

ADMINISTRACJA
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki
Wpłynęło dnia..... 09 STY. 2020
Nr..... 12..... szt.....

Gliwice, 02-01-20

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Jarosława Marcina Króla

pt. "Energy and economic analysis of a hybrid combined heat and power plant" (tłum. "Analiza energetyczno-ekonomiczna hybrydowej jednostki kogeneracyjnej z wykorzystaniem modelowania matematycznego")

wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Pawła Ocłoń, prof. PK
na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej.

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej, profesora Stanisława M. Rybickiego (pismo ŚO-520-2397/19.RKP z dnia 02.12.2019r.).

2. Wprowadzenie

Scenariusze dywersyfikacji źródeł energii pierwotnej w kraju wskazują, że w perspektywie najbliższych lat w sektorze energetycznym nadal dominującymi źródłami wytwórczymi będą jednostki scentralizowane wykorzystujące technologie węglowe. Jednakże, konieczność wykonalności zobowiązań emisyjnych, jak i innych głównych wymagań związanych z polityką klimatyczną Unii Europejskiej stawia przed Polską potrzebę modernizacji przestarzałej technologicznie, charakteryzującej się niską sprawnością wytwarzania energii elektrycznej i w dużej mierze zdekapitalizowanej krajowej energetyki. Wydaje się, że podstawową koniecznością jest przeprowadzenie niezbędnych analiz, wyniki których pozwolą na podjęcie racjonalnych procesów inwestycyjnych w krajowej energetyce.

Jednym z możliwych kierunków modernizacji krajowej energetyki jest odnowienie istniejących układów technologicznych elektrowni i elektrociepłowni, a więc zabiegi doskonalące istniejące już w nich poszczególne instalacje i urządzenia jak: modernizacja kotłów zwiększająca ich sprawność energetyczną, modernizacja układów przepływowych turbin podnosząca ich sprawność wewnętrzną, modernizacja układów chłodzenia, czy zabiegi zmniejszające elektryczne potrzeby własne bloków.

Drugą możliwością jest wykorzystanie wariantów bezinwestycyjnych skupiających się na optymalizacji pracy istniejących urządzeń. Takie rozwiązanie zaproponował Autor rozprawy. W tym celu został opracowany model matematyczny hybrydowej elektrociepłowni, który pozwala na wykonanie obliczeń ekonomicznych pokazujących rentowność proponowanych rozwiązań optymalizacyjnych.

Mając powyższe na względzie, uważam rozprawę doktorską mgr inż. Jarosława Marcina Króla pt. "Energy and economic analysis of a hybrid combined heat and power" za ważną zarówno z poznawczego jak i utylitarnego względu, a tematykę pracy za aktualną.

3. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Jarosława Marcina Króla została napisana w języku angielskim. Zawiera łącznie 99 stron, na które składa się 10 ponumerowanych kolejno rozdziałów merytorycznych, streszczenie w języku polskim, spis treści, spis ważniejszych symboli oraz spis literatury. Praca zawiera 88 rysunków, 13 tabel i 57 odnośników literaturowych. Tytuł pracy w języku polskim nie odpowiada oryginalnej wersji angielskiej. Dodano w niej bowiem sformułowanie „z wykorzystaniem modelowania matematycznego”.

Autor rozpoczął swą rozprawę od przedstawienia spisu ważniejszych symboli. Nie ustrzegł się przy tym błędów i nieścisłości:

- Wielkość „ h ” winna być nazwana „entalpią właściwą” („specific enthalpy”).
- Wielkość „ E ” została nazwana „energiją” („energy”) z jednostką wyrażoną w MWh. Tymczasem ta sama wielkość w rozdziale 5 (wzór 12) jest określona jako produkcja elektryczności („electricity production”).
- Autor nie stosuje jednostek układu SI – np. t/h.
- Wielkość $\dot{m}$ oznaczona jako strumień masowy (masowe natężenie przepływu) jest „powielona” jako wielkość $\dot{F}$ i oznaczona jako strumień masowy paliwa; należałoby pozostać przy jednym

z tych symboli i wprowadzić zasadę indeksowania (dolnego lub górnego). Wówczas wielość $\dot{m}_F$ oznaczałaby strumień masowy paliwa.

- Spis używanych indeksów powinna stanowić osobną listę.

