Dr hab. inż. Sławomir Dykas
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska

Gliwice, 2015-09-03

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgra inż. Sebastiana MICHALSKIEGO
pt.: Analiza efektywności zero-emisyjnego bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne i ultranadkrytyczne z tlenowym kotłem pyłowym opalanym węglem kamiennym"

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Prezentowane w rozprawie doktorskiej wyniki były uzyskane w ramach badań finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w Strategicznym Programie Badawczym „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: opracowanie technologii spalania tlenowego w kotłach pyłowych i fluidalnych, zintegrowanych z wychwytywaniem CO_2". Potwierdza to więc w dużej mierze sensowność i ważność podjętej przez doktoranta tematyki badawczej, która wpisuje się w nurt badań zmierzających do poprawy efektywności parowych kondensacyjnych elektrowni węglowych.

Rozprawa doktorska mgra inż. Sebastiana Michalskiego jest dość obszerna, zawiera 238 stron tekstu, rysunków, schematów i tabel. Składa się ona ze spisu oznaczeń i symboli, ze spisu rysunków i tabel, z siedmiu głównych rozdziałów, spisu literatury i ponad 50 stron załączników. Rozprawa jest napisana dobrze od strony edycyjnej, z niewielką ilością błędów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wszystkie rysunki, a zwłaszcza schematy instalacji siłowni i ich elementów, są wykonane bardzo starannie i są bardzo czytelne.
W spisie oznaczeń nie zawarto wszystkich ważnych oznaczeń i symboli znajdujących się w tekście rozprawy. W spisie oznaczeń brak jest konsekwencji, tylko niektóre oznaczenia mają jednostki, a dla tych co mają nie użyto podstawowych jednostek SI, tj. dla ciśnienia podano *kPa*, zamiast *Pa*, a dla mocy *MW* zamiast *W* itd..
Rozdziały rozprawy doktorskiej odzwierciedlają prawidłową i logiczną strukturę pracy, jednak kilka podrozdziałów można było pominąć lub zmienić ich kolejność. Dotyczy to np. rozdziału 4 pt. „Analiza termodynamiczna", w którym podrozdział 4.2 zawiera tylko jeden podpodrozdział 4.2.1 pt. „Dyskusja wyników analizy termodynamicznej". Ten podpodrozdział powinien być raczej ostatnim, podsumowującym podrozdziałem rozdziału 4. Ostatni, siódmy rozdział zawiera podsumowanie, napisane w punktach, które bardzo

precyzyjnie na siedmiu stronach podsumowuje wszystkie przeprowadzone w pracy analizy i wyciąga z nich wnioski.

Spis literatury zawiera 147 pozycji, w skład których wchodzą prace autorów zagranicznych jak i krajowych, oraz kilkanaście odwołań do stron internetowych. Świadczy to o tym, że doktorant dużo czytał i jest na bieżącą z tematyką poruszaną przez niego w rozprawie doktorskiej. Przegląd literatury, dokonany na początku rozprawy, zawiera tylko niewiele ponad jedną stronę tekstu, jednak wydaje się, że uwzględnia on wszystkie wątki poruszane w literaturze światowej w temacie kondensacyjnych parowych bloków nadkrytycznych z tlenowymi pyłowymi kotłami na węgiel kamienny. Doktorant również sam wiele publikował w tej tematyce, również w czasopismach indeksowanych. W trakcie swoich studiów doktoranckich brał czynny udział w wielu seminariach i konferencjach naukowych, krajowych i międzynarodowych.

W pracy analizowane były trzy główne struktury technologiczne bloku węglowego z tlenowym kotłem pyłowym. W treści rozprawy zaprezentowano wszystkie wyniki dla pierwszej struktury, *W1*, natomiast w załącznikach zawarto wyniki analiz, schematy, tabele i charakterystyki dla dwóch pozostałych struktur, *W2* i *W3*. Jedynym wytłumaczeniem takiego wyboru może być fakt, że zawarcie wyników dla wszystkich analizowanych struktur w tekście rozprawy znacząco zwiększyłoby jej objętość.

