



**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI**

**Dyscyplina naukowa:** inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

**mgr inż. Arkadiusz Musiał**

**Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych  
siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów  
przemysłowych**

**Promotor: dr hab. inż. Jacek Kalina**

**Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Antczak**

**Gliwice, 2022**

## Wykaz zmian wprowadzonych w rozprawie doktorskiej:

# Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych

### 1. Zamienione zdanie:

Na Rysunek 1.5. Ideowy schemat działania regeneratora obrotowego [4].

**na:**

Na rysunku 1.5 przedstawiono uproszczony schemat i zasadę działania regeneratora obrotowego[4].

### 2. Poprawiono błąd w zdaniu:

Jest to jeden z wielu rozwiązań konstrukcyjnych regeneratorów [1,4]

**na:**

Jest to jedno z wielu rozwiązań konstrukcyjnych regeneratorów [1,4].

### 3. Poprawiono błąd w zdaniu:

Do zalet tego rozwiązania należy duża powierzchnia przepływu ciepła w małej objętości, niewielką jednostkową masę wypełnienia.

**na:**

Do zalet tego rozwiązania należy duża powierzchnia przepływu ciepła w małej objętości oraz niewielka jednostkowa masa wypełnienia.

### 4. Poprawiono błąd w zdaniu:

Zazwyczaj procesy te dotyczą odzysku ciepła ze spalin do podgrzewu substratów spalania (np. powietrza i paliwa), choć może także dotyczyć innych gazów oraz mediów.

**na:**

Zazwyczaj procesy te dotyczą odzysku ciepła ze spalin do podgrzewu substratów spalania (np. powietrza i paliwa), choć mogą także dotyczyć innych gazów oraz mediów.

### 5. Zmodyfikowano zdanie:

Ponadto są to urządzenia podatne na osadzanie się na ich powierzchni zanieczyszczeń, co pogłębia problem strat ciśnienia i może się wiązać ze zjawiskiem wybijania spalin z pieca oraz związanych z tym strat paliwa.

**na:**

Ponadto są to urządzenia podatne na osadzanie się na ich powierzchni zanieczyszczeń, co pogłębia problem strat ciśnienia i może powodować zjawisko wybijania spalin z pieca oraz związane z tym straty paliwa.

#### **6. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Przenikanie powietrza do przewodu spalinowego powoduje obniżenie temperatury spalin (a więc pogorszenie warunków przepływu ciepła), zmniejszenie natężenia przepływu powietrza do pieca (w skrajnych przypadkach zmniejszenie mocy cieplnej pieca i niedogrzanie wsadu), a także podobnie jak w przypadku zanieczyszczenia zwiększenia oporów przepływu i wybijanie spalin.

**na:**

Przenikanie powietrza do przewodu spalinowego powoduje obniżenie temperatury spalin (a więc pogorszenie warunków przepływu ciepła), zmniejszenie natężenia przepływu powietrza do pieca (w skrajnych przypadkach zmniejszenie mocy cieplnej pieca i niedogrzanie wsadu), a także podobnie jak w przypadku zanieczyszczenia zwiększenie oporów przepływu i wybijanie spalin.

#### **7. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Rozwiązanie to zostało zastosowane już w jednej z najstarszych cementowni na terenie Polski w Golezowie (1885, obecnie już nieczynna) gdzie wykorzystywano spaliny z pieców obrotowych o temperaturze 800°C [2,5]

**na:**

Rozwiązanie to zostało zastosowane już w jednej z najstarszych cementowni na terenie Polski w Golezowie (1885, obecnie już nieczynna), gdzie wykorzystywano spaliny z pieców obrotowych o temperaturze 800°C [1,5].

#### **8. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Zainstalowano wówczas dwa generatory o moc 600 kW, które zastępowały wykorzystywane wcześniej maszyny parowe, nie jest jednak jasne, czy wykorzystywały one ciepło odpadowe czy spalały paliwo, choć w tym samym czasie zamontowano cztery piece obrotowe, po dwa w dwóch osobnych halach.

**na:**

Zainstalowano wówczas dwa generatory o mocy 600 kW, które zastępowały wykorzystywane wcześniej maszyny parowe, nie jest jednak jasne, czy

wykorzystywały one ciepło odpadowe czy spalały paliwo, choć w tym samym czasie zamontowano cztery piece obrotowe, po dwa w dwóch osobnych halach.

#### 9. Poprawiono błąd w zdaniu:

Rozwiązanie to jest także ma pewne wady. W układach tych, aby zapewnić ich wysoką sprawność stosowane są stosunkowo wysokie przegrzewy pary na wylocie z kotła, wykorzystywane są kosztowne wielostopniowe turbiny, przegrzew pary pomiędzy poszczególnymi stopniami i/lub upusty pary do regeneracyjnych wymienników ciepła podgrzewające skroploną przed powrotem do kotła, odgazowywacze, pompy kondensatu i pompy obiegowe [8].

na:

(pierwsze zdanie usunięto) W układach tych, aby zapewnić wysoką sprawność stosowane są stosunkowo wysokie przegrzewy pary na wylocie z kotła, wykorzystywane są kosztowne wielostopniowe turbiny, przegrzew pary pomiędzy poszczególnymi stopniami i/lub upusty do regeneracyjnych wymienników ciepła podgrzewające skroploną parę wodną przed powrotem do kotła, odgazowywacze, pompy kondensatu i pompy obiegowe [8].

#### 10. Poprawiono błąd w zdaniu:

W warunkach polskich jak i ogólnie-europejskich zastosowanie nowoczesnych bardziej wydajnych metod produkcji cementu oraz wyższa zawartość wilgoci surowców (7-9% w Polsce) powodująca większe zużycie ciepła odpadowego do ich suszenia, sprawiło, że klasyczny obieg RC utracił jedną z niszy swojego zastosowania, co wpisuje się w ogólne ograniczenia tej technologii do wykorzystania przemysłowego ciepła odpadowego [3,6].

na:

W warunkach polskich jak i ogólnie-europejskich zastosowanie nowoczesnych bardziej wydajnych metod produkcji cementu oraz wyższa zawartość wilgoci surowców (7-9% w Polsce) powodująca większe zużycie ciepła odpadowego do ich suszenia, sprawiły, że klasyczny obieg RC utracił jedną z niszy swojego zastosowania, co wpisuje się w ogólne ograniczenia tej technologii do wykorzystania przemysłowego ciepła odpadowego [3,6].

#### 11. Poprawiono błędy w zdaniu:

Oznacza to, że temperatura parowania jest zmienna w jego trakcie, następuje zmniejszenie minimalnych różnic temperatur pomiędzy mieszaniną woda-amoniak, a nośnikiem ciepłą odpadowego umożliwiając pozyskanie większej ilości ciepła od źródła ciepła odpadowego niż w przypadku zastosowania czystej wody (o ok 15-25%).

na:

Oznacza to, że temperatura parowania jest zmienna w jego trakcie, następuje zmniejszenie minimalnych różnic temperatur pomiędzy mieszaniną woda-amoniak, a nośnikiem ciepła odpadowego umożliwiając pozyskanie większej ilości energii od źródła ciepła odpadowego niż w przypadku zastosowania czystej wody (o ok 15-25%).

## 12. **Zmodyfikowano zdanie:**

Ciśnienie może być regulowane przez zmianę stosunku woda/amoniak np. ciśnienie w skraplaczu może zostać obniżone poprzez zmniejszenie koncentracji amoniaku w roztworze, a zwiększenia ciśnienia w parowniku poprzez jego zwiększenie.

**na:**

Ciśnienie może być regulowane przez zmianę stosunku woda/amoniak – wzrost koncentracji amoniaku powoduje obniżenie ciśnienia w skraplaczu, natomiast spadek powoduje wzrost ciśnienia w parowniku.

## 13. **Zmodyfikowano zdanie:**

Para o wysokiej zawartości amoniaku zostaje skierowana do napędu turbiny, a oddzielona na separatorze mieszanina wody stanie ciekłym i gazowym trafia do wysokotemperaturowego rekuperatora, który podgrzewa ciekłą mieszaninę woda-amoniak tuż przed parownikiem, po czym przed skraplaczem łączy się z rozprężoną w turbinie amoniakalną parą. Zanim mieszanina trafi do skraplacza oddaje ciepło w kolejnym rekuperatorze, który jest umieszczony tuż za pompą, a przed niskotemperaturowym rekuperatorem, zamontowany bezpośrednio przed parownikiem. Z rekuperatora niskotemperaturowego mieszanina trafia do skraplacza następuje izobaryczne skroplenie (najpierw wody, potem amoniaku), po czym już w stanie ciekłym zostaje skierowana do pompy, z której poprzez oba rekuperatory (w których wstępnie się podgrzewa) trafia z powrotem do parownika zamykając tym samym cykl termodynamiczny.

**na:**

Para o wysokiej zawartości amoniaku zostaje skierowana do napędu turbiny, a oddzielona na separatorze mieszanina wody w stanie ciekłym i gazowym trafia do wysokotemperaturowego rekuperatora, który podgrzewa ciekłą mieszaninę woda-amoniak tuż przed parownikiem, po czym za turbiną łączy się z rozprężoną amoniakalną parą. Zanim mieszanina trafi do skraplacza oddaje ciepło w niskotemperaturowym rekuperatorze, który jest umieszczony tuż za pompą, a przed rekuperatorem wysokotemperaturowym, zamontowany bezpośrednio przed parownikiem. Z rekuperatora niskotemperaturowego mieszanina trafia do skraplacza, gdzie następuje izobaryczne skroplenie (najpierw wody, potem amoniaku), po czym już w stanie ciekłym zostaje skierowana do pompy, z której poprzez oba rekuperatory (w których wstępnie się podgrzewa) trafia z powrotem do parownika zamykając tym samym cykl termodynamiczny.

**14. Zamieniono zdanie:**

W praktyce układ ten ma dość złożoną strukturę technologiczną i może się okazać trudny w eksploatacji.

**na:**

Sprawia to że elektrownia oparta o obieg Kaliny może się okazać trudna w eksploatacji.

**15. Poprawiano błędy w zdaniu:**

Jedno z wdrożeń miało miejsce w miejscowości Húsavík na Islandii, gdzie w roku 2000 oddano do eksploatacji jednostkę opartą na obiegu Kaliny, dla którego źródłem ciepła była gorąca woda o temperaturze 122°C i strumieniu masy 90 kg/s. Produkowała 2 MW energii elektrycznej z 20 MW dostarczone energii cieplnej.

**na:**

Jedno z wdrożeń miało miejsce w miejscowości Húsavík na Islandii, gdzie w roku 2000 oddano do eksploatacji jednostkę opartą na obiegu Kaliny, dla której źródłem ciepła była gorąca woda o temperaturze 122°C i strumieniu masy 90 kg/s. Produkowała 2 MW energii elektrycznej z 20 MW dostarczonej energii cieplnej.

**16. Poprawiano błąd w zdaniu:**

Podobny los spotkał jednostkę pracująco w miejscowości Unterhaching w Niemczech.

**na:**

Podobny los spotkał jednostkę pracującą w miejscowości Unterhaching w Niemczech.

**17. Zmodyfikowano zdanie:**

Technologia ta jest jednak udoskonalana z każdym kolejnym demonstratorem technologii oraz wdrożeniem i można się spodziewać, że w przyszłości zainteresowanie cyklem Kaliny jak i liczba projektów mogą wzrosnąć [12]

**na:**

Technologia ta jest jednak udoskonalana z każdym kolejnym demonstratorem oraz wdrożeniem i można się spodziewać, że w przyszłości zainteresowanie cyklem Kaliny jak i liczba projektów mogą wzrosnąć [12].

**18. Zmodyfikowano zdanie:**

Silniki Stirlinga również nie należą nowych koncepcji wykorzystania ciepła odpadowego, ponieważ pojawiła jeszcze w czasach rewolucji przemysłowej, a dokładnie w 1816 r. gdy został opatentowany przez wynalazcę Roberta Stirlinga [17].

**na:**

Kolejną technologią stosowaną do konwersji ciepła odpadowego na pracę mechaniczną i dalej na energię elektryczną jest **Silnik Stirlinga**. Jest technologią sięgającą czasów rewolucji przemysłowej, a dokładnie 1816 r. gdy został opatentowany przez wynalazcę Roberta Stirlinga [17].

**19. Zmodyfikowano zdanie:**

Podstawową różnicą pomiędzy układem ORC a klasycznym układem parowym jest zastosowany czynnik roboczy jakim są czynniki niskowrzące, nazywane także organicznymi takie jak oleje silikonowe, węglowodory czy czynniki chłodnicze [30,31], które charakteryzują mniejszym ciepłem parowania niż woda oraz zazwyczaj niższą temperaturą parowania.

**na:**

Podstawową różnicą pomiędzy układem ORC a klasycznym układem parowym jest zastosowany czynnik roboczy jakim są czynniki niskowrzące, nazywane także organicznymi takie jak oleje silikonowe, węglowodory czy czynniki chłodnicze [30,31], które dla danego ciśnienia charakteryzują się mniejszym ciepłem parowania niż woda oraz zazwyczaj niższą temperaturą nasycenia.

**20. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Ciąg przemian termodynamicznych jakie występują w obiegu ORC jest co do zasady taki sam jak w obiegu konwencjonalnym obiegu parowym, co przedstawiono na rys. 1.13 oraz 1.14.

