



Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Stępczyńskiej - Drygas:
***Analiza termodynamiczna i ekonomiczna bloku węglowego na parametry ultra –
nadkrytyczne z turbiną pomocniczą.***

1. Przedmiot i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa zawiera wyniki badań różnych struktur technologicznych bloku kondensacyjnego o istotnie nadkrytycznych parametrach pary. Celem jest ocena efektów termodynamicznych oraz ekonomicznych wprowadzania różnych opcji modyfikacji obiegu cieplnego oraz napędu pomp wody zasilającej. Badania przeprowadzono zarówno dla obciążenia nominalnego jak i zmiennego. Istotnym elementem analizy jest dyskusja rozwiązań instalacji z turbiną pomocniczą, będącą wyróżnikiem tzw *Master Cycle*. Ponadto dla kilku wybranych konfiguracji bloku wykonano obliczenia parametrów jego integracji z instalacją wychwytu dwutlenku węgla. Poszukiwania sposobów poprawy sprawności konwersji energii w bloku kondensacyjnym i dyskusja ich efektów ilościowych mają istotne znaczenie dla dalszego rozwoju energetyki węglowej. Wzrost sprawności ma także ważne znaczenie biorąc pod uwagę dekarbonizację technologii energetycznych. Z tego powodu podjęcie badań w rozpatrywanym zakresie jest ważne, zarówno z metodologicznego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Zakres rozprawy, przyjęte założenia metodologiczne oraz stosowane przez Autorkę metody analiz termodynamicznych i ekonomicznych sprawiają, że mieści się ona w dyscyplinie *energetyka*.

Przedstawione w pracy wyniki uzyskano w badaniach ujętych w Zadaniu 1 programu strategicznego *Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii*. Przed określeniem celu pracy poprzedzono dyskusją problematyki współczesnych tendencji rozwoju bloków węglowych, skupiając uwagę na zagadnieniach instalacji klasy 700⁰C. Ta część rozprawy łącznie z rozdziałem 3 poświęconym obiegowi parowemu z turbiną pomocniczą stanowi także szczegółowe rozeznanie literaturowe w zakresie rozpatrywanych w pracy zagadnień. Przegląd ten wskazuje na obszary badań, w których można poszukiwać nowych informacji o analizowanych technologiach. W pozostałych rozdziałach pracy rozpatrzono:

- Analizę termodynamiczną różnych konfiguracji ultra – nadkrytycznych instalacji bloków węglowych,

- Analizę efektywności badanych bloków przy ich zmiennym obciążeniu,
- Wpływ na efektywność bloków różnych napędów pomp wody zasilającej,
- Integrację badanej klasy bloku węglowego z instalacją wychwytu CO₂,
- Analizę ekonomiczną.

Wyniki analizy różnych rozwiązań technologicznych bloków porównano z wynikami dla instalacji referencyjnej o następujących parametrach pary: 35MPa/700⁰C, 7.43 MPa/720⁰C, $t_{wz} = 330^0$ C. Odpowiadają one dyskutowanemu w literaturze klasycznemu blokowi 50+. Przyjęty układ regeneracyjny to: 5 wymienników regeneracyjnych niskoprężnych, odgazowywacz i 3 wysokoprężne. Wyróżnikiem jest usytuowanie na wylocie z części średnioprężnej wymiennika mieszkankowego oraz przyjęcie napędu elektrycznego pomp wody zasilającej. W części wysokoprężnej nie wprowadzono schładzacza pary. Taki wybór instalacji referencyjnej można uznać za uzasadniony. Umożliwia on bowiem analizę wpływu wielu opcji doskonalenia obiegu cieplnego. Dla układu z jednym wtórnym przegrzewem analizowano wpływ: różnej liczby schładzaczy pary(1-3) oraz trzy opcje chłodzenia skraplacza. Rozpatrywano dwie instalacje z podwójnym wtórnym przegrzewem . W pierwszej układ regeneracji zawierał 3 wymienniki wysokoprężne, 6 wymienników niskoprężnych(czwarty mieszkankowy) i odgazowywacz. W drugim wariantcie zastosowano schładzacz pary i tylko dwa wymienniki wysokoprężne. Osobną grupę badanych instalacji utworzono wprowadzając przeciwpężna turbinę pomocniczą. Dla tej opcji analizowano 6 wariantów, różniących się strukturą układu regeneracyjnego. Łącznie przedyskutowano 18 różnych rozwiązań. W obliczeniach określano wzrost efektywności termodynamicznej poszczególnych opcji względem wariantu referencyjnego. Największy efekt charakteryzował rozwiązania z ponownym wtórnym przegrzewem.

W drugiej części rozprawy skupiono uwagę na zagadnieniach:

- Zmiennego obciążenia i sposobów regulacji strumienia pary,
- Określeniu efektywności różnych napędów pomp wody zasilającej.

Wykonane w tym zakresie pracochłonne obliczenia stanowią ważną część pracy.

