci gałęzi.



Rys. 8: Koszty całkowite użytkowania budynku, odniesione do roku reprezentatywnego, przy różnych wielkościach okien elewacji południowej.



Rys. 9: Emisja CO₂ związana ze zużytej energią elektryczną potrzebną do napędu pompy ciepła w trybie grzania oraz chłodzenia.

8 Doskonalenie układu grzewczo-wentylacyjnego jednorodzinnego budynku pasywnego

W ramach prac poszukiwania najkorzystniejszego systemu grzewczo-wentylacyjnego opracowano kilka możliwych systemów instalacji z różnych elementów składowych. Propozycje te połączono w grupy, które utworzono na podstawie analiz zalet i wad układów stosowanych w praktyce. Szczególną uwagę przy tworzeniu tych propozycji zwrócono na:

- wstępną obróbkę powietrza wentylacyjnego z wykorzystaniem powietrznego gruntowego wymiennika ciepła oraz rekuperatora,
- zastosowanie właściwej instalacji c.o., tzn. umożliwiającej spełnienie wymaganych funkcji, oraz efektywnego układu przygotowania c.w.u.,
- przyjęcie efektywnego źródła ciepła dla budynku pasywnego.

Nadrzędnym kryterium tworzenia systemów było racjonalne, ze względów ekonomicznych i ekologicznych, uzyskanie wymaganej temperatury i czystości powietrza wewnętrznego oraz temperatury c.w.u. Założono jednocześnie, że rozsądne kształtowanie odpowiedniej czystości powietrza wewnętrznego wymagałoby dostosowania strumienia powietrza wentylacyjnego do aktualnych strumieni zanieczyszczeń, w tym wilgoci w budynku.

8.1 Program analiz

Badania dotyczące doskonalenia układu grzewczo-wentylacyjnego (z uwzględnieniem chłodzenia) jednorodzinnego budynku pasywnego polegały na przeprowadzeniu obliczeń zapotrzebowania na energię elektryczną potrzebną do napędu pompy ciepła dla przedstawionych układów ogrzewania, przy różnej powierzchni okien fasady południowej. Główne obliczenia przeprowadzono w środowisku programu EnergyPlus [68, 69, 93]. W obliczeniach wykorzystano program EnergyPlus w wersji 8.7. Model budynku został przygotowany w programie Google SketchUp Make 2017 [100], z wykorzystaniem nakładki OpenStudio SketchUp Plug-in. Aby ułatwić pracę związaną z tworzeniem i obróbką plików tekstowych w czasie analiz, pliki były tworzone przy pomocy Energy Plus IDFEditor. W analizach wykorzystano również dodatkowe programy: RetScreen 4 oraz arkusze kalkulacyjne MS Excel.

Przy pomocy programu RetScreen 4 [97] wyznaczono uzysk energii wynikający z zastosowania odnawialnych źródeł energii w postaci ogniw fotowoltaicznych oraz kolektorów słonecznych. Instalacja fotowoltaiczna została założona jako instalacja ogniw krzemowych polikrystalicznych firmy BP Solar, model BP 3 235 W. Natomiast jako instalację kolektorów słonecznych przyjęto pracę układu złożonego z 3 kolektorów płaskich cieczowych firmy Hewalex - model KS 2100.

Arkusze kalkulacyjne MS Excel wykorzystano do zestawienia wyników końcowych z powyższych programów, przedstawienia wyników w formie graficznej, a także dalszej obróbki związanej z analizą finansową.

8.2 Analiza finansowa

Analiza finansowa obejmowała użytkowanie poszczególnych rozwiązań. To wyniki analizy finansowej pozwalają wybrać rozwiązanie najkorzystniejsze. Analiza została wykonana w sposób analogiczny do analizy wykonanych podczas poszukiwania najkorzystniejszej powierzchni przeszklenia elewacji południowej, dodano jedynie wartości dotyczące instalacji ogrzewania i wentylacji oraz źródła ciepła.

8.3 Wyniki analizy

Analizę wyników przeprowadzonych obliczeń podzielono na 2 grupy:

Zużycie energii napędowej pompy ciepła pracującej na potrzeby ogrzewania budynku i przygotowania ciepłej wody użytkowej – uwzględniono wyniki dla wszystkich przypadków systemów przedstawionych wcześniej.

- Zużycie energii napędowej pompy ciepła pracującej na potrzeby ogrzewania i chłodzenia oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej – uwzględniono wyniki analiz dotyczących przypadków 4 - 6, gdyż tylko te układy instalacji pozwalają na chłodzenie budynku.

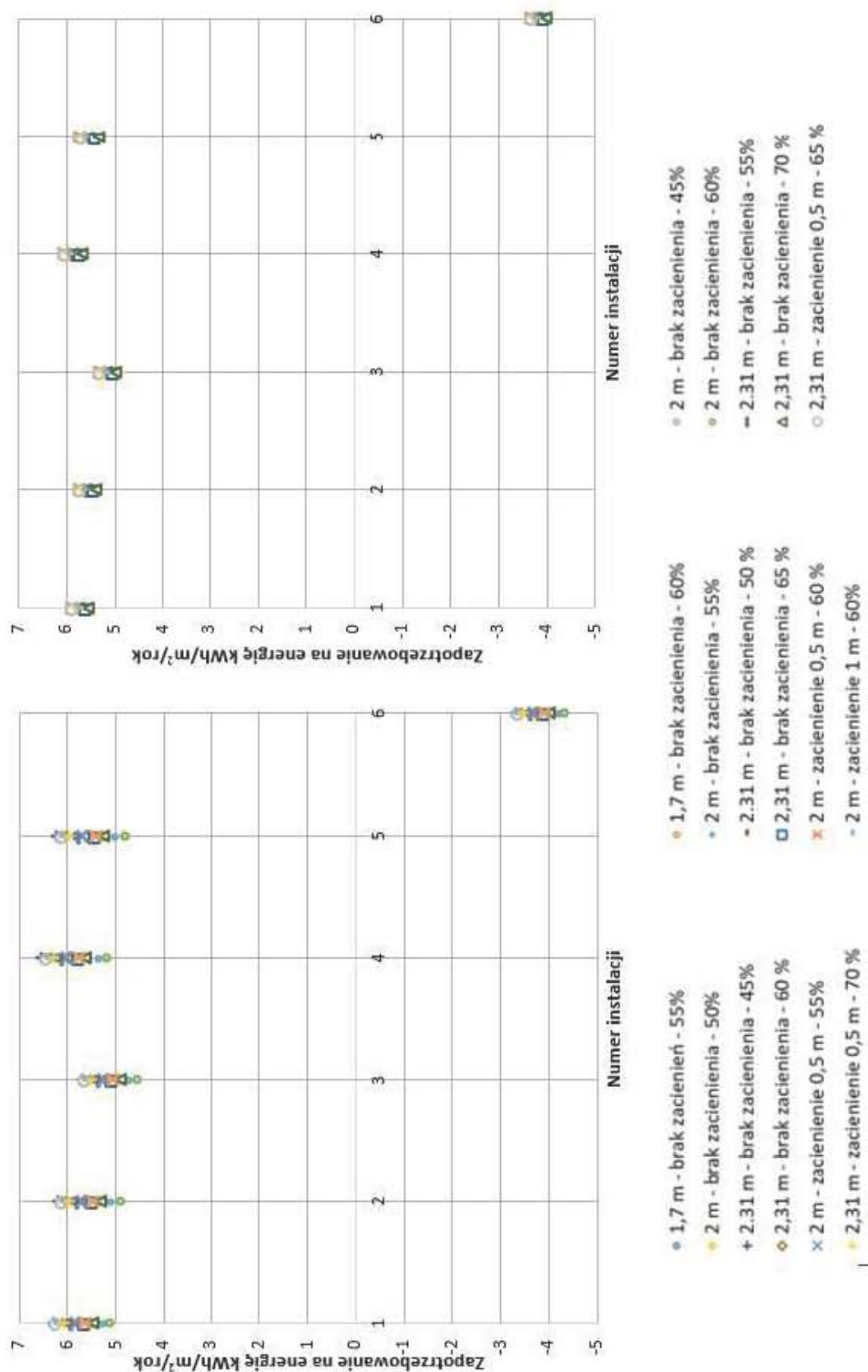
1. **Zużycie energii do ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej** Analizując zużycie energii do ogrzewania dla budynku bez aktywnych zacięnięć (rys. 10) najkorzystniejszym rozwiązaniem było instalacja zgodna z układem 3 przy 60% przeszkleniu elewacji południowej, wysokości okien 2 m i braku zacięnięcia stałego.

