

prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 08.02.2022 r.

R E C E N Z J A N R 2

poprawionej rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Pajączka nt.:

„Analiza i optymalizacja układu skraplania gazu ziemnego wykorzystującego egzergię odpadową z systemu przesyłu i dystrybucji gazu”

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina – pismo z dnia 24 stycznia 2022 roku. Ocenie podlegała poprawiona wersja pracy uwzględniająca wymagane poprawki sugerowane przez recenzenta prof. dr hab. inż. Stanisława Nagy.

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Wojciech Kostowski, prof. PŚ.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 181 stron i została podzielona na siedem rozdziałów. Dodatkowo podano: spis tablic, spis rysunków, wykaz literatury oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. W treści rozprawy zawarte są:

1. **Wstęp**, gdzie zwrócono uwagę na coraz większe znaczenie ekologicznych źródeł energii, w szczególności gazu ziemnego, który może być dostarczany w postaci ciekłej lub gazowej. Podano także cel pracy oraz dokonano przeglądu literatury w zakresie wykorzystania energii i egzergii odpadowej w systemie gazowym oraz możliwości ulepszenia procesu skraplania gazu ziemnego, a także analizy egzergetycznej jednostek wytwarzających LNG oraz sposobów optymalizacji procesu skraplania.
2. **Identyfikacja źródeł energii odpadowej**, którą przeprowadzono na podstawie wybranych dwóch tłoczni, dwóch stacji redukcji ciśnienia na tłoczni oraz jednej „wirtualnej” stacji miejskiej. Główny nacisk położono na identyfikację źródła ciepła odpadowego dostępnego w stacjach redukcyjnych.
3. **Współpraca linii skraplania gazu ziemnego ze stacją redukcyjną w modelu blackbox**, gdzie przedstawiono propozycję układu skraplania gazu ziemnego zintegrowanego ze stacją redukcyjną wyposażoną w ekspander gazu. Przedstawiono sposoby oczyszczania gazu i usuwania dwutlenku węgla. Na podstawie przeprowadzonych analiz podano wyniki bilansu energii i egzergii oraz wyniki analizy ekonomicznej.

4. **Głęboka integracja stacji redukcyjnej z linią skraplania gazu ziemnego**, gdzie zaproponowano model, który przewiduje połączenie tych dwóch układów, w celu stworzenia zintegrowanego jednego układu produkującego LNG oraz dostarczającego gaz ziemny do odbiorcy. Pozwoliło to na zwiększenie sprawności obu tych procesów przy wykorzystaniu potencjału egzergii wysokiego ciśnienia gazu przed redukcją. Treść rozdziału wzbogacono o informacje związane z problematyką oczyszczania gazu ziemnego.
5. **Optymalizacja parametrów pracy jednostki redukcyjno-skraplającej**, którą przeprowadzono w oparciu o model optymalizacji „roju cząstek”. Pozwoliło to określić układ integracji, który najlepiej spełnia oczekiwania założonego celu pracy oraz posiada dość wysoki potencjał do dalszego rozwoju.
6. **Zgłoszenie patentowe**, które opracowano na podstawie uzyskanych wyników z optymalizacji układu jednostki redukcyjno-skraplającej. Zaproponowano projekt stacji redukcyjnej umożliwiającej wstępne ochłodzenie gazu ziemnego przed jego skropleniem oraz wykroplenie ciężkich węglowodorów z tego strumienia gazu.
7. **Podsumowanie**, gdzie opisano zakres przeprowadzonych prac, uzyskane efekty i wnioski.
8. **Literatura** zawierająca 107 pozycji literatury polskiej i zagranicznej w postaci artykułów naukowych, pozycji książkowych i stron internetowych.
9. **Spis rysunków i tablic.**

