POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 9.04.2016

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Dryjańskiej
„Wpływ wybranych parametrów na charakterystyki energetyczne i ekonomiczne elektrowni z kotłem fluidalnym, tlenownią kriogeniczną i instalacją CCS"

Podstawą opracowania opinii jest uchwała Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 29.01.2016. Recenzowana rozprawa ma formę oprawionego maszynopisu zawierającego 220 stron.

Wybór tematyki, sformułowanie celu rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy integracji bloku energetycznego elektrowni cieplnej z kriogeniczną tlenownią oraz instalacją CCS. Taka konfiguracja jest niezbędna w celu ograniczenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery w technologii spalania tlenowego. Z kolei spalanie tlenowe jest najbardziej uzasadnioną technologią, pod względem technicznym i ekonomicznym, pozwalającą na wychwyt dwutlenku węgla emitowanego w elektrowniach cieplnych, w których paliwem jest węgiel brunatny. Praca była realizowana w ramach Strategicznego Programu Badań – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii, co pozwoliło Autorce na kompleksowe podejście do analizowanego zagadnienia i wykorzystania opracowanych w ramach Programu modeli obliczeniowych elektrowni i jej składowych systemów. Praca była również wykonywana przy wsparciu programu „DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska". Praca jest niewątpliwie jednym z pierwszych kompleksowych opracowań dotyczących modelowania elektrowni cieplnej sprzęgniętej z tlenownią oraz CCS.

Tematyka pracy jest więc aktualna zarówno z naukowego jak i gospodarczego punktu widzenia.

Autorka sformułowała w sposób jednoznaczny cel pracy jako analizę termodynamiczną i ekonomiczną parowego bloku nadkrytycznego zasilanego węglem brunatnym oraz wyposażonego w cyrkulacyjny kocioł fluidalny pracujący w technologii spalania tlenowego, kriogeniczną instalację separacji powietrza, instalację oczyszczania i sprężania CO2 przed transportem oraz turbinę parową o mocy 600 MW. Dodatkowo zdecydowała o przeprowadzeniu modelowych badań porównawczych bloku super-nadkrytycznego również o mocy 600 MW. Na podkreślenie zasługuje podjęcie się przez Autorkę określenia granicznej ceny sprzedaży energii elektrycznej przez analizowane elektrownie przy uwzględnieniu zarówno parametrów termodynamicznych jak i dobrze udokumentowanych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych analizowanych układów.

Zawartość pracy

Zasadnicza część pracy została podzielona na 8 rozdziałów uzupełnionych podsumowaniem, spisem tabel, spisem rysunków, wykazem literatury oraz załącznikami zawierającymi schematy technologiczne oraz wyniki modelowania.

W rozdziale 1. omówiono technologie ograniczania emisji CO_2 w blokach energetycznych, przy czy najbardziej rozbudowany opis dotyczy spalania tlenowego węgla.

W rozdziale 2. opisano strukturę analizowanego układu elektrowni z instalacjami ASU oraz CCS. Rozdział zawiera schemat blokowy elektrowni oraz uproszczone schematy przepływowe modelowanych podsystemów elektrowni wraz z parametrami termodynamicznymi w istotnych punktach. W rozdziale przedstawiono również metodologię wyznaczania sprawności elektrowni, tlenowni i układu separacji CO_2.

W rozdziale 3 opisano model kotła fluidalnego w postaci równań bilansowych dla stanów stacjonarnych. Rozdział zawiera również liczbowe wartości parametrów przyjętych do obliczeń. Model pozwolił na określenie stopnia recyrkulacji spalin przy założonej wartości udziału tlenu w komorze paleniskowej wynoszącej 30%. Rozpatrzono dwa sposoby recyrkulacji spalin – w stanie suchym i wilgotnym. Przeprowadzono szereg symulacji, których wyniki dokumentują czułość sprawności cieplnej kotła fluidalnego na wybrane parametry takie jak np.: różnica temperatur za przegrzewaczem wody, współczynnika nadmiaru utleniacza, strumienia masy przez suszarkę paliwa, różnicy temperatur na zimnych końcach podgrzewacza tlenu. Różnice sprawności nie przekraczają kilku procent i wskazują na niewielką wrażliwość kotła na badane parametry.

