

Kraków, 17.05. 2022r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Energetyki i Paliw
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
wnowak@agh.edu.pl
Tel: 604410913

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krystiana Krochmalnego „Wpływ warunków toryfikacji biomasy i odpadów na właściwości fizykochemiczne produktów”

Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z 13 kwietnia 2022 r (pismo W9/PW/346/2022 z 22.04.2022).

Zasadność tematyki

Toryfikacja, proces różniący się od karbonizacji, jest procesem termicznym prowadzonym w zakresie temperatur od 230 do 300 °C przy braku tlenu. Wstępna obróbka termiczna biomasy poprawia jej gęstość energetyczną, zmniejsza stosunek tlenu do węgla (O/C) i zmniejsza jej higroskopijność. Podczas tego procesu biomasa wysycha i częściowo

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
48/437 /2022

Wpłynęło dnia 03.06.2022

pozbywa się części lotnych, co powoduje zmniejszenie jej masy zachowując w znacznym stopniu wysoką wartość energetyczną. W procesie toryfikacji z biomasy usuwane są H_2O i CO_2 . W rezultacie, zarówno stosunki O/C, jak i H/C biomasy ulegają obniżeniu.

W surowej biomacie, wysoka zawartość tlenu powoduje jej utlenianie podczas zgazowania, zwiększając straty termodynamiczne procesu. Toryfikacja może zmniejszyć te straty poprzez zmniejszenie zawartości tlenu w biomacie. Toryfikacja zwiększa również względną zawartość węgla w biomacie. Właściwości drewna poddanego toryfikacji zależą od temperatury, czasu oraz od rodzaju surowca drzewnego.

Toryfikacja modyfikuje również strukturę biomasy, czyniąc ją bardziej kruchą lub łamliwą. Jest to spowodowane depolimeryzacją hemicelulozy. W rezultacie proces rozdrabniania staje się łatwiejszy, co obniża zapotrzebowanie energetyczne na mielenie i koszty obsługi. Ułatwia to współspalanie biomasy w kotle pyłowym lub zgazowanie w reaktorze przepływowym. Toryfikacja powoduje pewne zmniejszenie zawartości energii w biomacie z powodu częściowego uwolnienia części lotnych, ale biorąc pod uwagę znacznie większą redukcję masy, gęstość energetyczna biomasy wzrasta.

Drewno toryfikowane osiąga lepsze wyniki niż drewno pierwotne (lub inna biomasa) zarówno w procesach zgazowania i spalania. Główne cechy i zalety toryfikatu są następujące:

- zwiększa stosunek O/C drewna, co poprawia jego wydajność procesu,
- zmniejsza zapotrzebowanie na moc do rozdrabniania i poprawia obsługę.
- zapewnia czystsze spalanie paliwa,
- można otrzymać gaz o podwyższonej wartości opałowej w wyniku zgazowania toryfikatu,
- drewno toryfikowane pochłania mniej wilgoci podczas przechowywania.
- można produkować najwyższej jakości pelety z biomasy o większej objętościowej gęstości energetycznej.

Na podstawie tych cech można łatwo spekulować, że toryfikacja pozwoli na wykorzystanie biomasy w procesie zgazowania, bezpośredniego spalania w kotle pyłowym oraz produkcji peletów.

Istnieje więc pilna potrzeba przeprowadzenia kompleksowej analizy procesu toryfikacji zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i instalacjach demonstracyjnych w celu przeanalizowania wpływu parametrów toryfikacji na właściwości uzyskiwanych produktów.

I właśnie tą tematyką zajmuje się Doktorant w swojej rozprawie doktorskiej proponując m.in. nowatorskie podejście szczegółowej analizy przebiegu procesu toryfikacji w różnego typu reaktorach.