Osobno należy rozpatrzyć instalacje wyposażone w ogniwa fotowoltaiczne. W przypadku analizowanego budynku był możliwy montaż instalacji fotowoltaicznej o znacznej powierzchni ukierunkowanej południowo. Dzięki temu roczna ilość energii dostarczonej z instalacji PV była znaczna, przewyższająca zużycie energii napędowej pompy ciepła w ciągu całego roku.

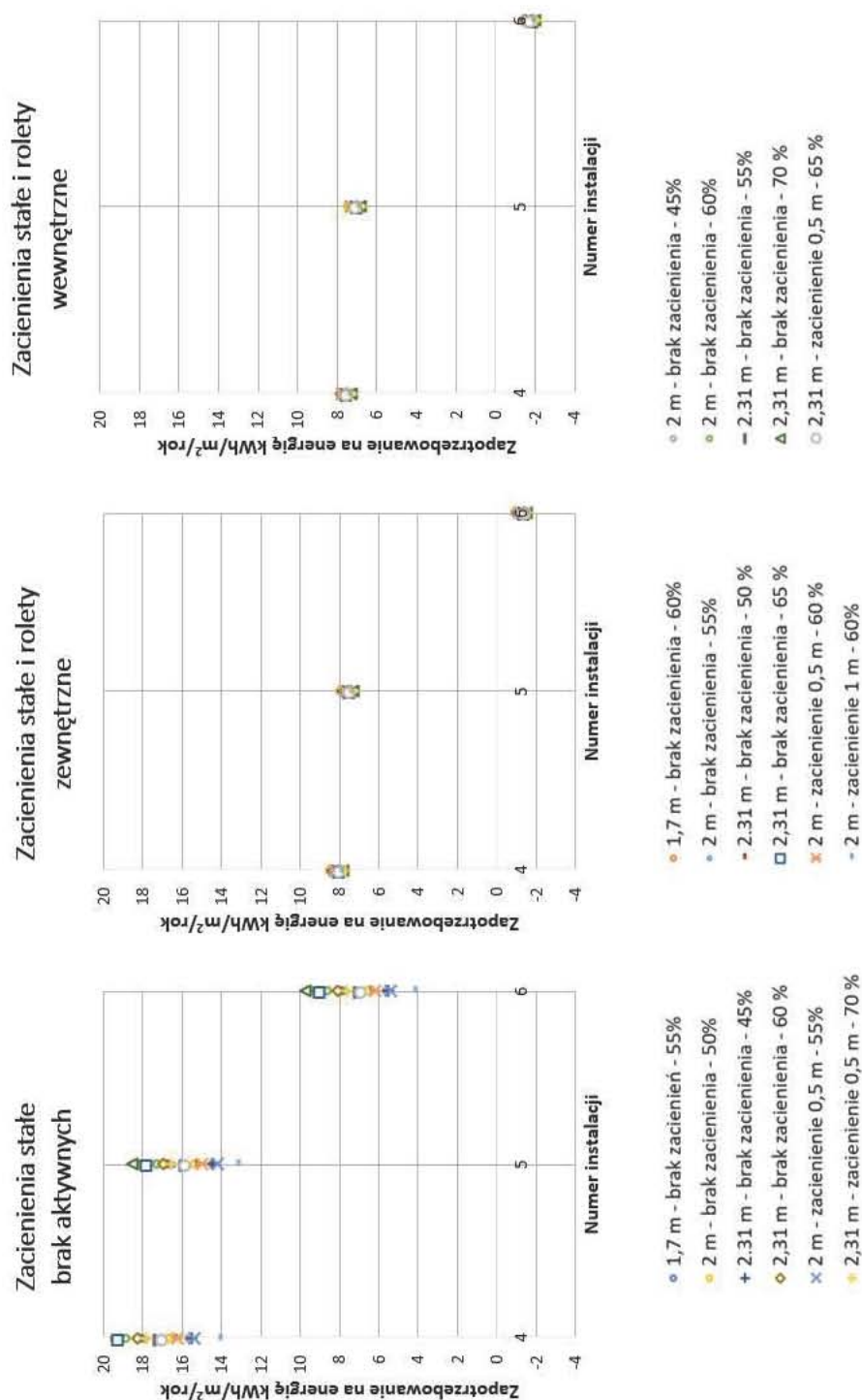
Wprowadzenie zacięnięć aktywnych w postaci rolet zewnętrznych nie zmienia rozkładu wyników poszczególnych typów instalacji. Ponownie najkorzystniejszym układem był układ 3 dla instalacji z kolektorami słonecznymi. Zmianie uległy natomiast najkorzystniejsze przypadki przeszklenia elewacji. Zastosowanie rolet zewnętrznych zmniejszyło straty ciepła przez rozwiniętą powierzchnię okien, dzięki czemu najkorzystniejszymi układami są budynki z maksymalnymi przeszkleniami elewacji południowej – 70% i 65%, przy wysokości okna 2,31 m i braku zacięnięć stałych. Jednak różnice między poszczególnymi powierzchniami szklenia są niewielkie.

2. **Zużycie energii do ogrzewania, chłodzenia i c.w.u.** Analizy uwzględniające chłodzenie zostały przeprowadzone tylko dla instalacji 4 – 6, gdyż tylko w przypadku tych instalacji możliwe było jej wykorzystanie do chłodzenia budynku.

