

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Mateusza Brzęczka,
zatytułowanej „**Analiza możliwości zwiększenia efektywności elektrowni
gazowo-parowej bez i z instalacją wychwytu i sprężania CO₂**”

1. Zasadność podjęcia tematu

Energetyka w Europie rozwija się w warunkach narastającego nacisku na redukcję emisji dwutlenku węgla, jako podstawowego gazu cieplarnianego będącego produktem procesu spalania paliw kopalnych. Układy gazowo-parowe, z uwagi na stosowane paliwo (w rozpatrywanym przypadku gaz ziemny) oraz możliwą do uzyskania wysoką sprawność termodynamiczną stanowią rozwiązanie o potencjalnie niskiej emisji jednostkowej dwutlenku węgla. Nie wyklucza to możliwości separacji tego gazu ze spalin, dającej potencjalną możliwość dalszej redukcji jego emisji.

Stan rozwoju technologicznego bloków gazowo-parowych pozwolił na przekroczenie w ostatnich latach bariery 60% jeśli chodzi o sprawność (odniesioną do wartości opałowej). Standardowym rozwiązaniem po stronie części parowej jest układ z generacją pary na trzech poziomach ciśnienia, z przegrzewem międzystopniowym w obrębie układu jej doprowadzenia do części średnioprężnej. Temperatura spalin za współcześnie budowanymi turbinami gazowymi wielkiej mocy oscyluje, zależnie od modelu, w granicach wartości nominalnej 610-650°C. Stosowanie bardzo wysokiej temperatury w układzie przepływowym za komorą spalania (dziś nawet powyżej 1600°C) wymusza wprowadzanie intensywnego chłodzenia najbardziej narażonych elementów, w tym łopatek w układzie przepływowym turbiny. Coraz częściej w układach turbozespołów gazowych pojawiają się nowe rozwiązania, w tym chłodzenie powietrza chłodzącego czy recyrkulacją spalin polegającą na kierowaniu części ich strumienia zza turbiny (ekspandera) do układu przepływowego sprężarki.

Szybki postęp technologiczny, umiarkowane koszty inwestycyjne, wysoka sprawność stały się już od dłuższego czasu istotnymi atutami skutkującymi wysoką konkurencyjnością bloków gazowo-parowych w porównaniu do pozostałych technologii energetycznych. W świecie, w tym w Europie, powstało szereg nowych bloków gazowo-parowych. Polska dołączyła w ostatnich latach do grona krajów inwestujących w instalacje tej kategorii, z zastosowaniem najnowszych rozwiązań. Niedawno ukończono, jako pierwszą korzystającą z turbiny gazowej wielkiej mocy nowej generacji (klasa FB GE), inwestycję we Włocławku - blok klasy 450 MW z trójprężną częścią parową oraz przegrzewem wtórnym pary za częścią WP. Dalsze inwestycje z instalacjami tej klasy są w toku.

Autor rozprawy, mgr inż. Mateusz Brzęczek, trafnie ocenił walory, stan rozwoju technologii bloków gazowo-parowych oraz w oparciu o powyższe wybrał temat rozprawy i pulę zagadnień do analizy. Przedmiotem rozważań w ocenianej pracy jest analiza możliwości

zwiększenia sprawności termodynamicznej nowoczesnego układu gazowo-parowego. Wybrane warianty realizacji, w tym bez oraz z instalacjami separacji i sprężania CO₂, z rozpatrzeniem wariantowych rozwiązań po stronie układu chłodzenia układu przepływowego turbiny gazowej, czy wprowadzeniem możliwości odzyskania ciepła niskotemperaturowego w układach ORC należy uznać za dobrane z dobrą identyfikacją potrzeb badawczych.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Oceniana rozprawa podzielona została na 9 ponumerowanych rozdziałów oraz 3 nie ponumerowane, to jest „Wstęp”, „Cel i zakres pracy” oraz „Podsumowanie”. Bibliografia zawiera 146 pozycji, z czego 5 stanowi prace współautorskie Doktoranta opublikowane w recenzowanych czasopismach krajowych (z listy B), jedna z recenzowanej konferencji naukowej (ECOS), jedna z czasopisma zagranicznego z listy A (Energy). Jak należy zauważyć, mgr inż. Mateusz Brzęczek dysponuje już znaczącym, jak na doktoranta, dorobkiem publikacyjnym.

