



***OCENA EFEKTYWNOŚCI
TECHNICZNO-EKONOMICZNEJ WYBRANEGO PROCESU
CIEPLNEGO ZA POMOCĄ ANALIZY WIELOKRYTERIALNEJ***

mgr inż. Jacek Tomasiak

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie

Wydział Nauk Technicznych

Promotor:

dr hab. inż. Jerzy Duda, prof. PWSZ Nysa

Promotor pomocniczy:

dr inż. Marek Wasilewski

Spis treści

1. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU.....	4
2. CEL, ZAKRES I TEZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ.....	5
3. ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY.....	6
3.1 Rozdział 1 - Wprowadzenie.....	6
3.2 Rozdział 2 - Analiza wielokryterialna.....	6
3.3 Rozdział 3 - Przegląd metod i przepisów dotyczących usprawnienia gospodarki energetycznej w krajach UE	6
3.4 Rozdział 4 - Nowe techniki wytwarzania ciepła i energii elektrycznej.....	7
3.5 Rozdział 5 - Koncepcja nadbudowy procesu technologicznego produkcji pary technologicznej wysokosprawną instalacją kogeneracyjną	8
3.6 Rozdział 6 - Nowa technologia wytwarzania pary technologicznej.....	8
3.7 Rozdział 7 - Propozycja metodyki wielokryterialnej oceny technologii WHR	11
3.8 Rozdział 8 – Wnioski.....	16

Słowa kluczowe: ciepło odpadowe, wielokryterialne wspomaganie decyzji, kogeneracja, technologie WHR, F-AHP, TOPSIS

Keywords: waste heat, multi-criteria decision support, cogeneration, combined heat and power generation CHP, WHR technology, F-AHP, TOPSIS.

ABSTRACT

The doctoral dissertation deals with the issue of the use of low-temperature process heat, which can be the source of generating "clean" emission-free electricity. Low-temperature waste heat, just like the use of renewable energy sources, is supported in the EU by directives on energy efficiency improvement. Development and high availability of new innovative techniques for generating electricity and heat in WHR systems (*Waste Heat Recovery*), which differ significantly in investment costs, energy efficiency, ecological effects and scope of work and time of implementation, require a special assessment of solutions when making a decision to choose the best one. In the work, on the example of a typical production plant, a multi-variant concept of boiler house modernization was developed with a view to increasing the energy efficiency of the process and reducing greenhouse gas emissions. The best solution was chosen based on the concept of multi-criteria decision support methods. The proposed methodology consists of three phases. The first phase involves the identification of potential sources of waste heat enthalpy based on an energy audit carried out in the company. In the second phase of the study, the proposed concepts were evaluated using the F-AHP method (*Fuzzy - Analytic Hierarchy Process*). The proposed method is a fuzzy analytical hierarchical process, used to build a decision model, in order to determine the value of weighting factors. In the final phase, the TOPSIS method was used to carry out the final ranking. It is an ordinal method that uses reference points to assess the decision-making variant - an ideal and anti-ideal solution.

1. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU

Wraz z rozwojem gospodarczym i cywilizacyjnym społeczeństwa wzrasta zapotrzebowanie na energię elektryczną, co skutkuje zmniejszeniem zasobów paliw kopalnych - nieodnawialnych (węgla, gazu ziemnego, ropy naftowej), podstawowych paliw w energetyce i przemyśle. Ponad 85% energii na świecie pochodzi ze źródeł nieodnawialnych. Tak wysoki udział paliw kopalnych, a zwłaszcza węgla, jest wynikiem ich dużej dostępności, łatwości wykorzystania oraz stosunkowo niskiej ceny. Perspektywa wyczerpania się źródeł energetycznych - zasobów paliw kopalnych oraz postępująca degradacja środowiska naturalnego zarówno w wyniku ich pozyskiwania (hałdy kopalniane, zasolenie wód) oraz spalania (emisja pyłowa i gazowa) spowodowała, że strategicznym działaniem w krajach UE jest rozwijanie nowych innowacyjnych energooszczędnych technik wytwarzania i wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych (OZE).

Pod względem wielkości zasobów odnawialnych źródeł energii, Polska należy do państw o średnim potencjale technicznego wykorzystania OZE. Szacuje się, że możliwy do wykorzystania potencjał OZE może zabezpieczyć około 60% krajowego zapotrzebowania na energię pierwotną. Ograniczenia te wynikają głównie z wysokich kosztów pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych, braku własnych technologii pozwalających na wykorzystanie istniejących w Polsce zasobów OZE, które praktycznie ograniczone są głównie do: biomasy, słońca i wiatru. W związku z tym, poszukuje się innych technik czystej produkcji energii elektrycznej. Istotnym źródłem energii, dotychczas w kraju stosunkowo w małym zakresie wykorzystanym, jest ciepło odpadowe z procesów produkcyjnych, zwłaszcza wysokotemperaturowych, które podobnie jak energetyka zużywają znaczne ilości paliw kopalnych i szkodliwie wpływają na środowisko naturalne. Wzrost cen paliw oraz coraz ostrzejsze limity dopuszczalnych emisji gazowych i wynikające z tego opłaty środowiskowe powodują, że przemysł podobnie jak energetyka poszukuje nowych energooszczędnych technik wytwarzania o niskiej emisji szkodliwych gazów. Dotyczy to zwłaszcza zakładów produkcyjnych, które ze względu na proces wytwarzania, wykorzystują parę na cele technologiczne i w związku z tym, posiadają własne małe kotłownie (o mocy < 50 MW), często węglowe. Pakiet klimatyczno – energetyczny oraz coraz ostrzejsze normy dopuszczalnych emisji wynikające z dyrektyw IED (*Integrated Pollution Prevention and Control*) i MCP (*Medium Combustion Plants Directive*), spowodowały intensywny rozwój nowych innowacyjnych technik wytwarzania ciepła oraz energii elektrycznej. Dostępność wielu rozwiązań powoduje, że wybór najlepszego rozwiązania w oparciu tylko o analizę efektywności ekonomicznej jest często niewystarczający. Dotyczy to zwłaszcza starych, wyeksploatowanych technologii, które, żeby wypełnić nowe, ostrzejsze wymagania dotyczące dopuszczalnych emisji, muszą zostać zmodernizowane lub zastąpione nowymi, znacznie droższymi technologiami. Uzupełnienie analizy ekonomicznej oceną ekspertów – własnej kadry inżynierskiej, znającej dokładnie problemy technologiczne w zakładzie lub ekspertów zewnętrznych, pozwoli na wybór najlepszego rozwiązania.

