

Dr hab. inż. Jan Górski, prof. nadzw.
AGH w Krakowie
ul. Obrońców Poczty Gdańskiej 4/3
33-509 Rzeszów,
tel: 665 890 014
e-mail: jagorski@agh.edu.pl



Kraków, 15.06.2014r.

Recenzja pracy doktorskiej

pt.: „*Analiza termodynamiczna i ekonomiczna bloku węglowego na parametry ultra-nadkrytyczne z turbiną pomocniczą*”

1. Podstawa opracowania

Recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach (umowa o dzieło Nr UD/47/RIE0/2014 z dnia 02.04.2014 r.).

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt.: „*Analiza termodynamiczna i ekonomiczna bloku węglowego na parametry ultra-nadkrytyczne z turbiną pomocniczą*” opracowana Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach przez mgr inż. Katarzynę Stępczyńską-Drygas. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Sławomir Dykas, prof. nadzw. Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Rozprawa liczy 189 stron maszynopisu, w tym około 135 rysunków i 43 tablice. Przytoczono łącznie 95 pozycji literatury (w istocie 92, gdyż 3 pozycje się powtarzają), w tym 1 pracę, której współautorem jest doktorantka oraz ponad 25 źródeł internetowych.

3. Ocena celowości podjęcia tematu, sformułowania tytułu i tezy rozprawy

Problemy bezpieczeństwa energetycznego oraz poprawy wskaźników efektywności klasycznych elektrowni węglowych stanowią istotny dylemat zarówno w skali kraju jak i całego globu. Biorąc ponadto pod uwagę kwestie spełnienia kryteriów zrównoważonego rozwoju oraz zmniejszenia kumulujących się skutków nadmiernej emisji zanieczyszczeń ekosfery, w tym w wyniku spalania paliw węglowych w elektrowniach zawodowych, niezbędną potrzebą jest modernizacja istniejących bloków oraz coraz szersze wprowadzanie nowych, zaawansowanych technologii opartych o bloki nadkrytyczne i ultra-nadkrytyczne. Znaczne zasoby węgla brunatnego w Polsce określane na około 25 mld Mg występujące w czynnych oraz perspektywicznych zagłębiach węglowych, stawiają przed kadrą naukową i techniczną konieczność wypracowania ekonomicznych i uwzględniających ochronę środowiska technologii wydobywania i przetwórstwa węgla, głównie poprzez ograniczenie emisji zanieczyszczonych gazów w spalinach z elektrowni. Wiąże się to bezpośrednio z koniecznością

wprowadzenia w dającym się przewidzieć horyzoncie czasowym instalacji CCS, które obligatoryjnie będą wkrótce stanowić integralną część bloków w elektrowniach zawodowych i przemysłowych.

Jak powszechnie wiadomo, prawdopodobne skutki dołączenia układu CCS po stronie spalin (tzw. Post-Combustion Carbon Capture), w klasycznym bloku energetycznym szacowane są na około 10 – 14% spadku sprawności układu. Oznacza to w praktyce, że bez zasadniczej poprawy sprawności nowo projektowanych bloków w elektrowniach, nie będzie możliwym uzyskania akceptacji społecznej zarówno dla ponoszenia kosztów antropogennej emisji CO₂ jak i uzasadnionego wzrostu cen energii elektrycznej i ciepła. W bilansie produkcji i zużycia paliw pierwotnych w Polsce, udział paliw gazowych i energii ze źródeł odnawialnych jest i pozostanie niekorzystny w stosunku do dominującej pozycji węgla kamiennego i brunatnego. Aktualnie wdrażaną technologią jest ograniczanie emisji jednostkowej CO₂ poprzez instalowanie zespołów energetycznych dużej mocy i wysokiej sprawności energetycznej. Ten kierunek został już w kraju zapoczątkowany w istniejących zagłębiach węgla brunatnego. Planowane przez UE w bliskiej perspektywie 20% zmniejszenie emisji CO₂, a w przyszłości jeszcze większe jej ograniczenie, spowoduje zatrzymanie budowy nowych elektrowni w aktualnie realizowanych technologiach. Z uwagi na krajową strukturę zasobów paliw oraz konieczność modernizacji i odtworzenia znacznej części przestarzałego potencjału energetyki krajowej, podjęty został szeroki program badawczy w tym zakresie, w którym szczególną rolę pełni Politechnika Śląska w Gliwicach.