**na:**

Ciąg przemian termodynamicznych jakie występują w obiegu ORC jest co do zasady taki sam jak w konwencjonalnym obiegu parowym, co przedstawiono na rys. 1.13 oraz 1.14.

**21. Zamieniono zdanie:**

Maszyna robocza napędzającą generator elektryczny

**na:**

Energia mechaniczna zostaje zamieniona na elektryczną w generatorze

**22. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Kształt obiegu i efektywność energetyczna systemu zależą głównie od temperatury źródła ciepła oraz rodzaju zastosowanego czynnika roboczego. Kluczowe zależności oraz kształtujące jego efektywność termodynamiczną procesu ORC opisują moc

osiągalną generatora G, moc włożoną do napędu pompy obiegowej czynnika PO, ciepło doprowadzone do obiegu w gorących wymiennikach ciepła P oraz ciepło wyprowadzone w skraplaczu S.

**na:**

Dokładny przebieg poszczególnych przemian obiegu na wykresie Ts i efektywność energetyczna systemu zależą głównie od temperatury źródła ciepła oraz rodzaju zastosowanego czynnika roboczego. Kluczowe zależności kształtujące efektywność termodynamiczną procesu ORC opisują moc osiągalną generatora G, moc włożoną do napędu pompy obiegowej czynnika PO, ciepło doprowadzone do obiegu w gorących wymiennikach ciepła P oraz ciepło wyprowadzone w skraplaczu S.

**23. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Powoduje to, że technologia ta jest coraz częściej dostrzegana jest przez rządowe oraz pozarządowe instytucje zajmujące się szeroko rozumianą ochroną środowiska (technologia ORC znajduje się np. w dokumencie BAT – Best Available Technologies) i coraz częściej realizację inwestycji z technologią ORC jest wspomagane legislacyjnie i finansowo. Technologia ORC do znalazła zastosowanie do odzysku ciepła odpadowego zarówno w zastosowaniach stacjonarnych jak i trakcyjnych, a nawet do odzysku energii cieplnej w postaci chłodu (np. z terminala regazyfikacyjnego LNG, a elektrownie takie są określane mianem kriogenicznych), a spotykane jednostki mają moc od 1 kW do kilkunastu MW.

**na:**

Powoduje to, że technologia ta jest coraz częściej dostrzegana przez rządowe oraz pozarządowe instytucje zajmujące się szeroko rozumianą ochroną środowiska (technologia ORC znajduje się np. w dokumencie BAT – Best Available Technologies) i coraz częściej realizację inwestycji z technologią ORC jest wspomagane legislacyjnie i finansowo. Technologia ORC może zostać wykorzystana do odzysku ciepła odpadowego zarówno w zastosowaniach stacjonarnych jak i trakcyjnych, a nawet do odzysku energii cieplnej w postaci chłodu (np. z terminala regazyfikacyjnego LNG, a elektrownie takie są określane mianem kriogenicznych), a spotykane jednostki mają moc od 1 kW do kilkunastu MW.

**24. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Rozwój oferty poszczególnych firm odbywa się w oparciu o opracowaną technologię ekspandera, którym może być turbina osiowa lub promieniowa lub maszyna innego typu.

**na:**

Rozwój oferty poszczególnych firm odbywa się w oparciu o opracowaną technologię ekspandera, którym może być turbina osiowa, promieniowa lub maszyna innego typu.

**25. Usunięto rozdział 1.3, ponieważ jego planowana treść stanowiłaby powtórzenie treści zawartych w sposób rozproszony w pozostałej części pracy.**



**26. Wprowadzono zmiany w strukturze rozprawy doktorskiej: po rozdziale 1.2. Uwarunkowania i ograniczenia technologii organicznego obiegu Rankine'a (ORC) wprowadzono rozdział 2. Cel, zakres i tezy pracy wraz z podrozdziałem 2.1. Tezy badawcze.**

**27. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Energia odpadowa jest surowcem wtórnym uzyskiwanym ze zużytych wyrobów i może zostać uznane jako odnawialne źródło energii [1].

**na:**

Energia odpadowa jest surowcem wtórnym uzyskiwanym ze zużytych wyrobów i może zostać uznana jako odnawialne źródło energii [1].

**28. Poprawki estetyczne dla tabeli 5.1 Przemysłowe zużycie energii w Polsce w ktoe w 2017 r. zależności od rodzaju paliwa i sektora przemysłowego**

**29. Poprawki estetyczne dla tabeli 5.2. Przykładowe współczynniki i zużycie paliwa dla przemysłu chemicznego i petrochemicznego**

**30. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Na cele niniejsze pracy przyjęto podział nośników ciepła ze względu na ich temperaturę na

**na:**

Na cele niniejszej pracy przyjęto podział nośników ciepła ze względu na ich temperaturę na

**31. Poprawiono błąd w zdaniu:**

W hutach oprócz energii odpadowej energii termicznej występują także strumienie odpadowej energii chemicznej (gaz konwertorowy, gaz wielkopiecowy) oraz ciśnieniowej (nadmiarowe ciśnienie gazu wielkopiecowego), które nie zostały wyszczególnione w niniejszej analizie.

**na:**

W hutach oprócz odpadowej energii termicznej występują także strumienie odpadowej energii chemicznej (gaz konwertorowy, gaz wielkopiecowy) oraz ciśnieniowej (nadmiarowe ciśnienie gazu wielkopiecowego), które nie zostały wyszczególnione w niniejszej analizie.

**32. Pod tabelą 5.6 Wskaźniki ciepła odpadowego w zależności od sektora i poziomu temperatury w odniesieniu do zużycia energii dodano dodatkowy opis:**

W tabeli 5.6 podano oszacowany udział energii odpadowej w stosunku do całości doprowadzonej energii napędowej dla procesów i urządzeń występujących w poszczególnych gałęziach przemysłu z rozbiem na promieniowanie cieplne, nośniki ciepła z rozbiem na poziomy temperatur oraz sumarycznie dla poszczególnych sektorów oraz dla przemysłu jako całości.

**33. Usunięto odwołanie do literatury z tytułu rozdziału 5.1. Prototyp Marani ORC10**

**34. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Projektowy strumień ciepła przekazywanego w parowniku wynosi 160 kWt – bezpośrednio w oleju lub pośrednio za pomocą pętli wodnej, kumulującej ciepło w więcej niż jednego urządzenia.

**na:**

Projektowy strumień ciepła przekazywanego w parowniku wynosi 160 kWt – bezpośrednio w oleju lub pośrednio za pomocą pętli wodnej, kumulującej ciepło z więcej niż jednego urządzenia.

**35. Dodano rozdział 5.4. Wkład własny Autora w prace nad prototypami ORC i ich powiązanie z rozprawą doktorską**

**36. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Model ten w zależności od posiadanych informacji na temat potencjalnych komponentów układów ORC może być kalibrowany z wykorzystaniem charakterystyk rzeczywistych urządzeń takich jak pompy, turbina czy wymienniki ciepła zamiast sztywnych arbitralnych założeń lub korelacji i danych literaturowych w celu zwiększenia prawdopodobieństwa jak zgodności obliczeń teoretycznych z nominalnymi parametrami zbudowanych układów ORC.

**na:**

Model ten w zależności od posiadanych informacji na temat potencjalnych komponentów układów ORC może być kalibrowany z wykorzystaniem charakterystyk rzeczywistych urządzeń takich jak pompy, turbina czy wymienniki ciepła zamiast sztywnych arbitralnych założeń lub korelacji i danych literaturowych w celu zwiększenia prawdopodobieństwa zgodności obliczeń teoretycznych z nominalnymi parametrami zbudowanych układów ORC.

**37. Poprawiono błąd w opisie oznaczenia strumienia nośnika ciepła odpadowego:**

$\dot{m}_{nc}$  - strumień nośnika ciepła odpadowego, kg/s

**na:**

$\dot{m}_{nc}$  - strumień nośnika ciepła odpadowego, kg/s

**38. Zmodyfikowano zdanie:**

Jeżeli jest to substancja dostępna w obrocie handlowym (np. olej smarne), dane można pozyskać z kart charakterystyk, zwracając się do producenta lub nawet zlecając badania mające na celu je wyznaczyć.

**na:**

Jeżeli jest to substancja dostępna w obrocie handlowym (np. olej smarne), dane można pozyskać z kart charakterystyk, zwracając się do producenta lub nawet zlecając badania mające na celu ich wyznaczenie.

**39. Zmodyfikowano zdanie:**

Jeżeli jest to substancja dostępna w obrocie handlowym (np. olej smarne), dane można pozyskać z kart charakterystyk, zwracając się do producenta lub nawet zlecając badania mające na celu je wyznaczyć.

**na:**

Jeżeli jest to substancja dostępna w obrocie handlowym (np. olej smarne), dane można pozyskać z kart charakterystyk, zwracając się do producenta lub nawet zlecając badania mające na celu ich wyznaczenie.

**39. Zmodyfikowano zdanie:**

W przypadku spalin może to być temperatura punktu rosy, wyliczana na podstawie ich temperatury, składu i ciśnienia lub jak w przypadku silników gazowych może być podana w dokumentacji techniczno-ruchowej na wyższym niż wynikało by z obliczeń poziomie często w zakresie 120-130°C.

**na:**

W przypadku spalin może to być temperatura punktu rosy, wyliczana na podstawie ich składu i ciśnienia lub jak w przypadku silników gazowych może być podana w dokumentacji techniczno-ruchowej na wyższym niż wynikało by z obliczeń poziomie często w zakresie 120-130°C.

**40. Zmodyfikowano zdanie:**

Innym przykładem pochodzącym z działalności Marani, jest minimalna temperatura wracająca do roboczych elementów sprężarki z chłodnicy, która poza momentem rozruch, nie powinna być niższa niż 60°C. Ograniczenia dotyczące minimalnej temperatury nośnika za układem ORC mogą być bardzo różnorodne i wynikające z indywidualnej specyfiki konkretnych procesów i urządzeń oraz powinny zostać zidentyfikowana przed przystąpienie do prac.

**na:**

Innym przykładem pochodzącym z działalności Marani, jest minimalna temperatura oleju smarującego kierowanego do roboczych elementów sprężarki z zbiornika oleju

i/lub chłodnicy, która poza momentem rozruchu, nie powinna być niższa niż 60°C. Ograniczenie to jest prawdziwe także przy odzysku ciepła z sprężarki do celów grzewczych. Ograniczenia dotyczące minimalnej temperatury nośnika za układem ORC mogą być bardzo różnorodne i wynikające z indywidualnej specyfiki konkretnych procesów i urządzeń oraz powinny zostać zidentyfikowane przed przystąpieniem do prac analitycznych i projektowych.

**41. Zmodyfikowano zdanie:**

Poprawia stabilność termiczną układu, jednak zmniejsza sprawność oraz może zmniejszać moc układu ORC wykorzystujące medium pośredniczące.

**na:**

Poprawia stabilność termiczną układu, jednak może skutkować zmniejszeniem sprawności oraz generowanej mocy przez układy ORC wykorzystujące obieg pośredniczący w wymianie ciepła.

**42. Zmodyfikowano zdanie:**

Regeneracja ciepła zwiększa sprawność układ, zmniejsza obciążenie cieplne systemu chłodzenia, jednak stanowi dodatkowy element systemu, który stanowi dodatkowy koszt oraz podnosi poziom jego skomplikowania oraz utrudnia automatyzację.

**na:**

Regeneracja ciepła zwiększa sprawność układu, zmniejsza obciążenie cieplne systemu chłodzenia, jednak stanowi dodatkowy element konstrukcji jednostki ORC, który stanowi dodatkowy koszt, podnosi poziom jego skomplikowania oraz utrudnia automatyzację.

**43. Poprawiono błędy w zdaniu:**

Zadanie optymalizacyjne polega na doborze najkorzystniejszej ze względu na przyjęte kryterium jakości (funkcję celu) struktury obiegu, czynnik roboczego oraz parametrów termodynamicznych.

**na:**

Zadanie optymalizacyjne polega na doborze najkorzystniejszych ze względu na przyjęte kryterium jakości (funkcję celu): struktury obiegu, czynnika roboczego oraz parametrów termodynamicznych.

**44. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Jeżeli  $T_{condensation} < T_{condensation, min}$ , wówczas następuje podniesienia ciśnienia  $p_{min}$  do momentu, w którym  $T_{condensation} = T_{condensation, min}$ . Na tej podstawie można obliczyć temperaturę czynnika roboczego na wylocie z skraplacza:

**na:**

Jeżeli  $T_{condensation} < T_{condensation, min}$ , wówczas następuje podniesienie ciśnienia  $p_{min}$  do momentu, w którym  $T_{condensation} = T_{condensation, min}$ . Na tej podstawie można obliczyć temperaturę czynnika roboczego na wylocie z skraplacza:

**45. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Jeżeli  $T_{condensation} < T_{condensation, min}$ , wówczas następuje **podniesienia** ciśnienia  $p_{min}$  do momentu, w którym  $T_{condensation} = T_{condensation, min}$ . Na tej podstawie można obliczyć temperaturę czynnika roboczego na wylocie z skraplacza:

**na:**

Jeżeli  $T_{condensation} < T_{condensation, min}$ , wówczas następuje **podniesienie** ciśnienia  $p_{min}$  do momentu, w którym  $T_{condensation} = T_{condensation, min}$ . Na tej podstawie można obliczyć temperaturę czynnika roboczego na wylocie z skraplacza:

**46. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Następnie następuje obliczenie temperatury parowania  $T_{evaporation}$  oraz temperatury na wlocie do turbiny  $T_{in}^{TURBINE}$  przy  $p_{in}^{TURBINE}$ .