W rozdziale 1 (str. 6-9) zatytułowanym „Introduction” („Wprowadzenie”) Autor przedstawił sytuację energetyczną Polski uwzględniając specyfikę związaną ze strukturą paliwową oraz z uwarunkowaniami prawnymi dotyczącymi w głównej mierze rosnących cen emisji dwutlenku węgla. Autor wskazał na działania, które zmierzają do tego, aby produkcja finalnych postaci energii stała się bardziej efektywna energetycznie i ekologicznie. Wskazał mechanizmy wsparcia funkcjonujące w Unii Europejskiej. Stwierdził, że wprowadzane opłaty i podatki w zasadniczy sposób wpływają na kształt sektora energetycznego, a to wymaga od operatorów systemu energetycznego poszukiwania nowych mechanizmów, które pozwolą na optymalizację pracy układów produkujących energię. Ponadto, Autor w rozdziale tym zdefiniował zakres pracy opisując model matematyczny, który został opracowany. Wskazał ponadto na trzy artykuły opublikowane w czasopiśmie „Energy Conversion and Management”, będących podstawą opracowania ocenianej Rozprawy, są to:

1. Król J., Ocioń P., Economic analysis of heat production in existing medium size combined heat and power plant, with respect to the CO₂ allowances purchasing cost, Energy Conversion and Management, 171, 2018, 110-125.
2. Król J., Ocioń P., Economic analysis of heat and electricity production in Combined Heat and Power plant equipped with steam and water boilers and natural gas engines, Energy Conversion and Management, 176, 2018, 11-29.
3. Król J., Ocioń P., Sensitivity analysis of hybrid combined heat and power plant on fuel and CO₂ allowances price change, Energy Conversion and Management, 196, 2019, 127-148.

Ponadto, Autor użył rzeczywistych danych eksploatacyjnych w celu walidacji zaproponowanego modelu.

Rozdział 2 (str. 9-17) został zatytułowany „Literature survey”. Autor umieścił w nim przegląd literatury dotyczącej poruszanego tematu. Przywołał w nim aż 54 z wszystkich 57 pozycji literaturowych wykorzystanych w Rozprawie. Czytając ten rozdział odnosi się jednak wrażenie, że zabrakło Autorowi koncepcji, według jakiego kryterium podzielić doświadczenia innych badaczy poruszających się w tematyce bliskiej Rozprawie. Co prawda na stronie 11 Autor wskazał, że badania w zakresie szeroko

pojętej energetyki skupiają się na dwóch kluczowych celach: poprawie sprawności energetycznej i obniżeniu kosztów operacyjnych, to w opisie wymienił wiele innych aspektów, które wymagałyby pogrupowania. Są to między innymi następujące zagadnienia: analiza LCA, analiza technoeconomiczna, analiza energetyczna, problem magazynowania energii, integracja układów z innymi technologiami, jak np. zgazowanie, oszczędność energii, obniżenie emisji NOx. „Zakończycielem” może być trafne podsumowanie rozdziału, które umieszczono na stronie 16 (przedostatni akapit).

W rozdziale 3 mgr inż. Jarosław Marcin Król przedstawił cel („aim”), zakres („scope”) oraz tezy („thesis”) pracy.

Celem pracy jest opracowanie matematycznego modelu energetyczno-ekonomicznego hybrydowej elektrociepłowni, który pozwoli operatorowi elektrociepłowni na wybór optymalnej z punktu widzenia rachunku ekonomicznego konfiguracji pracy elektrociepłowni. Proponowany model został wdrożony w jednej z istniejących polskich elektrociepłowni.

Zakres pracy został sformułowany tak samo jak cel pracy jako opracowanie modelu elektrociepłowni. Autor winien jednak w tym miejscu streścić zakres przeprowadzonych prac polegających nie tylko na opracowaniu modelu, ale jego testowaniu dla różnych konfiguracji i scenariuszy pracy oraz walidacji modelu w oparciu o rzeczywiste dane eksploatacyjne.

Cel pracy pozwolił na sformułowanie głównej tezy pracy, która może zostać streszczona do następującej formy: stworzenie algorytmu obliczeniowego jest odpowiedzią na zapotrzebowanie jednostek produkcyjnych o złożonej strukturze wytwórczej do przeprowadzania analiz pozwalających na bieżąco śledzić koszty i przychody z produkcji energii elektrycznej i ciepła. Algorytm jest narzędziem wspierającym podejmowanie decyzji dla najbardziej opłacalnej konfiguracji elektrociepłowni hybrydowej.