W rozdziale pierwszym, noszącym tytuł „Znaczenie i uwarunkowania gazu ziemnego w produkcji energii elektrycznej” zawarty został przegląd informacji o roli tego paliwa w świecie oraz Polsce w ujęciu historycznym, strukturalnym, ze szczególnym uwzględnieniem udziału w produkcji energii elektrycznej. Doktorant w skrócie przedstawił także przewidywaną rolę gazu ziemnego w przyszłym bilansie potrzeb energetycznych Polski wynikającą z prognoz przygotowanych na potrzeby tworzonej Polityki Energetycznej Polski.

Rozdział drugi, zatytułowany „Elektrownie gazowo-parowe” zawiera zestawienie syntetycznych informacji odnoszących się do stanu rozwoju technologii siłowni gazowo-parowych, ich cech eksploatacyjnych oraz stanu rozwoju w Polsce. Zawarte zostały tu także informacje o koncepcjach zwiększenia sprawności w turbinie gazowej oraz w części parowej układu gazowo-parowego. W moim odczuciu zabrakło tu nieco szerszego ujęcia ukazującego związek pomiędzy kategoriami stosowanych turbin gazowych (kryteria optymalizacji obiegu prostego) i wynikającymi stąd konsekwencjami dla filozofii projektowania bloków gazowo-parowych. Odczuwa się nieco brak uporządkowania prezentowanych informacji, jak i wskazania istotnych dla dalszych rozważań cech układów gazowo-parowych, na przykład tego, że nie ma potrzeby stosowania w części parowej układu regeneracji, zaś turbina parowa podlega w konsekwencji specyficznym ograniczeniom konstrukcyjnym (na skutek dużego strumienia pary wylotowej).

Przedmiotem rozważań w rozdziale trzecim są technologie sekwestracji dwutlenku węgla. Autor przedstawił klasyfikację metod separacji oraz wychwytu CO₂ przedstawiając w sposób syntetyczny kluczowe cechy technologii uznawanych za najbardziej perspektywiczne. Prócz rozważanej w rozdziale 8 technologii separacji chemicznej CO₂ w przejrzysty sposób scharakteryzowane zostały najważniejsze technologie badane na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w ostatnich latach.

Rozdział czwarty rozprawy zawiera prezentację metodologii oraz wyników obliczeń sprawności elektrowni gazowo-parowej przeprowadzonych przez Doktoranta przy założeniu stałej temperatury spalin 630°C za turbiną gazową. Obliczenia zostały przeprowadzone dla trzech wariantów, określonych w rozprawie jako konserwatywny, optymistyczny oraz superoptymistyczny. Różnicowanymi parametrami były sprawność sprężarki i turbiny gazowej (ekspandera) oraz temperatura metalu łopatek turbiny przyjęta w wariantcie konserwatywnym na poziomie 900°C, zaś w pozostałych 1000°C. Doboru (optymalizacji)

parametrów części parowej dokonano z wykorzystaniem algorytmu genetycznego. Wyniki analiz przedstawione zostały w postaci charakterystyk ilustrujących przebieg mocy i sprawności części parowej w funkcji sprężu, a także sprawności układu gazowo-parowego oraz jednostkowej emisji CO₂. Rozważono, obok „klasycznego” przypadku trójprężnej części parowej z przegrzewem wtórnym wprowadzenie dodatkowego obiegu parowego wykorzystującego ciepło chłodzenia powietrza. Stwierdzona została tu możliwość uzyskania istotnego wzrostu mocy turbiny parowej. Doktorant zwrócił uwagę, że bez wykorzystania tego ciepła wzrost sprawności elektrowni można uzyskać jedynie przez poprawę charakterystyk turbiny gazowej.