**na:**

Następnie obliczana jest temperatura parowania  $T_{evaporation}$  oraz temperatury na wlocie do turbiny  $T_{in}^{TURBINE}$  przy  $p_{in}^{TURBINE}$ .

**47. Zmodyfikowano zdanie:**

W tym miejscu przedstawiony zostanie gdy sprawność turbiny jest znana (a więc przypadki 1 i 3), jednak procedura oszacowywania sprawności turbiny indywidualnie do przypadku zostanie szczegółowo przedstawiona w następnym podrozdziale.

**na:**

W tym miejscu przedstawiona zostanie procedura gdy wartość sprawności turbiny jest znana (a więc przypadki 1 i 3 - procedura oszacowywania sprawności turbiny indywidualnie do przypadku zostanie szczegółowo przedstawiona w następnym podrozdziale.)

**48. Poprawiono wzór:**

$$T_{cold\ cr, in}^{REG}, h_{cold\ cr, in}^{REG} = T_{cr, out}^{PUMP}, h_{cr, out}^{PUMP} \quad (4.1.26)$$

**na:**

$$T_{cold\ cr, in}^{REG}, h_{cold\ cr, in}^{REG} = T_{cr, out}^{PUMP}, h_{cr, out}^{PUMP} \quad (6.1.16)$$

Zmieniono oznaczenie PUMP na bardziej szczegółowe MP, będące skrótem od medium pump

**49. Poprawiono zdanie:**

pary na wylocie z regeneratora po gorącej stronie jest obliczana, przy założeniu, że

**na:**

Temperatura pary na wylocie z regeneratora po gorącej stronie jest obliczana, przy założeniu, że minimalna różnica temperatur występuje po jego zimnej stronie, a więc:

**50. Poprawiono zdanie:**

Następnie obliczany jest strumień chłodziwa przepływające przez skraplacz.

**na:**

Następnie obliczany jest strumień chłodziwa przepływający przez skraplacz.

**51. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Chłodnia wentylatorowa czy może zostać pominięta, gdy układ ORC będzie korzystał z już istniejącego systemu chłodzenia.

**na:**

Chłodnia wentylatorowa może zostać pominięta, gdy układ ORC będzie korzystał z już istniejącego systemu chłodzenia.

**52. Poprawiono błąd w zdaniu:**

CTP - stała liczby rurek uwzględniająca niecałkowite pokrycie przekroju płaszczu przez rurki, z powodu zachowania odpowiednie odległości między nimi oraz pomiędzy poszczególnymi pęczkami rur przechodzącymi przez płaszczu

**na:**

CTP - stała liczby rurek uwzględniająca niecałkowite pokrycie przekroju płaszczu przez rurki, z powodu zachowania odpowiednich odległości między nimi oraz pomiędzy poszczególnymi pęczkami rur przechodzącymi przez płaszczu

**53. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Obliczenia wykonywane są z wykorzystaniem algorytmu differential evolution pochodzącej z biblioteki SciPy.

**na:**

Obliczenia wykonywane są z wykorzystaniem algorytmu differential evolution pochodzącego z biblioteki SciPy.

**54. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Pozwala to na przeprowadzenie obliczeń dla ogólnego przypadku na wstępnym etapie realizacji, uściślanie parametrów pracy poprzez implementacje parametrów rzeczywistych urządzeń przewidzianych do zastosowania w układzie ORC, jak i analizę i walidację dla już zbudowanych i empirycznie przetestowanych jednostek.

**na:**

Pozwala to na przeprowadzenie obliczeń dla ogólnego przypadku na wstępnym etapie realizacji, uściślanie parametrów pracy poprzez implementację parametrów rzeczywistych urządzeń przewidzianych do zastosowania w układzie ORC oraz analizę i walidację dla już zbudowanych i empirycznie przetestowanych jednostek.

**55. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Parametry wlot/wylot parownika oraz skraplacza, obliczane są w podobny sposób z tym, że dla strefy, w których nie zachodzi zmiana stanu efektywność wymiennika obliczana jest z wykorzystaniem wzorów 5.11-5.14.

**na:**

Parametry wlot/wylot parownika oraz skraplacza, obliczane są w podobny sposób z tym, że dla stref, w których nie zachodzi zmiana stanu efektywność wymiennika obliczana jest z wykorzystaniem wzorów (6.4.11.)-(6.4.14)

**56. Poprawiono błąd w zdaniu:**

$N_{cr}$  – moc netto pętli czynnika roboczego w zakresie , kW

**na:**

$N_{cr}$  – moc netto obiegu termodynamicznego, kW

**57. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Koszt glikolu  $K_c$  – funkcja ilości ciepła przekazywanego w skraplaczu

**na:**

Koszt glikolu  $K_c$  – funkcja ilości czynnika w pętli chłodzenia

**58. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Szacowana ilość glikolu  $m_c$  niezbędna do zakupu

**na:**

Szacowana ilość glikolu  $m_c$  niezbędna do zakupu, na podstawie strumienia ciepła oddawanego przekazywanego w skraplaczu

**59. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Koszt turbiny  $K_T$  – funkcja mocy turbiny dopasowana do kosztów poniesionych przez marani na skonstruowanie turbiny dla każdego z projektów

**na:**

Koszt turbiny  $K_T$  – funkcja mocy turbiny dopasowana do kosztów poniesionych przez Marani na skonstruowanie turbiny dla każdego z projektów

**60. Poprawiono zdanie:**

Koszt układu sterowania  $K_{PLCIUS}$  – funkcja mocy pobieranej przez pompę oraz nadciśnienia do jakiego podnoszą poszczególne media robocze

**na:**

Koszt układu sterowania  $K_{PLCIUS}$  w funkcji liczby rejestrowanych pomiarów

**61. Poprawiono zdanie:**

$K_{ZP,c} = 1\,559,17$  PLN, koszt zaworów przelewowych oleju termalnego

**na:**

$K_{ZP,c} = 1\,559,17$  PLN, koszt zaworów przelewowych chłodziwa

**62. Poprawiono zdanie:**

$K_{ZB,c} = 1\,467,45$  PLN, koszt zaworów przelewowych **oleju termalnego**

**na:**

$K_{ZB,c} = 1\,467,45$  PLN, koszt zaworów przelewowych **chłodziwa**

**63. Zamieniono teks:**

Parametry źródła ciepła odpadowego

**na:**

Źródło ciepła będące podstawą dla studium przypadku zostało już wcześniej wspomniane w rozdziale 5.2 opisującym prototyp Marani ORC30 - jest to kontenerowy zespół sprężarkowo-gazowy będący własnością i eksploatowany przez Marani na terenie kopalni Halemba. Zespół ten składa się z silnika gazowego, zasilanego gazem z odmetanowania kopalni oraz zintegrowanej z nim sprężarki. Silnik przekazuje wytworzoną moc mechaniczną, bez przetworzenia do postaci energii elektrycznej, bezpośrednio do napędu sprężarki.

Silnik co do zasady (poza włączeniem oraz odstawieniem) pracuje na swoich nominalnych parametrach i nie jest eksploatowany pod niepełnym obciążeniem. Dane przyjęte do analizy stanowią syntezę danych udostępnionych przez producenta (karta katalogowa, dokumentacja techniczno-ruchowa) oraz pomiarów weryfikacyjnych. Strategia eksploatacji silnika pozwoliła na łatwą identyfikację punktu projektowego. Ciepło niskotemperaturowe pochodzące z chłodnicy oleju pozostaje niezagospodarowane.



Do analizy przyjęto następujące parametry źródła ciepła odpadowego:

**64. Dodano ilustracje nr. 7.1, 7.2 i 7.3 w celu uszczegółowienia opisu źródła ciepła odpadowego.**

**65. Poprawiono nazwę rozdziału 7.2.**

Założenia uzyskane wyniki i ich dyskusja

**na:**

Wyniki studium przypadku

**66. W rozdziale 7.2. Wyniki studium przypadku dodano wykresy:**

Sprawność netto

Koszt za kW

Koszt całkowity

Czas zwrotu

**67. Zmodyfikowano i rozszerzono fragment tekstu poświęcony obliczaniu współczynnika wnikania ciepła w trakcie zmiany stanu skupienia czynnika roboczego**

Współczynnik wnikania ciepła w przypadku zmiany stanu skupienia:

$\alpha$

$$= \left[ 0,0686 \left( \frac{\rho_{X=1}}{\rho_{X=0} - \rho_{X=1}} \right)^{0,033} \left( \frac{\rho_{X=0}}{\sigma} \right)^{1/3} \frac{\lambda_{X=0}^{0,8}}{\mu_{X=0}^{0,5} c_{p,X=0}^{1/6} T_{sat}^{0,37}} \right]^{3,33} \Delta T^{2,33} \quad (4.3.1)$$

Gdzie:

$\rho_{X=1}$  – gęstość pary,  $kg/m^3$

$\rho_{X=0}$  – gęstość cieczy,  $kg/m^3$

$\sigma$  – napięcie powierzchniowe,  $W/m^2$

$\lambda_{X=0}$  – przewodność cieplna cieczy,  $W/(m \cdot K)$

$\mu_{X=0}$  – lepkość dynamiczna cieczy,  $kg/(m \cdot s)$

$T_{sat}$  – temperatura nasycenia,  $K$

$\Delta T$  – różnica temperatur pomiędzy temperaturą nasycenia a temperaturą ścianki,  $K$

Obliczenia dotyczące skraplacza i parownika zostały przeprowadzone przy ich podziale na trzy odrębne wymienniki, gdzie wzór 4.3.26 stosowany jest tylko w części, w której zachodzi zmiana stanu skupienia.

**na:**

Wrzenie jest procesem złożonym, cechującym się skomplikowanym mechanizmem transportu ciepła, przez co nie możliwe jest zastosowanie jednej uniwersalnej korelacji obliczania współczynnika wnikania ciepła dla tego procesu. Istnieje jednak szereg empirycznych korelacji i metod obliczeniowych pozwalających oszacować

współczynnik wnikania ciepła w trakcie zmiany stanu skupienia. Jedną z takich korelacji jest korelacja Krużylina. [76,77]:

$$\alpha = \left[ 0,0686 \left( \frac{\rho_{X=1}}{\rho_{X=0} - \rho_{X=1}} \right)^{0,033} \left( \frac{\rho_{X=0}}{\sigma} \right)^{1/3} \frac{\lambda_{X=0}^{0,8}}{\mu_{X=0}^{0,5} c_{p,X=0}^{1/6} T_{sat}^{0,37}} \right]^{3,33} \Delta T^{2,33} \quad (6.3.26)$$

Gdzie:

$\rho_{X=1}$  – gęstość pary,  $kg/m^3$

$\rho_{X=0}$  – gęstość cieczy,  $kg/m^3$

$\sigma$  – napięcie powierzchniowe,  $W/m^2$

$\lambda_{X=0}$  – przewodność cieplna cieczy,  $W/(m \cdot K)$

$\mu_{X=0}$  – lepkość dynamiczna cieczy,  $kg/(m \cdot s)$

$T_{sat}$  – temperatura nasycenia,  $K$

$\Delta T$  – różnica temperatur pomiędzy temperaturą nasycenia a temperaturą ścianki,  $K$

Współczynnik wnikania ciepła w trakcie skraplania obliczono na podstawie teorii Nusselta [78]:

$$\alpha = 0,725 \left( \frac{g \rho_{X=0}^2 r \lambda_{X=0}^3}{\mu_{X=0} \Delta T d_o} \right)^{0,25} \quad (6.3.27)$$

Gdzie:

$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $kg/m^3$

$\rho_{X=0}$  – gęstość cieczy,  $kg/m^3$

$r$  – entalpia parowania,  $kJ/kg$

$\lambda_{X=0}$  – przewodność cieplna cieczy,  $W/(m \cdot K)$

$\mu_{X=0}$  – lepkość dynamiczna cieczy,  $kg/(m \cdot s)$

$d_o$  – średnica zewnętrzna rurki,  $m$

$\Delta T$  – różnica temperatur pomiędzy temperaturą nasycenia a temperaturą ścianki,  $K$

Ze względu na swój empiryczny charakter zastosowanie różnych korelacji na współczynnik wnikania ciepła podczas zmiany stanu skupienia dla tego samego czynnika roboczego przy tych samych parametrach termodynamicznych może prowadzić do uzyskania wyraźnych rozbieżności w jego wartościach [77,79]. W pracy [79] przy uzyskaniu różnych wartości dla zastosowania różnych korelacji, autorzy zdecydowali się na obliczenie średniej arytmetycznej dla procesu parowania oraz skraplania w celu wykorzystania w dalszych pracach. Praca ta miała jednak charakter obliczeniowy bez empirycznej weryfikacji potwierdzającej słuszność takiego podejścia.

