



prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda  
Instytut Techniki Ciepłej  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Andrzeja Kochaniewicza,  
zatytułowanej „Wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin kotłów bloków  
węglowych w celu zwiększenia sprawności wytwarzania energii  
elektrycznej”

### 1. Zasadność podjęcia tematu

Polska stała się w ostatnim okresie jednym z głównych rynków dla bloków węglowych na wysokie (nadkrytyczne) parametry pary. Decydują o tym znaczne krajowe zasoby węgla kamiennego i brunatnego, rzutuujące na koszt pozyskania energii niższy niż dla innych, pochodzących głównie z importu paliw, konieczność odnowy majątku wytwórczego energetyki, w znacznej części już wiekowego, wchodzącego w bliską końcową fazę okresu eksploatacji, a także jego rozbudowy. Wypracowane w świecie rozwiązania technologiczne służące poprawie sprawności oraz ochronie środowiska stworzyły nowe możliwości modyfikacji tradycyjnych układów technologicznych bloków węglowych.

Jednym z takich rozwiązań jest powiązanie procesu głębokiego odsiarczania spalin z ich wyprowadzeniem do chłodni kominowej. Ten zabieg, zastosowany po raz pierwszy przed ponad 30 laty (1982) w Niemczech, w demonstracyjnej elektrowni Völklingen, stosowany jest obecnie powszechnie, nie tylko przy budowie nowych jednostek, ale często także w ramach modernizacji starszych. Dzięki temu nie zachodzi potrzeba ponownego dogrzewania spalin, jak to miało miejsce w tradycyjnych układach, gdzie kierowane one były do „suchego” komina. Spaliny przed wprowadzeniem do (mokrej) instalacji odsiarczania schładzane są do temperatury podobnej jak w tradycyjnych, stosowanych uprzednio układach połączeń. W ten sposób pojawia się do zagospodarowania w układzie technologicznym siłowni dodatkowy strumień energii.

Poszukiwanie rozwiązań służących poprawie sprawności konwersji energii w blokach energetycznych opalanych paliwami pochodzenia organicznego jest wynikiem wprowadzenia w Unii Europejskiej Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji Gazów Cieplarnianych. Oczekiwany przez decydentów unijnych wysoki koszt emisji dwutlenku węgla sprzyjać będzie poszukiwaniu metod podwyższania sprawności (skutkujących obniżaniem jego emisji jednostkowej).

Wprowadzony obowiązek przygotowania nowych bloków opalanych paliwami pochodzenia organicznego do usuwania dwutlenku węgla ze spalin to kolejny czynnik skutkujący istotnymi zmianami w układzie technologicznym, w tym potrzebą zużycia znacznych strumieni energii z jednej strony, z drugiej zaś pojawieniem się kolejnych strumieni ciepła do zagospodarowania. Jednym z przykładów jest tu ciepło pochodzące z chłodzenia

międzystopniowego sprężarek dwutlenku węgla przeznaczonego do składowania (sekwestracji).

Autor rozprawy podjął się kompleksowej analizy stosowanych rozwiązań technicznych związanych z nowymi możliwościami zagospodarowaniem tych strumieni energii. Temat, w związku z przedstawionymi powyżej informacjami, należy uznać za szczególnie aktualny, równocześnie interesujący z naukowego i technicznego punktu widzenia. W Polsce jest on bardzo istotny, z uwagi na podejmowane już, ale przede wszystkim planowane kolejne inwestycje w bloki węglowe.

## **2. Ogólna charakterystyka i ocena rozprawy**

Oceniana rozprawa podzielona została na 8 rozdziałów. Dodatkowe, nie numerowane, to: wstęp, sformułowanie celu i omówienie zakresu pracy oraz podsumowanie. Rozdział pierwszy zawiera krótką informację dotyczącą istniejących oraz będących w budowie bloków węglowych, w których zastosowano wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin.

