



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Katedra Techniki Ciepłej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok,  
tel. [REDACTED]

e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 28.02.2022

---

---

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Krzysztofa Pajączka**  
*Analiza i optymalizacja układu skraplania gazu ziemnego*  
*wykorzystującego egzergię odpadową z systemu przesyłu i dystrybucji gazu*

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana Prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, pismo RIE-BD/4/438/20202/2021 z dnia 17 sierpnia 2021, a także pisma RIE-BD.512.5.2022 z dnia 24 stycznia 2022 roku. Recenzję pierwotnej wersji rozprawy doktorskiej sporządziłem w dniu 08 listopada 2021, recenzja ta zawierała jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy. Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa z uzupełnieniami i zmianami wskazanymi przez Doktoranta.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Pan Dr hab. inż. Wojciech Kostowski, Prof. uczelni.

### **I. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 181 stron. Rozprawa składa się z następujących części: streszczenia w języku polskim i angielskim, zestawienia oznaczeń, wstępu (rozdział 1) w którym został zamieszczony cel i zakres pracy, rozdziałów 2-5 prezentujących własny materiał badawczy, opisu zgłoszenia patentowego (rozdział 6), podsumowania (rozdział 10), zestawienia bibliograficznego, spisu tablic i rysunków. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp**, w którym Autor dokonał przeglądu stanu ogólnej wiedzy dotyczącej układów dystrybucji gazu ziemnego oraz skraplania gazu ziemnego, a także sformułował cel i zakres pracy.
2. **Identyfikacja źródeł egzergii odpadowej**. W rozdziale w została zamieszczona analiza źródeł egzergii odpadowej w stacjach redukcyjnych, i tłoczniach, a także zostały przeanalizowane możliwości wykorzystania ciepła odpadowego występującego przy napędzie układów sprężania.
3. **Współpraca linii skraplania gazu ziemnego ze stacją redukcyjną w modelu blackbox**. W rozdziale tym Doktorant przedstawił analizę energetyczną oraz egzergetyczną dla różnych konfiguracji rozdzielonej współpracy linii skraplania gazu ziemnego ze stacją redukcyjną.

4. **Głęboka integracja stacji redukcyjnej z linią skraplania gazu ziemnego.** W rozdziale tym Doktorant przedstawił analizę energetyczną oraz egzergetyczną dla różnych konfiguracji zintegrowanego układu stacji redukcyjnej z linią skraplania gazu ziemnego.
  5. **Optymalizacja parametrów pracy jednostki redukcyjno-skraplejacej.** W rozdziale został sformułowany cel oraz metodyka optymalizacji, zaprezentowany został model procesu separacji faz oraz skraplania oraz przeanalizowano wyniki optymalizacji dla wybranych konfiguracji zintegrowanej stacji redukcyjnej wraz z układem skraplania gazu ziemnego.
  6. **Zgłoszenie patentowe.** W rozdziale zaprezentowano zgłoszone do opatentowania rozwiązanie ideowe zintegrowanej stacji redukcyjnej wraz z układem skraplania gazu ziemnego.
  7. **Podsumowanie.** W Rozdziale tym Doktorant dokonał syntetycznego podsumowania uzyskanych wyników i wskazał rekomendacje w zakresie praktycznego ich wykorzystania.
- **Bibliografia** zawierająca wykaz 107 pozycji literatury, obejmująca najnowsze publikacje z renomowanych czasopism międzynarodowych, referaty z międzynarodowych konferencji naukowych, publikacje książkowe i monografie z dziedziny analiz egzergetycznych, inżynierii chemicznej oraz technologii gazownictwa, aktów prawnych oraz źródeł danych statystycznych i technicznych. W spisie literatury znalazło się 47 artykułów naukowych z renomowanych czasopism specjalistycznych z listy JCR oraz międzynarodowych czasopism specjalistycznych, 17 pozycji książkowych i monograficznych, 8 referatów naukowych.

## II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował cel oraz zasadniczy zakres rozprawy w Rozdziale 1.5. Celem pracy jest „zaprojektowanie modelu jednostki skraplejacej o mini skali, która będzie charakteryzować się zerową energochłonnością”. Do realizacji tego zadania ma zostać wykorzystana egzergia odpadowa dostępna w sieci przesyłu lub dystrybucji gazu ziemnego.