2. Cel i zakres rozprawy doktorskiej

Doktorant w swojej rozprawie dokonał analizy efektywności termodynamicznej i ekonomicznej bloku energetycznego o mocy elektrycznej brutto 600MW pracującego w technologii oxy-spalania, składającego się z tlenowego kotła pyłowego na węgiel kamienny, instalację wychwytu i sprężania CO_2, instalację produkcji tlenu oraz zespół turbiny parowej. Analizy przeprowadzono dla trzech struktur bloku: jednego na parametry ultranadkrytyczne (USC) i dwóch na zaawansowane parametry ultranadkrytyczne (A-USC), z pojedynczym i podwójnym przegrzewem wtórnym pary.

Dodatkowo rozważono wykorzystanie ciepła odpadowego zawartego w strumieniu spalin z kotła oraz strumieniu gazu za ekspanderem tlenowni do poprawy sprawności wytwarzania energii elektrycznej analizowanych struktur technologicznych bloków węglowych. Analizowano również wykorzystanie ciepła odprowadzanego z chłodnic międzystopniowych sprężarki CO_2 do wytwarzania elektryczności w organicznym obiegu Rankine'a (nie Rankien'a jak podano w pracy).

W sumie w pracy przedstawiono wyniki analiz termodynamicznych i ekonomicznych kilkunastu wariantów schematów technologicznych elektrowni typu „oxy" i elektrowni referencyjnej. Mimo, że taka ogromna ilość informacji, złożeń oraz rezultatów analiz, charakterystyk itp. jest trudna do przedstawienia i porównania, doktorant zrobił to w sposób przejrzysty i uporządkowany .

Wszystkie te analizy przeprowadzone zostały przy pomocy opracowanych przez doktoranta algorytmów i modeli obliczeniowych dla poszczególnych elementów instalacji bloku, tj. zespołu kotłowego, kotła pyłowego, tlenowni i instalacji wychwytu i sprężania dwutlenku węgla. Modele te zbudowane zostały w kodach GateCycle i Aspen, a następnie zintegrowane przy pomocy programu nadrzędnego. Doktorant pokonał wiele trudności jakie m.in. sprawia użycie programu GateCycle do modelowania obiegu turbiny parowej czy kotła. W przypadku obiegu turbiny parowej opracował model dla turbiny z pojedynczym i podwójnym przegrzewem pary. W przypadku modelu kotła pyłowego dokonał porównania pomiędzy dwoma metodami recyrkulacji spalin, mokrej i suchej, wykazując większą efektywność użycia mokrej metody recyrkulacji spalin. Niektóre opracowane algorytmy i metody obliczeniowe zostały zwalidowane w oparciu o inne kody numeryczne, jak np. algorytm służący do modelowania zespołu turbiny parowej.

Algorytmy, sposoby i założenia do modelowania zostały w pracy opisane dość dokładnie, niektóre jednak trochę zbyt ogólnie. Znajdują się też pomyłki, powstałe raczej przy redagowaniu pracy, m.in. podawane wartości entalpii właściwej gazów (nie pary wodnej) są raczej poprawkami, Δh, w odniesieniu do jakiejś wartości odniesienia.

3. Komentarz i uwagi

W recenzowanej pracy doktorskiej uzyskano bardzo ciekawe wyniki analizy termodynamicznej elektrowni typu „oxy". Przeanalizowano wpływ sprężu sprężarki powietrza tlenowni oraz stopień odzysku tlenu na podstawowe wielkości rozważanego bloku energetycznego w różnych wariantach. Prezentowane w pracy bardzo liczne charakterystyki termodynamiczne są bardzo czytelne i dostarczają bardzo wielu informacji na temat pracy bloku. Odnosi się to również do przeprowadzonych analiz ekonomicznych, na podstawie których można ocenić nakłady i rentowność rozważanych struktur technologicznych bloku „oxy", stanowią one doskonałe uzupełnienie analiz termodynamicznych.

Praca zawiera pewną ilość błędów edytorskich, które nie utrudniają znacząco czytania pracy i analizowania otrzymanych rezultatów badań. Uwagi edytorskie zostały naniesione na

egzemplarz pracy, który został przekazany doktorantowi w celu ich ewentualnego uwzględnienia przy redagowaniu tekstu w celu publikacyjnym (artykuł lub monografia).

