

Dr hab. inż. Sławomir Stelmach, prof. IChPW
Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla
ul. Zamkowa 1
41-803 Zabrze

Zabrze, dn. 09.03.2021 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Pawła Kazimierskiego

pt.:

„BADANIE I ANALIZA ZGAZOWANIA BIOMASY W REAKTORZE Z RUCHOMYM ZŁOŻEM Z WYKORZYSTANIEM METOD RADIOGRAFICZNYCH”

Recenzja została opracowana na zlecenie Z-cy Dyrektora ds. naukowych
Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN,
dr. hab. Marcina Lackowskiego.

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Badanie i analiza zgazowania biomasy w reaktorze z ruchomym złożem z wykorzystaniem metod radiograficznych”, została opracowana przez Pana mgr. inż. Pawła Kazimierskiego w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku, w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych przy wykorzystaniu infrastruktury badawczej Instytutu. Promotorem przedmiotowej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Dariusz Kardaś, prof. IMP PAN.

Wymogi przyjętych w ostatnich latach konwencji klimatycznych oraz wzrastające zapotrzebowanie na pierwotne nośniki energii, są przyczyną nieustająco zwiększającego się zużycia biomasy na całym świecie. Wykorzystanie biomasy do celów energetycznych jest zgodne z polityką zrównoważonego rozwoju i niesie za sobą pozytywne efekty środowiskowe i ekonomiczne. W Polsce biomasa jest bardzo ważnym i często wykorzystywanym źródłem energii odnawialnej. Do celów energetycznych jest ona pozyskiwana głównie z odpadów leśnych, przemysłu drzewnego, rolnego, zieleni miejskiej, organicznych odpadów komunalnych oraz plantacji roślin energetycznych. Systematyczny wzrost wykorzystania biomasy dla produkcji energii jest następstwem jej powszechnej dostępności, odnawialności oraz korzystnych aspektów ekologicznych. Procesy termicznej konwersji biomasy, takie

jak piroliza i zgazowanie, są potencjalnie efektywnymi sposobami przetwarzania biomasy celem wytwarzania paliw ciekłych i gazowych oraz chemikaliów.

Autor recenzowanej pracy doktorskiej podjął naukowo-badawcze działania zmierzające do pogłębionej analizy zjawisk chemicznych, fizycznych i mechanicznych (w tym dynamiki ruchu złoża w reaktorze) zachodzących podczas termicznej konwersji biomasy z wykorzystaniem procesów pirolizy i zgazowania. Wykorzystał w tym celu zaawansowane metody badawcze, przy czym główną metodą zastosowaną w analizowaniu zjawisk zachodzących w złożu zgazowywanej biomasy była radiografia rentgenowska.

Układ edycyjny recenzowanej rozprawy jest typowy dla prac o przedmiotowym charakterze i w zrozumiały, logiczny sposób prezentuje zagadnienie opracowane przez autora. Rozprawa obejmuje 157 stron i jest podzielona na 6 głównych rozdziałów: 1. Wstęp i cel pracy, 2. Biomasa, 3. Charakterystyka i przebieg procesu pirolizy, 4. Zgazowanie, 5. Radiograficzne badania szybkości osiadania złoża oraz 6. Podsumowanie i wnioski. Każdy z nich (za wyjątkiem 6.) obejmuje podrozdziały. Treść rozprawy zawiera 119 rysunków oraz 16 tabel. Zawarta w rozprawie bibliografia obejmuje 84 pozycje literaturowe, w tym siedem publikacji autora pracy opublikowanych wraz z innymi współautorami.

We wstępie do rozprawy autor opisał krótko istotność zagadnienia termicznej konwersji biomasy podkreślając, że termiczne procesy jej przetwarzania są wciąż nie w pełni poznane (szczególnie piroliza i zgazowanie). Podkreślił, że w prowadzonych przez niego badaniach wykorzystane zostały niekonwencjonalne techniki analityczne, pozwalające na precyzyjną ocenę postępu procesu konwersji paliwa stałego. Główną niekonwencjonalną techniką badawczą (o czym już wspomniano) zastosowaną przez autora podczas badań pirolizy i zgazowania biomasy była radiografia rentgenowska. W drugim podrozdziale wstępu autor sformułował cel pracy, którym była analiza i opisanie zjawisk zachodzących podczas zgazowania biomasy z uwzględnieniem procesów termochemicznych oraz procesu osiadania złoża. Jednocześnie autor sformułował podstawową tezę rozprawy, twierdząc że „[...] Metoda radiograficzna pozwala na ocenę zmiennej dynamiki procesu pirolizy pojedynczej cząstki i zgazowania biomasy w złożu”. Szkoda, że w postawionej tezie autor nie doprecyzował o jaki rodzaj złoża chodzi, choć oczywiście dalsza lektura rozprawy w oczywisty sposób wyjaśnia tę kwestię.