Różnorodność dostępnych w literaturze korelacji oraz występujące pomiędzy nimi rozbieżności w wynikach mogą być potencjalnym polem manipulacji wynikami obliczeń powierzchni wymiany ciepła, zwłaszcza w przypadku ogólnych i wielowariantowych analizy (szeroki zakres analizowanych czynników roboczych oraz parametrów) w ramach studiów wykonalności. Ich niewątpliwą zaletą jest jednak możliwość choćby przybliżonego obliczenia powierzchni wymiany ciepła, w celu określenia kosztów inwestycyjnych oraz zasadności zastosowania technologii ORC dla danego źródła ciepła odpadowego.

**68. Poprawiono zdanie:**

Efekt ekologiczny wdrożenia technologii ORC określono jako zastąpienie energii wytwarzanej w dedykowanych do tego celu instalacjach spalania, energią wytworzoną w układzie ORC napędzanym ciepłem odpadowym i nie obciążonym emisją ze spalania na paliw na cele produkcji energii elektrycznej.

**na:**

Efekt ekologiczny wdrożenia technologii ORC określono jako zastąpienie energii wytwarzanej w dedykowanych do tego celu instalacjach spalania, energią wytworzoną w układzie ORC napędzanym ciepłem odpadowym i nie obciążonym emisją ze spalania paliw na cele produkcji energii elektrycznej.

**69. Dodano pominięte odwołanie do tabeli w zdaniu:**

Najnowsze wskaźniki zostały zaprezentowane w tab.

**na:**

Najnowsze wskaźniki zostały zaprezentowane w tab. 6.11.

**70. Dodano ilustracje rozdziale założenia:**

Rysunek 7.1 Koncepcja integracji układu ORC z zespołem silnika gazowego napędzającego sprężarkę

Rysunek 7.2. Parametry silnika na podstawie karty katalogowej.

Rysunek 7.3. Pomiary powierzchni kolektora spalin z wykorzystaniem kamery termowizyjnej

**71. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Choć ostatecznie na wybór realizowanego wariantu mogą wpłynąć czynniki nie ujęte w ramach opracowanych narzędzi (bezpieczeństwo eksploatacji, dostępność czynnika roboczego, dotychczasowe doświadczeni z budowy prototypów) to uzyskiwane wyniki mają na celu wspomaganie takich decyzji w możliwie najszybszy oraz najbardziej pełny sposób.

**na:**

Choć ostatecznie na wybór realizowanego wariantu mogą wpłynąć czynniki nie ujęte w ramach opracowanych narzędzi (bezpieczeństwo eksploatacji, dostępność czynnika roboczego, dotychczasowe doświadczenia z budowy prototypów) to uzyskiwane wyniki mają na celu wspomaganie takich decyzji w możliwie najszybszy oraz najbardziej pełny sposób.

**72. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Analizując poszczególne wyniki można zauważyć, że pomimo występujących różnic znajdują się one na podobnym poziomie.

**na:**

Analizując poszczególne wyniki można zauważyć, że pomimo występujących różnic znajdują się one na podobnym poziomie.

**73. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Wybranemu odcinkowi czasu odpowiada temperatury oraz przepływy przedstawione na rysunku 9.2.

**na:**

Wybranemu odcinkowi czasu odpowiadają temperatury oraz przepływy przedstawione na rysunku 7.21.

**74. Zmodyfikowano zdanie:**

W przypadku porównywania wyników pomiarów oraz obliczeń off-design uwzględniono tylko zapotrzebowanie własne na moc pompy obiegowej czynnika roboczego, ze względu na brak implementacji rzeczywistych charakterystyk niektórych komponentów takich jak chłodnia wentylatorowa oraz brak niektórych pomiarów niezbędnych do uwzględnienia potrzeb własnych na energię elektryczną własnych.

**na:**

W przypadku porównywania wyników pomiarów oraz obliczeń off-design uwzględniono tylko zapotrzebowanie własne na moc pompy obiegowej czynnika roboczego. Wynika to z nieznaności rzeczywistych charakterystyk niektórych komponentów (np. chłodni wentylatorowej) oraz braku niektórych pomiarów niezbędnych do szczegółowego określenia własnego zapotrzebowania układu ORC na energię elektryczną.

**75. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Najwyższa uzyskana w wyniku obliczeń mocy przypada właśnie na strukturę technologiczną 3 dla toluenu.

**na:**

Najwyższa uzyskana w wyniku obliczeń moc przypada właśnie na strukturę technologiczną 3 dla toluenu.

**76. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Dodatkowo koszt/kW zainstalowane mocy bardziej skomplikowanych strukturalnie układów ORC jest wyraźnie wyższy od pozostałych układów.

na:

Dodatkowo koszt/kW zainstalowanej mocy bardziej skomplikowanych strukturalnie układów ORC jest wyraźnie wyższy od pozostałych.

**77. Dodano zdanie:**

Rysunki 7.13-7.15 są generowane są standardowo dla każdego z rozważanych przypadków (czynnik, struktura technologiczna, zestaw założeń np. toluene, layout: 3, scenario: 1).

**78. Dodano pozycję „Suma” w tabeli 7.3 Zestawienie wyników dwóch niezależnych analiz (wcześniej tabela 8.3)**

**79. Poprawiono błąd w jednostce 7.1. Założenia przyjęte do przeprowadzenia analizy:**

$\eta_{i,cr}^{PUMP}$	$\eta_{i,cr}^{PUMP}$	0,40	0,40	0,40	0,40
----------------------	----------------------	------	------	------	------

na:

$\eta_{i,cr}^{PUMP}$	-	0,40	0,40	0,40	0,40
----------------------	---	------	------	------	------

**80. Dodano zdanie w rozdziale Wnioski:**

Na rysunku 7.10 widać, że warianty bez pętli pośredniczącej ostatecznie osiągają także znacznie lepsze czasy zwrotu, w niektórych przypadkach spadając nawet poniżej 5 lat. Zastosowania regeneracji ciepła powoduje przyrost wytwarzanej energii, jednak nieco podnosi czas zwrotu, ponieważ regeneratory stanowią dodatkowy koszt. Układy wykorzystujące pętle pośredniczące mają wyraźnie dłuższy czas zwrotu, osiągając nawet dwukrotność czasu zwrotu dla układów bez pętli. Porównując struktury technologiczne wykorzystujące pętle pośredniczące można zauważyć, że struktura technologiczna 4, a więc najbardziej skomplikowana z pośród wszystkich rozważanych, ma nieco krótszy czas zwrotu, niż struktura technologiczna 3. Wskazuje to na pozytywny wpływ regeneracji ciepła na opłacalność ekonomiczną układów ORC stosujących pętle pośredniczące, a korzyść wynikająca ze wzrostu wytwarzanej mocy elektrycznej, kompensuje dodatkowe koszty poniesione na wymiennik regeneracyjny.

**81. Przygotowano od nowa rozdział „Podsumowanie”**

Dodatkowo koszt/kW zainstalowanej mocy bardziej skomplikowanych strukturalnie układów ORC jest wyraźnie wyższy od pozostałych.

**82. Dodano rozdział „Oprogramowanie użytkowe” opisujący fragmenty kodu przygotowanego oprogramowania**

**83. Dodano rozdział „Wkład własny Autora....” opisujący wkład autora w prace nad prototypowymi jednostkami ORC**

**84. Rozszerzono rozdział „Przegląd literatury w zakresie optymalizacji układów ORC współpracujących z źródłami ciepła odpadowego” o dodatkowe osiągnięcia na tym polu w krajowych ośrodkach**

**85. Zmodyfikowano zdanie:**

Z tego powodu pojawiają się nowe propozycje lub komercjalizacja już znanych rozwiązań technologicznych pozwalających na przetworzenie energii ciepła odpadowego do energii elektrycznej.

**na:**

Z tego powodu pojawiają się nowe propozycje rozwiązań technologicznych lub komercjalizacja już znanych, które pozwalają na konwersję energii ciepła odpadowego do postaci energii elektrycznej.

**86. Zmodyfikowano zdania:**

Rozwiązanie to jest znacznie popularniejsze w Azji, gdzie m.in. firma Kawasaki Heavy Industries od lat z powodzeniem buduje instalacje tego typu na cementowaniach w Chinach i Japonii, a w latach 1980-2009 uruchomiła 106 takich instalacji o mocy 1413 MW [3]. W 2009 roku na świecie było 510 instalacji odzysku ciepła opartych na klasycznym obiegu parowy z czego 455 w Chinach [3].

**na:**

Rozwiązanie polegające na wykorzystaniu konwencjonalnego obiegu Rankine’a jest znacznie popularniejsze w Azji, gdzie m.in. firma Kawasaki Heavy Industries od lat z powodzeniem buduje instalacje tego typu w cementowaniach w Chinach i Japonii. Według dostępnych danych w latach 1980-2009 firma uruchomiła 106 takich instalacji o mocy 1413 MW [3]. W 2009 roku na świecie było około 510 instalacji odzysku ciepła opartych na klasycznym obiegu parowym z czego 455 w Chinach [3].

**87. Zmodyfikowano zdania:**

O ile klasyczny obieg parowy jest jedną z najpopularniejszych metod produkcji energii elektrycznej na świecie (stosowany w elektrowniach węglowych, jądrowych oraz układach gazowo parowych), to uważany jest za nieopłacalny ekonomicznie gdy temperatura źródła ciepła odpadowego jest niższa niż 350-400°C i/lub możliwa produkcja energii elektrycznej jest niższa niż 10 MWel [8].

**na:**

O ile klasyczny obieg parowy jest jedną z najpopularniejszych metod produkcji energii elektrycznej na świecie (stosowany w elektrowniach węglowych, jądrowych oraz układach gazowo parowych), to uważany jest za nieopłacalny ekonomicznie gdy

temperatura źródła ciepła odpadowego jest niższa niż 350-400°C i/lub możliwa moc elektryczna zainstalowana jest niższa niż 10 MWel [8].

**88. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

W układach tych, aby zapewnić wysoką sprawność stosowane są stosunkowo wysokie przegrzewy pary na wylocie z kotła, wykorzystywane są kosztowne wielostopniowe turbiny, przegrzew pary pomiędzy poszczególnymi stopniami i/lub upusty do regeneracyjnych wymienników ciepła podgrzewające skroploną parę wodną przed powrotem do kotła, odgazowywacze, pompy kondensatu i pompy obiegowe [8]. Ponadto woda wymaga uzdatnienia przez zastosowaniem w układach CR, są one stosunkowo durze, wrażliwe na zmiany obciążenia, wymagają wykwalifikowanego personelu do obsługi oraz regularnych czynności remontowych, wynikających z erozji ostatnich wieńców łopatek turbiny, gdzie para zaczyna kondensować i pojawiają się także kropelki wody. Jego zastosowanie może się wiązać z dodatkowymi trudnościami w warunkach suchego klimatu, z bardzo ograniczoną lub z brakiem dostępu do świeżej wody uzupełniającej starty wody krażącej wewnątrz układu. Wymienione powyżej cechy klasycznego obiegu Clausiusa-Rankinea sprawiają, że jego zastosowanie może się okazać nieuzasadnione dla rozproszonych nisko- i/lub średniotemperaturowych źródeł ciepła odpadowego występujących w przemyśle.

**na:**

W układach tych, aby zapewnić wysoką sprawność stosuje się stosunkowo wysokie przegrzanie pary na wylocie z kotła. Ponadto wykorzystywane są kosztowne wielostopniowe turbiny, przegrzew pary pomiędzy poszczególnymi stopniami i/lub upusty do regeneracyjnych wymienników ciepła podgrzewające skroploną parę wodną przed powrotem do kotła, odgazowywacze, pompy kondensatu i pompy obiegowe [8]. Obiekty te są stosunkowo duże, wrażliwe na zmiany obciążenia, wymagają wykwalifikowanego personelu obsługi oraz regularnych czynności remontowych, wynikających z erozji ostatnich wieńców łopatek turbiny, gdzie para zaczyna kondensować. Znaczenia ma również fakt, że woda obiegowa wymaga uzdatnienia przed zastosowaniem jako czynnik roboczy w układach CR. Zastosowane konwencjonalnego układu parowego może się wiązać z dodatkowymi trudnościami w warunkach suchego klimatu, z bardzo ograniczoną lub z brakiem dostępu do świeżej wody uzupełniającej starty obiegu. Wymienione powyżej cechy klasycznego obiegu Clausiusa-Rankinea sprawiają, że jego zastosowanie może się okazać nieuzasadnione w przypadku rozproszonych nisko- i/lub średniotemperaturowych źródeł ciepła odpadowego występujących w przemyśle.

**89. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Różnica polega na zastosowaniu zamiast czystej wody dwuskładnikowej mieszaniny wody z amoniakiem (jest to tzw. system binarny) oraz na zastąpieniu parowania izotermicznego parowaniem nieizotermicznym. Oznacza to, że temperatura parowania jest zmienna w jego trakcie, następuje zmniejszenie minimalnych różnic temperatur między mieszaniną woda-amoniak, a nośnikiem ciepła odpadowego umożliwiając pozyskanie większej ilości energii od źródła ciepła odpadowego niż w przypadku zastosowania czystej wody (o ok 15-25%).

Temperatura wrzenia mieszaniny zależy od stosunku zawartości woda/amoniak. Im wyższa jest zawartość amoniaku tym niższe są temperatury parowania oraz skraplania, a im wyższy jest spadek ciśnienia na turbinie tym większa jest generowana moc. Manipulowanie stosunkiem woda-amoniak umożliwia dopasowanie temperatury parowania dla danego źródła ciepła (w tym do zmian jego parametrów), co w połączeniu z możliwością regulacji ciśnienia pozwala na elastyczne sterowanie oraz maksymalizację wydajności obiegu Kaliny. Ciśnienie może być regulowane przez zmianę stosunku woda/amoniak – wzrost koncentracji amoniaku powoduje obniżenie ciśnienia w skraplaczu, natomiast spadek powoduje wzrost ciśnienia w parowniku.