Poza drobnymi uwagami natury redakcyjnej z lektury dysertacji nasuwają się następujące spostrzeżenia:

- Jak technicznie zostały zrealizowane obliczenia dla elektrowni typu „oxy", polegające na integracji opracowanych modeli obliczeniowych? W pracy przedstawiono tylko schemat blokowy algorytmu obliczeniowego, nie wspomniano o użytym programie komputerowym.
- W pracy dokonano porównania obliczeń termodynamicznych obiegu turbiny parowej wykonanych opracowanym modelem z obliczeniami innym kodem (kodem IMiUE). Porównanie to wykazało bardzo dużą zgodność parametrów w poszczególnych punktach obiegu, największy błąd względny (znacznie odbiegający od pozostałych), tylko dla temperatury, zaobserwowano w punktach za schładzaczem pary (ostatni wymiennik regeneracji wysokoprężnej). Dlaczego w tych punktach i dlaczego dotyczy to tylko temperatury?
- Analizy termodynamiczne dla trzech wariantów struktur bloku były prowadzone dla różnych wartości ciśnienia w skraplaczu, dla wariantu W1 dla *5kPa*, a dla pozostałych dwóch dla *4kPa*. Co stało na przeszkodzie dla wariantu W1 przyjąć ciśnienie w skraplaczu również na poziomie *4kPa*? Wówczas wzrost sprawności zależałby tylko od zwiększania parametrów pary przed turbiną.
- Prezentowanie wyników analizy termodynamicznych obiegu turbiny parowej bez rysowania linii ekspansji wydaje się niepełne. Wówczas byłoby od razu widoczne, że koniec linii ekspansji w turbinie dla wariantu *W3* (podwójny przegrzew wtórny) jest minimalnie powyżej linii nasycenia. Czy i w jaki sposób uwzględniono ten fakt w sprawności ostatnich stopni części niskoprężnej (podawanej w pracy jako „Sprawność wewnętrzna ostatniej grupy stopni części WP turbiny, %")?
- Dlaczego w analizie ekonomicznej dla szacowania nakładów inwestycyjnych połączono koszty zespołu turbiny parowej z kosztami na budowę kotła pyłowego? Znane są przecież w literaturze zależności pozwalające na osobne szacowanie tych nakładów.
- W kosztach inwestycyjnych na budowę elektrowni „oxy" nie zauważyłem kosztów budowy chłodni kominowej, który jest dość znaczny. Czy ten koszt był uwzględniony w innej pozycji kosztów?

- Jak był określany wskaźnik uwzględniający inne koszty budowy tlenowni, tj. dodatkowe koszty oprócz sprężarki, ekspandera, membran i wymienników ciepła? Czy uwzględniano w nim koszt budynku tlenowni?
- W pracy analizowano koszty jednostkowe wytwarzania energii elektrycznej netto dla elektrowni „oxy". Czy próbowano analizować również koszty emisji uniknionej CO_2 w odniesieniu do bloku referencyjnego bez instalacji CCS?

5.Wnioski końcowe

Mgr inż. Sebastian Michalski podjął wysiłek analizy termodynamicznej i ekonomicznej bloku węglowego z tlenowym kotłem pyłowym, do której wykorzystał własne algorytmy i metody obliczeniowe, co jest niezwykle cenne i warte podkreślenia. Zrealizował z nawiązką zakres planowanych badań i osiągnął wszystkie założone przez siebie cele. Wykazał się przy tym szeroką wiedzą na temat bloków pracujących w technologii oxy-spalania, umiejętnościami w zakresie budowy algorytmów obliczeniowych do analizy termodynamicznej jak i ekonomicznej.

Uwagi przedstawione w tej recenzji w żaden sposób nie umniejszają ogromnego wkładu pracy doktoranta jak i dużej wartości naukowej jego rozprawy doktorskiej.

Biorąc powyższe pod uwagę z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie o Stopniach i Tytułach Naukowych i wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.