



prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielwicz, prof. zw. PG
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12
tel. +58 347 2254
email: Dariusz.Mikielwicz@pg.gda.pl

Gdańsk, 18 października 2016 r.

R E C E N Z J A
pracy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Brzęczka pt.
"Analiza możliwości zwiększenia efektywności elektrowni gazowo-parowej
bez i z instalacją wychwytu i sprężania CO₂"

Recenzja została wykonana na zlecenie Prodziekana ds. Organizacji i Rozwoju Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w oparciu o uchwałę Rady Wydziału z dnia 8 lipca 2016 roku.

Pracę wykonano pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Janusza Kotowicza.

1. Przedmiot rozprawy

Układy gazowo-parowe należą do szybko rozwijających się technologii energetycznych. Ambitne cele unijnej polityki klimatycznej, przede wszystkim związane z redukcją emisji dwutlenku węgla o 40% świadczą o zdeterminowanej polityce energetycznej UE w kierunku gospodarki niskoemisyjnej. W takiej sytuacji rozwój technologii czystego wykorzystania węgla musi rozwijać technologie wychwytu i magazynowania dwutlenku węgla (ang. carbon capture and storage). Działania te muszą być także nakierowane na ocenę kosztów realizacji takiej polityki oraz jej wpływ na poziom cen energii. Liczba wchodzących w grę konfiguracji wiązanych ze szczegółowym rozwiązaniem powiązań technologicznych turbiny gazowej z układami współpracującymi jest bardzo duża. Rozwiązania nad możliwościami poprawy sprawności układów oraz redukcji emisji, szczególnie emisji dwutlenku węgla, są aktualne z badawczego punktu widzenia.

Autor rozprawy podjął się kompleksowej analizy techniczno mającej na celu zwiększenie sprawności termodynamicznej nowoczesnego, trój-ciśnieniowego układu gazowo-parowego z przegrzewem wtórnym pary w wariantcie bez i z instalacją separacji i sprężania CO₂. Analiza taka wymagała opracowania stosownych modeli matematycznych oraz odpowiadającym im algorytmów poszczególnych elementów obiegu, poddania analizie licznych informacji dotyczących strony ekonomicznej, jak również wykazania się wnikliwością przy obróbce pozyskiwanych danych. Uzyskane przez Doktoranta wyniki będą mogły przyczynić się do podjęcia decyzji o dalszych krokach odnośnie technologii układu gazowo parowego bez i z instalacją separacji i sprężania CO₂.

Opiniowana praca ma charakter teoretyczno-modelowy i liczy wraz z bibliografią, spisem rysunków i tabel oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim 168 stron. Składa się z 9

rozdziałów oraz wstępu, określenia celu i zakresu pracy oraz jej podsumowania. Rozprawa zawiera 146 pozycji literaturowych, spośród których Doktorant jest współautorem ośmiu prac. W jednej z nich jest pierwszym autorem.

Praca składa się z dwóch części, pierwszej, wprowadzającej czytelnika w dotychczasowy stan wiedzy zagadnień związanych z problematyką obiegów gazowo-parowych poprzez przedstawienie charakterystyki stanu rynku gazu w Polsce i na świecie, przedstawienie rozwoju technologii gazowo-parowej oraz przegląd technologii sekwestracji dwutlenku węgla. W drugiej części, w której przedstawiono własne rozważania dotyczące modelowania pracy bloku gazowo-parowego, w których poruszono wpływ chłodzenia turbin, sekwencyjne spalanie oraz integrację układu wychwytu i sprężania CO₂.