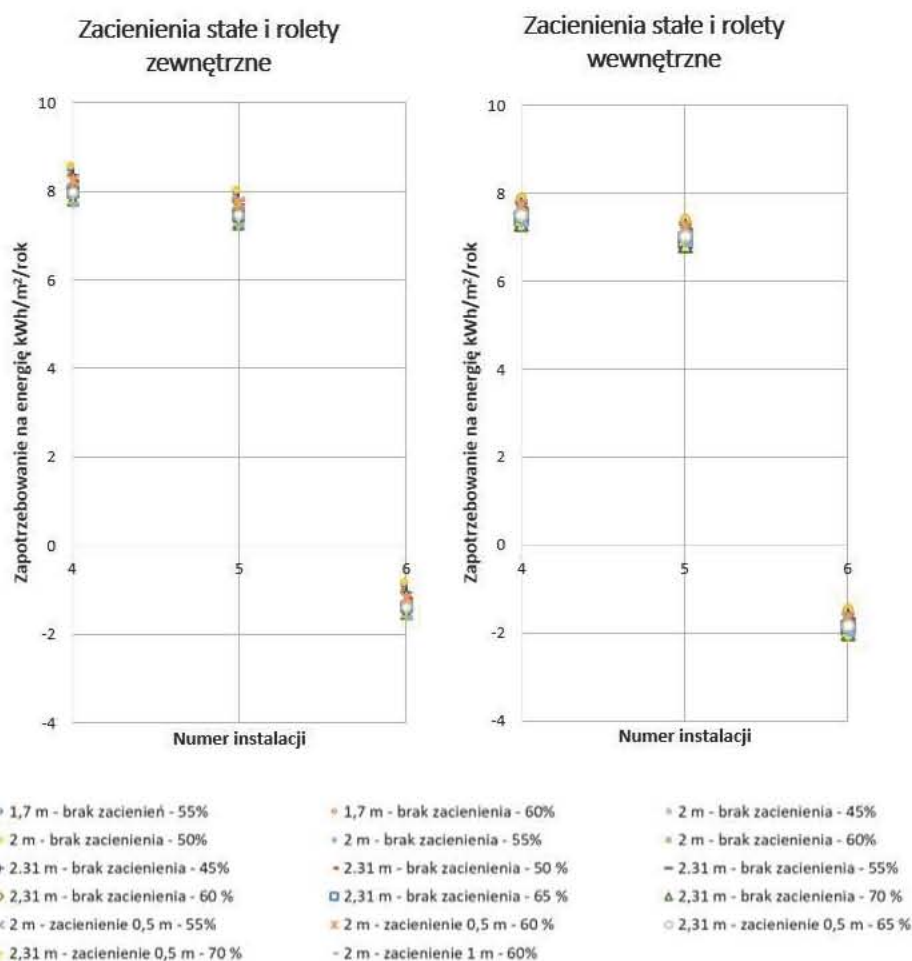
Najkorzystniejszym typem instalacji była instalacja wyposażona w ogniwa fotowoltaiczne, które dostarczają energię do napędu pompy ciepła (widoczne na rys. 11 i 12, który szczegó-



Rys. 10: Zużycie energii do ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla budynku wyposażonego w zacielenia stałe (balkon i okap dachu) - lewa strona, zacielenia stałe i aktywne w postaci rolet zewnętrznych - prawa strona



Rys. 11: Zużycie energii do ogrzewania, chłodzenia i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla budynku wyposażonego w zacienienia stałe (balkon i okap dachu) – wykres lewy górny, zacienień stałych i aktywnych w postaci rolet zewnętrznych – wykres prawy górny, zacienień stałych i aktywnych w postaci rolet wewnętrznych - wykres lewy dolny.



Rys. 12: Zużycie energii do ogrzewania, chłodzenia i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla budynku wyposażonego w zacienienia stałe aktywne w postaci rolet zewnętrznych – wykres lewy, zacienień stałych i aktywnych w postaci rolet wewnętrznych – wykres prawy.

łowiej pokazuje przypadki z zacienieniami aktywnymi). W przypadku budynków niewyposażonych w zacienienia aktywne pozyskiwanie energii elektrycznej z PV było mniejsze niż jej zużycie energii, dlatego występuje konieczność zakupu dodatkowej energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej. W przypadku budynków wyposażonych w rolety (zarówno zewnętrznie, jak i wewnętrznie) ilość energii wytworzonej w ogniwach PV była większa od zużycie energii elektrycznej.

Dla budynku bez rolet najkorzystniejszym układem była instalacja typu 6 z przeszkleniem od strony południowej odpowiadającym 55% powierzchni elewacji, z oknami wysokości 2 metrów z półmetrowym zacienieniem stałym. Dla budynków wyposażonych w rolety uzyskano podobne wyniki przy wykorzystaniu rolet zewnętrznych i wewnętrznych. Najkorzystniejszą była instalacja 6. Różnice wyników w obu przypadkach są minimalne co pokazuje rys. 12. Analizując wykresy można zauważyć, iż korzystniejszym rozwiązaniem

było zastosowanie rolet wewnętrznych.

8.3.1 Analiza finansowa

Poszukiwanie najkorzystniejszego rozwiązania ze względu na całkowite koszty użytkowania również zostało rozbite na przypadki bez chłodzenia i z chłodzeniem.

1. **Analiza finansowa użytkowania budynku bez chłodzenia** Wyniki dotyczące kosztów użytkowania kształtują się odmiennie w porównaniu do zużycia energii. Jest to związane ze znacznymi sumarycznymi kosztami elementów często wymienianych w okresie użytkowania budynku, jak np. rolety. Jak można zaobserwować na rys. 13, nieuzasadnione ekonomicznie jest inwestowanie w układ wyposażony w ogniwa fotowoltaiczne. Jest to związane z wysokimi kosztami zakupu i montażu instalacji PV, dodatkowo taką inwestycję trzeba powtarzać co 25 lat (możliwe, że przyszłe rozwiązania budowy ogniw PV będą pozwalały na dłuższą pracę, jednak na razie brak takich informacji).