Jednym z realizowanych w ramach tej problematyki zadań jest opracowanie koncepcji wysoko-sprawnych bloków węglowych na parametry ultra-nadkrytyczne. Jest to bardzo ambitne i złożone przedsięwzięcie, które musi uwzględniać w prowadzonych analizach i pracach studialnych szereg problemów dotyczących zagadnień modelowania i optymalizacji procesów termodynamicznych i przepływowych w maszynach i elementach instalacji, badań materiałowych i technologicznych wynikających z ekstremalnie wysokich oraz zmiennych w czasie obciążeń cieplno-mechanicznych, a także inne związane choćby z oszacowaniem kosztów i porównaniem alternatywnych rozwiązań.

Koncepcja bloku siłowni parowej na parametry nadkrytyczne pojawiła się już w połowie minionego stulecia, jednak praktycznie do końca XX wieku nie mogła uzyskać technicznej dojrzałości ze względu na problemy konstrukcyjne wynikające m.in. z wysokich obciążeń cieplno-mechanicznych. Dzięki postępom w inżynierii materiałowej, w latach 1990 ÷ 2000 ponownie powrócono do tej koncepcji, tym razem jednak przyjmując możliwość osiągnięcia bardzo wysokich parametrów pary, tj. powyżej 30 MPa oraz 700⁰C.

Wspomniana rozprawa doktorska stanowi określony i ważny przyczynek w tym zakresie i jest wynikiem kilkuletnich badań doktorantki zrealizowanych bezpośrednio pod opieką dr hab. inż. Sławomira Dykasa. Badania te wykonano w ramach Strategicznego Programu Badawczo-Rozwojowego NCBR dotyczącego „Opracowania technologii dla wysokosprawnych ‘zero-emisyjnych’ bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin”, którego koordynatorem jest prof. Tadeusz Chmielniak.

Recenzowana praca doktorska dotyczy zatem niezwykle ważnej i aktualnej problematyki rozwoju przyszłościowych nisko-emisyjnych technologii węglowych. Jej zasadniczy obszar obejmuje kwestie modelowania procesów cieplno-przepływowych oraz obiegów siłowni cieplnych z uwzględnieniem nieodwracalności procesów i strat w urządzeniach i elementach układu. Autorka poświęca wiele uwagi dostosowaniu opracowanych modeli i wariantów rozwiązań technologicznych do potrzeb ich praktycznej użyteczności, a także poszukiwaniu możliwie najkorzystniejszych rozwiązań, optymalnych z punktu widzenia kosztów i ich technicznej wykonalności.

Doktorantka wprowadziła nie sformułowała w sposób bezpośredni tezy rozprawy, jednak po jej lekturze można wskazać następujące główne tezy pracy:

1. Dla poprawy wskaźników techniczno-ekonomicznych siłowni parowej o parametrach ultra-nadkrytycznych celowym jest przeniesienie upustów pary z części średnioprężnej (SP) do części wysokoprężnej (WP) turbiny głównej. Upusty te, zasilane parą z wylotu turbiny WP przed jej wtórnym przegrzewem, mogą napędzać oddzielną upustowo-przeciwprężną turbinę pomocniczą (TP), która jednocześnie będzie źródłem mocy do napędu dodatkowego generatora lub pomp wody zasilającej.
2. Zastosowanie w takiej konfiguracji turbiny pomocniczej, poprzez obniżenie różnic temperatur pomiędzy przegrzaną parą upustową a wodą zasilającą, umożliwi uzyskanie korzystniejszych warunków wymiany ciepła w podgrzewaczach regeneracyjnych (PR), które w klasycznym rozwiązaniu zasilane są parą z części średnioprężnej turbiny głównej.
3. Uzyskanie wyższych sprawności netto w układzie z turbiną pomocniczą w stosunku do referencyjnego bloku o mocy 900 MW_e oraz zmniejszenie zapotrzebowania energii na potrzeby własne wymaga bardziej rozbudowanych struktur, zwłaszcza jeśli będzie on połączony z instalacją separacji i wychwytu CO₂ ze spalin.
4. Układ z turbiną pomocniczą będzie bardziej elastyczny w warunkach częściowych obciążen bloku i zapewni korzystniejsze wskaźniki efektywności w porównaniu z blokiem referencyjnym. Jest on też ekonomicznie uzasadniony, gdyż taki wariant pozwoli obniżyć nakłady inwestycyjne na system regeneracyjnych podgrzewaczy wody zasilającej oraz uzyskać korzystniejsze wskaźniki rentowności przedsięwzięcia.