We **wstępnym rozdziale** Autor wprowadza do tematyki podjętej w pracy. W kolejnym rozdziale, **rozdziale 1**, przedstawia główny cel pracy czyli analizę możliwości zwiększenia sprawności termodynamicznej nowoczesnego, trój-ciśnieniowego układu parowo-gazowego z przegrzewem wtórnym pary przy uwzględnieniu i bez instalacji separacji i sprężania CO₂. Założeniem podstawowym przyjętym w rozważaniach jest przyjęcie stałości temperatury spalin na wylocie z turbiny gazowej. Spowodowane jest to faktem, że modernizacje bloku parowego są kilkukrotnie wyższe niż te związane z częścią turbinową. Rozpatrzono trzy warianty chłodzenia układu przepływowego turbiny gazowej, wpływ chłodzenia konwekcyjnego, błonowego i transpiracyjnego na sprawność turbiny gazowej i całego bloku. W pracy przedstawiono także analizę spalania sekwencyjnego turbiny gazowej oraz efektywne wykorzystanie ciepła odpadowego z bloku. Analizy przeprowadzone są na podstawie własnego algorytmu obliczeniowego.

Rozdział drugi przedstawia przegląd technologii gazowo-parowych stosowanych w praktyce. Jest to zwięzłe, wręcz monograficzne przedstawienie najnowszych trendów w zakresie takich obiegów, jak również tematyki związanej z podwyższaniem sprawności w części parowej układu. Rozdział jest zredagowany przejrzysto i przystępnie dla czytelnika, który może sobie łatwo uaktualnić wiedzę związaną z tą tematyką.

Rozdział trzeci przedstawia przegląd technologii sekwestracji dwutlenku węgla. Jest to również bardzo zwięzłe przedstawienie technologii możliwych do wykorzystania w praktyce, uwzględniając potencjalne technologie perspektywiczne, jak na przykład wykorzystanie ogniw paliwowych do obniżenia emisji CO₂.

W **rozdziale 4** Doktorant przedstawia analizę wpływu konwekcyjnego chłodzenia otwartego turbiny gazowej oraz wykorzystania ciepła powietrza chłodzącego w aspekcie sprawności elektrowni gazowo-parowej. Przedstawia metodologię wyznaczania charakterystyk pracy bloków gazowo-parowych w zakresie temperatur panujących w turbinie gazowej oraz w szerokim zakresie spręży. Poszukiwano wzrostu sprawności turbiny poprzez poprawę charakterystyk pracy turbiny oraz zaproponowanie wykorzystania ciepła powietrza chłodzącego turbinę. Wykazano, że nie wykorzystując tego ciepła poprawę sprawności turbiny można uzyskać tylko za pomocą poprawy charakterystyk turbiny gazowej lub wprowadzenie dodatkowego obiegu parowego, wykorzystującego ciepło powietrza. Stałą wartość temperatury spalin na wylocie z turbiny utrzymywano poprzez uzmiennienie temperatury spalin przed turbiną w zależności od stopnia sprężania. Do obliczeń zaproponowano własny model obiegu opracowany w programie GateCycleTM. Autor prawidłowo interpretuje, że konieczność utrzymania stałej temperatury spalin za turbiną, przy uzmiennieniu temperatury spalin przed turbiną powoduje, że zmienia się sprawność izentropowa. Podaje zakres ich zmienności. Analizuje ilości ciepła, jakie są możliwe do odbioru w układzie turbiny. Kolejnym krokiem w tym rozdziale jest przedstawienie modelu części parowej obiegu. Jak wspomniano wcześniej analizowano tę część obiegu przy założeniu stałej temperatury spalin opuszczających turbinę. Dobór parametrów części parowej dokonał za pomocą algorytmu genetycznego, co jest również oryginalnym wkładem pracy

Doktoranta. Są to opisy, które dobrze charakteryzują kompetencje Autora. Doktorant nieco nadużywa terminu „optymalizacja” w rozdziale 4.8, gdyż nie przedstawia żadnego kryterium optymalizacyjnego, a jedynie szuka zestawu parametrów, jaki da w wyniku najlepszą wartość sprawności. Taki zestaw parametrów uzyskuje dla maksymalnej temperatury spalin, co jest wnioskiem oczywistym.