2. CEL, ZAKRES I TEZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Celem głównym pracy jest opracowanie różnych pod względem zakresu zmian i rozwiązań technicznych, koncepcji modernizacji produkcji pary na cele technologiczne oraz sposobu przeprowadzenia wielokryterialnej analizy efektywności ekonomicznej i ekologicznej tych rozwiązań, która będzie pomocna przy wyborze najkorzystniejszego w danych warunkach rozwiązania.

Wynikające z tego **cele szczegółowe** to:

- określenie źródeł procesowej entalpii odpadowej i możliwości ich wykorzystania,
- określenie ograniczeń wykorzystania entalpii odpadowej,
- opracowanie wariantowej koncepcji ograniczenia zużycia paliw kopalnych i emisji gazów cieplarnianych,
- analiza wielokryterialna rozwiązań,
- wybór najlepszego pod względem ekonomicznym i ekologicznym rozwiązania.

Zakres pracy wynikający z przedstawionego celu obejmuje:

- przegląd stanu wiedzy na temat analizy wielokryterialnej i technik WHR (*Waste Heat Recovery*),
- wykonanie uproszczonego audytu energetycznego badanego procesu technologicznego,
- opracowanie koncepcji nadbudowy procesu układem kogeneracyjnym WHR,
- ocenę efektywności ekonomicznej opracowanego rozwiązania (NPV, IRR i DPBP),
- analizę wielokryterialną rozwiązań WHR,

Teza pracy:

Procesowa entalpia odpadowa oraz nadbudowa procesu technologicznego układem CHP, źródłem „czystej” energii elektrycznej.

3. ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY

3.1. Rozdział 1 – Wprowadzenie

Stanowi wstęp do rozprawy oraz jest uzasadnieniem podjęcia tematu dotyczącego rozwijania nowych innowacyjnych energooszczędnych technik wytwarzania i wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w krajach UE w związku z perspektywą wyczerpania się źródeł energetycznych - zasobów paliw kopalnych. Pod względem wielkości zasobów odnawialnych źródeł energii, Polska należy do państw o średnim potencjale technicznego wykorzystania OZE.

W związku z tym, poszukuje się innych technik „czystej” produkcji energii elektrycznej. Istotnym źródłem energii dotychczas w kraju stosunkowo w małym zakresie wykorzystanym, jest ciepło odpadowe z procesów produkcyjnych, zwłaszcza wysokotemperaturowych, które podobnie jak energetyka zużywają znaczne ilości paliw kopalnych i szkodliwie wpływają na środowisko naturalne.

W rozdziale tym zawarto również cel, zakres i tezę pracy.

3.2. Rozdział 2 – Analiza wielokryterialna

Rozdział 2 przedstawia, w oparciu o analizę literaturową, wybrane metody wielokryterialne podejmowania decyzji MCDA (*Multiple-Criteria Decision Analysis*). Proponuje się ich zastosowanie w procesie wyboru technologii WHR (*Waste Heat Recovery*), których działanie opiera się na wykorzystywaniu procesowego ciepła odpadowego. Wybór technologii WHR jest procesem złożonym z uwagi na wielowymiarowy zbiór kryteriów, np.: ekonomicznych, energetycznych, ekologicznych czy też technologicznych wpływających na opłacalność inwestycji.

W dalszej części pracy scharakteryzowano wybrane metody MCDM, które najczęściej wykorzystywane są do rozwiązywania problemów decyzyjnych w zakresie wykorzystania źródeł energii odnawialnej, alokacji zasobów energetycznych lub do celów zrównoważonego zarządzania energią. W literaturze przedmiotu w tym zakresie najczęściej wybieraną metodą WWD (*Wielokryterialne Wspomaganie Decyzji*) jest AHP, a następnie PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) i ELECTRE (*franc. ELimination Et Choix Traduisant la REalité*), dodatkowo szerokie zastosowanie w obszarze planowania energetycznego znajduje metoda TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*). Kończącą częścią tego rozdziału jest analiza porównawcza wybranych metod WWD oraz przegląd ich zastosowań.

3.3. Rozdział 3 – Przegląd metod i przepisów dotyczących usprawnienia gospodarki energetycznej w krajach UE

W rozdziale 3 przedstawiono uwarunkowania prawne UE wynikające z dyrektywy MCP (*Medium Combustion Plants Directive*) i pakietu klimatycznego oraz idei zrównoważonego rozwoju. Przepisy te wymuszają na krajach członkowskich wprowadzanie innowacyjnych „czystych” - bezemisyjnych technologii, których celem jest zwiększenie sprawności energetycznej (ograniczenie strat cieplnych), ograniczenie zużycia paliw kopalnych, kosztem wykorzystania OZE. Przedstawione nowe technologie wykorzystania źródeł odnawialnych mają duży wpływ na rozwój innowacyjnych technik wytwarzania energii elektrycznej w jednostkach o mocy poniżej 50 MW. Oprócz sektora energetycznego, techniki te znalazły duże zainteresowanie w

wysokotemperaturowych procesach wytwarzania (np. przemysł cementowy, chemiczny czy hutniczy). W procesach tych podobnie jak w energetyce podstawowymi paliwami technologicznymi są paliwa nieodnawialne. W związku z tym, wykorzystanie w tych procesach odnawialnych źródeł energii i skojarzenie procesu technologicznego z wytwarzaniem energii elektrycznej, jest coraz częściej stosowanym rozwiązaniem zgodnym z ideą zrównoważonego rozwoju. W dalszej części tego rozdziału przedstawiono uwarunkowania przepisów UE dotyczące efektywności energetycznej w odniesieniu do polskiego prawa energetycznego (Dz.U. R. P. poz. 220 z 06.02.2017, Dz.U. R. P. poz. 831 z 11.06.2016)). Polskie prawo energetyczne oraz ustawa o efektywności energetycznej wymuszają na zakładach przemysłowych podejmowanie działań podnoszących efektywność energetyczną. Jednym ze wskazanych celów poprawy efektywności energetycznej jest modernizacja lub wymiana lokalnych źródeł ciepła. W pracy proponuje się nadbudowę istniejącego procesu wytwarzania pary technologicznej układem kogeneracyjnym WHR. W zaproponowanych układach strumień odpadowego ciepła niskotemperaturowego wykorzystany jest do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, z możliwością generacji chłodu w absorpcyjnym urządzeniu chłodniczym na potrzeby klimatyzacji. Obecny rozwój nowych innowacyjnych technik WHR o wyższych sprawnościach i coraz niższych kosztach będzie sprzyjał rozwojowi energetyki rozproszonej, na co duży wpływ będą miały ceny paliw, energii elektrycznej i opłaty za emisję CO₂.