**na:**

Różnica polega tu na zastosowaniu zamiast czystej wody, dwuskładnikowej mieszaniny wody z amoniakiem (jest to tzw. system binarny) oraz na zastąpieniu parowania izotermicznego parowaniem nieizotermicznym. Oznacza to, że temperatura jest zmienna w trakcie procesu parowania, dzięki czemu następuje zmniejszenie średniej różnicy temperatury pomiędzy czynnikami wymieniającymi ciepło tj. mieszaniną woda-amoniak, a nośnikiem ciepła odpadowego. Umożliwia to zmniejszenie strat egzergii w procesie, co prowadzi do pozyskania większej ilości energii elektrycznej ze źródła ciepła odpadowego, niż w przypadku zastosowania czystej wody (o około 15-25%).

W obiegu KC temperatura wrzenia mieszaniny zależy od stosunku udziałów wody i amoniaku. Im wyższy jest udział amoniaku tym niższe są temperatury parowania oraz skraplania, a im wyższy jest spadek ciśnienia w turbinie tym większa jest generowana moc. Manipulowanie stosunkiem woda-amoniak umożliwia dopasowanie temperatury parowania dla danego źródła ciepła (w tym do zmian jego parametrów), co w połączeniu z możliwością regulacji ciśnienia pozwala na elastyczne sterowanie oraz maksymalizację wydajności obiegu Kaliny. Ciśnienie może być regulowane przez zmianę stosunku woda/amoniak – wzrost udziału amoniaku powoduje obniżenie ciśnienia w skraplaczu, natomiast spadek powoduje wzrost ciśnienia w parowniku. Układ jest także wrażliwy na zmiany udziału amoniaku w mieszaninie, zwłaszcza przy wysokich stężeniach, gdy małe zmiany zawartości amoniaku powodują duże zmiany ciśnienia.

#### **90. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Odnosząc się do struktury technologicznej przedstawionej na rysunku 1.10. w obiegu Kaliny ciepło pobierane w parowniku powoduje odparowanie mieszaniny woda-amoniak (najpierw amoniak, a potem woda), skąd zostaje skierowana do separatora – obniża (ale nie usuwa całkowicie) udział wody w parze wodnej w celu uniknięcia niekorzystnego wpływu nadmiernej zawartości wody na turbinę (erozja łopatek pod końcem rozprężania w turbinie). Para o wysokiej zawartości amoniaku zostaje skierowana do napędu turbiny, a oddzielona na separatorze mieszanina wody w stanie ciekłym i gazowym trafia do wysokotemperaturowego rekuperatora, który podgrzewa ciekłą mieszaninę woda-amoniak tuż przed parownikiem, po czym za turbiną łączy się z rozprężoną amoniakalną parą.

**na:**



Odnosząc się do struktury technologicznej przedstawionej na rysunku 1.10. w obiegu Kaliny ciepło pobierane w parowniku powoduje odparowanie mieszaniny woda-amoniak, skąd zostaje skierowana do separatora – obniża (ale nie usuwa całkowicie) udział wody w parze wodnej w celu uniknięcia niekorzystnego wpływu nadmiernej zawartości wody na turbinę (erozja łopatek pod końcem rozprężania w turbinie). Para o wysokiej zawartości amoniaku zostaje skierowana do napędu turbiny, a oddzielona w separatorze mieszanina w stanie ciekłym trafia do wysokotemperaturowego rekuperatora, który podgrzewa ciekłą mieszaninę woda-amoniak tuż przed parownikiem, po czym za turbiną łączy się z rozprężoną mieszaniną w fazie gazowej.

#### **91. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Cykl Kaliny dla tego samego nisko- lub średniotemperaturowego źródła ciepła może być nawet o 15-20% sprawniejszy od porównywalnych obiegów CR oraz ORC. Wynika to z zastąpienia izotermicznego parowania oraz skraplania, procesami nieizotermicznymi w trakcie, których różnica temperatur pomiędzy gorącymi i zimnymi czynnikami nie jest stała oraz na ogół jest znacznie mniejsza, niż w procesach izotermicznych. Ponadto analiza przedstawiona w [11] wykazała, że koszty za kW mocy zainstalowanej może być niższych niż dla układów ORC.

**na:**

Obieg Kaliny dla tego samego nisko- lub średniotemperaturowego źródła ciepła może być nawet o 15-20% sprawniejszy od porównywalnych obiegów CR oraz ORC. Wynika to z zastąpienia izotermicznego parowania oraz skraplania, procesami nieizotermicznymi w trakcie, których różnica temperatur pomiędzy gorącymi i zimnymi czynnikami nie jest stała oraz na ogół jest znacznie mniejsza, niż w procesach izotermicznych. Ponadto analiza przedstawiona w [11] wykazała, że koszty za kW mocy zainstalowanej może być niższych niż dla układów ORC.

#### **92. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Cykl Kaliny dla tego samego nisko- lub średniotemperaturowego źródła ciepła może być nawet o 15-20% sprawniejszy od porównywalnych obiegów CR oraz ORC. Wynika to z zastąpienia izotermicznego parowania oraz skraplania, procesami nieizotermicznymi w trakcie, których różnica temperatur pomiędzy gorącymi i zimnymi czynnikami nie jest stała oraz na ogół jest znacznie mniejsza, niż w procesach izotermicznych. Ponadto analiza przedstawiona w [11] wykazała, że koszty za kW mocy zainstalowanej może być niższych niż dla układów ORC.

**na:**

Obieg Kaliny dla tego samego nisko- lub średniotemperaturowego źródła ciepła może być nawet o 15-20% sprawniejszy od porównywalnych obiegów CR oraz ORC. Wynika to z zastąpienia izotermicznego parowania oraz skraplania, procesami nieizotermicznymi w trakcie, których różnica temperatur pomiędzy gorącymi i zimnymi czynnikami nie jest stała oraz na ogół jest znacznie mniejsza, niż w

procesach izotermicznych. Ponadto analiza przedstawiona w [11] wykazała, że koszty za kW mocy zainstalowanej może być niższych niż dla układów ORC.

**93. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Wynika to z stosunkowo niewielkiego czasu od momentu uruchomienia pierwszej instalacji tego typu, a co za tym idzie braku doświadczenia eksploatacyjnego. Jest to także układ o stosunkowo złożonej strukturze technologicznej, gdzie duże znaczenie ma jakość procesu separacji wody od amoniaku przed turbiną jak i mieszania rozprężanej pary z roztworem wody z separatora, ponieważ mają one duży wpływ na stabilność procesu oraz bezpieczną i bezawaryjną eksploatację turbiny.

**na:**

Wynika to ze stosunkowo niewielkiego czasu od momentu uruchomienia pierwszej instalacji tego typu, a co za tym idzie braku doświadczenia eksploatacyjnego. Jest to także układ o stosunkowo złożonej strukturze technologicznej, gdzie duże znaczenie ma jakość procesu separacji faz przed turbiną jak i mieszania rozprężanej pary z roztworem cieczy z separatora, ponieważ mają one duży wpływ na stabilność procesu oraz bezpieczną i bezawaryjną eksploatację turbiny.

**94. Zmodyfikowano zdanie:**

Technologia ta wzbudziła duże zainteresowanie w obszarze wykorzystania niskotemperaturowej geotermii (80-120°C), która może być źródłem analogicznym do niektórych odpadowych źródeł ciepła występujących w przemyśle (np. gorące oleje maszynowe).

**na:**

Technologia KC wzbudziła duże zainteresowanie w obszarze wykorzystania niskotemperaturowej geotermii (80-120°C), która może być źródłem analogicznym do niektórych odpadowych źródeł ciepła występujących w przemyśle (np. gorące oleje maszynowe).

**95. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

W tabeli przedstawiono znane wdrożenia do obiegu Kaliny do zagospodarowania ciepła odpadowego z przemysłu zrealizowane przez firmę Kalina Power Limited.

Technologia ta jest jednak wciąż udoskonalana z każdym kolejnym demonstratorem oraz wdrożeniem. Zatem i można się spodziewać, że w przyszłości zainteresowanie cyklem obiegiem Kaliny jak i liczba projektów aplikacyjnych mogą wzrosnąć [12]. Kolejną technologią stosowaną do konwersji ciepła odpadowego na pracę mechaniczną i dalej na energię elektryczną jest Silnik Stirlinga. Jest to technologią technologią sięgającą sięgająca czasów rewolucji przemysłowej, a dokładnie 1816 r. gdy został opatentowany przez wynalazcę Roberta Stirlinga [17].

**na:**

W tabeli przedstawiono znane wdrożenia układów KC do zagospodarowania ciepła odpadowego z przemysłu zrealizowane przez firmę Kalina Power Limited.

Technologia KC jest wciąż udoskonalana z każdym kolejnym demonstratorem oraz wdrożeniem. Zatem można się spodziewać, że w przyszłości zainteresowanie obiegiem Kaliny jak i liczba projektów aplikacyjnych mogą wzrosnąć [12]. Kolejną technologią stosowaną do konwersji ciepła odpadowego na pracę mechaniczną i dalej na energię elektryczną jest Silnik Stirlinga jest technologią sięgającą czasów rewolucji przemysłowej, a dokładnie 1816 r. gdy został opatentowany przez wynalazcę Roberta Stirlinga [17].

**96. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Dostarczenie energii termicznej powoduje wzrost jego temperatury oraz objętości, co z kolei powoduje uniesienie tłoka do góry i wykonanie pracy, po czym gaz jest ochładzany zmniejsza się jego temperatura oraz objętość co powoduje przesunięcie tłoka w dół do pozycji początkowej oraz umożliwia ponowne doprowadzenie energii termicznej zamykając cykl termodynamiczny. Jest to więc pewna odmiana silnika tłokowego, z tą różnicą, że w porównaniu do silników spalinowych spalanie zachodzi na zewnątrz silnika, a nie w jego przestrzeni roboczej (komorze tłoka). Oznacza to, że energia cieplna jest doprowadzana z zewnątrz i przynajmniej teoretycznie może ona pochodzić z dowolnego źródła ciepła (geotermia, biomasa, energia słoneczna czy przemysłowe ciepło odpadowe) [18].

**na:**

Dostarczenie ciepła powoduje wzrost jego temperatury oraz objętości, co z kolei powoduje uniesienie tłoka roboczego do góry i wykonanie pracy. Następnie gaz jest ochładzany, zmniejsza się jego temperatura oraz objętość co powoduje przesunięcie tłoka w dół do pozycji początkowej oraz umożliwia ponowne doprowadzenie ciepła zamykając obieg termodynamiczny. Jest to więc pewna odmiana silnika tłokowego, z tą różnicą, że w porównaniu do silników spalinowych spalanie zachodzi na zewnątrz silnika, a nie w jego przestrzeni roboczej (komorze spalania w cylindrze). Oznacza to, że ciepło jest doprowadzane z zewnątrz i przynajmniej teoretycznie może ono pochodzić z dowolnego źródła (geotermia, biomasa, energia słoneczna czy przemysłowe ciepło odpadowe) [18].

**97. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Polega on na sprężeniu powietrza atmosferycznego, ogrzaniu w wymienniku ciepła, a następnie skierowaniu do turbiny w celu generacji energii elektrycznej. Turbina i sprężarka osadzone są na wspólnym wale, przez co część energii produkowanej przez turbinę jest zużywana przez kompresor. Ponieważ generacja energii w turbinie jest większa niż zużycie kompresora uzyskiwana jest nadwyżka energii elektrycznej. Rozwiązanie to zostało zaproponowane w późnych latach 80 XX w. jako alternatywa dla zastosowania klasycznego obiegu Rankine'a do odzysku ciepła odpadowego.

**na:**

Polega on na sprężeniu powietrza atmosferycznego, ogrzaniu w wymienniku ciepła, a następnie skierowaniu do turbiny w celu konwersji na pracę mechaniczną i dalej na energię elektryczną. Turbina i sprężarka są zwykle osadzone na wspólnym wale, przez co część energii produkowanej przez turbinę jest zużywana przez sprężarkę. Ponieważ generacja energii mechanicznej w turbinie jest większa niż jej zużycie przez sprężarkę, uzyskiwana jest nadwyżka netto, która podlega konwersji na energię elektryczną. Rozwiązanie to zostało zaproponowane do odzysku ciepła odpadowego w późnych latach 80 XX w. jako alternatywa dla zastosowania klasycznego obiegu Rankine'a.

**98. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Obieg Braytona może znaleźć zastosowanie do odzysku ciepła z silników spalinowych, turbin gazowych, wani szklarskich oraz pieców przemysłowych. W [23] przeanalizowano zastosowanie obiegu Braytona dla turbiny gazowej o mocy na wale 25 MW pracującej na tłoczni gazu ziemnego, uzyskując wzrost mocy do 20,28% do 24,17%.

**na:**

Obieg Braytona może znaleźć zastosowanie do odzysku ciepła z silników spalinowych, turbin gazowych, wani szklarskich oraz pieców przemysłowych. W jego przypadku występuje korzystny rozkład temperatury pomiędzy czynnikami wymieniającymi ciepło, których temperatura ulega zmianie zarówno po stronie gorącej jak i zimnej wymiennika.