Analiza porównawcza trzech typów chłodzenia otwartego turbiny gazowej przedstawiona została w rozdziale piątym rozprawy, wariant A dotyczy chłodzenia konwekcyjnego powietrzem pobieranym z wylotu sprężarki, wariant O dodatkowego zastosowania chłodzenia powietrza chłodzącego do 100°C. Wariant B odnosi się do chłodzenia błonowego zaś wariant C chłodzenia transpiracyjnego, oba przy schłodzeniu powietrza chłodzącego oraz wykorzystaniu jego ciepła w części parowej. Wyniki obliczeń, podobnie jak w rozdziale poprzednim zestawione zostały w postaci charakterystyk, tu ilustrujących wpływ stopnia sprężania na temperaturę spalin za komorą spalania, ilość powietrza chłodzącego, sprawność turbozespołu gazowego, efektywność wykorzystania ciepła powietrza chłodzącego oraz moc i sprawność układu gazowo-parowego. Obliczenia prowadzone były, jak poprzednio, z utrzymaniem założenia o stałej temperaturze spalin za turbiną gazową (630°C). Zwraca uwagę założenie o zastosowaniu w obu rozdziałach bardzo szerokiego zakresu stosunku ciśnień (do 100), co skutkuje możliwością pojawienia się bardzo wysokiej temperatury powietrza za sprężarką. W rozprawie przyjęto ograniczenie jej do poziomu około 600°C (str. 61 w rozdz.4), co osiągnane jest dla sprężu około 40. Nie mam pewności, przy jakim założeniu prowadzone były obliczenia, skoro w pracy jest mowa o konieczności wprowadzenia chłodzenia międzystopniowego sprężarki lub zastosowaniu nowych materiałów, bądź technologii pozwalających na pracę sprężarki w wysokiej temperaturze. **Będę zobowiązany za komentarz Doktoranta w tej kwestii.**

Rozdział szósty pracy dotyczy analizy wpływu zamkniętych układów chłodzenia turbiny gazowej na sprawność układu gazowo-parowego. Pod uwagę wzięto chłodzenie powietrzne oraz parowe i porównano to z wariantem dla chłodzenia otwartego powietrzem (wspomniany wcześniej wariant A). Wyniki zestawiono w postaci kolejnej grupy charakterystyk. Nie w pełni jasne jest dla mnie wskazane na str. 99 rozprawy założenie o przyjęciu sprawności kotła odzyskowego „na poziomie $\eta_{KO} = 1$ ”. Moim zdaniem oznacza to założenie o schłodzeniu spalin do warunków otoczenia (albo warunków ISO), co wydaje się nie w pełni racjonalne i trudne do osiągnięcia. Podobnie mało trafne wydaje się wskazane na str. 107 sprawności mechanicznej sprężarki $\eta_{m,S} = 0,95$. Podobnie jak uprzednio mam prośbę o skomentowanie tych założeń.

W rozdziale 7 i 8 do rozważań przyjęto turbinę gazową ze spalaniem sekwencyjnym. W pierwszym z nich rozważono dwa warianty chłodzenia łopatek turbiny (parowe zamknięte oraz powietrzne otwarte). Przedmiotem rozważań w rozdziale ósmym jest blok gazowo-parowy wyposażony w turbinę ze spalaniem sekwencyjnym, chłodzeniem parowym łopatek turbiny gazowej, dodatkowo także instalacją wychwytu metodą absorpcji chemicznej oraz sprężania CO₂. Rozdział należy traktować jako kluczowy dla rozprawy, w prezentowanych wynikach obliczeń uwzględnione zostały wszystkie istotne czynniki mające wpływ na efektywność elektrowni gazowo-parowej, analizowane osobno w poprzednich rozdziałach. Doktorant starannie przeanalizował możliwości związane z doбором technologii, decydując

się na układ absorpcyjny, wskazał wchodzące w grę absorbenty oraz przedstawił najbardziej właściwą technologię sprężania CO₂. Należy tu zauważyć, że pula rozwiązań w zakresie usuwania i sprężania CO₂ jest wynikiem kompleksowych prac prowadzonych w macierzystym instytucie Doktoranta w ramach Programu Strategicznego dla Energetyki. Doktorant skorzystał ze wskazań wynikających z doświadczeń zebranych przy realizacji wspomnianych prac, ale przeprowadził własne obliczenia uzyskując oryginalne wyniki. W rozdziale ósmym przedstawione zostały charakterystyki obejmujące zmiany mocy elektrycznej obiegu parowego, mocy elektrycznej potrzebnej do napędu sprężarek i pompy CO₂, sprawności elektrowni, wskaźnika potrzeb własnych, energochłonności absorbentu, jednostkowej emisji CO₂ w funkcji stopnia sprężania.