Istotna część rozprawy, obejmująca analizę strukturalną oraz modelowanie kilku wariantów i konfiguracji bloku elektrowni węglowej o parametrach ultra-nadkrytycznych, we właściwy sposób koresponduje z tytułem i tematyką pracy. Przeprowadzono analizę wpływu warunków poboru pary na zakres niezbędnych zmian w strukturze obiegu, a w szczególności zespołu turbin i regeneratorów, poszukując możliwie najkorzystniejszych rozwiązań z punktu widzenia zmniejszenia strat oraz poprawy sprawności bloku. Symulacje obejmowały też ocenę efektywności i kosztów wybranych wariantów, w tym po zintegrowaniu bloku z instalacją separacji CO₂ metodą aminową.

Przedstawione wyżej przesłanki teoretyczne oraz praktyczne aspekty aplikacyjne tej pracy wskazują, iż autorka podjęła się rozwiązania ważnej i złożonej problematyki badawczej.

Wstępna część pracy, obejmująca Rozdział 1, zawiera charakterystykę rozwiązań i światowe plany rozwoju technologii bloków węglowych ze wskazaniem zasadniczych tendencji w energetyce zawodowej oraz wiodących programów badawczych dotyczących tej problematyki. Wykorzystano tu szereg informacji źródłowych w oparciu o bogato udokumentowane i aktualne źródła literaturowe (do 2012 r.), które obejmują szereg propozycji i prognoz dotyczących koncepcji i planów rozwoju bloków energetycznych na parametry ultra-nadkrytyczne. Wskazano tu zarówno oczekiwane efekty wprowadzenia takich rozwiązań jak i związane z nimi problemy technologiczne. Rozdział ten uzasadnia w bezpośredni sposób celowość i wybór obszaru podjętych przez doktorantkę badań i został przygotowany merytorycznie poprawnie i wyczerpująco.

W Rozdziale 2 dysertacji sformułowano główne cele oraz zakres badań stanowiących zasadniczą część pracy. Obejmuje ona analizę termodynamiczną i ekonomiczną wybranych koncepcji zaawansowanego bloku węglowego na parametry ultra-nadkrytyczne.

Kolejny, Rozdział 3 zawiera analizę termodynamiczną referencyjnego obiegu parowego na parametry USC o mocy 900 MW_e, a także omówienie specyfiki rozwiązania układu z dodatkową turbiną upustowo-przeciwprężną zasilaną parą z upustu w części wysokoprężnej turbiny głównej. Zaprezentowano tu opis koncepcji „Master Cycle” oraz innych, zmodyfikowanych rozwiązań dotyczących wariantów regeneracyjnego podgrzewu wody zasilającej i napędu pomp, w tym zastosowania pojedynczego i podwójnego przegrzewu pary w wymienionym układzie.

Rozdział 4 obejmuje szczegółową analizę termodynamiczną różnych konfiguracji ultranadkrytycznego bloku węglowego i jego głównych komponentów. Stanowi on logiczne rozwinięcie treści poprzedniego rozdziału. W oparciu o komercyjny kod obliczeniowy Ebsilon v.10.0 opracowano model strukturalny bloku i przeprowadzono symulację obiegu w warunkach nominalnych. Przyjęto tu szereg założeń upraszczających dotyczących głównie strat cieplnych i hydraulicznych, składu i właściwości paliwa węglowego oraz składu spalin. Szczegółowo rozpatrzono przy tym takie elementy układu jak skraplacze, układy regeneracyjnego podgrzewu wody i związane z nimi konfiguracje upustów parowych wykorzystujące układ turbiny pomocniczej. Przeprowadzono też m.in. ocenę wpływu ciśnienia przegrzewu pary oraz temperatury wody zasilającej na przyrost sprawności obiegu. Szkoda, że autorka nie wyjaśniła w jakim stopniu analizowane w pracy rozwiązania różnią się od koncepcji „Master Cycle”.