3.4. Rozdział 4 - Nowe techniki wytwarzania ciepła i energii elektrycznej

Rozdział 4 rozprawy doktorskiej opisuje nowe techniki wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w oparciu o kogenerację gazową oraz procesową entalpię odpadową. Układy kogeneracyjne oparte na silnikach i turbinach gazowych cieszą się dużym zainteresowaniem w ostatnich latach z uwagi na rodzaj paliwa, sprawność i łatwość skojarzenia z istniejącym procesem technologicznym. Zastosowanie paliw gazowych w porównaniu z paliwami stałymi (węgiel) daje dużo wyższy wskaźnik efektywności ekonomicznej oraz prawie o 50% niższą emisję CO₂. Gazowe układy wysokosprawnej kogeneracji charakteryzują się stosunkowo niskimi nakładami inwestycyjnymi (okresy zwrotu inwestycji dla takich układów wahają się w przedziale od 3 do 6 lat). Gazowe układy kogeneracyjne ze względu na wysoką sprawność, niskie jednostkowe koszty inwestycyjne i szeroki zakres mocy elektrycznych (od kilku kW_{el} do kilkudziesięciu MW_{el}) znalazły zastosowanie m.in.: w małych lokalnych ciepłowniach, zakładach przetwórstwa rolniczego, w szpitalach, w obiektach sportowych (krytych basenach), w oczyszczalniach ścieków i na składowiskach odpadów. Kolejną grupą układów opisaną w pracy do wytwarzania energii elektrycznej są instalacje WHR, których działanie opiera się na wykorzystywaniu procesowej entalpii odpadowej. Bazują one na następujących technikach wytwarzania energii elektrycznej:

- klasycznego obiegu parowego C-R (*Cykl Clausiusa – Rankine'a*),
- organicznego cyklu Rankine'a (*ORC – Organic Rankine Cycle*),
- cyklu Kaliny,
- silniku śrubowym.

W dalszej części rozdziału zdefiniowano ciepło odpadowe, a na koniec przedstawiono przykład zastosowań układów WHR w przemyśle.

3.5. Rozdział 5 - Koncepcja nadbudowy procesu technologicznego produkcji pary technologicznej wysokosprawną instalacją kogeneracyjną

W rozdziale 5 na przykładzie badanego przedsiębiorstwa z przemysłu spożywczego przeprowadzono analizę kotłowni zakładowej pod kątem poprawienia efektywności energetycznej zakładu oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Zasadniczym celem badanej kotłowni jest zabezpieczenie pary nasyconej o temperaturze 193°C i ciśnieniu 1,3MPa na cele technologiczne. Kotłownia wyposażona jest w pięć kotłów węglowych rusztowych. Paliwem stosowanym do produkcji pary technologicznej jest miał węglowy o minimalnej wartości opałowej 24MJ/kg. Ocenę efektywności energetycznej kotłowni przeprowadzono w oparciu o istniejące komputerowe raporty technologiczne dotyczące czasu pracy poszczególnych kotłów, ilości oraz parametrów wyprodukowanej pary technologicznej oraz zużycia paliwa. Do sporządzenia bilansu cieplnego wybrano metodę pośrednią zwaną metodą określenia strat, polegającą na określeniu wszystkich obliczalnych strat ciepła i strumienia energii zawartej w paliwie. Zebrane dane pomiarowe, eksploatacyjne kotłowni i informacje dotyczące zapotrzebowania na parę technologiczną pozwoliły w pierwszym etapie badań na wykonanie uproszczonego bilansu cieplnego kotłowni i określenie ilości ciepła odpadowego z kotła (entalpii gazów odlotowych) oraz z procesu technologicznego (kondensat). Dzięki zebranych informacjom na temat pracy kotłowni oraz danym technicznym i eksploatacyjnym kotłowni oraz procesu technologicznego ustalono miejsca, w których występują źródła niskotemperaturowego ciepła odpadowego. Do zasadniczych źródeł ciepła odpadowego należy entalpia kondensatu po procesie technologicznym, entalpia spalin kominowych po kotłach oraz ciepło z chłodzenia sprężarek. Znaczna część ciepła odpadowego jest już w zakładzie wykorzystana lub planuje się ją zagospodarować na cele grzewcze (kondensat i ciepło chłodzenia sprężarek). W związku z tym zaproponowano w pracy wykorzystanie kondensatu w instalacji WHR – ORC do produkcji energii elektrycznej oraz ciepła na cele grzewcze lub produkcji wody lodowej w okresie letnim. Jak wynika z danych zapotrzebowania na energię elektryczną w zakładzie, dzięki wykorzystaniu entalpii kondensatu będzie można zabezpieczyć ponad połowę energii na potrzeby własne. Oprócz obniżenia kosztów zakupu energii elektrycznej o 50%, rozwiązanie takie ma również znaczny wpływ na obniżenie emisji dwutlenku węgla. Uwzględniając, że wyprodukowanie energii elektrycznej z entalpii odpadowej - kondensatu technologicznego, jest procesem bezemisyjnym

w związku z tym, pośrednio ogranicza się emisję CO₂ o emisję, jaka wynika z wyprodukowania 1 kWh_{el} z węgla, która wynosi około 0,9 kg CO₂/kWh.

Nowe techniki wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych stwarzają warunki do przeprowadzenia modernizacji, która pozwoli uzyskać emisje zgodnie z standardami MCP. W związku z tym, w dalszej części pracy skupiono się na możliwości ograniczenia węgla w procesie produkcji pary na cele technologiczne i wielokryterialnej ocenie zaproponowanych rozwiązań, która będzie uzupełnieniem oceny ekonomicznej rozwiązań.