Dla tak postawionego celu pracy, Doktorant nakreślił zakres pracy - wskazując konieczność identyfikacji źródeł egzergii odpadowej dla różnych konfiguracji układów, a następnie dokonanie optymalizacji parametrów pracy dla wybranej, najlepszej konfiguracji w celu uzyskania jak najwyższej sprawności egzergetycznej przy zerowej energochłonności całości układu. Pracę ma zakończyć opracowanie projektu „jednostki skraplejacej zintegrowanej z układem odzysku egzergii, o zerowej energochłonności i możliwie najwyższej uzyskanej sprawności”.

Tak postawiony cel oraz zakres rozprawy dotyczy aktualnych zagadnień badawczych o otwartym charakterze i jego realizacja stanowi rzeczywiste wyzwanie o charakterze poznawczym oraz metodycznym. Szczególnie istotny jest także walor aplikacyjny tkwiący w tak postawionym celu oraz zakresie pracy doktorskiej, co stanowi ważną okoliczność w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych.

Cel, zakres rzeczowy oraz teza rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy przedstawionej w Rozdziale 1.6 rozprawy doktorskiej w zakresie zagadnień dotyczących zagospodarowania egzergii odpadowej w układach przesyłu gazu ziemnego oraz skraplania gazu ziemnego. Niewątpliwie sformułowany cel oraz wskazany zakres rozprawy ze sobą w pełni korespondują, program prac o charakterze

analitycznym zaproponowany przez Doktoranta ze sformułowanym celem w pełni koresponduje. W układzie pracy, przy tak postawionym celu oraz zakresie - znajdują się wątki o charakterze prac w zakresie zaawansowanych analiz egzergetycznych, analiz technicznych dla różnych konfiguracji układów przesyłu i skraplania gazu ziemnego, wreszcie zagadnienia modelowania procesów separacji oraz rachunku optymalizacyjnego. Należy wziąć pod uwagę, że rozprawa podejmuje zagadnienia coraz intensywniej rozważane w literaturze naukowej i technicznej, wobec czego uzyskanie znaczących poznawczo oraz metodycznie rezultatów stanowi rzeczywiste wyzwanie. W tym kontekście wskazany cel oraz tezę postawioną w rozprawie uznaję za adekwatne.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty analiz układów skraplania gazu ziemnego przy wykorzystaniu odpadowej egzergii z systemu przesyłu i dystrybucji gazu ziemnego – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy i umożliwiają jego osiągnięcie.

### **III. Treść rozprawy**

We Wstępie rozprawy Doktorant zamieścił omówienie ogólnych aspektów związanych z zastosowaniem i transportem gazu ziemnego w fazie gazowej oraz ciekłej, wskazując na szczegółowe uwarunkowania techniczne transportu gazu w warunkach krajowych. Zostały zaprezentowane istniejące technologie skraplania gazu ziemnego, a w tym obieg z rozprężaniem azotu, obieg z roztworem czynników chłodniczych ze wstępnym chłodzeniem obiegiem propanowym, wreszcie układ kaskadowy z zastosowaniem wielu czynników roboczych. Rozdział wstępny kończy sformułowanie celu i zakresu pracy (do których odniosłem się w punkcie II niniejszej recenzji), a także przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie zagadnień dotyczących zagospodarowania egzergii odpadowej w układach przesyłu gazu ziemnego oraz skraplania gazu ziemnego.

