dr hab. inż. Tomasz CZAKIERT, prof. PCz
ul. Wysockiego 17 B, 42-218 Częstochowa
tel. kom. 608 089 178

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA
Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii
Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
tel. 34 3250 945, e-mail: tczakiert@is.pcz.czest.pl

Częstochowa, 31.08.2015 r.

Szanowny Pan
Prof. dr hab. inż. Janusz KOTOWICZ
Dziekan
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18
44-100 Gliwice

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana MICHALSKIEGO

1. Wprowadzenie

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Nr RIE-BD/4/424/2014/2015 z dnia 9 czerwca 2015 roku.

2. Zakres rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Michalskiego nosi tytuł „Analiza efektywności zero-emisyjnego bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne i ultranadkrytyczne z tlenowym kotłem pyłowym opalanym węglem kamiennym". Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz. Praca została zrealizowana w ramach Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych pt. „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii" Zadania Badawczego „Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO_2" (Umowa nr SP/E/2/66420/10), współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Praca liczy ogółem 238 stron, włączając spis literatury w ilości 147 pozycji (w tym 6 pozycji których Doktorant jest autorem bądź współautorem) oraz 14 załączników. Praca zawiera również wykaz użytych oznaczeń i indeksów oraz spisy tabel i rysunków. Zebrany materiał rozdzielono pomiędzy 6 głównych rozdziałów, zakończonych obszernym podsumowaniem.

Wprowadzające rozdziały 1.1-1.4 są przeglądem literatury przedmiotu w zakresie analizowanych w pracy zagadnień i stanowią tło dla dyskusji prowadzonej w dalszych rozdziałach dysertacji. Informacje tu zawarte przedstawiono w sposób zwięzły i rzeczowy. Postawione cele i zakres pracy zostały zdefiniowane w podrozdziale 1.5 i korespondują one wyraźnie z przyjętą strukturą rozprawy doktorskiej. W rozdziale tym, rysują się jednocześnie dwa, jedynie z pozoru niezależne wątki: termodynamiczny i ekonomiczny, które w rzeczywistości głęboko się przenikają – co wykazano zresztą bezsprzecznie w ramach niniejszej pracy. W rozdziale 2 przedstawiono strukturę analizowanego przez Doktoranta bloku energetycznego oraz omówiono szczegółowo jej podstawowe elementy, mianowicie wyspę kotłową, układ turbiny parowej, tlenownię oraz jednostkę wychwytu i kondycjonowania CO_2. W przejrzysty sposób zaprezentowano również podstawowe zależności na których Autor opierać będzie prowadzone w dalszej części pracy obliczenia. W rozdziale 3 uszczegółowiono procedury obliczeniowe, opracowane niezależnie dla wszystkich czterech wyżej wymienionych elementów bloku energetycznego. Na etapie modelowania Doktorant wykorzystywał komercyjnie dostępne oprogramowanie GateCycle i Aspen, natomiast do walidacji uzyskanych wyników użył kodu numerycznego opracowanego w macierzystym Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej. W tym miejscu należy zwrócić szczególną uwagę na bardzo dobrą zgodności wyników uzyskanych przy zastosowaniu obu narzędzi, co potwierdzić może jedynie słuszność przyjętych przez Autora modelu założeń. Rozdział kończy prezentacja zespolonego algorytmu umożliwiającego przeprowadzenie kompleksowych obliczeń dla zintegrowanej elektrowni realizującej spalanie tlenowe. W rozdziale 4 rozstrzygnięto ostatecznie jedną z kluczowych kwestii związanych z organizacją procesu tlenowego spalania a dotyczącą metody recyrkulacji spalin, gdzie wyniki szczegółowych analiz termodynamicznych wskazały jednoznacznie na tzw. mokrą recyrkulację. Dużo uwagi poświęcono tu również parametrom pracy tlenowni, której moc potrzeb własnych ma największy wpływ na wzrost mocy potrzeb własnych całego bloku energetycznego. I tak, dla proponowanej w pracy metody separacji membranowej powietrza, Doktorant wykazał bezsprzeczną zależność pomiędzy wyższym stopniem odzysku tlenu a wzrostem sprawności wytwarzania energii elektrycznej netto. Wartych uwagi wyników dostarczają również symulacje polegające na rekonfiguracji struktury obiegu parowego, poprzez zastąpienie wybranych regeneracyjnych podgrzewaczy wody obiegowej, wymiennikami zasilanymi ciepłem odpadowym oraz poprzez wprowadzenie organicznego obiegu Rankine'a, co pozwala na podniesienie sprawności netto wytwarzania energii elektrycznej. Rozdziały 5 i 6 to wielowariantowa analiza ekonomiczna dyskutowanych w pracy rozwiązań technologicznych, uzupełniona o analizę wrażliwości i