3.6. Rozdział 6 – Nowa technologia wytwarzania pary technologicznej

Rozdział 6 zawiera koncepcje nadbudowy procesu technologicznego produkcji pary technologicznej opierające się na układach WHR-CHP. Przy opracowywaniu koncepcji podstawowym celem było wyeliminowanie z procesu węgla kamiennego i zastąpienie go gazem ziemnym lub gazem syntezowym. Istniejąca infrastruktura gazowa w zakładzie stwarza duże możliwości zrealizowania tego zadania w oparciu o gazowe układy CHP. Zgodnie z tymi

założeniami opracowano trzy koncepcje nadbudowy istniejącego procesu produkcji pary technologicznej w oparciu o układy wysokosprawnej kogeneracji:

- *I WARIANT* - CHP z silnikiem gazowym oraz spalaniem biomasy,
- *II WARIANT* - CHP z kotłem gazowym i turbiną gazową,
- *III WARIANT* - CHP z kotłem gazowym oraz reaktorem zgazowania i układem ORC.

Warianty te różnią się nie tylko nakładami inwestycyjnymi, ale również efektami ekonomicznymi i ekologicznymi.

Pierwszy wariant zakładał likwidację dwóch kotłów węglowych i zamianę istniejącego kotła gazowego na agregat prądotwórczy CHP z tłokowym silnikiem gazowym i kotłem odzyskowym. W rozwiązaniu tym, przewiduje się 50% zastąpienie energii chemicznej węgla, biomasą. Docelowo, paliwem w tym kotle będzie biomasa drzewna i biocarbon wytworzony z własnych odpadów produkcyjnych (ok. 40 Mg/m-c). W *WARIANCIE I* przewidziano dwa rozwiązania, pierwsze polega na przystosowaniu jednego kotła węglowego na kocioł opalany tylko biomasą, natomiast pozostałe dwa kotły węglowe stanowią 100% rezerwę i uruchamiane będą tylko w stanach awaryjnych (kotła na biomasę lub silnika gazowego). Drugie rozwiązanie zakłada przystosowanie dwóch kotłów węglowych do współspalania węgla i biomasy w stosunku udziału ciepła z tych paliw 50/50, natomiast trzeci kocioł węglowy stanowi rezerwę produkcyjną. Docelowo zakłada się całkowite wyeliminowanie z zakładu węgla.

W przedstawionym w pracy *WARIANCIE II* założono całkowitą likwidację kotłów węglowych i zastąpienie węgla gazem ziemnym, który jest już w zakładzie wykorzystywany. Z istniejącej kotłowni pozostanie jedynie kocioł gazowy, natomiast w miejsce kotłowni węglowej po jej wyburzeniu zostanie zainstalowana turbina gazowa z kotłem odzyskowym. W rozwiązaniu tym, zastosowano turbinę gazową produkcji Kawasaki typ GPB17D o mocy 1,6 MW_{el} i 5,6 MW_{th} (ok. 6,4 t/h pary).

Głównym celem opisanego *WARIANTU III* jest ograniczenie zużycia gazu ziemnego kosztem gazu wytworzonego w reaktorze - zgazowarce z biomasy drzewnej (trociny, ścinka drzewna), z możliwością zagospodarowania istniejącego odpadu produkcyjnego – biomasy rolniczej. Podobnie jak w *II WARIANCIE*, istniejące kotły węglowe zostaną zlikwidowane, pozostanie tylko kocioł gazowy. Zaproponowana instalacja składa się z reaktora do zgazowania biomasy oraz układu ORC. Dzięki takiemu rozwiązaniu będzie można podobnie jak w/w rozwiązaniach wykorzystać istniejący kolektor parowy i znacznie obniżyć koszty inwestycyjne - budowlane. Przy opracowaniu koncepcji modernizacji z reaktorem – zgazowarką biomasy drzewnej, wykorzystano dane literaturowe dotyczące rozwiązania, które zostało wdrożone w Gussing w Austrii. Jednak różnica pomiędzy rozwiązaniem w Gussing a opracowanym rozwiązaniem w pracy, polega na sposobie wytworzenia energii elektrycznej i wykorzystaniu wytworzonego gazu. W Gussing gaz wykorzystany jest zasadniczo do wytworzenia energii elektrycznej w agregacie z tłokowym silnikiem gazowym. Natomiast w opracowanym rozwiązaniu wytworzony w reaktorze gaz zostanie wykorzystany w kotłach gazowych do wytworzenia wymaganej ilości pary technologicznej. Zaproponowany układ z dwoma kotłami gazowymi i palnikami przystosowanymi na różne gazy stwarza 100% rezerwę produkcji pary technologicznej, co zabezpiecza ciągłość procesu przy postoju awaryjnym kotła lub zgazowarki. Natomiast wyprodukowana energia elektryczna w instalacji ORC zabezpiecza całkowicie zapotrzebowanie zakładu i pozwoli nadmiar energii sprzedać do sieci. Układ ORC jest bardzo elastyczny, co pozwala na dopasowanie mocy wytwarzanej energii do zapotrzebowania w bardzo szerokim zakresie (od 40% do 100% obciążenia) przy stałej sprawności. W *WARIANCIE III* przewiduje się również możliwość zastosowania w miejsce układu ORC, silnika gazowego,

który może w przyszłości posłużyć jako alternatywa dla procesu zgazowania biomasy (WARIANT III b).

Na końcu rozdziału przedstawiono ocenę ekonomiczną proponowanych rozwiązań jako wskaźniki efektywności ekonomicznej przyjęto wskaźniki dyskontowe *NPV*, *IRR* oraz *DPBP* jako te, które stosowane są najczęściej w praktyce i w prosty sposób pozwolą decydom ocenić efektywność ekonomiczną proponowanych rozwiązań w sposób uproszczony.

W celu oszacowania nakładów inwestycyjnych na modernizację istniejącego układu produkcji pary technologicznej, przyjęto następujące założenia:

- roczna produkcja pary technologicznej po modernizacji musi odpowiadać zapotrzebowaniu zgodnie z danymi analizowanego roku (uwzględnić możliwość wzrostu wydajności),
- średnioroczne zapotrzebowanie na energię elektryczną wynosi – 1,2 MWh,
- po modernizacji nie nastąpi wzrost kosztów osobowych (stan zatrudnienia bez zmian),
- ceny zakupu paliw i energii elektrycznej przyjęto jako średnie z ostatniego okresu i wynoszą 1MWh_{el} - 350 zł, cena zakupu gazu ziemnego 30 zł/GJ,
- przyjęto roczny czas pracy układu wynoszący 7000 h,
- okres eksploatacji przyjęto na poziomie 15 lat,
- stopa dyskontowa 12%,
- jednostkowa cena praw do emisji CO₂ od 20 do 40 [euro/t], przy założeniu, że 1€=4,28 PLN,
- możliwość uzyskania dofinansowania do projektu – 40% wymaganych nakładów,
- wartość CF_t przyjęto stałe w całym okresie eksploatacji,
- nakłady inwestycyjne przyjęto na podstawie ofert i danych literaturowych oraz z analizy podobnych rozwiązań.