W pracy [23] przeanalizowano zastosowanie obiegu Braytona do odzysku ciepła ze spalin turbiny gazowej o mocy na wale 25 MW pracującej na tłoczni gazu ziemnego, uzyskując wzrost mocy układu od 20,28% do 24,17%.

**99. Zmodyfikowano zdanie:**

Istotną różnicą w stosunku do wody jest także zbieżność izobar w obszarze pary przegrzanej, co prowadzi do obniżenia spadku entalpii w ekspanderze.

**na:**

Istotną różnicą w stosunku do wody jest także to, że w obszarze pary przegrzanej przy określonej wartości ciśnienia przed i za turbiną izentropowy spadek entalpii w turbinie zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury czynnika na wlocie do turbiny (zbieżność izobar).

**100. Zmodyfikowano zdanie:**

W wymienniku ciepła P (parowniku) następuje odparowanie czynnika roboczego poprzez doprowadzenie ciepła  $\dot{Q}_P$  od nośnika ciepła odpadowego.

**na:**

W wymienniku ciepła P (parowniku) następuje podgrzanie i odparowanie czynnika roboczego poprzez doprowadzenie strumienia ciepła  $\dot{Q}_P$  od nośnika ciepła odpadowego.

**101. Zmodyfikowano zdanie:**

Energia mechaniczna zostaje zamieniona na elektryczną w generatorze.

**na:**

Energia mechaniczna zostaje zamieniona na elektryczną w generatorze elektrycznym.

**102. Zmodyfikowano zdanie:**

Zastosowanie regeneracji przekłada się na podniesienie sprawności układu ORC, podniesienie temperatury czynnika roboczego na wlocie do parownika P1 (lub podgrzewacza P2), mniejszą różnicę temperatur w wymienniku, mniejsze wychłodzenie nośnika ciepła odpadowego, a co za tym idzie mniejszy stopień wykorzystania dostępnego ciepła odpadowego.

**na:**

Zastosowanie regeneracji przekłada się na podniesienie sprawności obiegu ORC, podniesienie temperatury czynnika roboczego na wlocie do parownika P1 (lub podgrzewacza P2), mniejszą różnicę temperatur w wymienniku, mniejsze wychłodzenie nośnika ciepła odpadowego, a co za tym idzie mniejszy stopień wykorzystania dostępnego ciepła odpadowego.

**103. Zmodyfikowano zdanie:**

Po stronie nośnika ciepła odpadowego wymienniki P1 i P2 mogą być ze sobą połączone szeregowo (wariant 1), gdzie podgrzewacz zasilany jest nośnikiem ciepła odpadowego, którego część energii została już wykorzystana w parowniku, lub też równolegle (wariant 2), gdy oba obydwie wymienniki zasilane są rozdzielonym strumieniem ciepła odpadowego o tej samej temperaturze.

**na:**

Po stronie nośnika ciepła odpadowego wymienniki P1 i P2 mogą być ze sobą połączone szeregowo (wariant 1), gdzie podgrzewacz zasilany jest nośnikiem ciepła odpadowego, którego część energii została już wykorzystana w parowniku, lub też równolegle (wariant 2), gdy obydwie wymienniki zasilane są rozdzielonym strumieniem ciepła odpadowego o tej samej temperaturze.

**104. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Zastosowanie technologii ORC do produkcji energii elektrycznej z przemysłowego ciepła odpadowego, w ostatnich latach stają się również coraz bardziej atrakcyjne z co najmniej kilku powodu. Oprócz, pobudek czysto ekonomicznych dla potencjalnych operatorów jednostek ORC, na znaczeniu w ostatnich latach nabrały także

środowiskowe aspekty technologii ORC – produkcja energii elektrycznej z jej wykorzystaniem powoduje zwiększenie efektywności energetycznej, bezpieczeństwa energetycznego, a także nie jest ona obciążona emisją zanieczyszczeń przyczyniając się do realizacji zasady zrównoważonego rozwoju. Powoduje to, że technologia ta jest coraz częściej dostrzegana przez rządowe oraz pozarządowe instytucje zajmujące się szeroko rozumianą ochroną środowiska (technologia ORC znajduje się np. w dokumencie BAT – Best Available Technologies) i coraz częściej realizację inwestycji z technologią ORC jest wspomagane legislacyjnie i finansowo.

**na:**

Zastosowanie technologii ORC do produkcji energii elektrycznej z przemysłowego ciepła odpadowego, w ostatnich latach staje się coraz bardziej atrakcyjne z co najmniej kilku powodów. Oprócz, przyczyn czysto ekonomicznych dla potencjalnych operatorów jednostek ORC, w ostatnich latach znaczenia nabrały także środowiskowe aspekty implantacji technologii ORC – produkcja energii elektrycznej z jej wykorzystaniem powoduje zwiększenie efektywności energetycznej, bezpieczeństwa energetycznego, a także nie jest ona obciążona emisją zanieczyszczeń przyczyniając się do realizacji zasady zrównoważonego rozwoju. Powoduje to, że technologia ta jest coraz częściej dostrzegana przez rządowe oraz pozarządowe instytucje zajmujące się szeroko rozumianą ochroną środowiska (technologia ORC znajduje się np. w dokumencie BAT – Best Available Technologies) i coraz częściej realizacja inwestycji w obszarze technologii ORC jest wspomagana legislacyjnie i finansowo.

#### **105. Poprawiono błąd w zdaniu:**

W przeciwieństwie do wielu omówionych wcześniej technologii, które jeszcze nie osiągnęły poziomu gotowości technologicznej umożliwiającej szeroko zakrojone próby komercjalizacji, technologia ORC znajduje się w ofercie wielu firm od takich gigantów

jak Mitsubishi Heavy Industries (którego częścią jest firma Turboden), czy GE, poprzez mniejsze przedsiębiorstwa, które cały swój model biznesowy oparły na ofercie układów ORC takie jak Orcan czy Triogen, po przedsiębiorstwa i start-upy dopiero rozwijające swoje jednostki ORC.

**na:**

W przeciwieństwie do wielu omówionych wcześniej technologii, które jeszcze nie osiągnęły poziomu gotowości technologicznej umożliwiającej szeroko zakrojone próby komercjalizacji, technologia ORC znajduje się w ofercie wielu firm od takich gigantów jak Mitsubishi Heavy Industries (którego częścią jest firma Turboden), czy GE, poprzez mniejsze przedsiębiorstwa, które cały swój model biznesowy oparły na ofercie układów ORC takie jak Orcan czy Triogen, po przedsiębiorstwa i start-upy dopiero rozwijające swoje jednostki ORC.

#### **106. Dodano nowy fragment tekstu na końcu rozdziału 1.2. 1.2. Uwarunkowania i ograniczenia technologii organicznego obiegu Rankine’a (ORC)**

W Polsce, największy wkład w rozwój technologii ORC ma Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku (IMP), który zrealizował w tym obszarze szereg projektów badawczo-rozwojowych w różnych zakresach mocy. Prace nad technologią ORC były również prowadzone na Politechnice Gdańskiej, Politechnice Wrocławskiej oraz Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Jak do tej pory jednak nie jest dostępna szeroka oferta komercyjna producentów krajowych. Stworzenia takiej oferty podjęła się firma Marani Sp. o.o., która w ramach projektów badawczo-rozwojowych we współpracy z IMP opracowała własny typoszereg urządzeń ORC przeznaczonych do konwersji przemysłowego ciepła odpadowego na energię elektryczną.

**107. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Zastosowane modyfikacje polegają na wykorzystaniu danych statystycznych GUS [60] nt. zużycia energii w przemyśle w 2017 r. (według metodologii Eurostatu) zamiast, jak to miało miejsce w innych pracach, danych International Energy Agency oraz na odrębnej analizie poszczególnych sektorów przemysłowych, zgodnie z podziałem stosowanym przez Eurostat.

**na:**

Zastosowane modyfikacje polegają na wykorzystaniu danych statystycznych GUS [60] nt. zużycia energii w przemyśle w 2017 r. (według metodologii Eurostatu) zamiast, jak to miało miejsce w innych pracach, danych International Energy Agency oraz na odrębnej analizie poszczególnych sektorów przemysłowych, zgodnie z podziałem stosowanym przez Eurostat.

**108. Poprawiono błąd w zdaniu:**

Opisane w dalszej części pracy prototypy powstały przy współpracy z Instytutem Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego w Gdańsku, który pierwotnie odpowiadał za prace koncepcyjne, w tym optymalizację termodynamiczną, wybór docelowych rozwiązań technicznych oraz szczegółowy projekt turbiny.

**na:**

Opisane w dalszej części pracy prototypy powstały przy współpracy z Instytutem Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego w Gdańsku, który pierwotnie odpowiadał za prace koncepcyjne, w tym optymalizację termodynamiczną, wybór docelowych rozwiązań technicznych oraz szczegółowy projekt turbiny.

**109. Zmodyfikowano zdanie:**

W trakcie badań wewnętrznych osiągnięto moc netto na poziomie 6,8 kW, a podczas testów przemysłowych 6 kW.

**na:**

W trakcie badań wewnętrznych osiągnięto moc elektryczną netto na poziomie 6,8 kW, a podczas testów przemysłowych 6,0 kW.

**110. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Ze względu na różnorodność źródeł ciepła odpadowego, zarówno pod kątem występujących nośników, temperatur, strumieni oraz zmienności tych parametrów w czasie opracowano ogólny model pozwalający na optymalizację parametrów układów ORC indywidualnie dla źródła ciepła.

**na:**

Ze względu na różnorodność źródeł ciepła odpadowego, zarówno w aspekcie występujących nośników, temperatur oraz strumieni, jak i zmienności tych parametrów w czasie opracowano ogólny model pozwalający na optymalny dobór parametrów układów ORC indywidualnie dla danego źródła ciepła.

**111. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Standardowo są to następujące dane:

- $T_{nc}$  - temperatura nośnika ciepła, °C
- $\dot{m}_{nc}$  - strumień nośnika ciepła odpadowego, kg/s
- $p_{nc}$  - ciśnienie nośnika, kPa(a)
- rodzaj nośnika – olej, woda, spaliny lub inne nośniki.

W przypadku spalin i innych gazów poprocesowych (np. gaz konwektorowy, żeliwiakowy, powietrze z chłodzenia klinkieru) niezbędna jest znajomość składu (np. dla spalin CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O).

**na:**

Zwykle są to następujące dane:

- $T_{nc}$  – temperatura nośnika ciepła, °C
- $\dot{m}_{nc}$  – strumień nośnika ciepła odpadowego, kg/s
- $p_{nc}$  – ciśnienie nośnika, kPa(a)
- rodzaj nośnika – olej, woda, spaliny lub inne nośniki.
- skład chemiczny – (zwykle w przypadku mieszanin gazów jak spaliny gaz konwektorowy, żeliwiakowy, powietrze z chłodzenia klinkieru).

**112. Zmodyfikowano zdanie:**

Gdy parametry nośnika do analizy są znane, można przejść do przyjęcia warunków brzegowych. W przyjętym modelu są to:

**na:**

Gdy niezbędne do analizy parametry nośnika są znane, można przejść do przyjęcia warunków brzegowych. W przyjętym modelu są to:

**113. W rozdziale 6 (wcześniej rozdział 4) Model matematyczny dla wyznaczenia nominalnych parametrów układów ORC zmieniono lokalizację zdania:**



Oznaczenia na rysunkach 4.1-4.4 oznaczają: E – ekonomizer, P – parownik, T – turbina, G – generator, R – regenerator, S – skraplacz, PC – pompa chłodziwa, PO – pompa obiegowa czynnika roboczego, POT – pompa obiegowa pętli olejowej

Wybór struktury pociąga za sobą szereg konsekwencji. Do najistotniejszych należą osiągnięta moc, sprawność oraz koszty układu.

Pętla olejowa zabezpiecza czynnik roboczy przed przegrzaniem oraz może stanowić akumulator ciepła. Zwiększa bezpieczeństwo eksploatacji poprzez oddzielenie potencjalnie palnego czynnika roboczego od nośnika ciepła odpadowego. Poprawia stabilność termiczną układu, jednak może skutkować zmniejszeniem sprawności oraz generowanej mocy przez układy ORC wykorzystujące obieg pośredniczący w wymianie ciepła

**na:**

W przyjętym modelu możliwa jest analiza dla czterech predefiniowanych struktur technologicznych przedstawionych na rysunkach 4.1-4.4, choć możliwe jest dodawanie kolejnych i modyfikowanie predefiniowanych. Wybór struktury pociąga za sobą szereg konsekwencji. Do najistotniejszych należą osiągnięta moc, sprawność oraz koszty układu.

Oznaczenia na rysunkach 4.1-4.4 oznaczają: E – ekonomizer, P – parownik, T – turbina, G – generator, R – regenerator, S – skraplacz, PC – pompa chłodziwa, PO – pompa obiegowa czynnika roboczego, POT – pompa obiegowa pętli olejowej.