Rozdział 5 dotyczy analizy porównawczej trzech otwartych typów chłodzenia turbiny gazowej. Przedstawiono koncepcje zwiększenia sprawności elektrowni gazowo-parowej poprzez wykorzystanie ciepła chłodzącego układ przepływowy ekspandera. Przeanalizowano przypadki chłodzenia klasycznego konwekcyjnego, błonowego i transpiracyjnego. Uzyskane rezultaty wskazują, że w wariacie z chłodzeniem konwekcyjnym możliwe jest osiągnięcie sprawności brutto 63%, podczas gdy w pozostałych dwóch przypadkach można uzyskać wartości o dwa procent wyższe. Analizy poparte są szeregiem wykresów reprezentujących obliczenia, charakteryzujących się dużymi walorami estetycznymi.

Rozdział 6 dotyczy analizy porównawczej zamkniętych typów chłodzenia turbiny gazowej. Uwagę skupiono na zastosowaniu pary w celu chłodzenia układu przepływowego turbiny gazowej dla szerokiego zakresu spręży w sprężarce. Zbudowano model matematyczny w programie GateCycleTM wykazując, że wprowadzenie chłodzenia zamkniętego turbiny gazowej w sposób znaczny powoduje wzrost jej sprawności jak i całego bloku.

Rozdział 7 dotyczy analizy pracy elektrowni gazowo-parowych ze spalaniem sekwencyjnym w turbinie gazowej poprzez wprowadzenie dodatkowej komory spalania za pierwszym stopniem łopatek ekspandera. Zbudowano model matematyczny obiegu w programie GateCycleTM oraz przeprowadzono analizę, na podstawie której stwierdzono, że wprowadzenie drugiej komory spalania powoduje obniżenie temperatury COT w rozpatrywanych wariantach, co pociąga za sobą niższą średnią temperaturę w turbinie gazowej, a to skutkuje zmniejszeniem strumienia masy medium chłodzącego pierwszy stopień ekspandera. Tego typu sytuacja, z kolei, wymaga wyższych strumieni masy w drugim i trzecim stopniu prowadząc do wzrostu strumienia masy paliwa spalanego w turbinie gazowej oraz ilości spalin dostarczanych do kotła odzyskowego. W takiej sytuacji potrzebna jest większa ilość czynnika w obiegu parowym, przyczyniając się do zwiększonej produkcji energii elektrycznej. Możliwym było uzyskanie sprawności elektrycznej netto na poziomie 67.9%.

Rozdział 8 dotyczy analizy obecności instalacji wychwyty i sprężania CO₂ w wybranym wariacie elektrowni gazowo-parowej ze spalaniem sekwencyjnym i chłodzeniem parowym łopatek ekspandera, zintegrowanym z instalacją wychwyty CO₂ za pomocą absorpcji chemicznej oraz instalacją sprężania wychwyconego gazu. Doktorant wykazał, że zastosowanie wychwyty CO₂ ze spalin przynosi spadek sprawności w postaci ubytku mocy elektrycznej w części parowej oraz konieczności sprężenia dwutlenku węgla. Integracja z instalacją wychwyty i sprężania CO₂ w zależności od rodzaju wariantu przyczynia się do obniżenia sprawności układu o około 4.5-7.5%. Ciekawa jest zależność (8.4), z której wynika, że zmniejszenie energochłonności absorbentów o 1MJ/kg CO₂ podwyższa sprawność netto bloku o około 1.5%.

Rozdział 9 dotyczy analizy związanej z zagospodarowaniem ciepła odpadowego ze spalin wylotowych z kotła odzyskowego oraz ciepło ze sprężarek CO₂. Autor przedstawił ideę tego typu układów, przeprowadził analizę czynników roboczych możliwych do zastosowania w takich układach oraz przeprowadził obliczenia za pomocą programu EBSILON. Obliczenia przeprowadził dla czterech czynników roboczych ORC, z których najlepsze wyniki uzyskać przy zastosowaniu R245ca. Trafne są jego uwagi co do kosztów czynnika i ich wpływu na ekonomię całości eksploatacji. Możliwym było uzyskanie podwyższenia sprawności elektrycznej całości układu netto na poziomie 0.25%.

