

dr hab. inż. Tomasz CZAKIERT, prof. PCz
ul. Wysockiego 17 B, 42-218 Częstochowa
tel. kom. 608 089 178

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
tel. 34 3250 945, e-mail: tczakiert@is.pcz.czyst.pl

Częstochowa, 24.06.2016 r.

Szanowny Pan
Prof. dr hab. inż. Zbigniew GNUTEK
Dziekan
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała OSTRYCHARCZYKA

1. Wprowadzenie

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Nr W9/PW/898/2016 z dnia 28 kwietnia 2016 roku.

2. Zakres rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Michała Ostrycharczyka nosi tytuł „Spalanie węgla brunatnego w atmosferze wzbogaconej w tlen dla bloków energetycznych pyłowych”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Halina Pawlak-Kruczek, prof. PWr.

Praca liczy ogółem 109 stron, włączając spis literatury w ilości 150 pozycji (w tym 1 pozycję której Doktorant jest współautorem), spis rysunków oraz 1 załącznik. Zebrany materiał rozdzielono pomiędzy 5 głównych rozdziałów, zakończonych obszernym podsumowaniem.

We wstępie do pracy Doktorant nakreśla uwarunkowania legislacyjne stanowiące zobowiązania Polski na arenie międzynarodowej w zakresie dalszego zrównoważonego

rozwoju czystej energetyki w naszym kraju. Deklaracje te definiują jednocześnie kierunki realizacji prac naukowo-badawczych, w które Doktorant wpisuje się ze swoimi badaniami przeprowadzonymi w ramach przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Uzasadnienie wyboru tematu pracy doktorskiej znaleźć można również w rozdziale 1.1, w którym Doktorant prezentuje zasoby oraz rolę jaką odgrywa węgiel brunatny w polskim sektorze energetycznym. Autor przedstawia dane i odnosi się także do wykorzystania tego surowca w innych krajach na świecie.

Doktorant stawia sobie bardzo ambitny cel, a w zasadzie szereg celów, zdefiniowanych w rozdziale 2 dysertacji, które wymagają przeprowadzenia szeroko zakrojonych badań o charakterze doświadczalnym. Zakres eksperymentu obejmuje między innymi określenie efektów jakie towarzyszą zmiennej atmosferze gazowej oraz różnemu stopniu zawilgocenia paliwa i różnemu nadmiarowi tlenu w procesie spalania. Jednocześnie badania koncentrują się przede wszystkim wokół emisji zanieczyszczeń gazowych, w tym SO_x i NO_x oraz emisji rtęci. Część badań poświęcona jest istotnemu problemowi straty niecałkowitego spalania. Cel pracy pozwala na jednoznaczne sformułowanie tezy, a właściwie dwóch niezależnych tez, jasno sprecyzowanych w tymże rozdziale. Na uwagę zasługuje również argumentacja, którą wysuwa Doktorant na potwierdzenie zasadność postawionych w pracy celów.

Technologii spalania tlenowego poświęcony jest kolejny obszerny rozdział 3. Wprowadzenie zawiera omówienie idei procesu, Doktorant wskazuje również najważniejsze wady i zalety omawianej technologii oraz alternatywne technologie umożliwiające uzyskanie tzw. zerowej emisji CO_2 do atmosfery. Przytaczane informacje wskazują jednocześnie na progres jaki dokonał się w ostatnich kilkunastu latach w tym zakresie. Szczegółowo omówiono wpływ składu atmosfery gazowej na temperaturę spalin, co rzutuje na mechanizmy i ilości ciepła przekazywanego odpowiednio w komorze spalania i ciągu konwekcyjnym kotła. Zwrócono również uwagę na różnice w przebiegu konwersji paliwa, zarówno na etapie odgazowania jak i dopalania pozostałości koksowej oraz na wpływ stopnia zawilgocenia spalanego węgla. Dużo uwagi poświęcono mechanizmom powstawania zanieczyszczeń gazowych – NO_x i SO_x oraz emisji rtęci, co uważa się za zrozumiałe w kontekście dalszych analiz prowadzonych w części eksperymentalnej rozprawy doktorskiej. Rozdział 3 zamyka dwustronicowe podsumowanie rzetelnie przeprowadzonego przeglądu aktualnej literatury w przedmiocie stanowiącym tematykę zrealizowanej pracy doktorskiej. Doktorant wskazuje tu bardzo wyraźnie na pewne obszary badawcze wymagające dalszych szczegółowych badań eksperymentalnych. Tym samym, jest to miejsce w którym niejako w sposób naturalny formułują się zarówno cel jak i zakres dysertacji. Dlatego uważam, że rozdział 2 „Cel, teza i zakres pracy” powinien pojawić się dopiero w tym miejscu rozprawy.