W rozdziale 4 (str. 19-21) zatytułowanym „Installation description” (Opis instalacji) Autor opisał analizowaną elektrociepłownię hybrydową. Badana instalacja składa się z trzech niezależnych jednostek wytwórczych: (1) trzy kotły parowe połączone z turbiną upustowo-kondensacyjną, (2) dwa kotły wodne, (3) dwa silniki gazowe. Te trzy niezależne systemy są podłączone do miejskiej sieci ciepłowniczej i mogą pracować równolegle bądź oddzielnie, w zależności od zapotrzebowania na ciepło. Idea optymalizacji z wykorzystaniem opracowanego algorytmu polega na znalezieniu najlepszej konfiguracji pracy

rozpatrywanej elektrociepłowni dla założonego zapotrzebowania na moc ciepłą. Mgr inż. Jarosław Marcin Król zawarł szczegółowy schemat analizowanej elektrociepłowni. Umieścić na nim ponumerowane punkty nie wyjaśniając jednak ich znaczenia.

Model matematyczny hybrydowej elektrociepłowni został przedstawiony w rozdziale 5 (str. 22-26). W kolejnych podrozdziałach od 5.1 do 5.3 Autor zaprezentował równania dla poszczególnych układów elektrociepłowni: kotłów parowych, kotłów wodnych oraz silników. Żadna z formuł nie została jednak wyprowadzona. Poza tym Autor nie wskazał źródeł pochodzenia niektórych danych.

W rozdziale 6 (str. 27-41) zatytułowanym „Detailed analysis of Combined heat and Power Plant” Doktorant dokonał analizy porównawczej pracy elektrociepłowni w układzie z pracującymi kotłami parowymi i wodnymi. Analiza wykonana została dla okresu przejściowego (24 godzin). Analiza systemu pokazała, że rozpatrywana technologia kogeneracyjna w porównaniu z tradycyjną technologią opartą na kotłach wodnych, generuje niższe zyski. Dodatkowo w rozdziale tym Autor przeprowadził analizę wpływu zmienności cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla (7, 15 i 30 EURO/Mg).

Rozdział 7 (str. 42-60) został zatytułowany „Operation of Combined Heat and Power Plant with gas engines” i stanowi rozszerzenie analizy zaprezentowanej w rozdziale 6 o uwzględnienie działania silników kogeneracyjnych. Do analizy przyjęto dane dotyczące zapotrzebowania na ciepło pochodzące z innego dnia roku niż to miało miejsce w analizie przeprowadzonej wcześniej w rozdziale 6, ale również z tzw. okresu przejściowego. Autor uwzględnił, podobnie jak we wcześniejszej analizie, koszty uprawnień do emisji dwutlenku węgla, ale również tzw. system wsparcia dla jednostek kogeneracji. Autor założył funkcjonowanie systemu wsparcia bazującego na tzw. „żółtych certyfikatach”. Jednakże Ustawa z grudnia 2018 r. o promowaniu energii elektrycznej z wysokosprawnej kogeneracji, wprowadziła nowy system wsparcia dla jednostek kogeneracji, w ramach którego nowe i znacznie zmodernizowane jednostki mogą uczestniczyć w konkurencyjnej procedurze aukcyjnej. Nowy system zastąpił dotychczasowy mechanizm bazujący na formule świadectw pochodzenia z kogeneracji.

Rozdział 8 (str. 61-82) stanowi główną część pracy. Zatytułowany został „Economic efficiency for various scenarios of operation combined CHP, gas engines with hard coal CHP and water boiler”. Autor skupił się w tej części pracy już tylko na dwóch konfiguracjach pracy elektrociepłowni: (1) dwa silniki gazowe pracujące w podstawie obciążenia cieplnego w połączeniu z kotłem parowym i turbiną upustowo-

kondensacyjną, (2) dwa silniki gazowe pracujące w podstawie obciążenia cieplnego w połączeniu z kotłem wodnym. Uwzględniono pięć różnych scenariuszy w zależności od cen paliw na rynku: (1) scenariusz 1 reprezentujący bieżącą sytuację na rynku na początku roku 2018, (2) scenariusz 2 zakładający wzrost cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla, (3) scenariusz 3 zakładający wzrost cen węgla oraz gazu ziemnego, (4) scenariusz 4 zakładający dalszy wzrost cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla oraz (5) scenariusz 5 zakładający dalszy wzrost cen węgla i gazu ziemnego. W rozdziałach od 8.1 do 8.5 Autor zaprezentował wyniki analiz dla poszczególnych scenariuszy, zaś w rozdziale 8.6 – porównanie otrzymanych wyników.