W tab. 4.1 przedstawiono przepływy pieniężne wynikające z nadbudowy procesu technologicznego wytwarzania pary technologicznej dla wszystkich zaproponowanych rozwiązań rozpatrywanego przedsiębiorstwa.

Tablica 4.1 Przepływy pieniężne wynikające z modernizacji procesu wytwarzania pary technologicznej w analizowanym zakładzie.

Przychody i wydatki [PLN/rok]	Zakres modernizacji			
	Wariant I	Wariant II	Wariant III a	Wariant III b
Zysk z ograniczenia zakupu energii elektrycznej	481 600	2 695 000	2 695 000	2 695 000
Dochód ze sprzedaży energii elektrycznej URE	-	226 800	617 400	146 880
Dochód ze sprzedaży praw do emisji CO ₂ ze spalania paliwa	831 686	614 100	1 546 000	1 546 000
Dochód pośredni ze sprzedaży CO ₂ z produkcji en.elekt.	94 160	613 580	719 040	458 816
Zysk/strata wynikające z różnicy kosztów paliwa	- 550 440	-2 375 409	-981 169	-768 669
Obsługa i serwis	-200 000	- 200 000	- 200 000	- 200 000
Suma efektów	657 006	1 574 071	4 396 271	3 878 027
Nakłady inwestycyjne	6 300 000	8 350 000	21 200 000	13 400 000

W tab. 4.2 przedstawiono wskaźniki dyskontowe dla wszystkich zaproponowanych wariantów. Z przeprowadzonej analizy uwarunkowań techniczno-ekonomicznych wynikają następujące wnioski:

- podstawowymi parametrami cenowymi mającymi wpływ na opłacalność zastosowania układów WHR jest cena zakupu paliwa, cena energii elektrycznej (sprzedaż lub uniknięcie jej zakupu) oraz cena sprzedaży uprawnień do emisji CO₂,
- pomimo zróżnicowanych nakładów inwestycyjnych okresy zwrotu są na podobnym poziomie przy uwzględnieniu dotacji oraz przy najwyższych cenach CO₂,
- największą efektywność ekologiczną mają układy na bazie zgazowania biomasy i z reaktorem ORC,
- zastosowanie układów WHR powoduje znaczne oszczędności energii pierwotnej.

Przedstawiona uproszczona analiza techniczno-ekonomiczna nie daje jednoznacznej odpowiedzi, które rozwiązanie jest najlepsze z punktu widzenia decydenta, szczególnie jeżeli pod uwagę bierze się aspekt ekologiczny, często trudno mierzalny. Dlatego też w celu wyboru najlepszego rozwiązania proponuje się analizę wielokryterialną, która uwzględnia nie tylko kryteria kosztowe, ale również korzyści, jakie niesie ze sobą zastosowanie układów WHR.

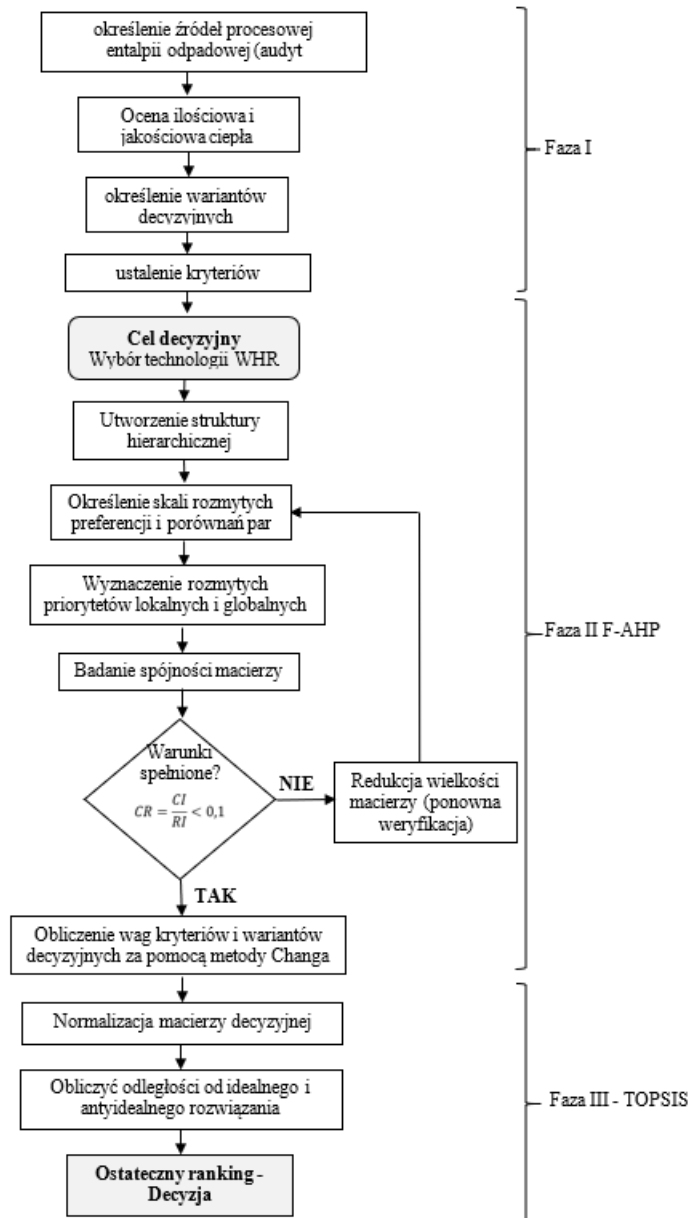
Tablica 4.2 Zestawienie wskaźników dyskontowych dla proponowanych wariantów.