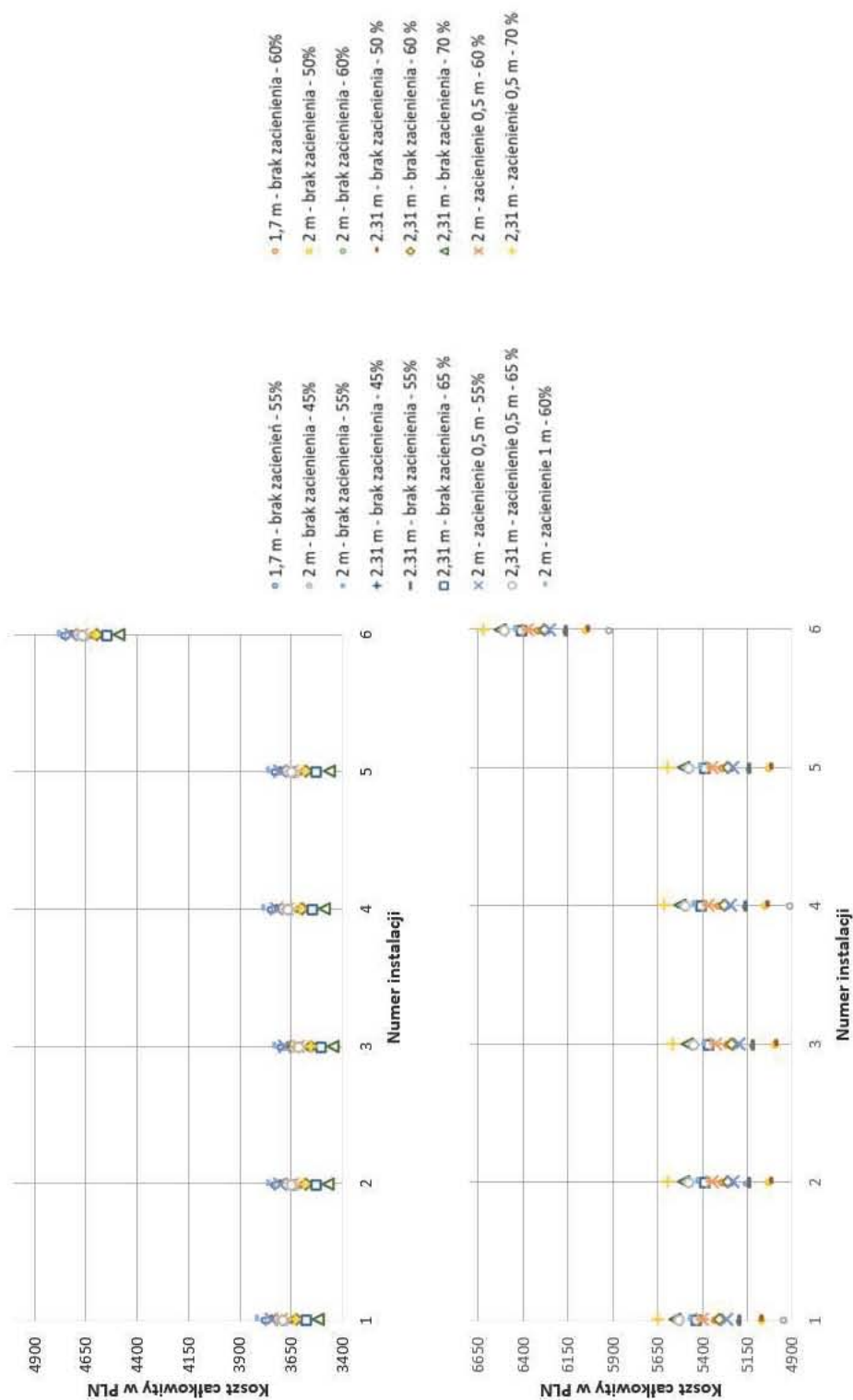
Najkorzystniejszym rozwiązaniem instalacji ogrzewania i przygotowania c.w.u. była instalacja 3. W przypadku budynku bez zacięń aktywnych najkorzystniejszym przypadkiem było 70% przeszklenie elewacji południowej, przy wysokości okna 2,31 m i braku zacięnia stałego. Natomiast wykorzystanie zacięń aktywnych sprawia, że najkorzystniejszym przypadkiem było 60% przeszklenie elewacji południowej, przy wysokości okna 2,31 m i braku zacięnia stałego oraz wysokość okna 2 m i 50% powierzchnia okien. Różnice kosztów w poszczególnych rozwiązaniach instalacyjnych są niewielkie dla tych rozwiązań okien, a najniższy koszt ponownie dotyczy trzeciego rozwiązania instalacji.

2. **Analiza finansowa użytkowania budynku z chłodzeniem** Uwzględnienie chłodzenia budynku wiąże się ze zwiększeniem nakładów na energię napędową pompy ciepła. Jednak obserwowane coraz bardziej upalne lata raczej skłaniają ku poniesieniu tych kosztów, na rzecz wyższego komfortu użytkowania budynku. Zestawienie wyników przedstawiono na rys. 14. Analizując 3 wykresy można zauważyć, że najkorzystniejszym rozwiązaniem instalacji był układ 6 bez zacięń aktywnych. W przypadku budynku bez zacięń aktywnych najkorzystniejszym rozwiązaniem była konstrukcja z oknami o wysokości 2,31 m, pokrywających 70% powierzchni elewacji południowej bez zacięnia stałego. Dzięki wprowadzeniu zacięń aktywnych w postaci rolet zewnętrznych najkorzystniejszym rozwiązaniem instalacji był przypadek 5:

wysokość okna 2,31 m, okna stanowią 45% powierzchni elewacji południowej, brak zacięń stałych,

wysokość okna 2 m, okna stanowią 45% powierzchni elewacji południowej, brak zacięń stałych.

Jednak to zastosowanie rolet wewnętrznych materiałowych pozwala uzyskać rozwiązanie o najniższych kosztach. Tu najlepsze wyniki uzyskano dla instalacji 5 z konstrukcjami okien:



Rys. 13: Całkowite koszty użytkowania uwzględniające koszty ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej. U góry: budynek bez zacielenia aktywnych, u dołu: budynek wyposażony w rolety zewnętrzne.

Uwaga: Na wykresach dobrano różne zakresy osi y.

- wysokość okna 2,31 m, okna stanowią 70% powierzchni elewacji południowej, brak zacięnięć stałych,
- wysokość okna 2,31 m, okna stanowią 65% powierzchni elewacji południowej, brak zacięnięć stałych.