Rozdział 9 (str. 83-89) Autor zatytułował „Mathematical model verification”, ale w streszczeniu w języku polskim napisane zostało, że w rozdziale tym przeprowadzono walidację opracowanego modelu matematycznego elektrociepłowni. Pomidzy weryfikacją (jak w tytule rozdziału) a walidacją (jak w opisie) istnieje zasadnicza różnica. Weryfikację, czyli postrzeganie, można sprowadzić do odpowiedzi na pytanie: „Czy produkt tworzony jest prawidłowo?”, a z kolei walidację: „Czy tworzony produkt jest prawidłowy?”. Autorowi, sądząc po zakresie przeprowadzonych prac, chodziło o walidację. W tym celu, w oparciu o dane z pięciu dni pracy (21-25 XI 2011) układu energetycznego. Uwzględniono jedynie wolumen produkcji energii elektrycznej. Wyniki pokazały, że opracowany model jest wystarczająco dokładny.

Pracę kończy rozdział 10 – „Wnioski”.

Podsumowując stwierdzam, że tytuł rozprawy obejmuje jej zakres. Geneza tematu i uzasadnienie celowości jego podjęcia jako problemu badawczego, wynikają z przeglądu stanu wiedzy. W rozprawie postawiono cel, tezę i określono zakres badań.

Pomimo przedstawionych uwag, strukturę merytoryczną i układ recenzowanej pracy uznaję za właściwe.

4. Ocena rozprawy

Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest oryginalna, aktualna i interesująca. Na uwagę zasługuje użyty charakter prowadzonych badań. Opracowany autorski algorytm został zaimplementowany w rzeczywistym układzie elektrociepłowni hybrydowej. Autor przeprowadził szereg analiz modelowych wykorzystując rzeczywiste dane eksploatacyjne. Ponadto, model został zwalidowany.

Za główne osiągnięcia Autora pracy uważam:

- Opracowanie modelu energetyczno-ekonomicznego hybrydowej elektrociepłowni, który pozwolił na bezinwestycyjną optymalizację pracy istniejących urządzeń. Opracowany model może wspierać proces utrzymania przemysłu energetycznego opartego na spalaniu paliw kopalnych sposobem efektywny energetycznie i ekonomicznie.
- Weryfikacja opracowanego modelu matematycznego elektrociepłowni na podstawie rzeczywistych danych eksploatacyjnych z wybranych dni pracy zakładu.
- Udowodnienie, że modelowanie matematyczne hybrydowych elektrociepłowni jest ważnym narzędziem wspierającym zarządzanie operacyjne procesu jednoczesnej produkcji ciepła i energii elektrycznej.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne i dyskusyjne jakie nasunęły się podczas lektury pracy. Moim zdaniem są one istotne dla dalszej dyskusji podczas publicznej obrony:

- Opisując w punkcie 4.1. parametry pracy kotłów parowych Autor napisał, że kotły zostały zmodernizowane w latach 2000-2003 stąd charakteryzują się akceptowalną wartością sprawności. Jaka to wartość?
- Czy oznaczenia numeryczne w indeksach dolnych występujące w równaniach w rozdziale 5.1 są tożsame z numeracją umieszczoną na rysunku 4.1?
- W jaki sposób operator instalacji sformułował równanie (3) na stronie 22 oraz równanie (24) na stronie 25?
- Strona 22 – ile wynosi wartość η_{18} w równaniu (5)?
- Strona 22 – w jaki sposób otrzymano równanie (6)?