2. Cel i zakres pracy

Doktorant podał, że celem pracy jest zaprojektowanie jednostki skraplającej w mini skali, która będzie charakteryzować się zerową energochłonnością. Jest to jednostka skraplająca gaz ziemny, która korzysta z egzergii odpadowej dostępnej w sieci przesyłu lub dystrybucji gazu ziemnego. Mając na uwadze uzyskanie celu pracy Doktorant przeprowadził analizę literatury dotyczącej wykorzystania energii i egzergii odpadowej w systemie gazowym oraz możliwości ulepszenia procesu skraplania gazu ziemnego, analizy egzergetycznej jednostek wytwarzających LNG i sposobów optymalizacji procesu skraplania. Na podstawie przeprowadzonych analiz zaplanował wykorzystanie najpopularniejszych jednostek skraplania gazu ziemnego, to jest rozprężania gazu (*Nitrogen Expansion Cycle – NEC*), pojedynczego mieszanego czynnika (*Single Mixed Refrigerant SMR*), cyklu z mieszanym czynnikiem chłodniczym i wstępnym schładzaniem przy użyciu propanu (*C3 Mixed Refrigerant 3CMR*) oraz skraplania przy użyciu kaskady wielu czynników (*Mixed Fluid Cascade Process MFCP*). Przeprowadził identyfikację potencjalnych źródeł energii odpadowej, na podstawie której wybrał źródła egzergii, dla których przeprowadził wielowariantową analizę termodynamiczną układu skraplania gazu ziemnego zintegrowanego z zaproponowanym układem odzysku egzergii odpadowej. Wariant o najlepszych parametrach, czyli o najniższej energochłonności zoptymalizował przy użyciu dedykowanego programu optymalizacyjnego. Na podstawie optymalizacji opracował projekt jednostki skraplającej, zintegrowany z układem odzysku egzergii o zerowej energochłonności i możliwie najwyższej sprawności. W ramach powyższego zakresu działań i uzyskanych rezultatów Doktorant w pełni osiągnął postawiony cel swojej pracy.

3. Rozwinięcie zakresu pracy

Tematyka przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej dotyczy poszukiwania nowych rozwiązań w zakresie lepszego wykorzystania energii pierwotnej poprzez zastosowanie nowych rozwiązań w gospodarce skojarzonej. Malejące rezerwy paliw konwencjonalnych zmuszają do podwyższania sprawności i efektywności energetycznej maszyn i urządzeń, które je wykorzystują. Z tego punktu widzenia zaproponowany temat rozprawy oceniam bardzo pozytywnie zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym. Mając na uwadze pełną realizację zaproponowanej tematyki Doktorant podjął próbę wykonania modelu jednostki skraplającej gaz ziemny, która korzysta z egzergii odpadowej dostępnej w sieci przesyłu lub dystrybucji gazu ziemnego i będzie charakteryzować się zerową energochłonnością.

W rozdziale pierwszym pracy, po zwróceniu uwagi na coraz większe znaczenie ekologicznych źródeł energii, dokonano krótkiej charakterystyki gazu ziemnego, opisano jego światowe zasoby, system dystrybucji i przesyłu. Szczególną uwagę zwrócono na skroplony gaz ziemny (LNG), opisując cztery technologie jego skraplania, w tym: rozprężania gazu (*Nitrogen Expansion Cycle* – NEC), pojedynczego mieszanego czynnika (*Single Mixed Refrigerant* SMR), cyklu z mieszanym czynnikiem chłodniczym i wstępnym schładzaniem przy użyciu propanu (*C3 Mixed Refrigerant* 3CMR) oraz skraplania przy użyciu kaskady wielu czynników (*Mixed Fluid Cascade Process* MFCP). Znaczną część rozdziału pierwszego poświęcono opisaniu przygotowania gazu ziemnego do procesu skraplania, w tym jego osuszaniu i usuwaniu dwutlenku węgla i siarkowodoru. Zaprezentowano obecnie stosowane technologie w tym zakresie podając schematy instalacji wraz z ich opisem. Po przedstawieniu celu pracy dokonano oceny stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy.

Rozdział drugi poświęcono identyfikacji źródeł egzergii odpadowej, którą przeprowadzono na podstawie wybranych dwóch tłoczni, dwóch stacji redukcji ciśnienia na tłoczni oraz jednej „wirtualnej” stacji miejskiej. Opisano wykorzystywane praktycznie stacje redukcyjne, tłocznie i sposoby wykorzystania ciepła odpadowego. Na podstawie identyfikacji i analizy możliwości wykorzystania źródeł egzergii odpadowej, dostępnej w systemie przesyłu i dystrybucji gazu wybrano stacje redukcyjne, jako główne źródło egzergii odpadowej. Wynika to ze stabilności pracy stacji redukcyjnych, produkowanej przez nie ilości energii elektrycznej oraz dużą ich ilość w systemie przesyłu i dystrybucji gazu ziemnego w Polsce.