wariant	Wkład własny	Koszt CO ₂ [euro]	NPV	IRR	DPBP
I	100%	20	767 519,30 zł	14%	11,22
		30	3 296 314,23 zł	22%	6,40
		40	5 825 109,16 zł	29%	4,54
	60%	20	3 017 519,30 zł	27%	4,98
		30	5 546 314,23 zł	39%	3,28
		40	8 075 109,16 zł	50%	2,19
II	100%	20	2 116 771,68 zł	17%	8,93
		30	3 983 982,34 zł	21%	6,72
		40	5 851 193,00 zł	25%	5,42
	60%	20	5 098 914,53 zł	31%	4,26
		30	6 966 125,20 zł	37%	3,41
		40	8 833 335,86 zł	43%	2,84
III a	100%	20	11 618 496,77 zł	28%	4,74
		30	16 319 209,49 zł	34%	3,75
		40	21 019 922,22 zł	40%	3,11
	60%	20	16 404 211,06 zł	48%	2,54
		30	21 104 923,78 zł	58%	2,05
		40	25 805 636,50 zł	67%	1,74
III b	100%	20	7 805 719,68 zł	19%	7,64
		30	12 506 432,40 zł	23%	5,98
		40	17 207 145,13 zł	27%	4,93
	60%	20	15 377 148,25 zł	34%	3,77
		30	20 077 860,97 zł	40%	3,09
		40	24 778 573,70 zł	47%	2,63

3.7. Rozdział 7 – Propozycja metodyki wielokryterialnej oceny technologii WHR

W rozdziale 7 przedstawiono analizę porównawczą zaproponowanych technologii WHR za pomocą metody hybrydowej F-AHP-TOPSIS (*Fuzzy - Analytic Hierarchy Process - Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*). Zastosowany model obliczeniowy wyboru technologii odzysku ciepła odpadowego składa się z trzech faz (rys. 4.1). Pierwsza faza obejmowała określenie potencjalnych źródeł entalpii ciepła odpadowego na podstawie przeprowadzonego

audytu energetycznego w przedsiębiorstwie lub bezpośrednich obliczeń na podstawie odczytów parametrów ilościowych w obrębie produktu, procesu i całego przedsiębiorstwa.



Rys. 4.1 Algorytm wyboru technologii odzysku ciepła odpadowego.

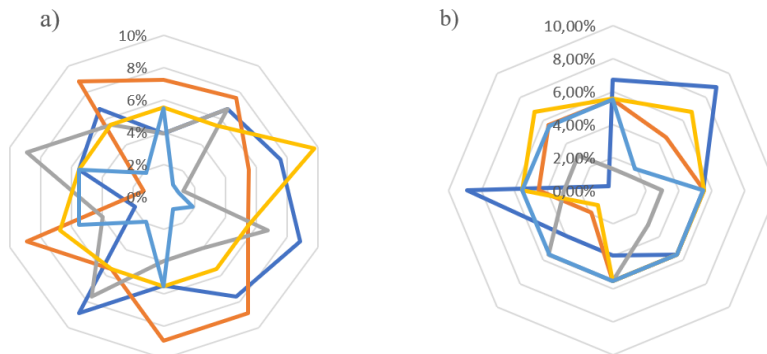
Źródło: opracowanie własne.

W drugiej fazie badania przeprowadzono ocenę zaproponowanych koncepcji z wykorzystaniem metody F-AHP (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process*). Zaproponowana metoda jest rozmytym analitycznym procesem hierarchicznym, wykorzystanym do budowy modelu decyzyjnego w celu określenia wartości współczynników wagowych. W rozpatrywanym badaniu wykorzystano dwa modele struktury hierarchicznej korzyści i kosztów. Popularność tej metody wynika z możliwości uwzględnienia czynników jakościowych i ilościowych oraz prostej procedury obliczeniowej. Dodatkowo zastosowanie logiki rozmytej pozwala zmniejszyć ryzyko niepewności i niejednoznaczności w podejmowaniu decyzji w wyniku zastosowania 9-stopniowej skali preferencyjnej Saaty'ego oraz pozwala wyeliminować kryteria o najmniejszym znaczeniu. W ostatniej fazie do przeprowadzenia rankingu końcowego zastosowano metodę TOPSIS. Jest to metoda porządkowa, która do oceny wariantu decyzyjnego wykorzystuje punkty referencyjne – rozwiązanie idealne i antyidealne. Wybór najlepszego wariantu decyzyjnego polega na znalezieniu

najkrótszej odległości od idealnego rozwiązania i najdłuższej odległości od antyidealnego rozwiązania. Idealnym wariantem decyzyjnym jest ten, który ma największe korzyści i najniższe koszty wśród wszystkich wariantów decyzyjnych, a antyidealnym wariantem jest ten, który ma najniższe korzyści i najwyższy koszt.

Eksperyment obliczeniowy bazujący na rozmytych metodach AHP i TOPSIS został przeprowadzony z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego. W pierwszym kroku etapy postępowania są podobne jak w klasycznej metodzie AHP/ANP (*Analytic Network Process*). W celu ustalenia wartości współczynników wagowych rozpatrywanych wariantów decyzyjnych tworzy się macierze porównań parami z wykorzystaniem rozmytego analitycznego procesu hierarchicznego (F-AHP). Zastosowanie logiki rozmytej wpływa korzystnie na stabilność otrzymanych wyników. Do określenia skali preferencji przypisuje się zmienną lingwistyczną opisującą relacje oparte na trójkątnej liczbie rozmytej $\tilde{A} = (l, m, u)$. Trójkątna liczba rozmyta zdefiniowana jest w przedziale $[l, u]$, a jej funkcja przynależności przyjmuje wartość równą 1 w punkcie m . W metodzie F-AHP stosuje się trójkątne liczby rozmyte, aby uzyskać oceny przedziałowe dla preferencji jednego kryterium względem drugiego.

W celu zagregowania wyników przeprowadzono indywidualne wywiady ankietowe z pracownikami wydziału energetycznego rozpatrywanego przedsiębiorstwa, a następnie wywiad grupowy tak, by móc porównać otrzymane wyniki. Zgodnie z założeniami metody F-AHP porównywane parami kryteria modelu korzyści i kosztów powinny uzyskać odpowiednią wartość współczynnika spójności $CR < 10\%$, wówczas można dokonać agregacji wyników. Na rys. 4.2 przedstawiono wartości współczynników CR dla respondentów w badaniu indywidualnym i grupowym.



Rys. 4.2 Wartości współczynników CR dla grupy respondentów: a- model korzyści, b- model kosztów.

Źródło: opracowanie własne.

W tab. 4.3 przedstawiono zagregowane wyniki znormalizowanych wag kryteriów głównych dla modelu korzyści i kosztów dla ocen indywidualnych i grupowych.