Część eksperymentalną pracy rozpoczyna skrupulatne omówienie zastosowanych procedur badawczych, wykorzystanej aparatury pomiarowej, jak również przedstawienie budowy i zasady działania przystosowanego do spalania w atmosferach gazowych O_2/CO_2 reaktora przepływowego (Rozdz. 4). Na podkreślenie zasługuje tu również włączenie przez Doktoranta metod numerycznych do zoptymalizowania warunków realizacji zaplanowanego eksperymentu.

W kolejnym rozdziale (5.1), Autor przedstawia wyniki przeprowadzonych analiz technicznej i elementarnej, na podstawie których dokonuje wyboru dwóch węgla brunatnych do dalszych badań.

Kolejne analizy ilości niedopału w uzyskanych popiołach (rozdz. 5.2) doprowadzają do zawężeniu zakresu rozmiaru ziaren wytypowanych wcześniej paliw, co skutkuje odrzuceniem wszystkich frakcji o średnicach większych od 200 μm .

W rozdziale 5.3 natomiast, Doktorant analizuje wpływ zawilgocenia paliwa na stopień jego wypalenia w różnych atmosferach gazowych, dochodząc do bardzo ciekawych wniosków, mianowicie: „... istnieje zawartość wilgoci w węglu brunatnym, która pozwala na osiągnięcie maksymalnego stopnia wypalenia paliwa w danych warunkach. Zwiększenie lub zmniejszenie zawartości wilgoci w paliwie od wartości optymalnej powoduje obniżenie stopnia wypalenia paliwa.”. Autor wskazuje tym samym na potrzebę wstępnego podsuszania węgla brunatnego, w celu ograniczenia straty niecałkowitego spalania.

Przeprowadzona w rozdziale 5.4 analiza ilościowa procesu odgazowania paliwa potwierdziła zasadność wstępnego podsuszania węgla brunatnego, z punktu widzenia procesów formowania/redukcji tlenków azotu, decydujących o ostatecznej emisji NO_x . Jednocześnie zauważono jednak, że zbyt głębokie podsuszanie paliwa może przynieść efekt przeciwny do zamierzonego. Dyskusja kontynuowana jest w rozdziałach 5.5 i 5.6, gdzie do badań wykorzystano zaawansowane narzędzia i metody eksperymentalne, jak SEM czy EDS.

Rozdział 5.7 uważam za zasadniczy. Doktorant prezentuje tu wyniki z szeroko zakrojonego programu badawczego, o którym mowa powyżej. W analizie odnosi się do doniesień literaturowych oraz do własnych obserwacji omówionych we wcześniejszych rozdziałach rozprawy.

Opracowane w ramach rozdziału 5.8 dane eksperymentalne dają Doktorantowi szersze spojrzenie na problem konwersji siarki w analizowanych warunkach realizacji procesu spalania węgla brunatnego. Autor robi użytek z tych informacji wskazując na relacje pomiędzy wcześniej omawianą emisją SO_2 , a emisją SO_3 i siarką związaną przez związki zawarte w popiele. Podobnie rozdział 5.9 traktuje szerzej o związkach azotu, w tym między innymi o HCN i NH_3 .

W ostatnim rozdziale 5.10, zwrócono uwagę na istotny i aktualny problem związany z emisją rtęci zawartej w spalanych węglach brunatnych. Doktorant potwierdza tu tendencję do adsorbowania utlenionej Hg na ziarnach popiołu, która występować ma również podczas spalania tlenowego.

Dysertację naukową zamyka rozdział w którym Autor spisał najważniejsze wnioski z przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej badań eksperymentalnych.

3. Ocena rozprawy

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza dotyka bardzo istotnych i aktualnych problemów związanych z produkcją energii i ciepła w oparciu o technologie wyróżniające się

zminimalizowanym oddziaływaniem na środowisko naturalne. Znaczenie i pilna potrzeba prowadzenia badań w tym kierunku została zauważona kilka lat temu, czego wyrazem było ogłoszenie Strategicznego Programu Badań Naukowych i Prac Rozwojowych „Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii”. Potwierdzić to może jedynie trafności wyboru obszaru zainteresowań naukowych Doktoranta.

Przedstawioną pracę naukową w całości oceniam wysoko. Na etapie jej lektury nasuwały się jednak pewne uwagi, pytania i komentarze, które w kolejności chronologicznej zostały spisane poniżej.