W Rozdziale 2 Doktorant podjął zagadnienia dotyczące identyfikacji źródeł egzergii odpadowej w wybranych układach przesyłu gazu ziemnego: dla dwóch wybranych rzeczywistych tłoczni gazu, dwóch stacji redukcji ciśnienia gazu oraz wirtualnej miejskiej stacji redukcyjnej. Pod uwagę wziął on możliwe do zastosowania napędy sprężarek gazu: silnik turbospalinowy (obieg Braytona), silnik spalinowy tłokowy, bądź silnik elektryczny. W pierwszej kolejności Doktorant rozpatrzył możliwości zagospodarowania egzergii odpadowej w stacjach redukcyjnych poprzez wykorzystanie procesu rozprężania w turbinach gazowych zamiast zastosowania dławienia izentalpowego. W tym przypadku rozpatrzył konieczność dogrzewania gazu przed turbiną w celu uniknięcia niepożądanego spadku temperatury w procesie rozprężania – także kontekście wykorzystania zasobów energii cieplnej odpadowej. Dalej rozpatrzył on możliwości zagospodarowania egzergii odpadowej w tłoczniach gazu, zwłaszcza w aspekcie generowanych dużych ilości mocy grzewczej odpadowej. Dokonał on w tym punkcie krytycznej oceny możliwości zagospodarowania źródeł ciepła odpadowego na cele produkcji mocy elektrycznej, zwłaszcza przy wykorzystaniu siłowni ORC. Stąd w podsumowaniu wskazał na znaczący potencjał tkwiący w zagospodarowaniu egzergii odpadowej w procesie redukcji ciśnienia gazu poprzez wykorzystanie procesu rozprężania gazu zamiast dławienia. Dokonane zostały szacunkowe obliczenia rocznego odzysku energii dla wybranych układów.

W Rozdziale 3 Doktorant podjął zagadnienia współpracy układu redukcji ciśnienia gazu z układem skraplania gazu ziemnego. W pierwszej kolejności dokonał on prezentacji trzech różnych możliwych sposobów współpracy:

- układu LNG oraz stacji redukcyjnej współpracujących równolegle, przy wykorzystaniu kotłowego ogrzewania gazu przed ekspanderem;
- układu LNG oraz stacji redukcyjnej współpracujących równolegle, przy wykorzystaniu ogrzewania gazu przed ekspanderem za pomocą ciepła odpadowego generowanego przez silnik spalinowy z ewentualnym dogrzewaniem przez kocioł;
- układu kombinowanego z rozprężaniem dwustopniowym, w którym równoległa prac układu LNG i stacji redukcyjnej następuje po pierwszym stopniu rozprężania gazu.

Do analizy wzięto 6 wydajności od 1.9 do 189.2 m<sup>3</sup> na dobę. Dla tych wariantów oraz skal wielkości układu przeanalizowano sprawności energetyczne oraz egzenergetyczne, a także dokonano obliczenia kosztu termo-ekologicznego. W pracy przeanalizowano w sposób krytyczny dostępne technologie oczyszczania gazu ziemnego oraz oczyszczania gazu z dwutlenku węgla oraz związane z nimi uwarunkowania techniczne oraz wymagane nakłady energetyczne – zwłaszcza dla metody adsorpcyjnej usuwania zawilgocenia z wykorzystaniem sit molekularnych. Wykonano także analizę ekonomiczną, nie obejmującą jednakże kosztów inwestycyjnych rozpatrywanych układów. W końcowej części rozdziału dokonano krytycznego podsumowania uzyskanych rezultatów, biorąc także pod uwagę uwarunkowania techniczne i eksploatacyjne.

W Rozdziale 4 podjęto zagadnienie opracowania zintegrowanego układu stacji redukcyjnej wraz ze stacją skraplania gazu ziemnego w małej skali w taki sposób, aby całość układu nie wymagała dostarczania mocy napędowej. W tym celu Doktorant wskazał, że w procesie rozprężania gazu celowo należy doprowadzić do uzyskania niskich temperatur umożliwiających proces częściowego skraplania gazu. Rozpatrzył on przy tym możliwość zastosowania do całkowitego skroplenia gazu obiegu z azotem (NEC), z mieszaniną czynników roboczych (SMR) oraz układu kaskadowego (CLU) z zastosowaniem kaskad metanu, etanu i propanu. Dla tych wariantów przeprowadzono analizę energetyczną oraz egzenergetyczną. W analizie tej uwzględniono nakłady energetyczne związane z oczyszczaniem gazu ziemnego z zawilgocenia oraz dwutlenku węgla. W dalszej części rozdziału zamieszczono rozszerzoną analizę egzenergetyczną w oparciu o analizę endogenicznego oraz egzogenicznego niszczenia egzergii, a także nieuniknioną oraz możliwą do uniknięcia destrukcję egzergii. W szczególności zaprezentowano sposób ekstrapolacyjnego oszacowania endogenicznego niszczenia strumienia egzergii w określonym komponencie analizowanego układu. Analizą objęto 6 różnych wydajności układu (analogicznie do wydajności rozważanych w Rozdziale 3). Analizie podjęto efekty energetyczne oraz egzenergetyczne wskazując przy tym na poziomy destrukcji strumienia egzergii w poszczególnych elementach składowych rozpatrywanych układów. Dokonano podsumowania uzyskanych wyników w aspekcie wyboru konfiguracji zespolonego układu redukcji i skraplania gazu ziemnego, w tym przypadku jest to układ z mieszaniną czynników roboczych (SMR).