Stany pracy przy obciążeniach częściowych bloku dla założonych charakterystyk sprawnościowych urządzeń zostały przeanalizowane w Rozdziale 5. Uzyskane tu rezultaty stanowią istotny i oryginalny wkład doktorantki do prognozowania i oceny pracy bloku w zmiennych warunkach pracy. Przeanalizowano zakres pracy bloku w zakresie od 40 do 100 % obciążenia. Oceniono efektywność każdego z wariantów uwzględniających modyfikacje konfiguracji turbiny pomocniczej, napędu pomp i przegrzewu pary.

Kolejny, Rozdział 6 poświęcony jest porównaniu efektywności rozwiązań dotyczących różnych wariantów napędu pomp wody zasilającej dla nominalnych i częściowych obciążeń bloku siłowni parowej. Szczegółowe analizy wykonano dla sześciu wariantów napędu pomp wody zasilającej. Wyniki symulacji zebrano w postaci wykresów i zestawień tabelarycznych prezentując prognozowane wartości sprawności netto bloku dla nominalnych poza obliczeniowych stanów pracy. Do tego celu użyto program Ebsilon oraz opracowane schematy obiegu z uwzględnieniem poszczególnych wariantów układu i napędu pomp oraz generatorów. Szkoda tylko, że nie pokazano choćby jednego przypadku prezentującego adekwatny schemat obiegu w kodzie Ebsilon.

Rozdział 7 dotyczy zagadnień modelowania integracji bloku z instalacją wychwytu ditlenku węgla. Przyjęto tu najbardziej powszechny wariant separacji CO₂ ze spalin metodą aminową. Założono typowe warunki poboru pary technologicznej, parametrów procesu wychwytu oraz jego energochłonności w celu dostosowania warunków współpracy instalacji wychwytu i sprężania CO₂ z obiegiem głównym dla rozpatrywanych modyfikacji bloku siłowni. Określono przy tym wpływ poszczególnych konfiguracji oraz sposobów regulacji parametrów i strumienia pary technologicznej na sprawność netto bloku, w tym przy obciążeniach częściowych w zakresie 40 – 100%. Analizę układu separacji CO₂ przeprowadzono z użyciem z użyciem dodatkowych procedur pomocniczych w pakiecie AspenPlus. Niestety, nie wskazano tu czy ten fragment został wykonany samodzielnie przez doktorantkę, a jeśli tak, to w jakim zakresie.

W Rozdziale 8, w oparciu o podstawowe zasady oceny efektywności ekonomicznej przedsięwzięć inwestycyjnych (metoda NPV) określono wskaźniki opłacalności inwestycji obejmującą poszczególne warianty bloku siłowni parowej wraz z instalacją sekwestracji CO₂. Wykazano, że bardziej rozwinięte struktury układu siłowni, obejmujące zastosowanie systemów przegrzewu pary wraz z turbiną pomocniczą, zwiększają jednostkowe koszty inwestycyjne, choć największy ich wzrost wynika z integracji bloku z instalacją CCS. Wydaje się być jednak dyskusyjnym przyjęcie tak dużego (90%) poziomu wychwytu CO₂ ze spalin.

Pracę uzupełniono o Załącznik, w którym doktorantka zamieściła zasady obliczeń współczynnika przenikania ciepła, którego wartość jest istotna z punktu widzenia określenia powierzchni wymiany ciepła w poszczególnych sekcjach podgrzewaczy regeneracyjnych. Przedstawiona uproszczona metodologia jest powszechnie znana i nie wnosi żadnych istotnych treści do pracy.

4. Uwagi krytyczne i szczegółowe

Praca reprezentuje bogaty materiał faktograficzny w oparciu o który opracowano własne modele i przeprowadzono liczne symulacje dla szeregu wariantów i konfiguracji układu bloku o parametrach

ultra nadkrytycznych zarówno dla stanów nominalnych jak i poza obliczeniowych pracy. Szereg wyników jest zupełnie nowych i oryginalnych, potwierdzając przy tym wartości wskaźników podawane w ostatnio publikowanych na świecie pracach o tej tematyce.