W również krótkim rozdziale drugim wskazano uwarunkowania i ograniczenia odzysku ciepła odpadowego ze spalin, charakterystyczne dla bloków opalanych węglem brunatnym oraz kamiennym. Rozdział trzeci stanowi syntetyczny opis obiegu wyjściowego przyjętego jako baza do dalszych analiz porównawczych. Strukturę oraz parametry przyjęto tu zgodnie ze Strategicznym Programem Badawczym, dla jednostki na parametry nadkrytyczne o mocy brutto 900 MW. Rozdział ten zawiera w uzupełnieniu opis przyjętych parametrów paliwa oraz spalin, osobno dla węgla brunatnego i kamiennego oraz specyfikację wskaźników charakteryzujących pracę bloku.

Rozdział czwarty stanowi przegląd zagadnień związanych z odzyskiem ciepła spalin wylotowych do podgrzania wody obiegu głównego siłowni parowej. Przedstawiono tu gamę możliwości zagospodarowania ciepła odzyskiwanego na drodze schłodzenia spalin pomiędzy elektrofiltrem a instalacją odsiarczania. Doktorant przedstawił tu wyniki własnych obliczeń bilansowych dla ponad dwudziestu różnych przypadków związanych z przekazaniem ciepła z chłodnicy spalin ulokowanej za elektrofiltrem do: podgrzania kondensatu, wody zasilającej, powietrza do kotła, w konfiguracji z wykorzystaniem pośredniego obiegu wodnego lub bezpośrednio. Kolejne rozważane przypadki opatrzone dobrze przygotowanymi ilustracjami (schematami technologicznymi), dodatkowo w pracy zamieszczono wykresy T-Q dla wymiennika odzyskowego. Ostateczne wyniki obliczeń porównano w układzie tabelarycznym oraz graficznym, zwracając uwagę na zmiany sprawności obiegu, średniej temperatury doprowadzenia ciepła do obiegu oraz sprawności kotła. Wyniki i sposób ich prezentacji nie budzą zastrzeżeń. Rezultaty obliczeń są zgodne z oczekiwaniami, w tym danymi literaturowymi. Prezentacji wariantów dokonano w przejrzysty i interesujący sposób, zwrócono uwagę na szereg istotnych kwestii związanych z bilansowaniem obiegu. Jako mankament należy wskazać brak dobrego zestawienia założeń do obliczeń, które można by przygotować w podobnym układzie jak wyniki (tabela 4.1 oraz tabela 4.2). W rozdziale nie daje się odnaleźć informacji o wykorzystanych narzędziach obliczeniowych.

Rozdział piąty Doktorant poświęcił możliwości wykorzystania ciepła odpadowego w alternatywny do analizowanego wcześniej sposób, a mianowicie do zasilania układu ORC. Takie podejście prowadzi w istocie do układu dwuczynnikowego. W rozdziale przedstawiono szersze rozważania dotyczące gamy i specyficznych własności wchodzących w grę czynników niskowrzących. Doktorant dokonał analizy uwarunkowań doboru czynnika

roboczego ORC w oparciu o kryteria termodynamiczne oraz o rozbudowane kryteria związane z potencjalnym wpływem na środowisko. Wyniki obliczeń obiegów ORC przedstawione zostały dla pełnej gamy rozpatrywanych czynników, w układzie wariantowym, z zastosowaniem wymiennika regeneracyjnego i bez, dla dwóch różnych wartości spiętrzenia temperatur. Należy tu przypomnieć, że stosowanie wymiennika regeneracyjnego w układach ORC wchodzi w grę dla tzw. czynników suchych i dotyczy dochładzania czynnika pomiędzy wylotem turbiny a wlotem do skraplacza. Ostateczny wynik obliczeń (w postaci zwiększonej mocy i sprawności bloku jako całości) przedstawiono dla wariantu (czynnika) umożliwiającego uzyskanie największej mocy z układu ORC. W tym rozdziale, w większym stopniu niż w poprzednim odczuwa się brak informacji o założeniach (wyjściowych parametrach) przyjętych do obliczeń. W pracy skupiono się na przedstawieniu wyników w postaci szeregu wykresów ilustrujących uzyskaną sprawność, moc oraz pracę jednostkową obiegu ORC dla analizowanych przypadków. Zabrakło informacji o parametrach obiegów ORC, stosowanej metodzie (obliczenia wariantowe, optymalizacja?) uzyskania wyników. Doktorant wskazał jedynie narzędzia obliczeniowe, którymi się posłużył (programy Aspen Plus oraz Refprop). Być może posłużono się metodą oceny sprawności (opisaną w rozdziale 5.5), ale, jak się wydaje, z uwagi na przyjęte uproszczenia jest to metoda o charakterze wstępnego szacunku. Doktorant dysponował narzędziami umożliwiającymi pełną symulację (wspomniany program Aspen), jak się wydaje, takowej dokonał. Zwraca uwagę zauważalnie większa liczba usterek tekstu w tym rozdziale w porównaniu do poprzedniego.