W rozdziale trzecim przedstawiono propozycję układu skraplania gazu ziemnego zintegrowanego ze stacją redukcyjną wyposażoną w ekspander gazu w modelu tzw. „Black box”, co pozwoliło na wstępne oszacowanie zmniejszenia energochłonności jednostki skraplającej gaz ziemny oraz analizę pracy zaproponowanego układu. Zaproponowana metodyka badań obejmowała opracowanie bilansu energii i egzergii, przepływów finansowych, kosztu termoeologicznego, przeprowadzenie analizy ekonomicznej i określenia egzergii koncentracji. Integracja w modelu „Black box” wykazała, że pod względem sprawności egzergicznej oraz energetycznej, jak i opłacalności ekonomicznej moduły skali małej i mini spełniają założone oczekiwania. Na wniosek jednego z recenzentów rozdział wzbogacono o szczegółowy opis oczyszczania gazu ziemnego. W wyniku przeprowadzonej analizy podano zalecenia w zakresie zmniejszenia energochłonności takiego procesu. Ponadto podano informacje na temat usuwania dwutlenku węgla z gazu przed jego skropleniem.

W rozdziale czwartym przeprowadzono głęboką integrację systemu skraplania gazu ziemnego i stacji redukcyjnej wyposażonej w ekspander gazu ziemnego. Zaprezentowany model przewidywał połączenie tych dwóch układów, w celu stworzenia zintegrowanego jednego układu produkującego LNG oraz dostarczanie gazu ziemnego do odbiorcy. Zabieg ten pozwolił na zwiększenie sprawności obu tych procesów przy wykorzystaniu potencjału eg-

zergii wysokiego ciśnienia gazu przed redukcją. W rozdziale przedstawiono zaprojektowany układ skraplania zintegrowany w skali mini ze stacją redukcyjną o zerowej energochłonności. Podano uzyskane wyniki w zakresie oczyszczania gazu, bilansu energii i egzergii, energochłonności procesów, kosztu termoeologicznego itp.

Rozdział piąty zawiera wyniki optymalizacji parametrów pracy jednostki redukcyjno-skrapającej w oparciu o model optymalizacji heurystycznej „roju cząstek” (PSO – *Particle Swarm Optimization*), która z powodzeniem była zastosowana w wielu obszarach badawczych i aplikacyjnych. Optymalizowano parametry pracy jednostki redukcyjno-skrapającej w celu zwiększenia sprawności egzergetycznej, zmniejszenia kosztu termoeologicznego oraz energochłonności układu. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano wysokosprawy, zero-energochłonny układ jednostki redukcyjno-skrapającej. Wykazano, że sprawność egzergetyczną jednostki skraplania gazu ziemnego można zwiększyć z poziomu referencyjnego 30% do poziomu 90% po zastosowaniu wyników optymalizacji układu.

Na podstawie uzyskanych wyników badań zostało przedstawione podsumowanie rozprawy, które potwierdza słuszność zastosowanych nowych rozwiązań konstrukcyjnych, związanych z odzyskiem energii odpadowej w układzie. W treści rozprawy przedstawiono projekt modelu jednostki skraplającej w mini skali, która charakteryzuje się zerową energochłonnością. Oznacza to, że cel pracy został osiągnięty w całości. Układ pracy oceniam jako właściwy, a zastosowane metody badawcze w postaci analiz teoretycznych i procedur obliczeniowych są adekwatne do rozwiązywanych problemów.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Zaproponowany przez Doktoranta temat rozprawy doktorskiej wynika z potrzeby prowadzenia prac badawczych w zakresie podnoszenia sprawności maszyn i urządzeń energetycznych oraz lepszego wykorzystania energii pierwotnej paliw konwencjonalnych. Pomimo licznych publikacji w tym zakresie problematyka ta nie została jeszcze w pełni zbadana i opisana. Istnieje dalsza potrzeba prowadzenia prac badawczych. Wynika to z konieczności poprawy konstrukcji i lepszego wykorzystania urządzeń energetycznych oraz wzajemnego ich kojarzenia. Pozwoli to na osiągnięcie efektu synergii i wzrostu współczynników sprawności i efektywności działania. Doktorant zaproponował cel swojej rozprawy, co pozwoliło uzyskać wymierne osiągnięcia, do których należy zaliczyć:

- a) Przeprowadzenie analizy danych pomiarowych z rzeczywistych obiektów dwóch stacji redukcyjnych zasilających tłocznie, dwóch tłoczni gazu oraz dziesięciu stacji redukcyjnych miejskich, która pozwoliła na wybranie stacji redukcyjnych jako główne źródło egzergii odpadowej.
- b) Opracowanie układu skraplania gazu ziemnego zintegrowanego ze stacją redukcyjną wyposażoną w ekspander gazu, z uwzględnieniem konieczności oczyszczania gazu ziemnego przed skropleniem w modelu, tzw. „Black box”, co pozwoliło na wstępne oszacowanie zmniejszenia energochłonności jednostki skraplającej gaz ziemny i wykazanie, że pod względem sprawności egzergetycznej oraz energetycznej, jak i opłacalności ekonomicznej moduły na granicy skali małej i mini spełniają założone oczekiwania.
- c) Opracowanie modelu łączącego system skraplania gazu ziemnego i stację redukcyjną wyposażoną w ekspander gazu ziemnego, co pozwoliło na zwiększenie sprawności zachodzących tam procesów przy wykorzystaniu potencjału egzergii wysokiego ciśnienia gazu przed redukcją i zaproponowanie układu skraplania zintegrowanego w skali mini ze stacją redukcyjną o zerowej energochłonności. Ze względu na rodzaj połączenia tych

dwóch układów przeprowadzono również analizę energochłonności procesu oczyszczania gazu ziemnego oraz uwzględniono jej wyniki w podsumowaniu pracy całego układu.

- d) Przeprowadzenie optymalizacji parametrów pracy jednostki redukcyjno-skrapłającej w oparciu o model optymalizacji heurystycznej „roju cząstek”, co pozwoliło wykazać, że sprawność egzergetyczną jednostki skraplania gazu ziemnego można zwiększyć z poziomu referencyjnego 30% do poziomu 90% po optymalizacji układu.
- e) Wykazanie, że potencjał wysokiego ciśnienia gazu w sieci gazowej jest najlepszym źródłem energii odpadowej, która może zasilać jednostkę skraplającą.
- f) Zbudowanie modelu „czarnej skrzynki” (Black box), który dobrze opisuje badane układy oraz pozwala na wykonanie analizy energetycznej, egzergetycznej, ekonomicznej oraz termoeologicznej.
- g) Opracowanie modelu skraplania gazu ziemnego w wersji wstępnej i hybrydowej, gdzie Doktorant wykazał się dużym zasobem wiedzy w zakresie przemian fazowych roztworów wieloskładnikowych. Opracowane modele pozwoliły na wielowariantową optymalizację jednostki redukcyjno-skrapłającej, którą wykonano w czterech wariantach. Wariant pierwszy odzwierciedlał prostsze podejście do projektowania lub modernizacji stacji, wariant drugi był bardziej złożony i brał pod uwagę więcej zmiennych decyzyjnych. Warianty 3 i 4 były rozszerzeniem poprzednich wariantów o moduł oczyszczania gazu ziemnego.
- h) Zastosowanie analizy egzergetycznej w analizie pracy układów energetycznych związanych ze skraplaniem i odparowaniem gazu ziemnego. Analiza ta daje większe możliwości i bardziej obiektywne i przydatne w praktyce wyniki w stosunku do analizy energetycznej.
- i) Dokonanie zgłoszenia patentowego dotyczącego projektu stacji redukcyjnej zdolnej do wstępnego ochładzania gazu ziemnego przed skropleniem oraz do wykroplenia ciężkich węglowodorów z podawanego strumienia gazu.