Koncepcja przeniesienia upustu pary w celu regeneracyjnego podgrzewu wody do części wysokoprężnej turbiny oraz użycie pomocniczej turbiny upustowo-przeciwprężnej z zastosowaniem podwójnego przegrzewu pary nie jest czymś zupełnie nowym. Rozwiązanie takie, dla bloku na parametry USC zostało zaproponowane w 1993r. przez Elsam Engineering („Master Cycle”, Patent WO 2004070172 A1).

W trakcie obliczeń poprawnie wykorzystano powszechnie uznane i efektywne pakiety obliczeniowe jak Epsilon oraz AspenPlus, w oparciu o które modelowano blok siłowni cieplnej i jego komponenty. Zapewne koniecznym było opracowanie kilka własnych procedur lub skryptów o czym brak jest informacji w pracy. Nie wiadomo, w jakim stopniu wybór określonego narzędzia obliczeniowego wpływa na wartości parametrów termicznych i kalorycznych czynnika (inne algorytmy i równania stanu opisujące właściwości i przemiany H₂O), co przy porównywaniu wyników symulacji dla kilku wariantów uniemożliwia uzyskanie jednoznacznej odpowiedzi jaka jest ich niepewność (np. str.92-93 przyrost sprawności o 0.03% oraz 0.01%).

Szereg wyników końcowych, pokazujących możliwe do uzyskania przyrosty sprawności bloku na poziomie setnych części procenta może być dyskusyjnych z racji niedoszacowania wpływu założeń i wyników cząstkowych na jej wartość wynikową (np. sprawności wewnętrzne zespołów turbin, pomp, wentylatorów, współczynnik nadmiaru powietrza i inne). Takie podejście wymagałoby jednak wprowadzenia analizy wrażliwości modelu.

Warto było też wskazać we wstępnej części pracy, jakie są oszacowania dotyczące strat i ich udziału w wynikowej sprawności bloku w odniesieniu do podstawowych układów i zespołów siłowni (tj. kocioł, turbina parowa, układy chłodzenia i systemy regeneracji ciepła, układy pomocnicze oraz przygotowania i dostarczania paliwa i powietrza).

Zamieszczony na końcu Załącznik, który powinien zawierać model i algorytm obliczeń wymiennika ciepła (podgrzewacze regeneracyjne) jest praktycznie zbędny ponieważ nie wnosi on nic istotnego do pracy. Wprowadzone uproszczenia służące do obliczeń średniej różnicy temperatur oraz korelacji dotyczących określania współczynników przejmowania ciepła są nie do końca poprawne. Brak jest m.in. określenia charakterystycznych temperatur dla liczb kryterialnych we wzorach (Z.14) ÷ (Z.16) oraz (Z.19) i (Z.21) ÷ (Z.23). Czy dla wartości wprowadzanych do wzorów parametrów termofizycznych takich jak gęstość, ciepło właściwe, przewodność i lepkość płynu użyto średnią temperaturę czynnika, a może powinna to być średnia temperatura pomiędzy temperaturą ścianki i temperaturą płynu?

Rozdział 7 poświęcony modelowaniu procesów wychwytu CO₂ ze spalin metodą chemicznej absorpcji aminowej opracowano na podstawie wyników badań zrealizowanych w dużej części w innym zespole badawczym. Nie wskazano przy tym jaki jest tutaj bezpośredni wkład doktorantki w prezentowane tu rozwiązania (m.in. model w programie AspenPlus czy jego integracja z obiegiem dla wybranych wariantów?). Brak jest komentarza dotyczącego przedstawienia w jaki sposób zintegrowano model wychwytu CO₂ w AspenPlus z modelem bloku siłowni w kodzie Epsilon.

W opinii recenzenta praca została przygotowana z dużą starannością oraz dbałością o stronę edytorską i merytoryczną. Pomimo to jej autorce nie udało się uniknąć pewnych drobnych niedociągnięć, które w dalszej części opinii zostały podane. Występuje dość duża ilość błędów literowych, a czasami można napotkać szereg określeń żargonowych (np.: „reżimy pracy”, „cylindryczne modelowanie”, „zimny koniec”, „zimna szyna”, „generator bilansujący”, itp.).

W odniesieniu do całości tekstu rękopisu pracy w szczególności zauważono, że:

- W treści pracy nie umieszczono wykazu ważniejszych oznaczeń oraz używanych skrótów. Jednocześnie występujące w tekście wielkości często są zapisano niewłaściwie (np. entalpia

zamiast entalpia właściwa, itp.) i nie zawierają jednostek w jakich je podano, co utrudnia jej lekturę, a także powoduje błędy w formalnym zapisie równań.