W następnej części rozprawy dyskutowano zagadnienia integracji różnych rozwiązań obiegu cieplnego z instalacją wychwytu dwutlenku węgla i jego transportu. Przyjęto do analiz i obliczeń metodę aminową separacji. Przedmiotem ostatniej części pracy jest analiza ekonomiczna kilku wybranych wariantów badanych instalacji. Z nakreślonego zakresu rozprawy wynika, że jest ona obszerna. Liczba dyskutowanych wariantów jest znaczna, co z jednej strony ma znaczenie dla wskazania możliwości technologicznych bloków o istotnie

nadkrytycznych parametrach pary, z drugiej jednak strony wprowadzenie wariantów różniących się nie tylko strukturą układu regeneracji ale także niektórymi parametrami (np. wartościami temperatury wody zasilającej) utrudnia ilościowe określenie efektu termodynamicznego dla poszczególnych opcji.

Spis literatury obejmuje 95 pozycji, w tym 1 opracowaną z udziałem doktorantki.

2. Ocena rozprawy

Badania podjęte w rozprawie dotyczą poszukiwania rozwiązań układu regeneracyjnego obiegów o bardzo wysokich parametrach pary w obiegach z pojedynczym i podwójnym wtórnym przegrzewem pary. Wzrost parametrów pary pierwotnej i po wtórnych przegrzewach prowadzi do wzrostu średniej temperatury doprowadzenia ciepła do obiegu i tym samym do wzrostu jego sprawności. Powoduje to jednak zmniejszenie efektywności układu regeneracyjnego. Poszukiwanie sposobów usunięcia tych przeciwstawnych tendencji jest ważnym zadaniem, którego rozwiązanie jest konieczne dla dalszego doskonalenia bloku kondensacyjnego, zwłaszcza w kontekście nowych istotnie nadkrytycznych parametrów pary charakterystycznych dla tzw. bloków 50+, przyjmowanych w rozprawie za przedmiot analizy. W tym sensie podjęte w badaniach rozprawie są uzasadnione i celowe. Dyskusja ważności różnych koncepcji przedsięwzięć poprawiających sprawność może bowiem wyłonić rozwiązania najefektywniejsze z termodynamicznego i ekonomicznego punktu widzenia, Z tego też powodu sformułowane w pracy zadania mają ważne znaczenie aplikacyjne dla optymalizacji struktury technologicznej bloku kondensacyjnego, zarówno bloku bez separacji dwutlenku węgla, jak i dla rozwiązań uwzględniających wychwyty CO_2 . Główne znaczenie podjętych badań polega na szczegółowej i systematycznej analizie wielu opcji układu regeneracyjnego i sposobów chłodzenia skraplacza oraz określenia ich charakterystyk zarówno dla obciążenia nominalnego jak i zmiennego. Wśród badanych wariantów na podkreślenie zasługuje układ z przeciwprężną turbiną pomocniczą analizowany zarówno dla wariantu z pojedynczym jak i podwójnym wtórnym przegrzewem pary. Należy przy tym pamiętać, że wprowadzenie tego rozwiązania istotnie komplikuje instalacje, zwiększając wymagania dotyczące algorytmu obliczeniowego, zwłaszcza w analizie stanów zmiennego obciążenia. Autorka opanowała te trudności, co dowodzi jej wysokich kompetencji w badaniach złożonych instalacji energetycznych. Jej kompetencje potwierdzają także przedstawione w rozprawie analizy integracji obiegu cieplnego z instalacją wychwyty i transportu dwutlenku węgla oraz analizy ekonomiczne.

Jak już zauważono wcześniej recenzowana praca zawiera wiele wątków odzwierciedlonych mnogością analizowanych struktur technologicznych oraz podjęciem obok obliczeń efektywności termodynamicznej także analiz instalacji separacji CO₂ i jego transportu oraz obliczeń ekonomicznych. Układ rozprawy i przyjmowane założenia nie zawsze ułatwiają merytoryczną ocenę uzyskanych wyników we wszystkich jej aspektach. Należy tu najpierw zwrócić uwagę na brak podania ogólnego przewodnika po analizowanych wariantach oraz wskazówek metodycznych jak oceniać względną efektywność poszczególnych rozwiązań. Autorka określa wprawdzie strukturę obiegu referencyjnego i przyjmuje dla niego parametry pary, ale wielokrotnie przy zmianie tej struktury zmienia także parametry, zwłaszcza dotyczy to temperatury wody zasilającej. Utrudnia to względną ocenę wpływu wtórnego przegrzewu wewnętrznego oraz pewnych rozwiązań układu regeneracyjnego na efektywność bloku. Nie wyjaśniono także jak wykorzystano wyniki analizy przedstawionej w p. 3.2.