Reasumując należy stwierdzić, że Doktorant opracował oryginalne i wartościowe rozwiązania koncepcyjne pozwalające na wzrost sprawności i efektywności urządzeń energetycznych we wzajemnym skojarzeniu. Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac koncepcyjnych, badań modelowych, analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma przede wszystkim duże znaczenie aplikacyjne. Dotyczy ona bardzo istotnego problemu lepszego wykorzystania maszyn i urządzeń energetycznych. Ciągły wzrost cen surowców energetycznych oraz malejące zasoby konwencjonalnych źródeł energii wymuszają konieczność poszukiwania nowych rozwiązań o wyższej sprawności i efektywności pracy. Istotnym jest budowa urządzeń pozwalających na znaczne zwiększenie ilości wykorzystanej energii poprzez pobór jej ze źródeł energii odpadowej. Zaproponowane przez Doktoranta urządzenie w postaci jednostki skrapłającej w mini skali, które charakteryzuje się zerową energochłonnością jest cennym osiągnięciem, które znajdzie zastosowanie w praktyce gazowniczej. Jest to jednostka skraplająca gaz ziemny, która korzysta z energii odpadowej dostępnej w sieci przesyłu lub dystrybucji gazu ziemnego. Oznacza to, że nie jest potrzebna dodatkowa energia dostarczana z zewnątrz, co nie zwiększa kosztów eksploatacyjnych a zmniejsza koszt termoeologiczny oraz energochłonność układu. Również cennym jest

wykazanie, że można zwiększyć sprawność egzergetyczną jednostki skraplania gazu ziemnego z poziomu referencyjnego 30% do poziomu 90% po optymalizacji układu, co znacznie zwiększa atrakcyjność handlową nowego rozwiązania. Zapewne spowoduje to wzrost zainteresowania nowym rozwiązaniem wśród projektantów, konstruktorów i eksploatorów sieci gazowniczych różnego typu.

Prezentowana rozprawa jest istotnym wkładem Autora w zakresie poszukiwania nowych rozwiązań i ich wdrożenia do projektowania i eksploatacji urządzeń energetycznych pracujących w skojarzeniu. Jest to szeroko pojęte działanie zmierzające do racjonalnego gospodarowania energią pierwotną, lepszego jej wykorzystania i zwiększenia jej oszczędności.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. W rozdziale pierwszym dokonano oceny stanu wiedzy na podstawie przeglądu literatury w zakresie wykorzystania energii i egzergii odpadowej w systemie gazowym oraz możliwości ulepszenia procesu skraplania gazu ziemnego, a także analizy egzergetycznej jednostek wytwarzających LNG oraz sposobów optymalizacji procesu skraplania. Szkoda, że Doktorant na zakończenie tego rozdziału nie dokonał podsumowania uzyskanych informacji z wykazaniem dlaczego podjął tematykę rozprawy. Należało również wskazać kierunki dalszych badań wynikające z analizy literatury.
2. W rozdziale 2 wyraźnie brakuje ogólnego schematu ideowego, z którego wynikałaby koncepcja wykorzystania egzergii odpadowej.
3. Autor zastosował metodę prowadzenia obliczeń w postaci modelu blackbox zakładając, że czytelnik posiada pełną wiedzę w tym zakresie. Wskazanym byłoby podanie krótkiego opisu tej metody w zastosowaniu do rozważanej tematyki.
4. W rozdziale 3.2. Autor opisuje bilanse energii i egzergii dla współpracy linii skraplania gazu ziemnego ze stacją redukcyjną. Przed rozpoczęciem prowadzenia przedstawionych analiz należało przestawić równania definicyjne bilansu energii i bilansu egzergii w ujęciu ogólnym i na ich podstawie prowadzić dalsze rozważania.
5. W rozdziale 4.3 Doktorant przedstawił wyniki wykonanych analiz i obliczeń w zakresie bilansu energii i egzergii stwierdzając, że integracja jednostek skraplających w dużej skali jest niekorzystna. W podanym opisie brak jest jednak wnikliwej analizy wskazującej co jest tego przyczyną. Wskazanym by było rozwinięcie uzasadnienia tego stwierdzenia.
6. W prezentowanej rozprawie użyto pojęcia „zerowa energochłonność” co sugeruje, że urządzenie ma charakter „perpetuum mobile”. Należy wyraźnie wyjaśnić znaczenie tego określenia w stosunku do analizowanego układu termodynamicznego.

Uwagi edytorskie

- ogólne

1. Należy podkreślić wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę wysoka jakość opracowania całego maszynopisu.