W rozdziale 4 omówiono podstawy kriogenicznej separacji mieszanin gazów oraz podano przykładowe schematy tlenowni. Następnie zaproponowano schemat i model tlenowni w programie ASPEN, który zastosowano do dalszych obliczeń. W obliczeniach wykorzystano gotowe moduły programu ASPEN, równowagi fazowe były liczone z wykorzystaniem równania Peng-Robinsona. Autorka przeprowadziła szereg symulacji ukierunkowanych na określenie energochłonności procesu separacji tlenu w zależności od ciśnienia sprężania powietrza, czystości produkowanego tlenu, miejsca zasilania kolumny niskiego ciśnienia strumieniem powietrza rozprężonego w detanderze. Obliczenia potwierdziły, że ze względu na energochłonność procesu separacji powietrza, czystość wytwarzanego tlenu nie powinna być wyższa od 97%, optymalną wartością z uwzględnieniem recyrkulacji spalin i energochłonności instalacji CCS jest 95%. W pracy przeprowadzono analizę wrażliwości energochłonności separacji tlenu na sposób wymiany ciepła pomiędzy kolumnami oraz sposób sprężania powietrza. Autorka wykazała, że przy zadanej czystości gazu wynoszącej 95% jest możliwe uzyskanie energochłonności separacji tlenu poniżej 200 kWh/tonę tlenu co jest dobrym rezultatem, gdyż obecnie eksploatowane tlenownie charakteryzują się wyższymi energochłonnościami.

Rozdział 5 zawiera model układu wychwytu CO2 w programie ASPEN. Autorka przeprowadziła analizę możliwości zmniejszenia energochłonności separacji i sprężania CO2. Wykonała analizę wrażliwości energochłonności separacji i sprężania na takie parametry jak m.in. końcowe ciśnienie sprężania, temperatura za chłodnica spalin. Autorka zdefiniowała parametry procesowe układu separacji i sprężania CO2, tak aby jego odzysk wynosił nie mniej niż 90%, przy czystości wynoszącej ok. 93%.

Rozdział 6 zawiera kompleksową analizę termodynamiczną zintegrowanego bloku energetycznego typu OXY. Autorka połączyła opracowane modele cząstkowe kotła fluidalnego, tlenowni oraz instalacji CCS i przeprowadziła wielowariantowe obliczenia sprawności zintegrowanego bloku. Jako obiekty referencyjne przyjęła bloki zasilane powietrzem. Stwierdziła, że w przypadku bloku nadkrytycznego następuje spadek sprawności netto wynosi 10,37% oraz 10,42 % w przypadku bloku super-nadkrytycznego. Spadki te mogą zostać ograniczone poprzez obniżenie ciśnienia sprężania powietrza na wejściu do tlenowni i zwiększenie ilości stopni sprężania CO2 odpowiednio do 8,71% oraz 8,76% w przypadku bloków nadkrytycznych i super-nadkrytycznych. W dalszych analizach Autorka wskazuje, ze nie jest możliwe dalsze istotne obniżenie energochłonności procesu CCS, nawet poprzez zmiany w układzie polegające na wykorzystaniu ciepła chłodzenia powietrza i spalin podczas ich sprężania w ASU i układzie CCS.

W rozdziale 7 wprowadzono podstawy rachunku ekonomicznego inwestycji oraz zaproponowano modele pozwalające na wyznaczenie minimalnej ceny sprzedaży energii elektrycznej w elektrowniach tlenowych z blokami nadkrytycznymi i super-nadkrytycznymi jak również w elektrowniach referencyjnych, w których utleniaczem jest powietrze. Jako zmienne wejściowe w przeprowadzonych obliczeniach wprowadzono koszty związane z inwestycją, koszty operacyjne, cenę pieniądza, koszt uprawnień do emisji CO2, cenę węgla, koszt transportu CO2 do miejsca składowania. Autorka wykazała, że w przypadku zastosowania spalania tlenowego minimalna cena energii elektrycznej musi wzrosnąć o około 25% w stosunku do ceny elektrowni zasilanej powietrzem.
Rozprawę kończą wnioski szczegółowe, podsumowanie oraz załączniki z wynikami obliczeń.

Uwagi o treści rozprawy

Praca stanowi ambitne i kompleksowe podejście do oceny wpływu wdrożenia spalania tlenowego zarówno na spadek sprawności elektrowni cieplnej jak i konieczny wzrost ceny energii elektrycznej wynikający z rachunku ekonomicznego. Szczególnie cenna jest integracja opracowanych osobno i wykorzystujących odmienne programy modeli: bloku energetycznego, instalacji separacji powietrza oraz instalacji separacji i sprężania CO_2. Autorka przeprowadziła analizy dla dwóch wybranych bloków fluidalnych różniących się parametrami pary (blok nadkrytyczny i super-nadkrytyczny) dla uzmiennionych wartości wybranych parametrów termodynamicznych ora dwóch wariantów cyrkulacji spalin. Wykazała, że przejście na spalanie tlenowe będzie skutkować utratą sprawności netto elektrowni rzędu 10%, co może zostać zredukowane o około 2% poprzez zmniejszenie energochłonności tlenowni i stacji sprężania CO_2. Byłoby interesujące, gdyby Autorka przeprowadziła analizę minimalnej, nieuniknionej utraty sprawności przy założeniu, że procesy separacji tlenu i sprężania CO_2 są odwracalne i charakteryzują się najmniejszą możliwą, wynikającą z II zasady termodynamiki, energochłonnością.