- Spis literatury obejmujący 95 pozycji nie został uszeregowany alfabetycznie, przez co m.in. trzy publikacje się powtarzają, patrz poz. [17] i [38], [51] i [89] oraz [59] i [80]. Analogiczne powtórzenie prawdopodobnie dotyczy poz. [11] i [32] literatury.
- W szeregu z nich brak jest pełnych danych bibliograficznych, patrz, poz. [1, 3, 6, 17, 25, 34, 35, 50, 65, 83 – 87, 93], dotyczy to głównie źródeł internetowych oraz daty dostępu (wiele z nich szybko stają się niedostępne lub nieaktualne).
- W wykazie literatury nie ma konsekwencji zapisu danych o autorach – np. pełne imię na początku, gdzie indziej skrót imienia, lub też umieszczone po nazwiskach autorów, patrz m.in. [4, 8] i [9, 12], [49] i [68], [70] i [79], itd.
- Pozycja [39] literatury ma niezrozumiały zapis (dwa różne źródła jednocześnie?)
- Brak jest przywołania źródła literatury w postaci jakiegokolwiek dokumentu dotyczącego „Strategicznego Programu Badawczego” NCBR, w ramach którego realizowano w/w pracę doktorską.
- Dziwny jest brak konsekwencji w używaniu wartości i przyrostów temperatury, wszędzie gdzie podawane są stopnie Celsjusza lub Kelwina, (patrz np. str.60: Rys. 4.3), należało te kwestie ujednoczyć.
- W Tabeli 1.2, na str. 9 zawarto tylko dane dla wybranych bloków elektrowni węglowych na świecie na parametry SC i USC – w odniesieniu do podanej, jak sądzę, wartości sprawności cieplnej określonej względem LHV paliwa, ($1 \div 2\%$ wyższe sprawności niż dla HHV paliwa). Bezpośrednie porównanie danych może też być mało precyzyjne, bo nie uwzględnia benchmarkingu pochodzenia i gatunku paliwa (różnice kilku procent w kaloryczności i składzie). Brak takiej dyskusji w tej części pracy.
- Rysunek 1.1 na str.11 nie został opisany, nie ma także podpisu pod nim.
- Str. 28 w.1g – zamiast opisowej formy należało użyć: „wysoka wytrzymałość względna stopów tytanu”...
- Rys. 1.16 – brak informacji o producentach turbin, a także nie wyjaśniono czy chodzi o sprawność politropową czy izentropową turbin.
- Rys. 3.2 3.5 nie zostały właściwie opisane (sensu symboli np. 26A, 10, 24,... należy się domyślać, a w tekście na str.37 też nie ma odpowiedniego objaśnienia). Także termin: „zasilana parą z zimnej szyny” (str.37, w. 11d) jest nieporozumieniem.
- Str.44, w.10g – powinno być: względny strumień pary...
- Na str. 53 i 54 zależności (4.4) \div (4.6) oraz (4.8) nie korespondują z wprowadzonymi pojęciami i definicjami. Należało użyć jednolitej symboliki oznaczeń dla strumienia ciepła doprowadzonego i odprowadzonego, to samo dotyczy strumienia energii chemicznej paliwa. Wzór (4.8) jest zatem niepoprawnie zapisany.
- Podany na str.58 w Tabeli 4.2 skład umowny węgla („węgiel 23” - ?) to udziały masowe czy inne? Jaki gatunek krajowego węgla jest najbliższy podanej charakterystyce?
- Nie wyjaśniono na jakiej podstawie w Tabeli 4.4 (str. 59) przyjęto konkretne wartości ciśnienia pary upustowej dla zasilania regeneracyjnych podgrzewaczy wody.
- Podany schemat na Rys. 4.1 bloku referencyjnego o mocy 900 MW_e, dla którego dane dotyczące parametrów czynnika zamieszczono w Tab. 4.6 nie został szczegółowo opisany, (p-ty 1 \div 49), a ponadto nie pokazano zrzutu ekranu z modelowania obiegu w kodzie Epsilon.
- Analogiczna jak wyżej uwaga dotyczy rysunkowych schematów bloku 900 MW_e dla rozpatrywanych wariantów jego konfiguracji (Rys. 4.8, 4.10 \div 4.13, 4.15, 4.16, 4.22, 4.25 \div 4.28, 6.1 \div 6.6).
- Rys. 4.5 i 4.9 - nie opisano krzywych zmian temperatury pary upustowej (PW1, PN1,..., itd.).