Wyniki wskazują, że w badaniach indywidualnych jak i grupowym modelu decyzyjnym korzyści kryterium energetycznego uzyskało najwyższą wartość. Podobnie w badaniu grupowym przy kosztach energetycznych wynik ten był najwyższy. Z kolei w modelu decyzyjnym kosztów dla badań indywidualnych najwyższą wartość uzyskały kryteria kosztów technologicznych. Najniższe wartości uzyskały wagi kryteriów środowiskowych.

Tablica 4.3 znormalizowane wagi kryteriów głównych dla badań indywidualnych i grupowych dla modelu korzyści i kosztów.

Model decyzyjny	Kryterium	badania indywidualne	badanie grupowe
korzyści	energetyczne	0,455	0,449
	środowiskowe	0,295	0,200
	technologiczne	0,250	0,351
koszty	energetyczne	0,264	0,567
	środowiskowe	0,031	0,077
	technologiczne	0,705	0,356

W tab. 4.4 i 4.5 przedstawiono wagi wariantów decyzyjnych w odniesieniu do subkryteriów. Największy wpływ na wybór wariantu decyzyjnego wśród modelu korzyści miały subkryteria związane z bezpieczeństwem energetycznym, ochroną zasobów energetycznych, zużyciem paliw i energii, ciągłość procesu produkcyjnego oraz obniżenie emisji gazów cieplarnianych.

Tablica 4.4 Znormalizowane wagi wariantów decyzyjnych w odniesieniu do subkryteriów dla modelu korzyści.

Subkryteria	bad. indywid.			bad. grupowe		
	warianty decyzyjne			warianty decyzyjne		
	I	II	III	I	II	III
certyfikaty energetyczne	0,500	0,000	0,500	0,077	0,356	0,567
odzysk energii z odpadów	0,500	0,125	0,375	0,351	0,200	0,449
zużycie paliw i energii	0,250	0,000	0,750	0,000	0,124	0,876
bezpieczeństwo energetyczne	0,112	0,088	0,800	0,567	0,356	0,077
utylizacja odpadów	0,141	0,203	0,656	0,437	0,000	0,563
obniżenie emisji gazów cieplarnianych	0,186	0,186	0,629	0,356	0,077	0,567
ochrona zasobów energetycznych kopalnych	0,118	0,000	0,882	0,351	0,200	0,449
ciągłość procesu produkcyjnego	0,479	0,133	0,388	0,000	0,124	0,876
racjonalizacja zużycia energii	0,250	0,320	0,430	0,569	0,431	0,000
redukcja kosztów energii w procesie technologicznym	0,250	0,110	0,640	0,283	0,000	0,717

Tablica 4.5 Znormalizowane wagi wariantów decyzyjnych w odniesieniu do subkryteriów dla modelu kosztów

Subkryteria	bad. indywid.			bad. grupowe		
	warianty decyzyjne			warianty decyzyjne		
	I	II	III	I	II	III
NPV, IRR	0,568	0,000	0,432	0,437	0,563	0,000
czas zwrotu inwestycji	0,775	0,046	0,179	0,563	0,437	0,000
udział kosztów własnych	0,212	0,424	0,365	0,000	0,283	0,717
koszt CO ₂	0,680	0,000	0,320	0,000	0,124	0,876
składowanie odpadów	0,526	0,253	0,221	0,561	0,219	0,219
opłaty środowiskowe	0,383	0,158	0,458	0,449	0,200	0,351
zużycie energii MWh/produkt	0,250	0,073	0,677	0,000	0,283	0,717
zużycie paliw t/produkt	0,500	0,237	0,263	0,200	0,351	0,449

W grupie modelu kosztów dominują wagi kosztów CO₂, czasu zwrotu inwestycji, udziału kosztów własnych oraz zużycia energii. W tab.4.6 przedstawiono zagregowane współczynniki wagowe w odniesieniu do kryteriów głównych, które posłużyły do sporządzenia rankingu końcowego. Z przedstawionych danych wynika, że kryteria energetyczne mają największy wpływ na wybór wariantu decyzyjnego. Podobnie jak w poprzednich analizach kryteria środowiskowe mają najmniejszy wpływ na wybór wariantu decyzyjnego.

Tablica 4.6 Znormalizowane zagregowane współczynniki wagowe wariantów decyzyjnych w odniesieniu do kryteriów głównych: a) model korzyści, b) model kosztów

a)

kryteria warianty decyzyjne	energetyczne (K ₁)	środowiskowe (K ₂)	technologiczne (K ₃)
I	0,366	0,060	0,083
II	0,205	0,019	0,109
III	0,378	0,093	0,242

b)

kryteria warianty decyzyjne	energetyczne (K ₁)	środowiskowe (K ₂)	technologiczne (K ₃)
I	0,335	0,035	0,116
II	0,430	0,016	0,172
III	0,324	0,038	0,225

Ostateczny wybór danego wariantu został obliczony na podstawie relacji korzyści do kosztów, czyli stosunku współczynnika wagowego wariantu w modelu korzyści do analogicznego współczynnika w modelu kosztów. Oznacza to, że najbardziej pożądanym wariantem jest ten, który w najwyższym stopniu realizuje zakładane korzyści i jednocześnie generuje najniższe koszty (tab. 4.7).

Tablica 4.7 Zagregowane wartości współczynników wagowych wariantów decyzyjnych.

kryteria warianty decyzyjne	energetyczne (K ₁)	środowiskowe (K ₂)	technologiczne (K ₃)
I	1,092	1,727	0,718
II	0,477	1,175	0,633
III	1,168	2,442	1,078

W kolejnym etapie dokonano uszeregowania wariantów decyzyjnych w oparciu o uzyskane wyniki współczynników wagowych wariantów decyzyjnych wyznaczonych za pomocą metody F-AHP. Do szeregowania wariantów decyzyjnych zastosowano metodę TOSIS. Wyniki uszeregowania wariantów decyzyjnych przedstawiono w tab. 4.8.