1. Uzasadnionym wydaje się podanie roku z którego pochodzą dane zamieszczone na lewej części rysunku 1.7 (rozdz. 1.1). Z kolei, dane zamieszczone na prawej części rysunku odnoszą się do węgla kamiennego (SKE - Steinkohle), choć w tekście czytamy o węglu brunatnym.
2. Cel i zakres pracy mogłyby zostać przedstawione w sposób bardziej zwięzły i przejrzysty (np. w punktach); natomiast teza, choć poprawnie sformułowana, obejmuje dwa bardzo obszerne problemy badawcze, które w zapisie mogłyby zostać potraktowane niezależnie.
3. Podczas omawiania technologii Pre-combustion (s. 18) powinno mówić się raczej o turbinie gazowej aniżeli o kotle.
4. Niezrozumiały jest fragment tekstu na stronach 28-29 w którym czytamy:
„... w spalinach ze spalania w mieszaninach O_2/CO_2 (...) następuje zwiększenie ilości NO_x w porównaniu do spalania w powietrzu ...” i dalej *„... w atmosferze oxy-spalania zaobserwowano (...) wzrost emisji NO_x ”*, natomiast w kolejnym zdaniu Autor (podając konkretne wartości liczbowe) stwierdza, że: *„Ale dla każdego przypadku spalania w atmosferze O_2/CO_2 (...) ilość NO_x była mniejsza niż dla spalania w powietrzu.”* Również w podsumowaniu podrozdziału przeczytać można że: *„Wspólnym mianownikiem powyższych badań jest zdecydowana redukcja emisji NO_x w atmosferze O_2/CO_2 w porównaniu do powietrza”*.

Podobnie, w tym samym fragmencie tekstu czytamy:

„Przy niskim stopniu recyrkulacji podnosi się ilość formowanych tlenków termicznych ...”, podczas gdy stronę dalej Doktorant słusznie stwierdza: *„W atmosferze O_2/CO_2 nie występuje mechanizm termiczny.”*

Proszę Doktoranta o wyjaśnienie tych dwóch kwestii.

5. Z kolei, w podrozdziale dotyczącym powstawania i wiązania tlenków siarki w atmosferach O_2/CO_2 (s. 32 i 34), mylnie stosowane jest pojęcie „metali alkalicznych” zawartych w popiele, w znaczeniu „metali ziem alkalicznych”.
6. Wzór 4.2 jest słuszny jedynie dla całkowicie suchej próbki, o czym należało nadmienić w opisie procedury określania części lotnych.
7. W części eksperymentalnej pracy mowa jest o NO_x , natomiast opis aparatury pomiarowej (s. 50) wskazuje wyłącznie na pomiar NO. Czy stężenie NO_2 było również mierzone? – Proszę Doktoranta o informację w tym zakresie.

8. Na tej samej stronie czytamy, że: „... analizowano wyniki (...) dla nadmiaru utleniacza w zakresie od 1,05 do 1,6 .”, kiedy to w kolejnym zdaniu Doktorant stwierdza, że: „Badania przeprowadzono dla współczynników nadmiaru utleniacza od $\lambda=1,1$ do 1,5 ...”.
9. W tekście zamieszczonym na s. 60 znaleźć można kilka drobnych nieścisłości, np.: „... uzyskano dużą zawartość części palnych rzędu od 8% do 30%” – powinno być do 37%; czy „... spalanie w powietrzu charakteryzowało się największym niedopalem na poziomie 28-30%.” – w teście W=24% Oxy25 uzyskano wartość przekraczającą 30%.
10. Przedstawiając stopień wypalenia części palnych (Rys. 5.6) można było pokusić się o oddzielne potraktowanie wyników uzyskanych dla popiołu dennego i lotnego.
11. Tytuł rozdziału 5.4 nie jest do końca czytelny. Zastosowany zwrot „Badania ubytków pierwiastków C N S z procesu szybkiej pirolizy ...” można było ująć w sposób bardziej zrozumiały, np. „Analiza ilościowa procesu odgazowania ...”. W tym samym rozdziale, dane zamieszczone w Tabelach 5.3 i 5.5 są niepotrzebnie powtórzone w formie wykresów (Rys. 5.7 i 5.8).
12. Fragment tekstu „Dla węgla o W=15% powierzchnia właściwa koksu uzyskana w atmosferze CO₂ odniesiona do powierzchni właściwej koksu uzyskanego w atmosferze N₂ jest większa o 18%, a dla węgla suchego (W=1%) powierzchnia z CO₂ jest mniejsza o 6,7%.” (s. 72) wydaje się niezrozumiały w kontekście analizy zamieszczonej na poprzedniej stronie „Wyniki otrzymane dla próbek kokсів wskazują że w atmosferze CO₂ dla obu próbek uzyskuje się większe powierzchnie właściwe dla odgazowania węgla w porównaniu do N₂. Otrzymuje się zwiększenie tej powierzchni dla W=1% aż o 50% oraz dla W=15% o 21,7%.”, opartej na danych z Tabeli 5.6. – Proszę o komentarz. W tym samym rozdziale (5.5) Doktorant błędnie utożsamia część mineralną węgla z popiołem oraz zalicza tlen do pierwiastków palnych.
13. Wniosek kończący rozdział 5.6 „... w atmosferach CO₂ i N₂ dla badanego suchego węgla (W=1%) autor wskazuje, że w atmosferze CO₂ występuje większy stopień konwersji azotu zawartego w paliwie do związków gazowych.” wydaje się kłócić z wcześniejszą analizą, w której czytamy „... dla węgla o zawartości wilgoci W=1% otrzymuje się podobne ilości wydzielonych związków na poziomie 1100 ppm w atmosferze N₂ oraz 1050 ppm w atmosferze CO₂”, oraz z danymi z Rys. 5.11 – Podobnie jak powyżej proszę o komentarz. Tabela 5.10 i Rys. 5.10 zawierają dokładnie te same dane.
14. Zdanie kończące paragraf dotyczący SO₂ (s. 80) „Stężenie siarki w komorze paleniskowej nieznacznie zależy od nadmiaru utleniacza.” kłuci się z wcześniejszym zapisem w tym samym paragrafie „... stężenia dwutlenku siarki w spalinach (...) utrzymywały się na prawie jednakowym poziomie, niezależnie od współczynnika nadmiaru tlenu ...”. Osobiście ciężko mi doszukać się takiej zależności (Rys. 5.13).
15. Moim zdaniem, konwencja powszechnie stosowana dla spalania w powietrzu, gdzie wyniki pomiaru przedstawia się w przeliczeniu na tzw. 6% tlen, nie do końca znajduje swoje zastosowanie w przypadku spalania tlenowego. 6% stężenie tlenu w spalinach podczas spalania w mieszankach o różnym udziale O₂ odpowiada bowiem różnemu