analizę ryzyka ekonomicznego. Ostatni rozdział dysertacji zawiera obszerne podsumowanie z wnioskami przypisanymi kolejnym obszarom zainteresowań Doktoranta.

3. Ocena pracy

W pracy analizowany jest nowoczesny układ bloku energetycznego, pracujący przy wysokich parametrach pary. Układ zbudowany jest z myślą o realizacji spalania tlenowego, stąd w jego strukturze pojawiają się dodatkowo jednostka produkcji tlenu oraz jednostka wychwytu CO_2 i przygotowania go do dalszej geologicznej sekwestracji. Tlenownia stanowi obecnie największe obciążenie energetyczne dla tego typu bloku, stąd za wielce uzasadnione uważa się poszukiwanie alternatywnych (dla kriogenicznego frakcjonowania) rozwiązań separacji powietrza, do których niewątpliwie zalicza się zaproponowana w pracy metoda membranowa.

Technologia spalania tlenowego należy do wąskiej grupy rozwiązań umożliwiających praktycznie zeroemisyjne wytwarzanie energii elektrycznej z paliw węglowych, co pozwala zaliczyć ją do technologii przyszłości. Szeroko zakrojone prace realizowane w ramach Programu Strategicznego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii" pozwoliły z kolei na doprowadzenie tego rozwiązania do stanu technologicznej gotowości do demonstracji w skali technicznej. Nie mniej jednak, jedną z kluczowych barier na drodze do pełnej komercjalizacji pozostaje wciąż kwestia obniżonej sprawności netto takiego układu.

Dlatego też, podjęcie przez Doktoranta w przedstawionej rozprawie wysiłków zmierzających do opracowania algorytmu obliczeniowego, umożliwiającego poszukiwanie rozwiązań służących ograniczeniu spadku sprawności w tego typu układach, świadczyć może wyłącznie o znajomości bieżących wyzwań w obszarze zeroemisyjnych technologii energetycznych oraz o trafności wyboru przedmiotu badań naukowych.

Przedstawioną pracę naukową w całości oceniam bardzo wysoko. Na etapie jej lektury nasuwały się jednak pewne uwagi, pytania i komentarze, które w kolejności chronologicznej zostały spisane poniżej.

1. *Wykaz oznaczeń*. Dla części oznaczeń pominięto jednostki, np. dla powierzchni, grubości i.in..

2. *Rozdział 1*. Rozszerzenie podsumowania podrozdziału 1.1 o średni wiek bloków eksploatowanych w polskim systemie energetycznym dałoby pełniejszy obraz omawianego zagadnienia. Na stronie 18 błędnie podano skrót „KRS" odnoszący się do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Podrozdział 1.4 powinien nosić tytuł precyzyjniej wskazujący na jego zawartość, np. Rozwój technologii spalania tlenowego; „Przegląd literatury" obejmuje de facto również poprzednie podrozdziały 1.1-1.3. W moim przekonaniu, podrozdział 1.5 „Cel i zakres pracy" powinien stanowić jeden z głównych rozdziałów

dysertacji (w tym przypadku rozdział o numerze 2), mimo że zarówno cele jak i zakres wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych wcześniej (podrozdziały 1.1-1.4) badań literaturowych.