Rozdział ostatni to podsumowanie pracy i wnioski .

Podsumowując, przyjęty układ pracy oceniam jako logiczny i czytelny. Dobór pozycji bibliograficznych jest odpowiedni. Doktorant dokonał właściwego przeglądu literatury, uwzględniając najnowsze doniesienia dotyczące analizowanej tematyki.

2. Teza pracy

Doktorant nie stawia w pracy tezy. Przedstawia jedynie cele pracy, które prowadziły do analizy 11 modeli bloków gazowo-parowych, w których poruszono wpływ chłodzenia turbin, sekwencyjne spalanie oraz integrację układu wychwytu i sprężania CO₂. Podjęcie się badań naukowych w tym zakresie, sformułowanie oraz przyjęcie tematu pracy doktorskiej, przygotowanie, zredagowanie i napisanie opiniowanej pracy doktorskiej uważam więc za celowe i bardzo aktualne oraz ważne z punktu widzenia naukowo poznawczego, a także użytecznego w zakresie analizy pracy układów gazowo-parowych.

3. Oryginalność pracy

Problemy, z którymi spotyka się współczesna energetyka mają zróżnicowaną naturę. Poszukiwanie technologii mało inwazyjnych w środowisko, powszechnie dostępnych i ekonomicznie uzasadnionych jest niezbędne. W ten nurt wpisuje się tematyka ocenianej pracy doktorskiej, gdyż zewsząd występują naciski na poprawę sprawności obiegów termodynamicznych, również gazowo-parowych, oraz ocena ekonomiczno-ekologiczna kosztu związanego z integracją instalacji wychwytu i sprężania dwutlenku węgla. Jest to szczególnie ważne w warunkach krajowych, gdzie poszukiwane są wysokosprawne technologie produkcji energii elektrycznej.

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. Opracowanie teoretycznego modelu bloku gazowo-parowego z różnymi rodzajami chłodzenia, różnymi sposobami spalania paliwa w turbinie gazowej oraz instalacją wychwytu i sprężania CO₂ w komercyjnym kodzie numerycznym GateCycleTM.
2. Opracowanie różnych sposobów zagospodarowania ciepła odpadowego poprzez wprowadzenie dodatkowego bloku parowego lub układu ORC.
3. Przeprowadzenie systematycznych obliczeń poszczególnych wariantów bloku gazowo-parowego.

4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się bardzo dużym umocowaniem praktycznym, gdyż analiza obiegów gazowo-parowych z punktu widzenia poprawienia ich sprawności energetycznej oraz oszacowania ekwiwalentnych strat sprawności związanych z instalacjami CCS jest jednym z wiodących tematów prac w literaturze przedmiotu. Opracowane narzędzia numeryczne umożliwiają symulację omawianych procesów w różnych wariantach bloku gazowo-parowego. Wyniki przeprowadzonych przez Doktoranta symulacji numerycznych pokazują, że możliwe jest znalezienie maksymalnych wartości w określonym zakresie zmienności parametrów. Pozytywna odpowiedź na cele postawione w pracy, a dotyczące możliwości poprawy sprawności energetycznej bloku gazowo-parowego została przedstawiona dla optymalnych sytuacji. Doktorant poprawnie ocenił stan wiedzy w literaturze światowej i wykazał się dużą wiedzą na temat modelowania układów energetycznych.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji praca jest oryginalna i wartościowa, napisana z wiarą i przejrzystością (może za wyjątkiem wstępu do rozdziału 9 traktującego o obiegach ORC), zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analizy obiegów termodynamicznych stanowią istotny wkład do problematyki naukowej związanej z rozwojem wydajnych technologii energetycznych. Autor mógł dodatkowo pokusić się o ocenę egzgergetyczną poszczególnych rozpatrywanych wariantów. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest pozytywna. Praca porusza ważny problem i przedstawia oryginalne i wartościowe rezultaty. Opracowana metodologia analizy może mieć szeroki zakres zastosowań, co należy uznać za zaletę pracy.