- Na rys. 4.37 należało wyraźnie wskazać, które przypadki dotyczą wody zasilającej o temperaturze 330 °C, a które dla 350 °C (warianty 2P ÷ 2P_TP_PWZ). Ta sama kwestia dotyczy m.in. Rys. 8.4 i Rys. 8.5.
- Nie podano jaki zakłada się wzrost temperatury wody chłodzącej w chłodni kominowej w Rozdziale 6 (czy jest on wynikowy, czy przyjęty do obliczeń?).
- Na Rys. 5.3 ÷ 5.10 w opisie brak jest informacji, że przedstawiono tu zredukowane charakterystyki maszyn i urządzeń. Opis w/w rysunków jest mało staranny (indeksowanie!).
- Na Rys. 8.14 i 8.15 nie podano wartości dla przypadku bloku referencyjnego (na pozostałych rysunkach naniesiono poprawki autorskie w wersji dostarczonej w późniejszym terminie).
- W opisie wielu rysunków w Rozdziałach 4 ÷ 7 brak uzupełniających informacji, np. Rys. 4.31 ÷ 4.34 – nie ma: „temperatura wody zasilającej” (TWZ) 310 – 350 °C, Rys.7.21, 7.22 – „Wariant”...
- Metodyka obliczeń współczynników przenikania ciepła podana w Załączniku (str. 171 – 176) jest bardzo uproszczona. Nie podano jaki typ wymiennika użyto do analizy. Brak jest odpowiednich komentarzy które uzasadniałyby przyjęte założenia, wybrany model fizyczny i matematyczny omawianych procesów (stare korelacje dla liczb podobieństwa Nusselta, brak zakresu obowiązywania wzorów kryterialnych, jakie są warunki odniesienia dla wartości stałych fizycznych płynu?).

5. Uwagi końcowe

Zamieszczone w tekście rękopisu uwagi mają zasadniczo charakter czysto redakcyjny i nie stanowią istotnego elementu końcowej oceny pracy doktorskiej.

- Doktorantka podjęła się analizy studialnej oraz rozwiązania interesującego zadania badawczego o ważnych i przyszłościowych aspektach aplikacyjnych.
- Jako oryginalne osiągnięcia doktorantki należy w szczególności wskazać:
 - opracowanie i testowanie modelu termodynamicznego dla szeregu wariantów zaawansowanego bloku węglowego na parametry ultra-nadkrytyczne, w tym analizę wskaźników jego pracy dla stanów nominalnych i obciążeń częściowych,
 - określenie możliwości podwyższenia sprawności przyszłościowego bloku USC poprzez różnego rodzaju modyfikacje struktury i układu konstrukcyjnego,
 - analizę integracji bloku z instalacją CCS wychwytu i separacji CO₂ ze spalin,
 - ocenę efektywności ekonomicznej i kosztów inwestycji dla zaawansowanego bloku węglowego.
- Na podstawie przedstawionych w pracy metod i uzyskanych wyników badań należy stwierdzić, że doktorantka dysponuje szeroką wiedzą z zakresu problematyki modelowania i pomiarów sprzężonych procesów ciepłno-przepływowych, a także posiada niezbędne umiejętności w posługiwaniu się współczesnymi narzędziami symulacji komputerowej.
- Praca doktorska, choć posiada kilka drobnych niedoskonałości, została przygotowana starannie i w sposób przemyślany, z odpowiednim uwypukleniem istotnych kwestii ujętych i rozwiniętych w trakcie badań. Postawione zadania badawcze, które zostały sformułowane w postaci celu zakresu i tez pracy, zostały następnie zweryfikowane w drogą symulacji komputerowych.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej argumenty stwierdzam, że opiniowana praca Pani mgr inż. Katarzyny Stępczyńskiej-Drygas spełnia wymogi stawiane w odpowiednich przepisach ustawy o stopniach i tytułach naukowych i wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Handwritten signature in blue ink.