Rozdział dziewiąty poświęcony został analizie zagospodarowania ciepła niskotemperaturowego z wykorzystaniem obiegu ORC. W takim przypadku przedmiotem analiz staje się elektrownia z trzema obiegami czynnika roboczego. Analizie poddany został układ wyposażony w dwa moduły ORC, jeden do zagospodarowania ciepła niskotemperaturowego ze spalin za kotłem odzyskowym, drugi – ciepła pozyskiwanego z chłodzenia dwutlenku węgla, sprężanego w instalacji jego przygotowania do transportu. Interesujący jest zastosowany tu sposób doboru parametrów oraz czynnika roboczego w instalacji ORC. Doktorant zastosował podejście oparte każdorazowo na doborze ciśnienia na wlocie do turbiny dla każdego z badanych czterech czynników roboczych tak, aby moduł ORC osiągał maksimum mocy elektrycznej netto. Dzięki temu maksymalizacji poddany został zysk na sprawności elektrycznej układu jako całości. W wyniku przeprowadzonych analiz wskazana została możliwość uzyskania poprawy sprawności tak skonfigurowanej elektrowni gazowo-parowej o około 0,25 pkt procentowego w całym analizowanym przedziale sprężu sprężarki turbozespołu gazowego.

Zwraca uwagę kompleksowe, wielowariantowe podejście do tytułowego zagadnienia rozprawy, to jest analizy efektywności elektrowni gazowo-parowej. Doktorant w rozdziałach od czwartego do dziewiątego rozprawy przedstawił rezultaty obliczeń dotyczące co najmniej pięciu różnych przypadków, z których każdy mógłby być przedmiotem osobnej pracy doktorskiej. Każdy z nich wymagał przygotowania modelu oraz pracochłonnych obliczeń. Sekwencja wspomnianych pięciu rozdziałów tworzy kompleksową strukturę analiz prowadzących do wypracowania całościowych wniosków związanych z poruszaną problematyką. Podobnie logicznie skomponowana została cała rozprawa.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Należy podkreślić, że przygotowanie rozprawy obejmującej szeroki zakres rozważań, dotyczącej wielowariantowych obliczeń instalacji o złożonej strukturze technologicznej jest zadaniem bardzo pracochłonnym. Duży nakład pracy na opracowanie założeń, modeli oraz przeprowadzenie całej gamy obliczeń cieplnych spowodował przypuszczalnie brak sił Doktoranta na weryfikację redakcji rozprawy. Stąd pojawiła się zauważalna liczba usterek o charakterze redakcyjnym w postaci literówek, pomyłek, czy nie do końca zweryfikowanych informacji. Usterki takie proponuję usunąć przed wykorzystaniem materiału z rozprawy do ewentualnej publikacji.

. Przykładowe usterki wymieniam poniżej:

- str. 18: w przekazanym do oceny egzemplarzu rozprawy (za rozdziałem Cel i zakres pracy) jest pusta;

- str. 19: „W połowy 2010 roku do końca 2014 w Polsce wykonano 66 odwiertów rozpoznawczych”;
- str. 21: „w 2012 roku całkowite zużycie gazu ziemnego na świecie wynosiło 1,4 bln m³”. Według mojej wiedzy zużycie to było znacząco wyższe, przekraczało 3 bln m³. Według danych BP (BP Statistical Review), w roku 2012 wydobycie gazu na świecie było równe 3,34 bln m³, w roku 2015 zaś 3,54 bln m³;
- str. 23: „Wobec powyższego kierunek wykorzystania gazu ziemnego w polskiej energetyce należy do najbardziej dynamicznych w kraju”;
- str. 23: „Ministerstwo Gospodarki krajowej finalizuje prace nad nową polityką energetyczną Polski”;
- str.24: „Wartość ujemna informuje, iż dany kraj posiada statutu eksportera netto nośników energii”. Słowo „statut” w znaczeniu „status” użyte zostało ponownie na str. 24;
- str. 29: „Firma Alstom posiada pełnowymiarowy testowy układ gazowo-parowy KA26 w Birr, w Szwajcarii. Układ oparty o zmodernizowaną turbinę GT 26”. Zwracam uwagę, że firma Alstom, w części aktywów związanych z energetyką została przejęta w ubiegłym roku przez General Electric, zaś prawa do turbin GT24 i GT26 trafiły do oferty firmy Ansaldo;
- str.31 i str. 32: informacje podane w tabelach 2.2 oraz 2.3 są niekompletne i nieściśle, na przykład w tabeli 2.2 nie wymieniono dwóch bloków gazowo-parowych zainstalowanych w KGHM, w tabeli 2.3 EC Włocławek wymieniono jako elektrownię, podobnie EC Puławy, Konin czy Bydgoszcz;
- str. 46, nad rys.3.6: „W wyniku wykorzystania CO₂ jako czynnika zgazowującego”;
- str.54, Tabela 4.4: „Różnice między analizowanymi wariantami K, O and S”;
- str.55, pod wzorem (4.4): „strumień powietrza za turbiną gazową” – chodzi raczej o spaliny;
- str. 65, ósma linia od góry: „ponieważ zależą one od odkładu paliwa”;
- str. 82, koniec przedostatniego akapitu: „która wynika z możliwości obecnie stosowanego materiału na spręż.”;
- str. 86, pierwsza linia zaczyna się od słów: „W przypadku chłodzenia błoną”;
- str. 96: „W niniejszym rozdziale przedstawiono i porównano wpływ zamkniętego chłodzenia powietrznego D i parowego E turbiny parowej”, moim zdaniem gazowej;
- rozdział 7: błędna numeracja rysunków od rys.7.8 do 7.10;
- str. 137, przedostatnie zdanie w pierwszym akapicie: „Obieg parowy analizowanej elektrowni składa się z głównego kotła odzyskowego zasilanego spalinami.”.