6. Strona 22 – na jakiej podstawie przyjęto wartość ciśnienia w celu obliczenia entalpii właściwej w punkcie 16?
7. Strona 23 – nie wyjaśniono co oznaczają skróty „demi”, „19CHP” oraz „19Cond”?
8. Strona 23 i dalej – ile wynosi wartość η_{el} ?
9. Strona 27 – czy dane przedstawione w tabeli 6.1 dotyczą dnia z sezonu zima/wiosna czy jesień/zima?
10. W jaki sposób operator instalacji może reagować na nadwyżki w produkcji pary w stosunku do zapotrzebowania na ciepło? Czy proponowany algorytm pozwala na płynną zmianę konfiguracji działania systemu, aby zapobiec takim nagłym sytuacjom?
11. Czy algorytm pozwala na uniknięcie sytuacji, kiedy system generuje straty przy produkcji energii elektrycznej w układzie kogeneracyjnym opartym o kotły parowe?
12. Dlaczego układ kogeneracyjny oparty o kotły parowe jest bardziej wrażliwy na wzrost cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla?
13. Strona 42 i dalej – analiza systemów nazwanych „Energy system 1” i „Energy system 2” jest powieleniem analizy zaprezentowanej w rozdziale 6, ale dotyczy innych danych.
Czy dane przedstawione w tabeli 6.1 dotyczą dnia z sezonu zima/wiosna czy jesień/zima?
Dlaczego przyjęto inne dane niż w rozdziale 6? Czy lepszym rozwiązaniem nie byłoby przeprowadzenie analiz dla obu wybranych dni w każdym z przypadków?
14. W grudniu 2019 została zakończona pierwsza aukcja na tzw. premię kogeneracyjną. Jak zmieniają się wyniki analiz dotyczących przypadków „Energy system 3” oraz „Energy system 4” po uwzględnieniu tzw. maksymalnej wysokości premii kogeneracyjnej, jaka została wypłacona uczestnikom aukcji? Czy algorytm jest „gotowy” na wprowadzanie dynamicznych zmian cen takiego wsparcia? Czy uwzględnienie tego nowego systemu, który jest bardziej złożony, rozróżnia bowiem jednostki nie tylko w zależności od rodzaju paliwa ale także rozróżnia jednostki na różnym etapie zaawansowania inwestycyjnego („istniejąca”, „modernizowana”, „znacznie modernizowana”, „nowa jednostka”) oraz z istotnym podziałem na koszyki „mocowe” – w zależności od mocy zainstalowanej elektrycznej (do 1 MW, 1–50 MW, 50–300 MW i powyżej 300 MW), podtrzyma wnioski jakie płynęły z analizy, że silniki gazowe z uwagi na wsparcie, znacząco podwyższają rentowność elektrociepłowni?
15. Rozdział 8 – który z okresów, ten z rozdziału 6 czy z 7, został przyjęty do analizy?

16. Tabela 8.1 – co było źródłem danych dla scenariusza 1?
17. Jak przyjęcie do analizy nieco szerszego okresu czasu, względnie innych dni w ciągu roku, zmieniłoby wyniki dla poszczególnych scenariuszy?
18. Rozdział 9 – dlaczego walidację modelu nie przeprowadzono dla tożsamyh dni jak analiza w rozdziałach 6, 7 i 8? Lub, odwracając pytanie, dlaczego analiza w rozdziałach 6, 7 i 8 nie została przeprowadzona dla wybranych pięciu dni pracy systemu (jak w rozdziale 9)?
19. Czy Autor widzi szansę, że opracowany algorytm może ująć swym zakresem szkodliwość ekologiczną spalin i związanych z tym opłat za korzystanie ze środowiska naturalnego?

Podkreślić należy, że powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy.

Inne uwagi, w tym edycyjne i językowe:

- Tabela 4.1 – w odniesieniu do wydajności kotła należałoby używać sformułowania „capacity” zamiast „performance”.
- Tabele od 4.1 do 4.3 – Autor nie używa jednostek z układu SI.
- Strona 26 – wielkość „I” została inaczej nazwana niż w spisie oznaczeń umieszczonym na wstępie pracy.
- Strona 26 – brak definicji stref Z0, Z1 i Z3; definicja tych stref pojawia się dopiero na następnej stronie i dotyczy stref Z0, Z1 i Z2 (nie Z3).
- Strona 29 – strumienie $\dot{Q}$ powinny być zapisane jako $\dot{Q}$. Co oznaczają symbole „*” w równaniach (37) i (38)?
- Strona 42 i 43 oraz 61 – dane są powieleniem informacji pokazanych na stronie 27.
- Strona 94 – pozycje [55], [56] i [57] nie zostały zacytowane w tekście Rozprawy.
- Strona 98 – „emisyjność CO₂” jest terminem związanym z wymianą ciepła; Autorowi zapewne chodziło o aspekt ekologiczny stąd należałoby użyć sformułowania „emisja CO₂”.

6. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że odnoszące się do rozprawy uwagi krytyczne nie mają wpływu na jej ocenę, która jest w pełni pozytywna i wysoka. Doktorant w pełni zrealizował postawione cele. Uważam, że należy podkreślić fakt, że praca została napisana w języku angielskim, a także kompleksowy charakter przeprowadzonych analiz. Autor rozprawy, mgr inż. Jarosław Marcin Król wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z treści pracy.

Na podstawie przedstawionej do recenzji pracy stwierdzam, że Doktorant wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Marcina Króla pt. "Energy and economic analysis of a hybrid combined heat and power plant" (tłum. "Analiza energetyczno-ekonomiczna hybrydowej jednostki kogeneracyjnej z wykorzystaniem modelowania matematycznego") spełnia w całości wymogi Ustawy z dnia 14.03.2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z dnia 21.06.2016r. poz. 882), także (nowej) Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce.

W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