stopniu wykorzystania utleniacza (różnej λ), co w tym przypadku oznaczałoby różny stopień „rozcieńczenia” spalin. Doktorant ma tego pełną świadomość i w dalszej części analizy prezentuje te same wyniki eksperymentalne odnosząc zmierzone ilości zanieczyszczeń do energii chemicznej spalanej paliwa, co uważam za wielce zasadne.

16. Autor powinien unikać powtórzeń polegających na przedstawianiu tych samych danych w różnej formie graficznej. Np. Tabela 5.12 i Rys. 5.17 czy Tabela 5.13 i Rys. 5.18.
17. Nie do końca mogę zgodzić się z wnioskami (s. 86/87) jakoby „... dla nadmiaru utleniacza 1,2 obserwuje się stałe lub rosnące wartości dla atmosfer Oxy, w których zwiększa się stosunek O_2/CO_2 . Natomiast dla nadmiaru utleniacza 1,4 uzyskuje się tylko rosnący trend emisji NO_x dla zwiększania stosunku O_2/CO_2 .” Tendencje o których mówi Autor odnoszą się jedynie do wybranych przypadków (np. $\lambda=1,4$ i $W=33\%$).
18. Wydawać się może, że w stwierdzeniu na s. 89 „... dla węgla o zawartości wilgoci 15% stopień konwersji siarki z węgla do fazy gazowej jest niemal stały dla atmosfer Oxy15, Oxy20, powietrza i Oxy25.” Doktorantowi chodziło raczej o przypadek $W=24\%$. Nie mniej jednak, nie mogę zgodzić się z tym stanowiskiem. Według mnie to punkt $O_2=15\%$ widocznie „odstaje” od liniowego trendu, który wytyczają pozostałe 4 punkty $O_2=20, 21, 25$ i 30% (Rys. 5.20).

Pojawiające się w rozprawie doktorskiej błędy edycyjne, redakcyjne i stylistyczne, które pominąłem w treści recenzji, zostały omówione z Doktorantem osobiście.

Za kluczowe osiągnięcie Doktoranta w przedstawionej dysertacji naukowej uważam potwierdzenie możliwości modernizacji istniejących kotłów pyłowych opalanych węglem brunatnym w technologii spalania tlenowego, z punktu widzenia jakości gazów spalinowych oraz sprawności procesu spalania.

4. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie bardzo ważnego problemu naukowego, jakim jest ocena zasadności wstępnego podsuszania węgla brunatnego w układach realizujących proces spalania tlenowego. W mojej ocenie, jej poziom merytoryczny spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Biorąc pod uwagę znacznie podjętej tematyki dla energetyki zawodowej, całokształt zrealizowanych prac oraz kluczowe osiągnięcie Doktoranta uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Michała Ostrycharczyka „Spalanie węgla brunatnego w atmosferze wzbogaconej w tlen dla bloków energetycznych pyłowych” mieści się z dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