W Rozdziale 5 Doktorant przedstawił metodę optymalizacji "rojem cząstek", ang. *Particle Swarm Optimisation* (PSO). Następnie sformułował funkcję celu obejmującą sprawność egzenergetyczną, koszt termo-ekologiczny oraz energochłonność procesu. Doktorant wskazał, że z uwagi na brak dostępnych bibliotek własności termodynamicznych w wykorzystywanym oprogramowaniu – zaszła konieczność opracowania własnego kodu do obliczeń równowagi fazowej w procesie separacji faz oraz skraplania gazu ziemnego o zadanym składzie. Wobec powyższego Doktorant opracował algorytm obliczenia równowagi fazowej z zastosowaniem

wybranych równań stanu. W opracowanym modelu równowagi faz wystąpił problem dotyczący określenia parametrów azotu – wymagający przyjęcia do obliczeń niefizycznych parametrów stanu nasycenia (ekstrapolowanych ponad punkt krytyczny), wobec czego Doktorant zaproponował zastosowanie modelu z zastosowaniem równania stanu Soave-Redlicha-Kwonga oraz empirycznych reguł mieszania, umożliwiających wykorzystanie tego równania dla mieszaniny gazów. Na tej podstawie wykorzystano równanie fugatywności dla faz, co w konsekwencji pozwoliło na określenie stanu równowagi fazowej. Doktorant przedstawił algorytm obliczeń równowagi fazowej. Dalej, w zakresie opracowania optymalnych parametrów pracy rozpatrzył cztery warianty zmiennych decyzyjnych:

- tylko jedną zmienną: stosunek strumienia masy gazu kierowanego do dystrybucji do strumienia masy gazu kierowanego do skroplenia – bez uwzględnienia układu oczyszczania gazu ziemnego;
- tylko jedną zmienną: stosunek strumienia masy gazu kierowanego do dystrybucji do strumienia masy gazu kierowanego do skroplenia – z uwzględnieniem układu oczyszczania gazu ziemnego;
- wiele zmiennych: oprócz powyższej wskazanego stosunku strumieni mas, także różnicę temperatur w wymienniku skraplającym oraz stopnie sprężania dla trzech sprężarek – bez uwzględnienia układu oczyszczania gazu ziemnego;
- wiele zmiennych: oprócz powyższej wskazanego stosunku strumieni mas, także różnicę temperatur w wymienniku skraplającym oraz stopnie sprężania dla trzech sprężarek – z uwzględnieniem układu oczyszczania gazu ziemnego.

W dalszej części rozdziału zostały przedstawione uzyskane rezultaty dla wszystkich wariantów optymalizacji, przy czym dla wariantu drugiego (z wieloma zmiennymi) analizie poddano wpływ zmiennych decyzyjnych na uzyskiwaną cząstkową funkcję celu. W podsumowaniu wskazano, że w wyniku optymalizacji uzyskano istotną poprawę sprawności egzergetycznej dla jednej zmiennej 86.44% oraz znacznie wyższą przy zastosowaniu wielu zmiennych decyzyjnych 91.69%, przy czym dla obydwu wariantów układ cechuje zerowa energochłonność. Wykazano, że uwzględnienie nakładów energetycznych na oczyszczanie gazu spowodowało dla wariantu z jedną zmienną decyzyjną marginalny spadek sprawności (na poziomie 0.1 %), natomiast dla wariantu z wieloma zmiennymi decyzyjnymi spadek sprawności egzergetycznej o około 2%. Zbliżone konkluzje uzyskano także w zakresie kosztu termoeconomicznego. Dla rozpatrywanych wariantów optymalizacji określono zasadnicze parametry techniczne dla zintegrowanej stacji redukcyjno-skraplającej o wydajności na poziomie około 3 000 ton LNG/a.