#### **114. Zmodyfikowano opis rysunków w rozdziale 6 (wcześniej rozdział 4) Model matematyczny dla wyznaczenia nominalnych parametrów układów ORC:**

Rysunek 4.1. Struktura technologiczna 1

Rysunek 4.2. Struktura technologiczna 2

Rysunek 4.3. Struktura technologiczna 3

Rysunek 4.4. Struktura technologiczna 4

**na:**

Rysunek 6.1. Struktura technologiczna 1 realizująca prosty obieg Rankine'a organicznego czynnika roboczego i bezpośredni odzysk ciepła z nośnika ciepła odpadowego

Rysunek 6.2. Struktura technologiczna 2 realizująca prosty obieg Rankine'a czynnika roboczego i odzysk ciepła z nośnika ciepła odpadowego przy użyciu pośredniego nośnika ciepła

Rysunek 6.3. Struktura technologiczna 3 realizująca obieg Rankine'a czynnika roboczego z regeneracją ciepła

Rysunek 6.4. Struktura technologiczna 4 realizująca obieg Rankine'a z regeneracją ciepła i wykorzystująca pośredni nośnik ciepła odpadowego

#### **115. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Pętla olejowa zabezpiecza czynnik roboczy przed przegrzaniem oraz może stanowić akumulator ciepła. Zwiększa bezpieczeństwo eksploatacji poprzez oddzielenie potencjalnie palnego czynnika roboczego od nośnika ciepła odpadowego.

**na:**

Pętla olejowa pośrednicząca w wymianie ciepła pomiędzy źródłem ciepła odpadowego a modułem ORC, zabezpiecza czynnik roboczy przed przegrzaniem oraz może stanowić akumulator ciepła. Zwiększa ona także bezpieczeństwo eksploatacji poprzez oddzielenie potencjalnie palnego czynnika roboczego od nośnika ciepła odpadowego.

**116. W rozdziale 6 (wcześniej 4) Model matematyczny dla wyznaczenia nominalnych parametrów układów ORC dodano fragment tekstu:**

Regeneracja ciepła zwiększa sprawność układu, zmniejsza obciążenie cieplne systemu chłodzenia, jednak stanowi dodatkowy element konstrukcji jednostki ORC, który stanowi dodatkowy koszt, podnosi poziom jego skomplikowania oraz utrudnia automatyzację.

Aby wykonać obliczenia niezbędne jest przyjęcie szeregu założeń konstrukcyjnych dotyczących parametrów poszczególnych komponentów, takich jak:

**na:**

Regeneracja ciepła zwiększa sprawność układu, zmniejsza obciążenie cieplne systemu chłodzenia, jednak stanowi dodatkowy element konstrukcji jednostki ORC, który stanowi dodatkowy koszt, podnosi poziom jego skomplikowania oraz utrudnia automatyzację.

Regeneracja ciepła w obiegu powoduje również mniejszy stopień wychłodzenia nośnika ciepła odpadowego (stopień odzysku ciepła), co jest spowodowane wyższą temperaturą czynnika organicznego na wlocie do parownika P.

Aby wykonać obliczenia niezbędne jest przyjęcie szeregu założeń konstrukcyjnych dotyczących parametrów poszczególnych komponentów, takich jak

**117. W rozdziale 6.1 (wcześniej 4.1) Procedura optymalizacji dodano fragment tekstu:**

Jako funkcję celu (kryterium jakości) można przyjmować różne parametry techniczne układu jak również parametry ekonomiczne czy wskaźniki ekologiczne. Jest to uzależnione od preferencji inwestora i projektanta oraz od otoczenia prawnego, ekonomicznego i społecznego projektu. W niniejszej pracy brano pod uwagę następujące funkcje celu:

- a) Maksymalizacja mocy elektrycznej z danego źródła ciepła odpadowego:

$$N_{netto} \rightarrow max \quad (6.1.1)$$

- b) Maksymalizacja sprawności wytwarzania energii z danego źródła ciepła odpadowego:

$$\eta_{ORC} \rightarrow max \quad (6.1.2)$$

- c) Minimalizacja okresu zwrotu:

$$pp_d \rightarrow min \quad (6.1.3)$$

Podkreślić należy, że pracy jest brana pod uwagę jedynie optymalizacja jednokryterialna. Nie są prowadzone rozważania związane z wyborem rozwiązania kompromisowego, t.j. spełniającego w określonym stopniu jednocześnie więcej niż jedno kryterium. Zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej były przedmiotem prac [43, 44, 45]. W niniejszej pracy, z uwagi na jej aplikacyjny charakter i funkcjonalność narzędzia obliczeniowego w zakresie wspomaganie decyzji w warunkach przemysłowych, pod uwagę wzięto typowe kryteria decyzyjne stosowane w projektach związanych z odzyskiem ciepła odpadowego.

**118. Poprawiono wzór w rozdziale 6.1 (wcześniej 4.1) Procedura optymalizacji:**

$$T_{in}^{MP}, p_{in}^{MP}, h_{in}^{MP}, s_{in}^{MP} = T_{cr,out}^{COND}, p_{cr,out}^{COND}, h_{cr,out}^{COND}, s_{cr,out}^{COND} \quad (4.1.20)$$

**na:**

$$T_{in}^{MP} = T_{cr,out}^{COND} \quad (6.1.23)$$

$$p_{in}^{MP} = p_{cr,out}^{COND} \quad (6.1.24)$$

$$h_{in}^{MP} = h_{cr,out}^{COND} \quad (6.1.25)$$

$$s_{in}^{MP} = s_{cr,out}^{COND} \quad (6.1.26)$$

Analogiczne zmiany wprowadzono dla wzorów: (4.1.26), (4.1.29), (4.1.30), (4.1.31), (4.1.32), (4.1.37), (4.1.46), (4.1.55)

**119. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Jako funkcję celu obrano moc netto układu ORC.

**na:**

Moc netto układu ORC oraz jego sprawność, rozważane jako alternatywne kryteria jakości (funkcja celu) wyznacza się jak następuje.

**120. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Chłodnia wentylatorowa czy może zostać pominięta, gdy układ ORC będzie korzystał z już istniejącego systemu chłodzenia. Ciepło dostarczone do układu ORC to w zależności od struktury technologicznej ciepło pobierane w ekonomizerze  $\dot{Q}_{ECO}$  dla wariantów z pośredniczącą pętlą olejową lub w parowniku  $\dot{Q}_{EVAP}$ , dla wariantów z odparowaniem bezpośrednim.

**na:**

Przyjęto, że zużycie energii elektrycznej w układzie chłodnicy wentylatorowej wykorzystywanej do chłodzenia skraplacza może zostać pominięte, gdy układ ORC będzie korzystał z już istniejącego w zakładzie przemysłowym systemu chłodzenia. Ciepło dostarczone do układu ORC to w zależności od struktury technologicznej to ciepło pobierane w ekonomizerze  $\dot{Q}_{ECO}$  dla wariantów z pośredniczącą pętlą olejową lub w parowniku  $\dot{Q}_{EVAP}$ , dla wariantów z odparowaniem bezpośrednim.

**121. Zmodyfikowano zdanie:**

Jeżeli sprawność turbiny nie została założona jako stała lub jeżeli obliczenia nie są prowadzone dla turbiny o znanej charakterystyce, wówczas można ją oszacować

na podstawie dostępnych w literaturze korelacji. W niniejszej pracy zastosowano korelację pochodzącą z [8] pozwalającą na oszacowanie sprawności turbiny na podstawie parametrów czynnika roboczego na dolocie do turbiny według równania (4.2.1) oraz współczynników podanych w tab. 4.1.

**na:**

Jeżeli sprawność turbiny nie została założona jako stała lub jeżeli obliczenia nie są prowadzone dla turbiny o znanej charakterystyce, wówczas można ją oszacować na podstawie dostępnych w literaturze korelacji. W niniejszej pracy zastosowano korelację pochodzącą z pracy [8] pozwalającą na oszacowanie sprawności turbiny na podstawie parametrów czynnika roboczego na dolocie do turbiny według równania (6.2.1) oraz współczynników podanych w tab. 6.1.

**122. Uzupełniono brakującą bibliografię w rozdziałach 6-6.5**

**123. W rozdziale 6.3 (wcześniej 4.3) Obliczanie powierzchni wymiany ciepła dodano zdanie opisujące wzór**

Jeżeli sprawność turbiny nie została założona jako stała lub jeżeli obliczenia nie są prowadzone dla turbiny o znanej charakterystyce, wówczas można ją oszacować

na podstawie dostępnych w literaturze korelacji. W niniejszej pracy zastosowano korelację pochodzącą z [8] pozwalającą na oszacowanie sprawności turbiny na podstawie parametrów czynnika roboczego na dolocie do turbiny według równania (4.2.1) oraz współczynników podanych w tab. 4.1.

**na:**

Jeżeli sprawność turbiny nie została założona jako stała lub jeżeli obliczenia nie są prowadzone dla turbiny o znanej charakterystyce, wówczas można ją oszacować na podstawie dostępnych w literaturze korelacji. W niniejszej pracy zastosowano korelację pochodzącą z pracy [8] pozwalającą na oszacowanie sprawności turbiny na podstawie parametrów czynnika roboczego na dolocie do turbiny według równania (6.2.1) oraz współczynników podanych w tab. 6.1.

**124. Poprawiono zdanie i rozszerzono opis algorytmu differential evolution:**

Obliczenia wykonywane są z wykorzystaniem algorytmu differential evolution pochodzącej z biblioteki SciPy [72]. Zmiennymi są średnica płaszczka  $D_{shell}$  oraz długość rurek  $L_t$ . Celem obliczeń jest uzyskanie jak najmniejszej powierzchni wymiany ciepła nie przekraczając maksymalnych rozmiarów, prędkości przepływu  $v_{max}^{shell}$ ,  $v_{max}^{tubes}$  oraz strat ciśnienia  $\Delta p_{max}^{shell}$ ,  $\Delta p_{max}^{tubes}$ .

**na:**

Obliczenia wykonywane są z wykorzystaniem algorytmu Differential Evolution (ewolucja różnicowa) pochodzącego z biblioteki SciPy [80]. Jest to rodzaj algorytmu ewolucyjnego, działającego na podobnej zasadzie, z tą różnicą, że mutacja i krzyżowanie następują przed selekcją najlepiej dopasowanych osobników do następnej iteracji [81]. Jest uważany za prosty i skuteczny algorytm, cieszący się rosnącą popularnością w wielu obszarach zastosowań, który może być traktowany na zasadzie „czarnej skrzynki” [82].

Ponieważ algorytm ten nie wykorzystuje gradientu do poszukiwania najlepszego rozwiązania nie wymaga on aby funkcja celu była różniczkowalna, dzięki czemu może przeszukiwać bardzo duże przestrzenie potencjalnych rozwiązań, a także może być stosowany do rozwiązywania problemów nieciągłych (choć pierwotnie był dedykowany rozwiązywaniu problemów ciągłych). Znalazł on szerokie zastosowanie do rozwiązywania problemów rzeczywistych takich jak projektowanie filtrów, analiza obrazu, grupowanie, projektowanie systemów, szeregowanie zadań czy uczenie rozmytych sieci kognitywnych. Pomimo dużej skuteczności w aplikacjach rzeczywistych istnieje niewiele artykułów dotyczących jego analizy teoretycznej [84].

Zastosowaną funkcją celu jest powierzchnia wymiany ciepła  $A$ , z niezależnymi są średnica płaszczka  $D_{shell}$  oraz długość rurek  $L_t$ . Celem obliczeń jest uzyskanie jak najmniejszej powierzchni wymiany ciepła  $A$  nie przekraczając maksymalnych dopuszczalnych rozmiarów, prędkości przepływu  $v_{max}^{shell}$ ,  $v_{max}^{tubes}$  oraz strat ciśnienia  $\Delta p_{max}^{shell}$ ,  $\Delta p_{max}^{tubes}$ .

## 125. Zmodyfikowano zdanie:

- Koszt czynnika roboczego – na podstawie danych oraz badania rynku przeprowadzonego przez Marani

$$\underline{K_{cr} = a \cdot m_{cr}^c + b} \quad (6.5)$$

Gdzie:

$K_{ce}$  – koszt czynnika roboczego, PLN

$m_{cr}^b$  – wymagana ilość czynnika roboczego, kg

$a, b, c$  – współczynniki aproksymujące zależne od wybranego czynnika roboczego.

**na:**

- Koszt czynnika roboczego – na podstawie danych oraz własnego badania rynku przeprowadzonego przez Marani Sp. z o. o.

$$\underline{K_{cr} = a \cdot m_{cr}^b + b} \quad (6.5.2)$$

Gdzie:

$K_{ce}$  – koszt czynnika roboczego, PLN

$\dot{m}_{cr}$  – wymagana ilość czynnika roboczego, kg

$a, b, c$  – współczynniki aproksymujące zależne od wybranego czynnika roboczego.