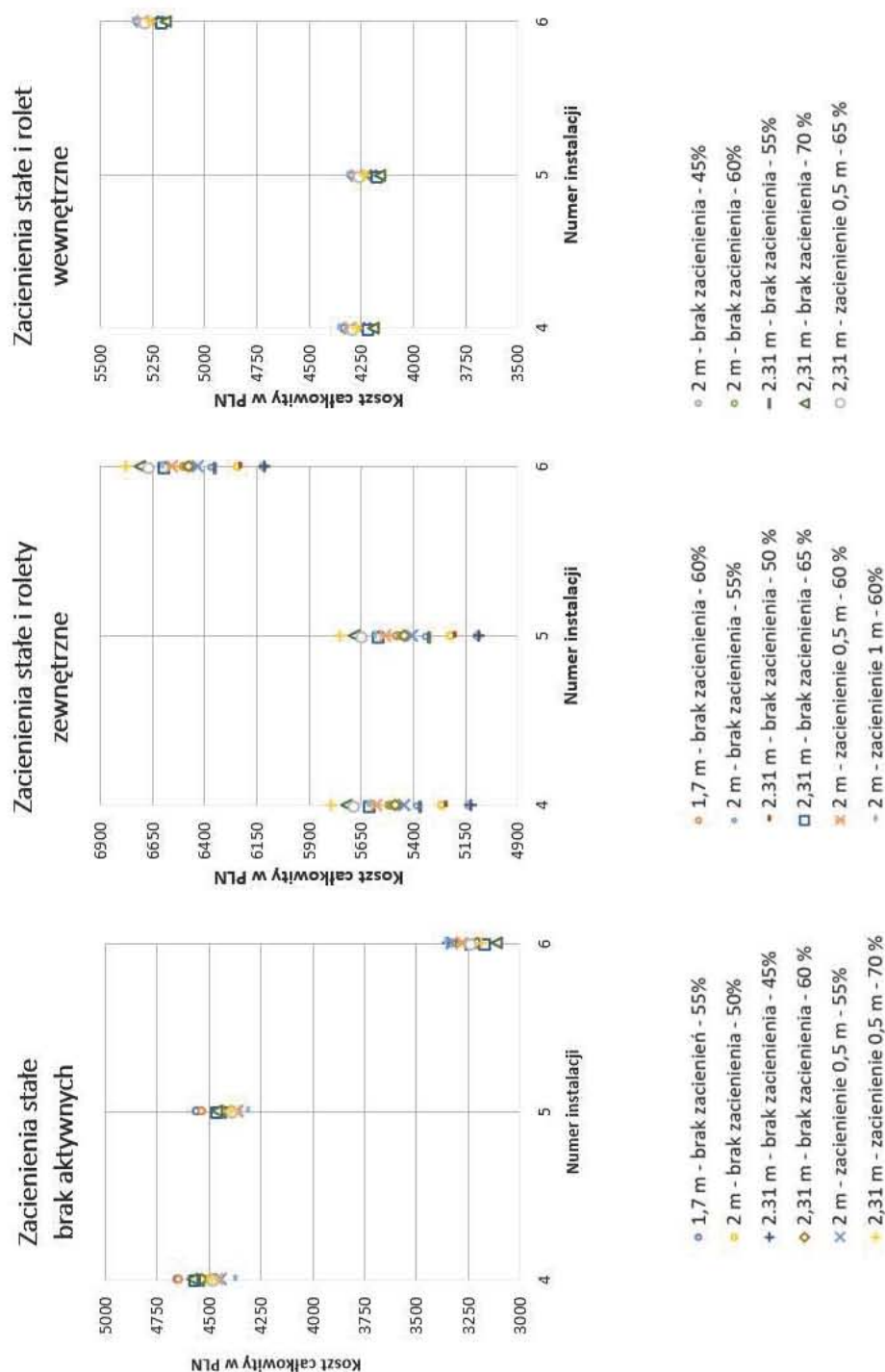
Te dwa przypadki można uznać za najkorzystniejsze rozwiązania budynku pasywnego.

9 Wnioski końcowe

Przeprowadzone analizy potwierdziły jak trudną kwestią jest dobranie odpowiednich konstrukcji i materiałów dla budynku, który ma spełniać wymagania stawiane budynkom niskoenergetycznym, a konkretnie pasywnym. Wprowadzanie zmian w doborze materiałów budowlanych, konstrukcji okien, ich wielkości i rozmieszczenia, wyborze systemu ogrzewania, wentylacji i przygotowania ciepłej wody może diametralnie zmienić charakterystykę budynku. Konieczne wydaje się zbadanie wpływu zastosowania konkretnego rozwiązania na 3 aspekty: zmiana zapotrzebowania na energię do ogrzewania (a także w wielu przypadkach chłodzenia), określenie zmiany kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, jak również określenie wpływu przyjętego rozwiązania budynku na środowisko. W taki sposób przeprowadzono analizy w niniejszej pracy.

Pierwszym krokiem w kierunku wskazania korzystnych rozwiązań konstrukcji budynku było określenie materiału przegrod zewnętrznych. Przeprowadzono analizę dostępnych i wykorzystywanych na rynku polskim materiałów budowlanych i izolacyjnych. Kierując się kryterium zachowania współczynnika U mniejszego niż $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ dla ścian pionowych zewnętrznych, oraz założeniem o akumulowaniu ciepła w przegrodzie wybrano konstrukcję ściany zewnętrznej opartej o bloczki Ytong o grubości 0,365 m, zaizolowanej termicznie od strony zewnętrznej styropianem o grubości 0,250 m.

Kolejnym krokiem badań był dobór rozwiązania i powierzchni okien. Skupiono się na oknach fasady południowej, gdyż ta strona budynku jest przewidziana do użytku dziennego oraz z tego kierunku pochodzi największy zysk energii od promieniowania słonecznego. Zgodnie z ideą budynku pasywnego powierzchnia przeszkleń pozostałych fasad powinna być minimalizowana, gdyż te przeszklania zwiększają stratę ciepła. Analiza dotyczyła zarówno konstrukcji okien – dobranie szerokości i konstrukcji ramy okiennej spełniającej wymagania dla budynków pasywnych, jak i powierzchni przeszkleń. Zmienną była również wysokość okna. Inną zmienną były zacięnięcia. We wszystkich przypadkach uwzględniano zacięnięcia stałe, które mogą być wykonane jako okap dachu lub balkon w konstrukcji osobnej, aby nie wprowadzić mostków cieplnych w konstrukcji ścian zewnętrznych. Analizowano również wpływ wykorzystania zacięnięć aktywnych, czyli zacięnięć, które w zależności od potrzeb mogą być zasłaniające lub odsłaniające. W obliczeniach uwzględniono zacięnięcia w postaci metalowych rolet zewnętrznych oraz wewnętrznych rolet tkaninowych. Z analiz wynika, że maksymalizacja powierzchni okien jest właściwa wyłącznie przy zastosowaniu zacięnięć aktywnych w postaci rolet zewnętrznych. Analizy początkowo zostały przeprowadzone w kierunku wskazania zapotrzebowania energii na potrzeby ogrzewa-



Rys. 14: Całkowite koszty użytkowania uwzględniające koszty ogrzewania, chłodzenia i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Od lewej: budynek bez zacienień aktywnych, budynek wyposażony w rolety zewnętrzne, budynek wyposażony w rolety wewnętrzne.

Uwaga: różne zakresy wartości na osi y.

nia i chłodzenia domu. Jednak nie tylko te wielkości określają całkowitą opłacalność poszczególnych rozwiązań. Stąd konieczne było przeprowadzenie analizy finansowej. Analiza finansowa obejmowała wskazanie wszystkich kosztów sprowadzonych do reprezentatywnego roku zerowego, zarówno inwestycyjnych, jak i eksploatacyjnych. Uwzględniono w analizie czasy użytkowania poszczególnych elementów, koszty ewentualnej ich wymiany, zmianę nabywczej wartości pieniądza, a także inflację. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano w odniesieniu do rozważanego typowego budynku jednorodzinnego, dla okien, których powierzchnia odpowiadała 70% powierzchni całkowitej fasady południowej. W przypadku budynku niewyposażonego w zacięcia aktywne najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla okien o wysokości 2 m i powierzchni przeszklenia odpowiadającej 40-45% powierzchni fasady. Inną częścią poszukiwania najkorzystniejszej wielkości okien południowych pomieszczeń budynku było określenie kosztów ekologicznych poszczególnych rozwiązań. Podobnie jak we wcześniejszych obliczeniach, tak i tu najkorzystniejszym rozwiązaniem okazały się okna zajmujące 70% powierzchni ściany południowej domu. W celu sprawdzenia poprawności działania programu symulacyjnego przeprowadzono walidację obliczeń.