W rozdziale drugim autor opisał czym jest biomasa, jakie są jej źródła, sposoby jej wykorzystania oraz przedstawił szczegółową charakterystykę fizyko-chemiczną biomasy drzewnej. Do planowanych eksperymentów konwersji termicznej wybrał on dwa rodzaje biomasy – zrębkę drzewną oraz granulát/pellet ze słomy pszenno-żytniej, opisując szczegółowo właściwości tych paliw (z uwzględnieniem analiz termograwimetrycznego rozkładu pirolitycznego obu paliw). W omawianym rozdziale autor usystematyzował również przemiany termochemiczne biomasy, a także zaprezentował podstawowe zagadnienia związane z jej suszeniem. Rozdział kończy krótka informacja dotycząca spalania biomasy, która w zasadzie niewiele wnosi do zasadniczego wątku rozprawy.

Obszerny rozdział trzeci został poświęcony przedstawieniu ogólnej analizy procesu pirolizy paliw stałych (przede wszystkim biomasy). Autor prezentuje podstawowe informacje dotyczące tej metody konwersji podpierając je cytowaniem stosownych pozycji literaturowych. Analizując tekst widać, że autor doskonale rozumie charakter zjawisk zachodzących podczas omawianego procesu, co nie jest zaskakujące, biorąc pod uwagę jego dotychczasowe doświadczenie eksperymentalne i dorobek publikacyjny. Doktorant zaprezentował również szczegółowe informacje na temat kilku znanych z literatury przedmiotu modeli mechanizmów procesu pirolizy. W omawianym rozdziale przedstawione zostały zagadnienia powiązane ściśle z projektowaniem reaktorów pirolitycznych, a także omówiono szczegółowo reaktory eksperymentalne wykorzystane w badaniach przeprowadzonych przez doktoranta. Na marginesie, interesujące wydają się nazwy układów eksperymentalnych wykorzystanych przez autora w jego badaniach. Jeśli zostały one nadane przez doktoranta, to świadczy to o jego szerokich zainteresowaniach, wybiegających poza obszar nauk technicznych, i jest godne wyraźnego podkreślenia.

Najważniejszą częścią rozdziału trzeciego jest opis wykonanych badań procesu pirolizy biomasy. Eksperymenty prowadzone były w różnych układach badawczych, przy przyjętych przez autora zmiennych warunkach procesowych. Autor przedstawił bilanse masowe wykonanych testów, omawiając jednocześnie jakość uzyskanych produktów. Dokonał on szczegółowej oceny wpływu temperatury prowadzenia procesu, szybkości nagrzewania oraz ciśnienia na przebieg rozkładu termicznego biomasy i uzyski poszczególnych frakcji. Analizy te uzupełniły również badania wpływu rodzaju biomasy (wierzba, dąb, sosna), rozmiaru cząstki biomasy, a nawet

kształtu cząstki oraz orientacji włókien względem jej krawędzi. Ilość analizowanych przez autora kryteriów mających wpływ na przebieg procesu pirolizy biomasy jest godna uznania.

Rozdział trzeci kończy autor opisem zastosowania nowatorskiej, nieinwazyjnej metody radiograficznej w celu wyznaczania przebiegu i charakterystyki procesu pirolizy biomasy. Należy podkreślić, że zastosowanie takiej techniki w badaniach procesu pirolizy jest rzeczywiście bardzo rzadkie, a autor sięgając po tę metodę jest na pewno pionierem tego rodzaju badań prowadzonych w kraju. Badania radiograficzne prowadzone były dla pojedynczej cząstki biomasy, w różnych warunkach procesowych oraz dla różnych wielkości próbek. Obserwacje poczynione przez autora są niezwykle interesujące i wnoszą istotny wkład w wiedzę zgromadzoną dotychczas na temat przedmiotowego procesu.