Cenną częścią pracy jest opis, model i obliczenia instalacji separacji powietrza przy użyciu programu ASPEN. Autorka uzyskała wyniki energochłonności i czystości tlenu zgodne z obecnie eksploatowanymi tlenowniami. Brak jest natomiast jednoznaczności w określeniu optymalnej czystości tlenu. W rozdziale 1 określono go na 97% uzasadniając, że przy tej czystości tlenownia nie musi być wyposażona w dodatkową kolumnę pozwalającą na separacje argonu. W dalszych częściach pracy Autorka wskazuje na 95%. Czy te różnice w proponowanej czystości tlenu są istotne? Prośba o komentarz.

Na stronie 23 Autorka pisze „ Główne wnioski jakie ustalono, wskazywały, że wyższa czystość uzyskiwanego tlenu wpływa na zwiększenie mocy generacji tego gazu, jednak zaznaczono, że moc ta może być redukowana poprzez wzrost stężenia CO_2 w spalinach". Stwierdzenie to jest niejasne. Prośba o przeredagowanie i wyjaśnienie.

Kriogeniczne instalacje separacji tlenu z powietrza wytwarzają ok. 2% tego gazu w postaci ciekłej. Pozwala to na wypłukiwanie węglowodorów z układu i uniknięcie niebezpieczeństwa wybuchu. Czy fakt częściowego poboru tlenu w postaci ciepłej ma wpływ na energochłonność elektrowni typu oxy? Czy Autorka widzi ewentualne korzyści z konieczności wytwarzanie części tlenu w postaci ciekłej? W jaki sposób strumień ciekłego tlen wpłynie na zmianę schematu 2.2 i innych?

Autorka wskazuje na możliwość wykorzystania azotu powstałego w procesie separacji powietrza w suszeniu węgla. W instalacjach separacji powietrza suchy, odpadowy azot jest stosowany do regeneracji adsorpcyjnych oczyszczalników powietrza. Czy zostało to wzięte pod uwagę? Czy w procesie suszenia węgla brunatnego przy wykorzystaniu azotu istotna jest niska wilgotność gazu czy jego podwyższona temperatura? Jakie są zalety azotu w porównaniu z suszeniem powietrzem?

W pracy analizowane są równolegle dwa bloki węglowe: na parametry nadkrytyczne pary (29 MPa/600 ^{o}C) oraz na parametry super-nadkrytyczne pary (30 MPa/650 ^{o}C). Otrzymane wyniki wskazują, że w przypadku bloku super-nadkrytycznego brak jest poprawy parametrów pracy przy niewątpliwie podwyższonej trudności technologicznej jego budowy wynikającej z wyższej temperatury pracy. Większość wyników wskazuje na wręcz pogorszone parametry bloku super-nadkrytycznego w stosunku do bloku nadkrytycznego. Przykładem są sprawności przedstawione na rysunkach 3.1, 3.2 czy na rysunku 3.6. Czy można wyciągnąć ogólny wniosek, że bloki super-nadkrytyczne są generalnie mniej sprawne od bloków nadkrytycznych i nie powinny być rozważane w układach ze spalaniem tlenowym? Prośba o komentarz do otrzymanych wyników i wyjaśnienie przyczyn niższych sprawności bloku super-nadkrytycznego.

Na stronie 95 (dół) Autorka pisze „Czystość ciekłego strumienia bogatego w dwutlenek węgla jest determinowana a analizowanym modelu..." Przytoczone zdanie jest niejasne, brakuje odniesienia do rysunku, co utrudnia zrozumienie. Prośba o przeredagowanie. Uwaga dotyczy wielu innych fragmentów pracy, w których Autorka w opisach stosuje oznaczenia bez jednoznacznego odniesienia się do rysunku lub tabeli. Niniejsza uwaga ma charakter porządkowy i dotyczy przede wszystkim ewentualnych publikacji rezultatów pracy. Styl, w którym praca jest napisana utrudnia nieraz jej zrozumienie poprzez konieczność odnoszenia się do zamieszczonych wcześniej rysunków i wyników zamieszczonych w załącznikach do pracy. Nie ma to wpływu na wartość treści pracy, ale utrudnia jej odbiór przez czytelnika.