Kolejna analiza dotyczyła systemu ogrzewania, wentylacji, chłodzenia i przygotowania ciepłej wody. To te systemy odpowiadają za ponad 70% całkowitego zużycia energii w budynku, stąd istotne jest rozsądne wybranie zastosowanego odpowiedniego rozwiązania. Analizy rozpoczęto od teoretycznego zbudowania kilku systemów ogrzewania i przygotowania c.w.u., oraz w przypadku takich możliwości - chłodzenia. Następnie dla poszczególnych systemów przeprowadzono obliczenia, uwzględniając najkorzystniejsze wielkości okien i zastosowanie zacięć. Tu podobnie jak w przypadku analizy powierzchni okien przeprowadzono badania zużycia energii, ale najkorzystniejsze rozwiązania wybrano na podstawie analizy finansowej pełnego cyklu życia. Wskazanie wyniku najkorzystniejszego należy uzależnić od stosowania lub nie stosowania chłodzenia budynku. W przypadku budynku bez chłodzenia najkorzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie systemu ogrzewania i przygotowania c.w.u. w układzie, w którym skraplacz pompy ciepła zlokalizowany jest w zasobniku ciepłej wody, która za pośrednictwem płytowego wymiennika ciepła podgrzewa czynnik roboczy instalacji ogrzewania. Ten układ ogrzewania, przy zastosowaniu zacięć aktywnych jest najkorzystniejszym rozwiązaniem przy konstrukcji budynku z oknami o powierzchni odpowiadającej 60% całej ściany i wysokości okna 2,31 m. Rezygnacja z zacięć aktywnych, których koszt jest znaczny, pozwala na maksymalizowanie powierzchni okien (najkorzystniejszy uzyskany wyniki odpowiada 70% przeszkleniu ściany), jednak należy liczyć się w takim przypadku z okresowym przegrzewaniem budynku. W zapobieganiu nadmiernemu przegrzaniu domu może pomóc instalacja chłodzenia. Uwzględniając nakład energii na chłodzenie najkorzystniejszym rozwiązaniem instalacyjnym jest układ 5, w którym skraplacz pompy ciepła oddaje energię do czynnika pośredniczącego, zaopatrującego zasobnik ciepłej wody i bufor ciepła z wykorzystaniem zaworu trójdrogowego. Działanie takiej instalacji da najkorzystniejszy efekt finansowy, gdy okna budynku będą pokrywały 65-70% powierzchni elewacji południowej, zarówno dla wysokości okna 2 m oraz 2,31 m i będą wyposażone w rolety wewnętrzne. Jak pokazały obliczenia wprowadzenie zacięć stałych (okap dachu i balkon) nie przekłada się na poprawienie bilansu energetycznego, a zwiększa koszty użytkowania budynku.

Uzyskane wyniki odpowiadają najkorzystniejszym rozwiązaniom dla analizowanego budynku. W związku ze szczegółowo określonymi wymogami dla budynku pasywnego, powyższe wyniki można przyjąć za przybliżenie najkorzystniejszych rozwiązań dla budynków pasywnych wznoszonych na terenie Polski. Należy jednak pamiętać (co było już podkreślane), że projektowanie i dobieranie elementów budynków pasywnych jest procesem bardzo wrażliwym na wszelkie zmiany. Wobec tego wszelkie odstępstwa od przyjętych w tej pracy założeń dotyczących rozważanego budynku mogą prowadzić do innych rozstrzygnięć związanych z konstrukcją i rozwiązaniem instalacyjnym tego budynku.

Doświadczenia zdobyte w toku przeprowadzonych prac studialnych i analitycznych w zakresie budynków pasywnych pozwalają sformułować następujące wnioski ogólne:

1. Najkorzystniejsza powierzchnia okien elewacji południowej zależy o zastosowania zaciemień aktywnych. Zaciemnienia takie pozwalają na projektowanie okien o znacznej powierzchni, odpowiadającej 60-70% powierzchni ściany, bez zwiększania ryzyka nadmiernego przegrzania wnętrza budynku. W ujęciu kosztów pełnego cyklu życia korzystniejsze jest zastosowanie materiałowych rolet wewnętrznych, które są znacznie tańsze w porównaniu do metalowych rolet zewnętrznych.
Wprowadzenie zaciemień stałych (okap dachu lub balkon) nie wpływa korzystnie – w znikomym stopniu ogranicza nakład energii na chłodzenie, przy zwiększeniu kosztów pełnego cyklu życia.
2. Analiza pracy systemu ogrzewania, wentylacji i chłodzenia potwierdziła, że dla zapewnienia komfortu cieplnego w budynku konieczne jest zastosowanie układu wyposażonego w pompę ciepła, która może również pracować w trybie rewersyjnym (chłodzenia).
3. Możliwe jest wzniesienie w klimacie Polski budynku spełniającego wymagania stawiane budynkom pasywnym, jednak słuszne wydaje się wyposażenie takiego budynku w system ogrzewania wykorzystujący maty kapilarne, umożliwiające również chłodzenie.
4. Zastosowanie tradycyjnych materiałów budowlanych do wznoszenia ścian zewnętrznych (błoczek i cegły betonowe, ceramiczne) umożliwia skonstruowanie budynku pasywnego w klimacie polskim.