W rozdziale szóstym poddano analizie kolejną możliwość poprawy sprawności bloku energetycznego – poprzez suszenie węgla (ze zrozumiałych względów rozważono tu jedynie węgiel brunatny). Wstępną część rozdziału poświęcono omówieniu stanu techniki światowej w tym zakresie. Analizę obliczeniową przeprowadzono dla bloku 600 MW na parametry nadkrytyczne (a więc innego niż dla rozważań prowadzonych w rozdziałach poprzednich) – w pracy brak jest bliższych informacji, jaką konfigurację i parametry bloku przyjęto. Posłużono się natomiast takimi samymi parametrami węgla (brunatnego), jak wskazane w rozdziale trzecim.

Rozdział siódmy poświęcono możliwości poprawy sprawności bloku wyposażonego w układ usuwania oraz sprężania dwutlenku węgla, drogą zagospodarowania ciepła pochodzącego z chłodzenia międzystopniowego sprężarki oraz z chłodnicy końcowej CO<sub>2</sub>. W tym przypadku również poddano analizie możliwość wykorzystania instalacji ORC. Jako alternatywę rozważono wykorzystanie tego ciepła do podgrzania kondensatu w obiegu podstawowym. Uzyskane wyniki należy uznać za interesujące. Zastosowane podejście obliczeniowe nie budzi wątpliwości.

W rozdziale ósmym Doktorant przedstawił analizę ekonomiczną bazowaną na realiach współczesnego rynku energii, handlu emisjami. Oparto ją na standardowym podejściu, z wykorzystaniem podstawowych wskaźników jak NPV oraz graniczna cena sprzedaży energii elektrycznej. Dla tego ostatniego parametru w rozprawie przeprowadzono analizę wrażliwości.

Na cytowaną w pracy literaturę składają się 42 pozycje, zaskakująco mało jak na rozprawę o tak rozbudowanej gamie rozważanych zagadnień.

Tekst rozprawy spisano dość starannie, zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń, ilustracji oraz tabel. Niemniej, obok braków wskazanych wcześniej, daje się zauważyć dość znaczną liczbę usterek omówionych nieco szerzej w rozdziale następnym.



### 3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Autor nie był do końca konsekwentny w zakresie poglądu na konieczne do przyjęcia założenia upraszczające. Wyrazem tego są na przykład: stwierdzenie ze str. 29 „*W przypadku zastosowania obiegu pośredniego woda-woda (rys.4.1) konieczne jest dodatkowo właściwe przyjęcie spiętrzenia temperatur oraz przyrost temperatury wody obiegu pośredniego*” w konfrontacji z komentarzem ze str. 46: „*W celu uproszczenia, pominięto wpływ wodnego obiegu pośredniego na obliczenia*”.

Pewne stwierdzenia zamieszczone w pracy powinny ulec aktualizacji z uwagi na dynamikę zmian zachodzących w krajowej energetyce, na przykład:

- struktura paliw wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej uległa w ostatnich w Polsce latach pewnym zmianom. Doktorant na str. 84 wspominał, że ze spalania węgla pochodzi 95% całkowitej produkcji energii elektrycznej. Aktualnie jest to znacząco poniżej 90% (według danych ARE 86.7% w roku 2010, 85.5% w roku 2011);
- liczba pracujących w naszym kraju instalacji ORC to już co najmniej 5, dalsze są w budowie. Doktorant powołuje się w pracy na pierwszą z takich instalacji jako jedyną, wskazuje również na zarzucony przed laty projekt dla Siemiatycz jako kolejną planowaną inwestycję ORC.