Kolejny, bardzo obszerny rozdział czwarty, koncentruje się na zagadnieniach związanych ze zgazowaniem biomasy. Autor dokonał szerokiego opisu zagadnień powiązanych z praktyczną realizacją tego procesu, uwzględniając między innymi fizyko-chemiczne podstawy zgazowania oraz typy reaktorów wykorzystywanych dla jego realizacji (niestety tylko ze złożem stałym, być może dlatego, że takie właśnie były wykorzystywane w jego badaniach). Eksperymenty zgazowania opisane w pierwszej części tego rozdziału autor prowadził w dwóch układach o identycznej geometrii ze złożem stałym, różniących się jednak trybem realizacji procesu konwersji. Zgazowywanym paliwem była zrębka drzewna (bukowa) oraz pellet ze słomy, natomiast czynnikami zgazowującymi wykorzystanymi w badaniach był tlen, powietrze oraz para wodna.

Istotnym zagadnieniem podjętym przez doktoranta, przedstawionym także w rozdziale czwartym, było osiadanie złoża zgazowywanego paliwa. Precyzyjne określenie jego szybkości może być niezwykle ważne przy projektowaniu i konstruowaniu reaktorów charakteryzujących się wyższymi sprawnościami niż reaktory eksploatowane dotychczas. Ważnym aspektem mającym wpływ na osiadanie złoża są zmiany struktury karbonizatu w czasie trwania procesu. Doktorant dokonał oceny tych zmian wykorzystując w tym celu analizę z zastosowaniem mikroskopu elektronowego (SEM). Dla oceny zmian struktury karbonizatów z różnych rodzajów biomasy wykorzystane zostały dwa czynniki zgazowujące – ditlenek węgla oraz para wodna. Badany był również wpływ orientacji włókien próbki biomasy na reakcje wtórne karbonizatu z ditlenkiem węgla.

W rozdziale czwartym autor przedstawił również mechaniczne techniki pomiaru szybkości osiadania złoża - metodę wykorzystującą stalowy tłoczek oraz metodę polegającą na analizie przesuwania się strefy spalania (będącą raczej termiczną metodą pomiaru), które wykorzystał w przeprowadzonych testach powietrznego zgazowania zrębek brzoźowych. Na podstawie wykonanych pomiarów doktorant określił strefy w reaktorze, w których następuje najszybsze osiadanie złoża. Dokonał ponadto głębszej analizy dotyczącej wpływu parametrów procesowych zgazowania na szybkość osiadania złoża paliwa, uwzględniając szybkość wybierania z reaktora wytworzonego karbonizatu oraz współczynnik nadmiaru powietrza kierowanego do zgazowania. W oparciu o przeprowadzone eksperymenty wyznaczył szereg zależności charakteryzujących badany proces.

Finalizując rozdział czwarty autor przedstawił uproszczony (jednowymiarowy) opis numeryczny procesu zgazowania dla układu o przeciwpłdowym reżimie pracy. W tym celu wykorzystał model dwupłdnowy, uwzględniając w obliczeniach pirolizę, transport masy fazy stałej, transport masy fazy gazowej oraz transport energii przez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie. Mimo przyjętych w obliczeniach uproszczeń, autor uzyskał interesujące charakterystyki procesu i bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych.

W rozdziale piątym doktorant zaprezentował teoretyczne podstawy radiografii, a także opis badań szybkości osiadania złoża zgazowywanego paliwa z zastosowaniem metod radiograficznych wraz z analizą uzyskanych wyników. Kolejny raz trzeba podkreślić, że wykorzystanie przez autora metod radiograficznych do badań procesów termicznej konwersji biomasy jest w kraju podejściem nowatorskim. Autor przeprowadził szereg eksperymentów mających na celu szczegółowe poznanie procesu osiadania złoża biomasy w reaktorze współ- i przeciwpłdowym. Wykorzystał dwie techniki pomiarowe - radioizotopową fluorescencję rentgenowską z zastosowaniem izotopu promieniotwórczego Selenu 75 (Se-75) oraz fluorescencję rentgenowską z użyciem lampy rentgenowskiej. Na podstawie wykonanych badań doktorant wykazał istotne różnice w szybkości osiadania złoża w dwóch różnych reżimach pracy reaktora zgazującego – współ- i przeciwpłdowym. Zaprezentowane w rozprawie wyniki badań szybkości osiadania złoża biomasy w reaktorze zgazującym stanowią niepodważalny wkład autora w rozwój wiedzy z zakresu termicznej konwersji paliw stałych.

W rozdziale szóstym autor dokonał krótkiego podsumowania całości rozprawy. Biorąc pod uwagę ogrom wykonanych przez niego eksperymentów i uzyskanych wyników badań, wydaje się, że podsumowanie to jest nieco za krótkie, ale oczywiście ujmuje najważniejsze konkluzje wynikające z wykonanej pracy.