Bibliografia

- [1] Albayya H., Hagare D., Saha, S.: *Energy conservation in residential buildings by incorporating Passive Solar and Energy Efficiency Design Strategies and higher thermal mass* Energy and Buildings, Vol. 182, 2019, s. 205-213
- [2] Audenaert A., De Cleyn S.H., Vankerckhove B.: *Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses* Energy Policy, Vol. 36, 2008, s. 47-55
- [3] Basińska M.: *The use of multi-criteria optimization to choose solutions for energy-efficient buildings* Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 65, 2017
- [4] Besler G.J., Jadwiszczak P.: *Nowe tendencje w ogrzewaniu* Materiały konferencyjne XII Zjazdu Ogrzewników Polskich, Warszawa 2002
- [5] Boyano A., Hernandez P., Wolf O.: *Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations* Energy and Buildings, Vol. 65, 2013, s. 19-28
- [6] Lai C.M., Wang Y.H.: *Energy-Saving Potential of Building Envelope Designs in Residential Houses in Taiwan* Energies, Vol. 11, 2011, s. 2061-2076
- [7] Coley D., Schukat, S.: *Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement* Building and Environment, Vol. 37, 2002, s. 1241-1247
- [8] Crawley D.B., Hand J.W., Kummert M., Griffith B.T.: *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs* Building and Environment, Vol. 43, 2008, s. 661-673
- [9] Dan D., Tanasa C., Stoian V., Brata S., Stoian D., Nagy Gyorgy T., Florut S.C.: *Passive house design—An efficient solution for residential buildings in Romania* Energy for Sustainable Development, Vol. 32, 2016, s. 99-109
- [10] Dequaire X.: *Passivhaus as a low-energy building standard: contribution to a typology* Energy Efficiency, Vol. 5, 2012, s. 377-391
- [11] Dokka T.H., Andresen I.: *Passive Houses in cold Norwegian climate* 10th International Passive House Conference 2006
- [12] Eicker U.: *Energy efficient buildings with solar and geothermal resources* Stuttgart University of Applied Sciences. Stuttgart, 2008
- [13] Eijndems H., Boerstra A., Op't Veld P.: *Low temperature heating systems* LowEx Newsletter, Vol. 37, 2015
- [14] Fedorczyk-Cisak M., Kowalska A.: *Fasady szklane w budynkach* Wydawnictwo Przewodnik Budowlany, 2012
- [15] Feist W.: *Dom pasywny - przełom energetyczny jest prosty* Świat Szkła, wyd. specjalne „Stolarka budowlana w budownictwie pasywnym i energooszczędnym”, Vol. 11, 2015

- [16] Ferdyn-Grygierek J., Grygierek K.: *Optimization of window size design for detached house using TRNSYS simulations and genetic algorithm* Architecture Civil Engineering Environment - ACEE, Vol. 10, 2017, s. 133-140
- [17] Firląg S.: *Pierwszy certyfikowany dom pasywny w Polsce* Instytut Budownictwa Pasywnego przy Narodowej Agencji Poszanowania Energii, 2007
- [18] Firląg Sz., Idczak, M.: *Budynki pasywne w Polsce* Narodowa Agencja Poszanowania Energii, 2015
- [19] Firląg Sz., Idczak, M.: *Okna w budynkach pasywnych - funkcje, wymagania, bilans energetyczny, komfort cieplny* Świat Szkła, wyd. specjalne „Stolarka budowlana w budownictwie pasywnym i energooszczędnym”, Vol. 11, 2015
- [20] Foit H.: *Optymalizacja ochrony cieplnej budynku mieszkalnego, instalacji i źródła ciepła* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006
- [21] Gaj J., Sobiech M.: *Akumulacja ciepła w budynkach a bezpieczeństwo energetyczne* Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych, Vol. 4, 2016, s. 19-23
- [22] Georges L., Van Moeseke G., Massart C., De Herde, A.: *Environmental and economic performance of heating systems for energy-efficient dwellings: case of passive and low-energy* Energy Policy, Vol. 40, 2012, s. 452-464
- [23] Grygierek K., Ferdyn-Grygierek J.: *Multi-Objectives Optimization of Ventilation Controllers for Passive Cooling in Residential Buildings* Sensors, Vol. 18, 2018
- [24] Hand J.W., Arch M.: *THE ESP-r COOKBOOK Strategies for Deploying Virtual Representations of the Build Environment* Energy Systems Research Unit Department of Mechanical Engineering University of Strathclyd, Glasgow 2008
- [25] Hong T., Sun K., Zhang R., Hinokuma R., Kasahara S., Yura Y.: *Development and validation of a new variable refrigerant flow system model in EnergyPlus* Energy and Buildings, Vol. 117, 2016, s. 399-411
- [26] Janus K.: *Rola okien w budownictwie pasywnym oraz energooszczędnym* Świat Szkła, Vol. 10, 2016, s. 24-26
- [27] Jin H.: *Parameter Estimation Based Models of Water Source Heat Pumps*. Phd. Thesis Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University, Oklahoma 2002
- [28] Jürgen S., Hermelink A.: *CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building* Energy Policy, Vol. 34, 2006, s. 151-171
- [29] Kaufmann B.: *Passivhäuser erfolgreich planen und bauen* Institut für ILS, Aachen 2004
- [30] Kiesielewicz T.: *Przegrzewanie budynków niskoenergetycznych* Napędy i sterowanie, Vol. 12, 2013, s. 65-69
- [31] Laskowski L.: *Systemy biernego ogrzewania słonecznego - zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej*. Studia z Zakresu Inżynierii, 34 KILiW PAN-IPPT PAN, Warszawa 1993
- [32] Loutzenhiser P.G., Manz H., Moosberger S., Maxwell, G.M.: *An empirical validation of window solar gain models and the associated interactions* International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, 2009, s. 85-95

- [33] Lubina P.: *Badanie zmienności wewnętrznych zysków ciepła z uwagi na dynamikę potrzeb cieplnych pomieszczeń w budynkach - praca doktorska* Politechnika Śląska, Gliwice 2005
- [34] Mahdavi A., Doppelbauer E.M.: *A performance comparison of passive and low-energy buildings* Energy and Buildings, Vol. 42, 2010, s. 1314-1319
- [35] Morrissey J., Moore T., Horne R.E.: *Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation* Renewable Energy, Vol. 36, 2011, s. 568-577
- [36] Muller L., Berker T.: *Passive House at the crossroads: The past and the present of a voluntary standard that managed to bridge the energy efficiency gap* Energy Policy, Vol. 60, 2013, s. 586-593
- [37] Olesen B.W.: *Revision of EN 15251: Indoor Environmental Criteria* REHVA Journal, Vol.4, 2012
- [38] Ornetzeder M. Rohrer H.: *Passive Houses in Austria: the role of intermediary organizations for the successful transformation of a socio-technical system* European Council for an Energy Efficient Economy - eceee 2009
- [39] Persson M.L., Roos A., Wall M.: *Influence of window size on the energy balance of low energy houses* Energy and Buildings, Vol. 38, 2006, s. 181-188
- [40] Persson M.L., Roos A., Werner A., Wall, M.: *Window size and orientation in a low energy house* CIB World Building Congress, Toronto 2004
- [41] Pomada M.: *Okna w budynkach pasywnych* Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, Vol. 13, 2014, s. 94-100
- [42] Rabah K.: *Development of energy-efficient passive solar building design in Nicosia Cyprus* Renewable Energy, Vol. 30, 2005, s. 937-956
- [43] Rempel A.R., Rempel A.W., Cashman K., Gates K., Page C., Shawe B.: *Interpretation of passive solar field data with EnergyPlus models: Un-conventional wisdom from four sunspaces in Eugene, Oregon* Building and Environment, Vol. 60, 2013, s. 158-172
- [44] Rubik M.: *Nowoczesne rozwiązania w technice ogrzewania* Instalacje, Vol. 4, 2000
- [45] Schlagowski G.: *Okna w budynkach pasywnych* Świat Szkła, wyd. specjalne „Stolarz budowlana w budownictwie pasywnym i energooszczędnym”, Vol. 11, 2015
- [46] Shabunko V., Lim C.M., Mathew S.: *EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam* Energy and Buildings, Vol. 169, 2018, s. 507-516
- [47] Shen B., New J., Baxter V.: *Air source integrated heat pump simulation model for EnergyPlus* Energy and Buildings, Vol. 156, 2017, s 197-206
- [48] Shukuya M., Hammache A.: *Introduction to the Concept of Exergy - for a Better Understanding of Low-Temperature-Heating and High-Temperature-Cooling System* VVT Technical Research Centre of Finland, Espoo 2002
- [49] Spanos, I., Simons, M., Holmes K.L.: *Cost savings by application of passive solar heating* Structural Survey, Vol. 23, 2005, s. 111-130
- [50] Strzeszewski M.: *Obniżenie zapotrzebowania na ciepło do wentylacji w wyniku zastosowania ogrzewań niskotemperaturowych* Materiały konferencyjne I Konferencji „Nowe techniki w klimatyzacji”, Warszawa 2003
- [51] Strzeszewski M.: *Wodne ogrzewanie podłogowe* Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006