W tabeli 5.1 odczuwa się brak informacji o czynniku R-11

Pogląd przedstawiony w rozdziale 7, że technologie i metody wychwyty CO<sub>2</sub> są znane i opanowane należy uznać za dyskusyjny. Do chwili obecnej brak jest na świecie instalacji wychwyty CO<sub>2</sub> z bloku węglowego, działającej w skali odpowiadającej klasie instalacji rozważanych w pracy, działających na warunkach komercyjnych.

Jako dyskusyjną należy uznać informację o zaliczeniu ciepła odpadowego z instalacji energetycznej do źródeł odnawialnych (uprawnienie do świadectwa pochodzenia dla energii elektrycznej produkowanej z ciepła odpadowego – str. 120). Zgodnie z zapisami Ustawy Prawo Energetyczne odnawialne źródło energii to „*źródło wykorzystujące w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu wysypiskowego, a także biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątków roślinnych i zwierzęcych*”.

Wątpliwość budzą założenia dotyczące sprawności generatora. W pracy przyjęto taką samą wartość tej sprawności dla jednostki podstawowej (klasy 900 MW) oraz (niewielkiego) generatora układu ORC. W obu przypadkach jest to 98.8% (por. str.21 oraz str.73). Podobnie budzi wątpliwość przyjęty w analizie ekonomicznej okres budowy bloku klasy 900 MW (3 lata). W praktyce budowa tej klasy bloku to pomiędzy 50 a 60 miesięcy, a więc około 5 lat.

Usterki o charakterze redakcyjnym to na przykład:

- w równaniu 3.1 w jeden iloczyn zlały się człony symbolizujące straty ciepła w żużlu i popiele lotnym. Zależność wyjściową do tego wzoru stanowi, jak się wydaje, równanie 3.9. Dla przejrzystości rozprawy lepiej by było, gdyby pojawiło się ono w tekście wcześniej, a w wyniku jego przekształceń zapisano by właśnie równanie 3.1. W tym kontekście (pod kątem jednolitości opisu) dobrze by było poddać analizie również zależność 6.3, opartą także na wzorze na sprawność kotła;

- doktorant niedostatecznie zadbał o właściwy dobór tekstu podpisów pod rysunkami, utrudnia to niekiedy lekturę, bowiem wymaga starannych poszukiwań w części opisowej pracy w celu odnalezienia stosownych informacji. Na przykład w podpisach pod rys. 5.21-5.25 oraz rys.5.28-5.38 warto by umieścić informację, że dotyczą one wariantów z wymiennikiem regeneracyjnym oraz bez tego wymiennika. Pod rys.7.6 figuruje podpis „Praca obiegu dla etanolu na wykresie T-s”, nie odwzorowuje to, jak się wydaje, treści rysunku. Pod rys.4.34 figuruje podpis zaczynający się od słów „Porównanie średniej temperatury doprowadzonej do obiegu ...”. Podpisy pod rys. 8.1 („Blok wyjściowy”), podobnie pod 8.2 i 8.3 stanowią skróty myślowe, chodzi oczywiście o schematy cieplne;
- tytuł rozdziału 5.4 wymaga usunięcia literówki

Szereg zauważonych innych usterek w postaci literówek, niedopowiedzeń, czy drobnych pomyłek zaznaczono w ocenianym egzemplarzu pracy i przekazano Doktorantowi do wykorzystania w ewentualnej korekcie.

#### 4. Ostateczna ocena pracy

Do osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy zaliczyć:

- opracowanie kompleksowego podejścia do problematyki możliwości poprawy sprawności bloków parowych na parametry nadkrytyczne drogą wykorzystania ciepła odpadowego;
- wytypowanie oraz poddanie bliższej analizie szeregu interesujących rozwiązań szczegółowych służących takiej poprawie.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy, a Doktorant zrealizował postawione sobie cele.

Autor rozprawy, mgr inż. Andrzej Kochaniewicz, wykazał się wiedzą teoretyczną w obszarze związanym z pracą, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to zarówno z treści rozprawy jak i z jego dorobku zawodowego oraz publikacyjnego.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Andrzej Kochaniewicz wykazał kompleksowe opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Kochaniewicza **pt.: „Wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin kotłów bloków węglowych w celu zwiększenia sprawności wytwarzania energii elektrycznej”** spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