Szczegółowy wykaz zauważonych usterek zostanie przekazany Doktorantowi w opiniowanym egzemplarzu rozprawy.

Przedstawione w rozprawie liczne charakterystyki uzyskane dla wielowariantowych obliczeń nie w pełni odwzorowują w moim odczuciu ogrom wykonanej przez Doktoranta pracy. Istotna część prezentowanych w rozprawie charakterystyk jest rezultatem zestawienia wyników wielokrotnych powtórzeń przyjętego algorytmu dla kolejnych wartości zmiennych niezależnych, przede wszystkim stopnia sprężania β . Wydaje się, że celowe byłoby zaznaczenie na tych charakterystykach punktami wartości dyskretnych, dla których obliczenia zrealizowano. Charakterystyki sporządzone w postaci gładkich krzywych nie niosą za sobą stosownej informacji. Nie jest również na nich widoczne, czy uzyskane wyniki pozwoliły na uzyskanie charakterystyk w postaci gładkich krzywych, czy prezentowany przebieg jest wynikiem interpolacji.

W rozprawie poświęconej problematyce doboru znamionowych parametrów pracy elektrowni gazowo-parowej Doktorant wskazywał po kilkakroć, że współczesne turbiny gazowe budowane są według dwóch odmiennych filozofii. Jedna z nich określana w pracy jako oparta na „standardowych stosunkach ciśnień” ($\beta = 20-30$) oraz alternatywna związana z „zastosowaniem wyższych stosunków ciśnień” ($\beta = 40-50$). W rozprawie zabrakło, moim zdaniem, odniesienia do podstaw obu wskazanych filozofii (przyczyny doboru właśnie takich wartości stosunku ciśnień). Rozprawa oparta została na analizie znaczącej liczby pozycji literatury (bibliografia obejmuje 146 źródeł), w tym z zakresu teorii turbin gazowych, stąd takie objaśnienie wydawało się łatwe do przytoczenia.

4. Ostateczna ocena pracy

Do osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- opracowanie kompleksowego podejścia do analizy efektywności elektrowni gazowo-parowej, z uwzględnieniem wpływu wychwytu i sprężania dwutlenku węgla,
- przeprowadzenie szczegółowej, opartej na starannie dobranych, licznych wariantach konfiguracji, analizy obliczeniowej efektywności elektrowni gazowo-parowej,
- wskazanie, dzięki takiemu podejściu zarówno standardowych jak i niekonwencjonalnych możliwości poprawy osiągnięć elektrowni gazowo-parowej.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy, a Doktorant zrealizował postawiony sobie cel. Uważam, że należy podkreślić raz jeszcze wysoką pracochłonność i kompleksowy charakter przeprowadzonych badań.

Autor rozprawy, mgr inż. Mateusz Brzęczek, wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z treści pracy.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Mateusz Brzęczek 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. Mateusza Brzęczka **pt.: „Analiza możliwości zwiększenia efektywności elektrowni gazowo-parowej bez i z instalacją wychwytu i sprężania CO₂”** spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytułach Naukowych oraz Tytułach i Tytułach w Zakresie Sztuki. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Z uwagi na wspomniane powyżej osiągnięcia Doktoranta, walory przedstawionej do oceny rozprawy, wysoki poziom, pracochłonność oraz elementy poznawcze wynikające z poddania analizie niekonwencjonalnych konfiguracji elektrowni gazowo-parowej stawiam wniosek o wyróżnienie.



A handwritten signature in blue ink, appearing to be "J. Lee".