2. W pracach naukowych, opracowaniach książkowych, zwyczajowo nie stawia się kropek w podpisach rysunków i tablic. W opiniowanej rozprawie znaki kropek w/w miejscach są zbędne.
3. W wersji poprawionej pracy Doktorant uwzględnił większość wskazanych w pierwszej opinii błędów edytorskich, tym nie mniej jeszcze kilka pozostało, co wykazano poniżej.

- szczegółowe

1. Na str. 21, 10 wiersz od góry jest zapis „*Gdy czynnik osiągnie wymagane wysokie ciśnienie to fazy te są mieszane ze sobą...*”. Powinno być „*Gdy czynnik osiągnie wymagane wysokie ciśnienie, to fazy te są mieszane ze sobą...*”.
2. Na str. 22, 11 wiersz od góry zapisano: „*.....na wlocie do drugiego do ciśnienia p_2 itd. gdzie $p_1 < p_2$ *”, powinno być „*.....na wlocie do drugiego do ciśnienia p_2 itd., gdzie $p_1 < p_2$ *”.
3. Tabela 2 na str. 26, wiersze 2, 3 i 4 od góry, jest „*MJ/m³*”, powinno być „*MJ/m³*”.
4. Na str. 27, 5 wiersz od dołu, zapisano „*...zmniejszyć prężność pary w gazie tj. osuszyć gaz.*”, powinno być: „*...zmniejszyć prężność pary w gazie, tj. osuszyć gaz.*”.
5. Na str. 37, 3 wiersz od dołu jest zapis „*...ekonomiczną optymalizację procesów skraplania...*”, powinno być „*...ekonomiczną optymalizację procesów skraplania....*”.
6. Na stronie 42, 10 wiersz od dołu zapisano „*...jest częścią pracy włożoną w sprężanie gazu...*”, powinno być „*...jest częścią pracy włożonej w sprężanie gazu...*”.
7. Na str. 49, 1 wiersz od dołu zapisano „*...odjęto ją od mocy całkowitej tak by uzyskać użyteczny potencjał....*”, powinno być „*...odjęto ją od mocy całkowitej tak, by uzyskać użyteczny potencjał....*”.
8. Na str. 55, 3 wiersz od dołu jest zapis „*Egzergię można zdefiniować jako maksymalną pracę, jaką układ termodynamiczny*”, powinno być „*Egzergię można zdefiniować jako maksymalną pracę, jaką układ termodynamiczny*”.
9. Str. 66, Tabela 4, podano produkcję LNG w kgal/dobę. Wskazaniem jest podanie, czy ma tu zastosowanie galon angielski czy amerykański.
10. Na str. 69, 11 wiersz od góry, jest zdanie bez orzeczenia „*Typowy spadek ciśnienia 0,7 kPa/m złoza*”. Powinno być „*Typowy spadek ciśnienia wynosi 0,7 kPa/m złoza*”.
11. Na str. 90, 3 wiersz od góry zapisano „*...potencjał wysokiego ciśnienia w gazu ziemnym....*”, powinno być „*...potencjał wysokiego ciśnienia gazu ziemnego*”.
12. Na str. 90, 18 wiersz od dołu zapisano „*...tak aby sprawdzić który zaprezentowany system....*”, powinno być „*...tak aby sprawdzić, który zaprezentowany system....*”.
13. Str. 151, 14 wiersz od dołu, jest zapis „*Jak można zauważyć w Tabeli 18Tabela 18 uwzględnienie energochłonności...*”, powinno być „*Jak można zauważyć w Tabeli 18 uwzględnienie energochłonności...*”.

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest rzeczowo i w sposób zrozumiały. W pracy brak jest praktycznie błędów językowych i niewiele jest błędów edytorskich. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych analiz teoretycznych i badań dotyczących nowych rozwiązań w zakresie urządzeń gospodarki skojarzonej. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie.

8. Wniosek do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu energetyki w prowadzeniu analiz i obliczeń teoretycznych oraz opracowaniu uzyskanych wyników. Obok odpowiedniego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. **Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Krzysztofa Pajączka, jako rozprawy doktorskiej** odpowiadającej warunkom określonym w artykule 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.) i o **dopuszczenie jej do publicznej obrony**. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie układów i systemów energetycznych. Wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