- [52] Tang C.: *Modeling Packaged Heat Pumps in Quasi-Steady State Energy Simulation Program*. M.S. Thesis Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University, Oklahoma 2005
- [53] Torcellini P., Pless S., Deru M., Crawley D., *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*, ACEEE Summer Stud, Pacific Grove, California, USA 2006
- [54] Tronchin L., Fabbri K.: *Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation* Energy and Buildings, Vol. 40, 2008, s. 1176-1187
- [55] Tąta D., Dyrz P., Foit, H.: *Proposed solutions for heating systems in polish conditions the search for the best heating system solution for a passive building located in the climate of Poland* Conference Roomvent Ventilation, Lublin 2018
- [55] Tąta D., Foit H.: *Wybrane technologie budowy mieszkalnych budynków pasywnych. Cz.1, Założenia budowlane* Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, Vol. 46, 2015, s. 383-388
- [56] Tąta D., Foit H.: *Wybrane technologie budowy mieszkalnych budynków pasywnych. Cz.2, Instalacje ogrzewania, wentylacji, elektryczna i wodna* Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, Vol. 46, 2015, s. 436-441
- [57] Udrea I., Croitoru C., Nastase I., Crutescu R., Badescu, V.: *Thermal comfort in a romanian passive house. Preliminary results* Energy Procedia. Vol. 85, 2016, s. 575-583
- [58] Żurawski J.: *Etykietowanie energetyczne stolarki okiennej* Materiały budowlane, Vol. 8, 2015
- [59] Wesołowski M.: *Tanie ciepło. Ogrzewanie wody użytkowej* Magazyn instalatora, Vol. 5, 2010
- [60] Wnuk R.: *Budowa domu pasywnego w praktyce* Przewodnik Budowlany 2012
- [61] Wnuk R.: *Instalacje w domu pasywnym i energooszczędnym* Wydawnictwo Przewodnik Budowlany 2012
- [62] Woods J., Bonnema E.: *Regression-based approach to modeling emerging HVAC technologies in EnergyPlus: A Case study using a Vuilleumier-cycle heat pump* Energy and Buildings, Vol. 186, 2019, s. 195-207

Inne źródła

- [63] *ASHRAE Standard 55-2007. Thermal environment conditions for human occupancy*. ASHRAE, Atlanta
- [64] *Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard, version 9f, revised*, 2016 https://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf
- [65] *EN 15251 (2007) Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. CEN, Brussels
- [66] *Energooszczędne i pasywne domy na osiedlu "Strumień"* <https://www.chronmyklimat.pl>
- [67] *Energooszczędny dom w Smochowicach* <http://www.chronmyklimat.pl>
- [68] *EnergyPlus Energy Simulation Software, Version 8.7.0 - instruction* U.S. Department of Energy 2016
- [69] *EnergyPlus, Engineering Reference* Department of Energy, Lawrence Berkeley National Laboratory 2011

- [70] *Energy Systems Research Unit The ESP-r System for Building Energy Simulation User Guide Version 10 Series* University of Strathclyde, Glasgow, 2002
- [71] *Główny Urząd Statystyczny* <http://stat.gov.pl>
- [72] *Instrukcja urzędnika APAR AR235* https://www.apar.pl/pdf/kat_ar235.pdf
- [73] Juchlewicz-Lipińska L: *Pierwszy w Polsce certyfikowany dom pasywny* <http://www.lipinscy.pl>
- [74] Katalog firmy BP Solar 2017
- [75] Materiały promocyjne firmy Hennlich
- [76] NS 3700:2010 - Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger (Criteria for passive houses and low energy buildings - Residential buildings)
- [77] *Pakiet do projektowania budynków pasywnych* Polski Instytut Budownictwa Pasywnego, Gdansk 2006
- [78] PN-ISO 7726:2001 Ergonomia środowiska termicznego -- Przyrządy do pomiaru wielkości fizycznych, 2001
- [79] *Passivhaus Institut Dramstadt* <http://www.passiv.de>
- [80] *Pasywny dom w Smolcu koło Wrocławia* <http://www.chronmyklimat.pl>
- [81] *Pasywny dom w Tychowie* <http://www.chronmyklimat.pl>
- [82] *Pocket Guide for Air Conditioning Heating, Ventilation, Refrigeration* ASHRAE, 2014
- [83] *Polski Instytut Budownictwa Pasywnego* <http://www.pibp.pl>
- [84] Prawo Budowlane Dziennik Ustaw poz.1332 z dnia 7 lipca 1994 (z późniejszymi zmianami)
- [85] *Program Priorytetowy „Efektywne wykorzystanie energii. Dopłaty do kredytów na budowę domów energooszczędnych”* <http://www.nfosigw.gov.pl>
- [86] *Raport Energia 2017* Główny Urząd Statystyczny 2017
- [87] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U.poz. 1422)
- [88] *Procyon Construction* <https://www.pcsa.pl>
- [89] *Strona własna firmy Domy i Domki* <https://www.domyidomki.com>
- [90] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r o odnawialnych źródłach energii. Dz.U. 2015 poz 478 z póź. zmianami)
- [91] *Wskaźniki emisyjności CO2 dla energii elektrycznej u odbiorców końcowych na podstawie informacji zawartych w Krajowej bazie o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancji za 2014 rok* IOŚ-PIB Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Zespół Zarządzania Krajową Bazą, 2015
- [92] <http://www.cennik-budowlany.pl>
- [93] <https://energyplus.net>
- [94] <http://www.e-heat.pl>
- [95] <https://www.hewalex.pl>
- [96] <http://www.instalator-brzozow.pl/oferta>
- [97] <https://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>
- [98] <http://www.pasywny-budynek.pl>
- [99] <http://www.wolfhaus.pl>
- [100] <https://www.sketchup.com>