W pracy określono spadek sprawności netto elektrowni tlenowych z uwzględnieniem potrzeb własnych tlenowni oraz instalacji wychwytu CO_2. Analiza nie uwzględnia nakładów energetycznych na transport CO_2 i zatłaczanie w miejscu końcowego składowania. W części pracy poświęconej analizie ekonomicznej elektrowni tlenowej Autorka założyła, że CO_2 będzie składowany na dnie Bałtyku, a średnia droga transportu tego gazu wyniesie 1000 km. Byłoby interesujące uwzględnienie w obliczeniach spadku sprawności netto elektrowni również kosztów energetycznych transportu CO_2 na odległość 1000 km. Pozwoliłoby to na rzetelne określenie całości nakładów energetycznych na CCS i sformułowanie rekomendacji

dla wykorzystania tej technologii. Prośba do Autorki o przeprowadzenie takiej analizy, nawet w bardzo uproszczony sposób.

Cenną częścią pracy jest analiza ekonomiczna inwestycji i eksploatacji bloku typu OXY. Zaproponowany aparat analizy ekonomicznej jest kompletny i pozwala na uwzględnienie wszystkich kosztów związanych z inwestycją (koszty budowy bloku, tlenowni i instalacji wychwytu, czas trwania inwestycji), eksploatacją (koszt paliwa, transportu CO_2, amortyzacja, koszty osobowe) i uwarunkowaniami prawnymi (koszt emisji CO_2). Dane liczbowe dotyczące kosztów Autorka przyjęła na podstawie literatury. Byłoby dobrze, gdyby zostały one porównane z rzeczywistymi kosztami inwestycji prowadzonych w ostatnich latach w Polsce i Europie. W pracy podano estymacje kosztu transportu dwutlenku węgla, natomiast nie założono nawet przybliżonego kosztu budowy rurociągu i systemu zatłaczania CO_2 na dno morza. Podobnie czas budowy rurociągu CO_2, ze względu na konieczne uzgodnienia służebności gruntu, decyzje środowiskowe itp. może znacznie przekroczyć czas budowy kompleksu elektrownia-tlenownia-system wychwytu CO_2.
Oznacza to, że podana w pracy analiza ekonomiczna może być zbyt optymistyczna. Uwaga ta nie ma wpływu na wysoką ocenę przeprowadzonej analizy ekonomicznej pod względem użytego aparatu i przyjętych pozostałych założeń. Na podkreślenie zasługuje, że przedstawiona analiza ekonomiczna mogłaby stanowić podstawę odrębnej rozprawy i wskazuje, że Autorka jest dobrze przygotowana do analiz inwestycji w energetyce zarówno pod względem badawczych i technicznym jak i ekonomicznym.

Przystępując do analizy ekonomicznej Autorka podkreśla, że obecnie podejmując decyzje o budowie nowej bądź gruntownej modernizacji starej elektrowni znacznie więcej uwagi poświęca się analizom ekonomicznym niż „dekady temu". Wydaje się jednak, że w latach 90-tych XX wieku, a więc już po upadku systemu gospodarki komunistycznej, możliwe było prognozowanie skutków ekonomicznych inwestycji (w szczególności modernizacyjnych) dzięki systemowi kontraktów długoterminowych. Przy ich wadach i zaletach pozwalały one na przeprowadzenie analizy ekonomicznej i pozyskanie finansowania inwestycji. Stąd pewien „wysyp" działań inwestycyjnych w latach 90-tych i ich zatrzymanie po wyhamowaniu systemu kontraktów długoterminowych ok. 10 lat temu. Obecnie przeprowadzenie analizy ekonomicznej jest w zasadzie niemożliwe ze względu na brak możliwości prognozowania przyszłych przepływów finansowych i w konsekwencji obserwowany jest brak decyzyjności na wszystkich szczeblach decydujących o kierunkach rozwoju energetyki. Jaki jest pogląd Autorki na temat kontraktów długoterminowych? Czy podobne mechanizmy powinny być teraz rekomendowane w celu zagwarantowania stabilności ekonomicznej inwestycji i w konsekwencji zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego Państwa? Czy obecny stan prawny jest wystarczający do podjęcia uzasadnionych ekonomicznie decyzji dot. budowy elektrowni, w tym elektrowni tlenowych? Zadane pytania mają charakter dyskusyjny i nie sugerują, że praca jest niekompletna.

Podsumowanie

Przedstawiona praca doktorska **„Wpływ wybranych parametrów na charakterystyki energetyczne i ekonomiczne elektrowni z kotłem fluidalnym, tlenownią kriogeniczną i instalacją CCS"** stanowi kompleksowe rozwiązanie problemu współpracy elektrowni cieplnej z tlenownią. Uważam, że spełnia wymogi ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Dzięki wprowadzenia elementów analizy ekonomicznej rozprawa, poza wartością naukową ma również walory aplikacyjne, w szczególności może być pomocnym materiałem przy podejmowaniu strategicznych decyzji o kierunkach inwestycji w energetyce. Stąd uważam, że praca kwalifikuje się do wyróżnienia.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA

M. Cleva