3. *Rozdział 2.* Rysunek 2.1 należałoby uzupełnić o nitkę wyprowadzenia CO_2 z jednostki CC, natomiast rysunek 2.2 o opis nad nitką recyrkulowanych spalin. Z kolei, na stronie 36 należałoby doprecyzować które załączniki Autor ma na myśli.

4. *Rozdział 3.* W przypadku kontunuowania prac nad stworzonym modelem – co w moim przekonaniu wydaje się wielce zasadne choćby z uwagi na olbrzymi trud związany z jego powstaniem, pokusić się można o próbę zaimplementowanie do modułu wyspy kotłowej instalacji odsiarczania spalin.

Jednym z podstawowych założeń przyjętych dla modelu tlenowni (str. 65-66) jest wartość stopnia odzysku tlenu w membranie separacyjnej z przedziału 50-100%. Wartości tego parametru dochodzące do 100% widzimy również na rysunku 3.4 (choć późniejszą analizę przeprowadzono już dla wartości R = 60% i 90%). Na ile wartości bliskie 100% są realne do osiągnięcia w praktyce? Co na ten temat mówi dokonany przegląd literatury? – Prosiłbym o komentarz Doktoranta w tej sprawie.

Jednocześnie, prosiłbym Doktoranta o zajęcie stanowiska z spawie uniwersalności opracowanego modelu zintegrowanej elektrowni tlenowej, z punktu widzenia jego największych ograniczeń. Na przykład, na ile skomplikowaną operacją okazałoby się przystosowanie algorytmu do obliczeń z kotłem fluidalnym o zmienionej konfiguracji wymienników ciepła zlokalizowanych w ciągu konwekcyjnym?

5. *Rozdział 4.* Doktorant ogranicza prezentację swoich wyników w zakresie emisji do jednostkowej emisji CO_2 względem mocy elektrycznej bloku oraz strumienia CO_2 emitowanego do atmosfery. Moim zdaniem interesujące byłoby również przedstawienie w analogiczny sposób ilości dwutlenku węgla przeznaczonego do podziemnego składowania (ewentualnie przemysłowego zagospodarowania). Sugestię tą pozostawiam Autorowi do rozwagi na etapie dalszego publikowania swoich wyników badań. Należy zastanowić się również czy przy wartościach rzędu kilkudziesięciu tysięcy (np. Tabela 4.5 i inne) uzasadnione jest stosowanie dokładności do kilku miejsc po przecinku.

6. *Rozdział 5.* W opisie metodologii wykorzystanej w analizie ekonomicznej (podrozdział 5.1.2) pominięto amortyzację, jako składową strumienia przepływów pieniężnych wyznaczanego z równania 5.2. Prosiłbym Doktoranta o informację uzupełniającą w tym zakresie.

7. *Rozdział 6.* W tabelach 6.1 i 6.2 pominięto jedną ze zmiennych losowych wytypowanych na potrzeby przeprowadzonej analizy ekonomicznej ryzyka. Chodzi tu o koszty eksploatacji i obsługi bloku dla których przyjęto niesymetryczne odchyłki w założonych granicach zmienności. Tu również, prosiłbym Doktoranta o informację uzupełniającą w tym zakresie.

Za kluczowe osiągnięcie Doktoranta w przedstawionej dysertacji naukowej uważam opracowanie algorytmu obliczeniowego wraz z wewnętrznymi podmodelami, kojarzącego cztery kluczowe moduły zintegrowanej elektrowni realizującej spalanie tlenowe.

4. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie bardzo ważnego problemu naukowego, jakim jest ocena zasadności i konkurencyjności wytwarzania energii elektrycznej w nowoczesnym bloku energetycznym realizującym spalanie tlenowe. W mojej ocenie, jej poziom merytoryczny spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. **W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.**

Jednocześnie znaczenie podjętej tematyki dla dalszego rozwoju sektora energetycznego, zakres przeprowadzonych analiz, ale przede wszystkim **wysoki poziom merytoryczny pracy jako całości upoważnia mnie do postawienia wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Michalskiego „Analiza efektywności zero-emisyjnego bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne i ultranadkrytyczne z tlenowym kotłem pyłowym opalanym węglem kamiennym".**