Analizując wyniki obliczeń warto zatrzymać się na stosunkowo niskiej efektywności wprowadzenia turbiny pomocniczej, rozwiązania, które przecież jest wyróżnikiem tzw *Master Cycle*. W rozprawie brak szerszej dyskusji tego zagadnienia. Turbina pomocnicza ma podobne funkcje jak przegrzew wewnętrzny, szkoda, że w pracy nie podjęto tego wątku.

Dla oceny rozprawy ważne znaczenie mają badania zmiennego obciążenia analizowanego bloku. Autorka przedstawia algorytm obliczeń, którego ogólną koncepcję należy uznać za uzasadnioną. Brak natomiast uzasadnienia lub wskazania źródeł na podstawie których przyjęto niektóre zależności w p.5.2. Dotyczy to głównie zał. 5.2, 5.3 oraz charakterystyk przedstawionych na rys. 5.5- 5.9. Ciekawym wynikiem uzyskanym w tym punkcie jest stwierdzenie o większej dynamice spadku sprawności w stanach niepełnego obciążenia bloku z podwójnym wtórnym przegrzewem niż w wypadku układu z pojedynczym wtórnym przegrzewem. Wymaga to szerszego wyjaśnienia. Podobnie nie wszystkie interesujące wyniki przedstawione w zakresie efektywności różnych napędów pomp wody zasilającej zostały szeroko przedyskutowane.

Obszerność pracy była zapewne przyczyną wielu drobnych usterek tekstu. Poniżej podano niektóre z nich:

Str. 10, 6 w. od góry – niezgrabne zdanie rozpoczynające się od *Jednak.....*

Str. 10, 11 w. od dołu - niezgrabne zdanie rozpoczynające się od *Jednakże...*

Str. 11, 3 w. od dołu – zlepek słów *szacowane spodziewane* nie brzmi najlepiej

Str. 17, należało wyjaśnić istotę koncepcji pokazanych na rys. 1.7.

Str. 18, wniosek zawarty w ostatnim zdaniu na stronie wymaga szerszego wyjaśnienia

Str. 23, 3 w. od góry – niegramatyczne zdanie *Pierwszą rozważaną koncepcją.....*

Str. 25, 11 w. od góry – niegramatyczne zdanie *Zastosowanie ograniczone jedynie do obszarów*

Str.29, 11 w od dołu - niegramatyczne zdanie *W ramach prac... ..obliczenia analizy..*

Str. 30, 3 w. od góry – zdanie niejasne

Str. 54 – w zależnościach 4.5, 4.6, 4.8 – powinien występować strumień ciepła

Str. 58 – brak źródła na podstawie którego przyjęto charakterystykę podana na rys. 4.2

Str. 70 - nieprawidłowy podpis pod rys. 4.13

Str. 76 – niegramatyczny tytuł p. 4.7; niegramatyczne zdanie *W związku... jest suma mocy..*

Str. 97 – 8 w. od góry – niezgrabne wyrażenie w zdaniu *Konieczność...reżimach...*

Str. 130 – brak źródła na podstawie którego opracowano schemat pokazany na rys.7.2

Str. 140 - brak źródła na podstawie którego przedstawiono schematy pokazany na rys.7.8-7.10

Str. 145 – czy schemat 7.18 jest koncepcją autorki?

Str. 177 – niestarannie opisano niektóre pozycje literatury, i tak np.:34,35,39, 50, 65,67,68, 69,82.88,91

Inne uwagi : Niektóre rysunki opisano w języku angielskim, co jest możliwe, ale powinno się wyjaśnić przynajmniej niektóre skróty, które na tych rys. się pojawiają.

3. Wnioski końcowe

Mgr inż. Katarzyna Stępczyńska-Drygas przeprowadziła w miarę usystematyzowaną rozległą analizę potencjału termodynamicznego różnych struktur technologicznych bloku kondensacyjnego pracującego z istotnie nadkrytycznymi parametrami pary. Podjęła także dyskusję różnych koncepcji integracji obiegu cieplnego z modułami wychwytu CO₂, jego sprężania i transportu oraz przeprowadziła dla wybranych technologii ocenę ekonomiczną. Zadania rozwiązywano w ramach Zad.1 Projektu Strategicznego *Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii*, co w niektórych obszarach wymagało śledzenia i uwzględnienia wyników uzyskanych w innych tematach tego projektu. Zrealizowała obszerny i wielowątkowy program badań, których wyniki mają ważne znaczenie dla doskonalenia struktury technologicznej rozpatrywanej klasy bloków. Wykazała się przy tym szeroką wiedzą i umiejętnościami w zakresie modelowania złożonych instalacji energetycznych i rozwiązania równań modeli. Praca zawiera pewne usterki, których istota polega głównie na ograniczonej

dyskusji niektórych założeń i wyników. Biorąc jednak pod uwagę zakres pracy, jej złożoność obliczeniową mogą one być wytłumaczalne. Nie mają przy tym istotniejszego wpływu na pozytywną ocenę pracy, która zawiera wiele oryginalnych rozwiązań zarówno w zakresie metodologicznym, poznawczym i aplikacyjnym.

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.