Przedstawiona przez doktoranta do obrony rozprawa doktorska ma charakter w dużej mierze użytkowy. Autor wykazał się dużą wiedzą z zakresu chemii, inżynierii chemicznej, inżynierii środowiska oraz inżynierii mechanicznej, a szczególnie głęboką znajomością kwestii związanych z termicznymi metodami przekształcania paliw stałych z wykorzystaniem procesu pirolizy i zgazowania. Połączenie wiedzy z tych obszarów pozwoliło mu na opracowanie spójnej merytorycznie rozprawy, która – pomijając jej zasadniczy cel, a więc uzyskanie stopnia doktora – może stanowić użyteczną wiedzę dla projektantów i eksploataatorów instalacji zgazowania, ale również dla naukowców zajmujących się tą tematyką.

Ogólna pozytywna ocena przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej, nie uprawnia jednak do pominięcia przedstawionych poniżej drobnych uwag, które nie umniejszają jednak wartości dzieła przygotowanego przez doktoranta. W niniejszej recenzji przedstawione zostaną tylko najważniejsze z nich. Drobne korekty edytorskie i mniej istotne komentarze zostały zaznaczone w wersji elektronicznej rozprawy i przekazane doktorantowi.

1. Na str. 8 rozprawy autor pisze, że „Metoda radiograficzna pozwala na ocenę zmiennej dynamiki procesu pirolizy pojedynczej cząstki i zgazowania biomasy w złożu”. Proszę autora o sprecyzowanie o jaki rodzaj złoża chodzi.
2. Na str. 18 doktorant podaje, że „Zależność pochodnej masy po temperaturze w funkcji temperatury pozwala przeanalizować szybkości rozkładu surowca oraz temperatury, w których zachodzą przemiany”. Precyzyjniej byłoby chyba napisać „[...] temperatury, w których intensywność przemian jest największa”. Proszę autora o komentarz.
3. Na str. 29 autor napisał, że „W warunkach wysokiego ciśnienia działanie na smoły pierwotne przez długi czas niską temperaturą prowadzi do powstania smół wtórnych”. Proszę o doprecyzowanie jaką „niską temperaturę” autor miał na myśli.
4. Pisząc, że „Największe ubytki masy i objętości paliwa podczas procesu zgazowania zachodzą w strefie pirolizy” autor miał prawdopodobnie na myśli jedynie zgazowanie biomasy (str. 36). Proszę autora o potwierdzenie.

5. Na str. 42 autor prezentuje wyniki badań pirolizy zrębków drzewnych, porównując pirolizę wykonaną w termograwimetrze z wynikami badań przeprowadzonych w reaktorze ze złożem stałym (ŚMIGŁY). Proszę autora o komentarz dotyczący mniejszego uzysku karbonizatu w temperaturze 300°C wytworzonego w reaktorze ŚMIGŁY w porównaniu do termograwimetru.
6. Na str. 48 doktorant twierdzi, że „[...] rodzaj drewna nie ma znaczącego wpływu na produkty pirolizy”. Z tą tezą nie można się zgodzić. Proszę autora o komentarz.
7. Na str. 75 autor stwierdza, że „Zgazowanie tlenem pozwalało na uzysk dużej zawartości karbonizatu [...]”. Proszę autora o wyjaśnienie, czy nie jest to pomyłka.
8. Zdaniem recenzenta określenie „osiadanie złoża” nie jest najkorzystniejszym określeniem badanego przez autora zjawiska. Kojarzy się ono pejoratywnie, sugerując zachodzenie jakiegoś niekorzystnego zjawiska pogarszającego strukturę złoża zgazowywanego materiału. Chyba lepszym określeniem byłoby np. „przemieszczanie się paliwa”. Proszę autora o komentarz.

Przedstawione w niniejszej recenzji nieliczne uwagi nie umniejszają praktycznej wartości ocenianej pracy i stanowią przyczynek do dalszej, konstruktywnej dyskusji. Wyrażam nadzieję, że w trakcie obrony publicznej doktorant będzie miał okazję odnieść się do większości z nich. Przygotowaną przez niego rozprawę, nacechowaną dużym ładunkiem aspektów użytkowych, oceniam pozytywnie. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej autor wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna).

Po szczegółowej analizie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej ostatecznie stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, w związku z art. 179 ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Pawła Kazimierskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