W Rozdziale 6 przedstawiono opis układu zgłoszonego do zastrzeżenia patentowego, obejmujący stację redukcyjną przeznaczoną do współpracy z systemem skraplania (zgłoszenie patentowe P.436762).

W Rozdziale 7 Doktorant dokonał podsumowania zawartych w rozprawie prac analitycznych oraz uzyskanych rezultatów. W szczególności dokonał porównania poszczególnych wariantów zintegrowanego układu rozważanych na poszczególnych etapach pracy i wykazał istotny postęp w zakresie osiągalnej sprawności egzergetycznej układu redukcyjno-skraplającego przy zerowej jego energochłonności.

#### **IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy**

Recenzowana rozprawa dotyczy kluczowych zagadnień z punktu widzenia aktualnych problemów energetyki gazowej. Zaproponowano oryginalne ujęcie zagadnienia integracji

stacji redukcyjnych i systemów magazynowania gazu w postaci skroplonej dla lokalnych potrzeb. Wykazano w pracy, że możliwe jest takie skonfigurowanie układu, aby uzyskać jego zerową energochłonność i zapewnić jak najbardziej efektywne zagospodarowania zasobów egzergii. Podejmowane przez Doktoranta analizy wnoszą także istotny wkład w zakresie metodyki analiz egzergetycznych z uwzględnieniem kosztu termo-ekologicznego. Niewątpliwie rozważane w rozprawie zagadnienia osiągnięcia jak najwyższej efektywności egzergetycznej przy zerowej energochłonności w zakresie przesyłu skraplania gazu ziemnego - należy do ważnych i otwartych problemów naukowych oraz technicznych. Zostały one podjęte przez Doktoranta w sposób oryginalny, twórczy oraz z zastosowaniem właściwych narzędzi metodycznych. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej zaprezentowano dojrzały warsztat pracy badawczej w obszarze nauk technicznych, w tym zwłaszcza w obszarze energetyki gazowej.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie racjonalnego rozwiązania zintegrowanego układu redukcji ciśnienia gazu ziemnego z układem skraplania – cechującego się zerową energochłonnością i bardzo wysoką sprawnością egzergetyczną;
- opracowanie szczegółowej metodyki zaawansowanej analizy egzergetycznej układów dystrybucji i skraplania gazu ziemnego oraz zastosowanie zaawansowanej metody optymalizacji do predykcji parametrów umożliwiających uzyskanie wysokiej sprawności egzergetycznej w tychże układach.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane. Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą wkład poznawczy w dziedzinie energetyki — mieszczących się w obszarze dotyczącym dyscypliny: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

## **V. Wartości użytkowe rozprawy**

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie bardzo duży walor aplikacyjny, wynikający wprost z jej tematyki, charakteru oraz zakresu rzeczowego. W rozprawie doktorskiej podjęto zagadnienia optymalnej konfiguracji oraz parametrów pracy zintegrowanego układu redukcji ciśnienia i skraplania gazu ziemnego, w którym realizowany ma być proces skraplania w warunkach zerowego zapotrzebowania na moc napędową. Opracowane rozwiązanie może zostać aplikowane dla mniejszych odbiorców gazu. Rozwiązanie stacji redukcyjnej stanowiącej element zintegrowanego układu - zostało zgłoszone do ochrony patentowej. W pracy sformułowano szereg wartościowych rekomendacji aplikacyjnych bazujących na przeprowadzonych pracach analitycznych. Niewątpliwie przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej prace badawcze otwierają nowe możliwości aplikacyjne w obszarze związanym z nowoczesną energetyką gazową.

## **VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

### **VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym**

W rozprawie zaprezentowano oryginalne ujęcie podejmowanego zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie materiał wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi,

mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają raczej charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny.