Tablica 4.8 Uszeregowanie wariantów decyzyjnych wg metody TOPSIS

Warianty	d_i^+	d_i^-	R_i	uszeregowanie
I	0,804	0,831	0,508	2
II	1,510	0,000	0,000	3
III	0,000	1,510	1,000	1

Według respondentów optymalnym wariantem nadbudowy procesu technologicznego pod względem korzyści i kosztów będzie koncepcja oparta na procesie zgazowania biomasy oraz układu ORC, czyli *WARIANT III*. Jest to rozwiązanie najdroższe pod względem inwestycyjnym, lecz przynosi największe korzyści środowiskowe i energetyczne. Ponieważ przedsiębiorstwo w przyszłości zamierza całkowicie zlikwidować kotłownię opalaną węglem, to rozwiązanie wydaje się być najlepszym. Na końcu rankingu znalazło się rozwiązanie, które opiera się na turbinie

gazowej. Pomimo, że w tym rozwiązaniu wyeliminowano węgiel, to i tak paliwo gazowe nie jest dość atrakcyjne z uwagi na niepewność cen paliw w najbliższym czasie.

W końcowej części rozdziału przedstawiono wyniki analizy wielokryterialnej dla najlepszego rozwiązania WHR współpracującego z procesem wypalania klinkieru w piecu obrotowym. Podobnie jak dla kotłowni węglowej badanego przedsiębiorstwa wykorzystano opracowaną metodykę wyboru technologii WHR. Zaproponowano również trzy koncepcje nadbudowy pieca obrotowego. Pierwszy wariant zakładał wykorzystanie entalpii gazów odlotowych z pieca i powietrza z chłodnika klinkieru przy zastosowaniu typowego układu parowego w obiegu Clausiusa-Rankine'a (C-R). Drugi wariant jest rozwiązaniem pochodnym do typowego obiegu C-R z tą różnicą, że wodę zastąpiono cieczą organiczną, która charakteryzuje się prawie 6-krotnie niższym ciepłem parowania niż woda. Wariant trzeci zakładał wykorzystanie paliw alternatywnych jako zamiennika paliwa kopalnego. Wariant ten jest podobny do *WARIANTU III* badanego przedsiębiorstwa, który w swym układzie zawiera reaktor zgazowania, wykorzystujący biomasę z paliw alternatywnych, silnik lub turbinę gazową oraz instalację ORC.

Podobnie jak w poprzednim badaniu przygotowano arkusze ankietowe i grupa wybranych ekspertów z przemysłu cementowego określiła swoje preferencje odnośnie wyboru technologii odzysku ciepła odpadowego. Na wybór technologii nadbudowy pieca obrotowego miały wpływ kryteria w modelu decyzyjnym korzyści: utylizacja odpadów, odzysk energii z odpadów, certyfikaty energetyczne oraz ochrona zasobów energetycznych kopalnych. Wyniki uszeregowania wariantów decyzyjnych przedstawiono w tab. 4.9.

Tablica 4.9 Uszeregowanie wariantów decyzyjnych

	d_i^+	d_i^-	R_i	uszeregowanie
W- I	0,5897	0,1343	0,1855	3
W-II	0,4283	0,2451	0,3640	2
W-III	0,2474	0,5756	0,6994	1

Zaproponowany *WARIANT III* zdecydowanie przewyższa pozostałe koncepcje. Na wybór tego duży wpływ miały kryteria energetyczne zarówno w grupie kosztów jak i korzyści szczególnie udział kosztów własnych i zużycie paliw i energii.

Zastosowanie nowoczesnych instalacji kogeneracyjnych, wykorzystanie entalpii procesowych gazów odlotowych oraz modernizacja instalacji przemysłowych może w znacznym stopniu przyczynić się do zmniejszenia zużycia paliw kopalnych, podniesienia efektywności systemów energetycznych oraz poprawy warunków środowiska naturalnego. Zaproponowane metody znajdują zastosowanie w wielu branżach, są proste w implementacji i interpretacji, posiadają zdolność do uchwycenia kryteriów ilościowych i jakościowych.

3.8. WNIOSKI

Na podstawie zaproponowanych w pracy koncepcji nadbudowy procesu układem kogeneracyjnym WHR oraz przeprowadzonej analizy wielokryterialnej uzyskanych rezultatów badań można sformułować następujące wnioski:

- zaproponowane w pracy układy kogeneracyjne mogą być wykorzystane do modernizacji obecnych instalacji przemysłowych, dzięki wykorzystaniu entalpii procesowych gazów odlotowych, w znacznym stopniu przyczyniają się do zmniejszenia zużycia paliw kopalnych,

podniesienia efektywności systemów energetycznych oraz poprawy warunków środowiska naturalnego,

- nadbudowa istniejącego układu spalania paliw kopalnych układem kogeneracyjnym eliminuje koszty zakupu energii elektrycznej, a nadmiar wyprodukowanej „czystej” energii generuje zysk ekonomiczny,
- wykorzystanie procesowej entalpii odpadowej w układach kogeneracyjnych przynosi dochód ze sprzedaży praw do emisji CO₂ ze spalania paliwa oraz dochód ze sprzedaży CO₂ z produkcji „czystej” energii elektrycznej,
- zaproponowane podejście do wyboru technologii WHR z zastosowaniem technik MCDM pomaga w rozwiązaniu problemów planowania energetycznego,
- wybór technologii WHR przy pomocy wielu metod MCDM może dostarczyć różne wyniki w sytuacji zastosowania bardzo zbliżonych do siebie metod. Proponuje się zastosowanie więcej niż jednej metody do rozwiązywania problemów energetycznych,
- racjonalnym kierunkiem modernizacji istniejących układów spalania paliw kopalnych jest nadbudowa układem kogeneracyjnym, wykorzystującym procesową entalpię odpadową,
- zmieniające się na rynku ceny paliw i energii stwarzają możliwości do inwestowania w technologie WHR.
- zaproponowany w pracy algorytm wyboru technologii odzysku ciepła odpadowego wpisuje się w aktualne trendy zwiększenia efektywności energetycznej istniejących układów spalania paliw kopalnych, tym samym ma charakter uniwersalny, gdyż może znaleźć zastosowanie w przedsiębiorstwach bardziej energochłonnych, gdzie tej procesowej entalpii odpadowej jest zdecydowanie więcej,
- zdefiniowanie spójnej rodziny kryteriów ekonomicznych, ekologicznych i energetycznych stwarza możliwość optymalnego wyboru technologii WHR.

Podsumowując, zaprezentowane w rozprawie doktorskiej rezultaty badań potwierdzają słuszność postawionej na wstępie pracy tezy naukowej. Zaprezentowane w pracy koncepcje nadbudowy procesu technologicznego układem WHR oraz zaproponowana metodyka wielokryterialna pozwala na wybór efektywnej strategii inwestycyjnej w przedsiębiorstwach wykorzystujących układy do spalania paliw kopalnych.