Praktycznie trudno znaleźć mankamenty merytoryczne pracy. Część swoich wątpliwości przedstawiłem w trakcie analizy rozprawy. Praca napisana jest poprawnym językiem, a jej lektura nie nastęrcza trudności.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem są następujące:

1. W pracy Autor używa określenia „ditlenek węgla”. Czy jest to normowane określenie, czy można nadal używać nazwy zwyczajowej „dwutlenek węgla”?
2. Rzeczywisty blok gazowo-parowy opisany jest wieloma zmiennymi i już samo ustalenie stałej temperatury spalin na wylocie z turbiny gazowej ma duży wpływ na wyniki analiz możliwych do przeprowadzenia. Poruszony problem kwalifikuje się do zagadnienia polioptymalizacyjnego. Szkoda, że Doktorant nie skomentował w pracy swojego najważniejszego założenia, czyli w jaki sposób przyjęcie stałej temperatury spalin na wylocie z turbiny gazowej jest ograniczeniem dla przeprowadzonych analiz.
3. Skąd wzięta jest zależność 4.22?

W pracy znajduje się sporo tzw. literówek, które pokrótce wymieniam poniżej:

1. Str. 6: punkt 6.2.2; jest „Wpływ Analiza” – pierwszy wyraz jest niepotrzebny
2. Str. 8: jest „A – powierzchnia lub powierzchnia przekroju” – chyba niepotrzebne jest takie rozgraniczenie przy takim samym symbolu?
3. Str. 8: jest „KND – kondensator lub skraplacz” – jaka jest tu różnica?
4. Str. 9: niepotrzebne przecinki po określeniach dla W , β , γ , δ , η .
5. Str. 18: pusta
6. Str. 27₉: jest „z za” zamiast „zza”
7. Str. 28₇: brak przecinka po nawiasie
8. Str. 29₁₅: jest „trój ciśnieniowy” zamiast „trój-ciśnieniowy”
9. Str. 30₁₄: jest „świcie” zamiast „świecie”
10. Str. 31: Tabela 2.2, jest „parowych” zamiast „parowe”
11. Str. 66⁴: jest „an” zamiast „na”
12. Str. 76²: jest „tosprawność” zamiast „to sprawność”
13. Str. 87: w tabeli 5.2 jest „pitch” zamiast „pinch”
14. Str. 94¹: jest „5przeprowadzono” zamiast „5 przeprowadzono”
15. Str. 96₈: jest „wynoszącym t_{4a} ” zamiast „wynoszącym t_{4a} ”
16. Str. 98¹: jest „Powietrze chłodząc łopatkę powietrze ...” zamiast „Powietrze chłodząc łopatkę ...”
17. Str. 105₃: jest „o2,75” zamiast „o 2,75”
18. Str. 149: w legendzie rys. 9.6 jest „beznen” zamiast „benzen”
19. Str. 151: w tytule podrozdziału jest „ Posumowanie” zamiast „Podsumowanie”

6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu przedstawiona mi do recenzji praca może stanowić rozprawę doktorską. Uzyskane wyniki obliczeń oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak też i praktyki inżynierskiej. Autor uzyskał wyniki na drodze rozważań literaturowych oraz analizy obliczeń przeprowadzonych za pomocą własnych modeli numerycznych. Wykazał się dogłębną umiejętnością posługiwania się kodami obliczeniowymi oraz głęboką wiedzą dotyczącą zagadnienia. Doktorant wykazał się inwencją twórczą w prowadzeniu prac, jak też dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Rzetelnie i systematycznie opracował modele instalacji bloku gazowo-parowego oraz przeprowadził systematyczne analizy wyników obliczeń. Interesujące są jego interpretacje uzyskanych wyników, które budzą zaufanie. Przedstawione uwagi krytyczne nie pomniejszają istotnie osiągnięć pracy.

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez odpowiednie ustawy. Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr. inż. Mateusza Brzęczka do publicznej obrony.**