1. W rozprawie warto byłoby podjąć także zagadnienia innych alternatywnych sposobów wykorzystania egzergii odpadowej w układach LNG, w tym przede wszystkim wykorzystania egzergii ciekłego LNG przy jego regazyfikacji. Z pewnością poszerzenie spektrum rozpatrywanych źródeł odpadowej egzergii na ten obszar mogłoby wnieść także dodatkowe możliwości rozwojowe dla lokalnych stacji redukcyjno-skrapających gazu ziemnego.
2. W rozprawie w wielu miejscach Doktorant odnosi się do faktu, że część danych pozyskana została w wyniku realizacji projektów przemysłowych – nie precyzując jednakże informacji dotyczących tychże projektów. Przykładowo, w Rozdziale 2.1.1 podaje się minimalny stosunek ciśnień ustalony na podstawie raportu, co do którego nie zamieszczono informacji identyfikujących to źródło. W tym samym rozdziale powołano się na nie sprecyzowaną „ofertę techniczną”, do której odniesiono równanie (5) – str. 46. Nie podano także źródła literaturowego dla przyjętych wartości współczynników korekcyjnych dla stacji zasilającej miasto (Rozdział 2.1.2). Na str. 49 powołano się na „symulację danej turbiny w programie GatceCycle na podstawie znanych parametrów”. Nie podano jednakże informacji identyfikujących tę symulację. Na str. 50 zamieszczono dane dotyczące ciepła odpadowego ze spalin – nie podając źródeł dla podanych informacji. Na str. 54 powołano się na rezultaty oszacowanej mocy cieplnej odpadowej „w ramach wykonywanej pracy przemysłowej” – nie precyzując jednakże informacji pozwalających na jej identyfikację.
3. Przy analizie miejskiej stacji redukcyjnej założono uśrednione parametry przyjmując ciągłą pracę stacji zamiast rzeczywistej, która ma charakter przerywany. W tym kontekście warto byłoby dodatkowo rozważyć, czy analizowany układ zintegrowany, będący meritum analizowanej pracy doktorskiej może być wrażliwy na pracę w warunkach przerywanych.
4. W Rozdziale 3.2.2 oraz Rozdziale 3.3.3 rozważa się zagadnienia opłacalności eksploatacji układów o różnych konfiguracjach – jednakże bez uwzględnienia kosztów inwestycyjnych. W przypadku układów o bardziej złożonej budowie uwzględnienie tychże kosztów mogłoby wnieść dodatkowy punkt widzenia w zakresie analizy ich opłacalności.
5. Wskazane byłoby zamieszczenie w pracy zestawu substancji roboczych pracujących w analizowanym układzie skraplania typu SMR. Warto byłoby także zamieścić w pracy przyjęte parametry pracy dla poszczególnych wymienników ciepła w analizowanych układach typu NEC, SMR oraz CLU.
6. Warto byłoby wskazać, czy w analizie egzergetycznej w Rozdziale 4.3 uwzględniono straty egzergii w zaworach dławiących, gdyż strat tych nie uwzględniono w zamieszczonych w tym rozdziale tabelach z wynikami obliczeń.
7. W Rozdziale 5.2 zamieszczono dyskusję w zakresie przyjętej funkcji celu. Warto byłoby w tym miejscu wskazać, czy w tak sformułowanej funkcji celu koszt termo-ekologiczny należy traktować jako wielkość całkowicie niezależną od sprawności egzergetycznej.

## **VI. 2. Uwagi porządkowe**

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Poniżej zawarte uwagi

nie wpływają na moją jednoznacznie bardzo wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwalam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

- W rozdziale 1.1 Doktorant wspomniał o możliwości zastosowania gazu ziemnego jako czynnika w układach chłodniczych bądź klimatyzacyjnych – co z uwagi na wymagania techniczne może dotyczyć jedynie zastosowania czystych węglowodorów.
- Właściwszym tytułem dla Rozdziału 2.3.2 jest: „Generator termoelektryczny”.
- Dla niektórych cytowanych prac zamieszczono wystarczająco precyzyjne dane umożliwiające ich jednoznaczną identyfikację, np. [9], [23], [36], [92].

## VII. Uwagi końcowe

Praca jest starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono w niej wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami termodynamicznymi zachodzącymi w układach przesyłu gazy, stacjach redukcyjnych i układach skraplania gazu ziemnego. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

## VIII. Wniosek do Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla termodynamiki oraz energetyki. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak poziomowi oryginalności osiągnięć poznawczych oraz metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty aplikacyjne, gdyż opracowane rozwiązanie możliwe jest do wdrożenia w energetyce gazowej. W moim przekonaniu Doktorant opanował warsztat pracy badawczej w dziedzinie nauk technicznych. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Pajączka spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.