## 126. Poprawiono błędy w oznaczeniu w równaniach

Jako funkcję celu obrano moc netto układu ORC.

$$N_i^{TURBINE} = \dot{m}_{cr}(h_{in}^{TURBINE} - h_{out}^{TURBINE}) \quad (4.1.61)$$

$$N_{i,cr}^{TURBINE} = \dot{m}_{cr}(h_{cr,out}^{PUMP} - h_{i,cr,n}^{PUMP}) \quad (4.1.62)$$

$$N_{i,cr}^{PUMP} = \dot{m}_{cr}(h_{o,out}^{PUMP} - h_{o,in}^{PUMP}) \quad (4.1.63)$$

$$N_{c,cr}^{PUMP} = \dot{m}_{cr}(h_{c,out}^{PUMP} - h_{c,in}^{PUMP}) \quad (4.1.64)$$

$$\begin{aligned} N_{cooling\ tower} = & 0.2898 + 0.2407\dot{m}_c + 0.007208\dot{Q}_{COND} \\ & - 0.00356\dot{m}_c^2 + 7.599 \cdot 10^{-5}\dot{m}_c\dot{Q}_{COND} \\ & - 2.976 \cdot 10^{-5}\dot{Q}_{COND}^2 \end{aligned} \quad (4.1.65)$$

$$\begin{aligned} N_{netto} = & N_i^{TURBINE} - N_{i,cr}^{TURBINE} - N_{i,cr}^{PUMP} - N_{c,cr}^{PUMP} \\ & - N_{cooling\ tower} \end{aligned} \quad (4.1.66)$$

$$\eta_{ORC} = \frac{N_{netto}}{\dot{Q}_{nc}} \quad (4.1.67)$$

**na:**

Moc netto układu ORC oraz jego sprawność, rozważane jako alternatywne kryteria jakości (funkcja celu) wyznacza się jak następuje.

$$N_i^{TURBINE} = \dot{m}_{cr}(h_{in}^{TURBINE} - h_{out}^{TURBINE}) \quad (6.1.80)$$

$$N_{i,cr}^{PUMP} = \dot{m}_{cr}(h_{cr,out}^{PUMP} - h_{cr,n}^{PUMP}) \quad (6.1.81)$$

$$N_{i,o}^{PUMP} = \dot{m}_{cr}(h_{o,out}^{PUMP} - h_{o,in}^{PUMP}) \quad (6.1.82)$$

$$N_{c,c}^{PUMP} = \dot{m}_{cr}(h_{c,out}^{PUMP} - h_{c,in}^{PUMP}) \quad (6.1.83)$$

$$\begin{aligned} N_{cooling\ tower} = & 0.2898 + 0.2407\dot{m}_c + 0.007208\dot{Q}_{COND} \\ & - 0.00356\dot{m}_c^2 + 7.599 \cdot 10^{-5}\dot{m}_c\dot{Q}_{COND} \\ & - 2.976 \cdot 10^{-5}\dot{Q}_{COND}^2 \end{aligned} \quad (6.1.84)$$

$$N_{netto} = N_i^{TURBINE} - N_{i,cr}^{PUMP} - N_{i,o}^{PUMP} - N_{c,c}^{PUMP} - N_{cooling\ tower} \quad (6.1.85)$$

$$\eta_{ORC} = \frac{N_{netto}}{\dot{Q}_{nc}} \quad (6.1.86)$$

**127. Zmodyfikowano fragment tekstu:**

Ilość czynnika jest została oszacowana jako funkcja mocy netto pętli czynnika roboczego w oparciu o ilości czynników zakupione do budowy poszczególnych prototypów.

$$m_{cr} = a \cdot N_{cr}^b + c \quad (7.2)$$

$$\underline{N_{cr} = N_{iT} - N_{iMP}} \quad (7.3)$$

Gdzie:

$N_{cr}$  – moc netto pętli czynnika roboczego w zakresie , kW

$a$  – 3,21189450e+02

$b$  – 4,14529560e-01

$c$  – -5,79889171e+02

**na:**

Ilość czynnika jest została oszacowana jako funkcja mocy netto pętli czynnika roboczego w oparciu o ilości czynników zakupione do budowy poszczególnych prototypów.

$$m_{cr} = a \cdot N_{cr}^b + c \quad (6.5.2)$$

$$\underline{N_{cr} = N_i^{TURBINE} - N_{i,cr}^{PUMP}} \quad (6.5.3)$$

Gdzie:

$N_{cr}$  – moc netto pętli czynnika roboczego, kW

$N_i^{TURBINE}$  – moc wewnętrzna turbiny, kW

$N_{i,cr}^{PUMP}$  – moc wewnętrzna pompy czynnika roboczego, kW

$a$  – 3,21189450e+02

$b$  – 4,14529560e-01

$c$  – -5,79889171e+02

**128. Poprawiono zdanie i rozszerzono opis algorytmu differential evolution:**

- Koszt regeneratora  $K_{REG}$  [75]

**na:**

- Koszt wymiennika regeneracyjnego  $K_{REG}$  [86]

### 129. Zmodyfikowano zdanie

W tym celu niezbędne jest oprócz znajomości kosztów wytworzenia układu ORC  $K_{ORC}$  także znajomość ceny energii elektrycznej  $C_{el}$ , planowanego horyzontu czasowego  $HC$  eksploatacji, planowanego rocznego czasu pracy  $t_{op}$ , rocznego oprocentowania kredytu  $i$  oraz kosztów eksploatacyjnych i serwisowania  $COM$  [75].

na:

W tym celu niezbędne jest oprócz znajomości kosztów wytworzenia układu ORC  $K_{ORC}$  także znajomość ceny energii elektrycznej  $C_{el}$ , planowanego horyzontu czasowego  $HC$  eksploatacji, planowanego rocznego czasu pracy  $t_{op}$ , rocznego oprocentowania kredytu  $i$  (koszt kapitału) oraz kosztów eksploatacyjnych i serwisowania  $COM$  [86].

### 130. Dodano fragment tekstu komentujący osiągnięte czasy zwrotów w rozdziale 7.2 Wyniki studium przypadku

Czas zwrotu jest najkrótszy dla m-Ksylenu pracującego w strukturze technologicznej 1 (4,28 lat). Jednak toluen w strukturze technologicznej nr 3 wypada najlepiej w ramach tej struktury technologicznej (4,62 lat), a różnica w czasie zwrotu pomiędzy m-Ksylenem w strukturze technologicznej 1 jest niewielka. Możliwe, że wzrost ceny energii elektrycznej przełożyłby się na skrócenie czasu zwrotu dla toluenu pracującego w strukturze technologicznej nr 3.

Analizując dane przedstawione na rysunku 7.10 można także zauważyć trend polegający na pogorszeniu czasu zwrotu wraz z wzrostem poziomu skomplikowania zastosowanej struktury technologicznej. Struktury technologiczne 2 i 4, wykorzystujące pętle pośredniczącą osiągają mniejsze moce netto oraz dłuższe czasy zwrotu. Zastosowanie regeneracji ciepła, choć na ogół podnosi sprawność oraz osiąganą moc, to wynikające z niej korzyści nie kompensują dodatkowych kosztów poniesionych na wymiennik regeneracyjny. Możliwe, że przyjęcie osiągniętej mocy netto jako kryterium optymalizacji jest słuszne tylko w ograniczonym zakresie, czyli w ramach tej samej struktury technologicznej.

### 131. Dokonano modyfikacji tabeli Zestawienie wyników dwóch niezależnych analiz:

Parametr	Jednostka	Obliczenia	
		Marani	IMP
Ekonomizer	$m^2$	32,21	28,1
Parownik	$m^2$	26,2	35,3
Regenerator	$m^2$	2,97	5,1
Skraplacz	$m^2$	21,34	28,9
$T_{s1}$	°C	510,0	510,0
$T_{s2}$	°C	222,47	222,24



T <sub>c1</sub>	°C	25,0	25,00
T <sub>c2</sub>	°C	44,56	56,10
m <sub>c1</sub>	kg/s	2,617	1,633
T <sub>o1</sub>	°C	310,0	310,0
T <sub>o2</sub>	°C	182,36	182,24
m <sub>o</sub>	kg/s	0,72	0,719
p <sub>1</sub>	kPa(a)	810,0	845,0
p <sub>2</sub>	kPa(a)	20,0	20,0
T <sub>1</sub>	°C	209,37	211,80
T <sub>2</sub>	°C	142,67	144,10
T <sub>3</sub>	°C	107,91	107,95
T <sub>4</sub>	°C	56,92	56,92
T <sub>5</sub>	°C	57,91	57,95
T <sub>6</sub>	°C	86,25	87,44
m	kg/s	0,395	0,395
N <sub>OP</sub>	kW	0,162	0,235
N <sub>MP</sub>	kW	0,938	0,98
N <sub>CP</sub>	kW	0,815	1,822
N <sub>CH</sub>	kW	2,025	0,267
N <sub>T</sub>	kW	35,328	35,5
N <sub>netto</sub>	kW	33,328	32,199

na

Parametr	Jednostka	Obliczenia		Błąd względny, %
		Marani	IMP	
A <sub>Ekonomizer</sub>	m <sup>2</sup>	32,21	28,1	-12,76
A <sub>Parownik</sub>	m <sup>2</sup>	26,2	35,3	34,73
A <sub>Regenerator</sub>	m <sup>2</sup>	2,97	5,1	71,72
A <sub>Skraplacz</sub>	m <sup>2</sup>	21,34	28,9	35,43
A <sub>Suma</sub>	m <sup>2</sup>	83,12	97,4	17,18
T <sub>s1</sub>	°C	510,0	510,0	0,00
T <sub>s2</sub>	°C	222,47	222,24	-0,10
T <sub>c1</sub>	°C	25,0	25,00	0,00
T <sub>c2</sub>	°C	44,56	56,10	25,90
m <sub>c1</sub>	kg/s	2,617	1,633	-37,60
T <sub>o1</sub>	°C	310,0	310,0	0,00
T <sub>o2</sub>	°C	182,36	182,24	-0,07
m <sub>o</sub>	kg/s	0,72	0,719	-0,14
p <sub>1</sub>	kPa(a)	810,0	845,0	4,32
p <sub>2</sub>	kPa(a)	20,0	20,0	0,00

T <sub>1</sub>	°C	209,37	211,80	1,16
T <sub>2</sub>	°C	142,67	144,10	1,00
T <sub>3</sub>	°C	107,91	107,95	0,04
T <sub>4</sub>	°C	56,92	56,92	0,00
T <sub>5</sub>	°C	57,91	57,95	0,07
T <sub>6</sub>	°C	86,25	87,44	1,38
m	kg/s	0,395	0,395	0,00
N <sub>OP</sub>	kW	0,162	0,235	45,06
N <sub>MP</sub>	kW	0,938	0,98	4,48
N <sub>CP</sub>	kW	0,815	1,822	123,56
N <sub>CH</sub>	kW	2,025	0,267	-86,81
N <sub>T</sub>	kW	35,328	35,5	0,49
N <sub>netto</sub>	kW	33,328	32,199	-3,39

### 132. Pozostale:

- Poprawiono błędy literowe, interpunkcyjne oraz usunięto powtórzenia

### 133. Dodano fragment tekstu na końcu rozdziału 6.1

Optymalizacja parametrów termodynamicznych układu ORC jest realizowana z wykorzystaniem algorytmu SHGO (simplicial homology global optimisation) zaimplementowanego w bibliotece SciPy [74,75]. Jest to stosunkowo nowy algorytm optymalizacji globalnej, o ogólnym przeznaczeniu działający na zasadzie „czarnej skrzynki”, który nie wymaga aby optymalizowana funkcja były różniczkowalna czy ciągła. Najlepiej sprawdza się dla problemów o niewielkiej liczbie zmiennych (w tym przypadku jedyną zmienną jest ciśnienie) oraz określonych warunkach brzegowych. Optymalizowana funkcja jest wrapperem – funkcją wywołującą inne funkcje, która dla poszukiwanego ciśnienia, zapewniającego jak najlepsze spełnienie funkcji celu, rozwiązuje układ równań za pomocą funkcji `least_squares` z biblioteki SciPy poprzez  $T_{nc,out}^{ECO}$  lub  $T_{nc,out}^{EVAP}$  oraz  $T_{o,in}^{ECO}$  i  $T_{c,out}^{COND}$ , aby spełniały one założone minimalne różnice temperatur  $\Delta T_{min}^{ECO}$ ,  $\Delta T_{min}^{EVAP}$  i  $\Delta T_{min}^{COND}$ . Odpowiedni kod został przedstawiony w Załączniku 1 oraz rozdziale 6.7 Oprogramowanie użytkowe.

### 134. Dodano fragment tekstu na końcu rozdziału 7.2:

Czas zwrotu jest najkrótszy dla m-Ksylenu pracującego w strukturze technologicznej

1 (4,28 lat). Jednak toluen w strukturze technologicznej nr 3 wypada najlepiej w ramach tej struktury technologicznej (4,62 lat), a różnica w czasie zwrotu pomiędzy m-Ksylenem

w strukturze technologicznej 1 jest niewielka. Możliwe, że wzrost ceny energii elektrycznej przełożyłby się na skrócenie czasu zwrotu dla toluenu pracującego w strukturze technologicznej nr 3.

Analizując dane przedstawione na rysunku 7.10 można także zauważyć trend polegający

na pogorszeniu czasu zwrotu wraz z wzrostem poziomu skomplikowania zastosowanej struktury technologicznej. Struktury technologiczne 2 i 4, wykorzystujące pętle pośredniczącą osiągają mniejsze moce netto oraz dłuższe czasy zwrotu. Zastosowanie regeneracji ciepła, choć na ogół podnosi sprawność oraz

osiąganą moc, to wynikające z niej korzyści nie kompensują dodatkowych kosztów poniesionych na wymiennik regeneracyjny. Możliwe, że przyjęcie osiąganey mocy netto jako kryterium optymalizacji jest słuszne tylko w ograniczonym zakresie, czyli w ramach tej samej struktury technologicznej.