Toryfikacja biomasy nie jest wprawdzie zagadnieniem nowym – była ona i jest wszakże przedmiotem wielokierunkowych badań naukowych prowadzonych w różnych ośrodkach (także krajowych) od wielu lat – podkreślić natomiast należy, iż pomimo tego brak jest na naszym rynku pozycji, która w sposób kompleksowy ujmuje problematykę toryfikacji biomasy, poczynając od wiedzy bazującej na wynikach badań podstawowych poprzez ocenę efektów energetycznych i emisyjnych spalania tego rodzaju paliw w instalacjach większej niż laboratoryjna skali. Brakuje wyczerpujących publikacji poświęconych toryfikacji biomasy, zwłaszcza w odniesieniu do osadów ściekowych.

Stąd tematyka rozprawy doktorskiej wiąże się bezpośrednio z nowymi trendami poszukiwania i implementacji takich rozwiązań procesowych, które pozwalają na ograniczenie emisji CO₂ oraz szerokie wykorzystanie biomasy. Problem naukowy został postawiony poprawnie oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora.

Układ pracy

Praca podzielona jest na pięć rozdziałów i liczy 162 strony. Bibliografia zawiera 289 pozycji, w tym jedna pozycja, w której Doktorant jest współautorem. O ile wiem Doktorant jest współautorem kilku publikacji o zasięgu międzynarodowym i szkoda, że nie pokazał swoich publikacji w wykazie literatury.

Praca zaczyna się od obszernego Wstępu (Rozdział 1) liczącego 49 stron. Krytyczna analiza literaturowa pokazała, iż dopracowanie sposobów wytwarzania toryfikatów z biomasy oraz ocena rozkładu w całej jej objętości, a także ocena stopnia karbonizacji wraz z określeniem reaktywności uzyskanych produktów nadal wymaga dalszych badań i analiz. Rozdział 2 przedstawia cel i zakres pracy. Pokazano, iż zasadniczym celem pracy jest poznanie i analiza przebiegu procesu toryfikacji dla różnych rodzajów biomasy pod kątem między innymi określenia energetyczności reakcji rozkładu biomasy oraz oceny najkorzystniejszych warunków do uzyskania toryfikatu o wysokiej jakości z przeznaczeniem

do zastosowania jako paliwa. Następnie omówiono cele szczegółowe. Rozdział 3 zawiera szczegółowy opis reaktorów wykorzystywanych w pracach badawczych z uwzględnieniem różnic pomiędzy nimi oraz ich wpływem na jakość wyników. Wyszczególnione zostały sposoby wykonywania najważniejszych obliczeń oraz pomiarów wraz ze stosowaną aparaturą oraz zakresami pomiarowymi.

Wyniki badań zostały pokazane w Rozdziale 4. Zostały one podzielone ze względu na skalę urządzeń w jakich były realizowane. Skala zaczyna się od badań na termograwimetrze, a kończy na reaktorze pilotowym. Dodatkowo przeprowadzono testy toryfikacji osadów ściekowych w różnych konfiguracjach oraz testy współspalania toryfikatu z węglem brunatnym i kamiennym. Przeprowadzone badania pokazały, że możliwe jest zastosowanie paliwa dodatkowego, w postaci pyły z toryfikowanej zrębki drzewnej, dodawanego do strumienia obu paliw referencyjnych w 10% udziale masowym. Analizując skład popiołów mieszanek paliw oraz odpowiednie współczynniki stwierdzono, że dodatek toryfikatu nie powodował wzrostu zagrożenia zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła. Badania zanieczyszczeń gazowych wykazały redukcję stężeń SO_2 wraz ze zwiększającym się udziałem toryfikatu. Badania wykazały również, że w wyniku toryfikacji osadów ściekowych możliwa jest poprawa takich samych parametrów paliwowych, co w przypadku biomasy lignocelulozowej. Rozdział 5 zawiera podsumowanie badań dotyczących toryfikacji różnego rodzaju biomas, przeprowadzonych w różnych skalach od laboratoryjnej do pilotowej. Wskazano rekomendacje i możliwe kierunki przyszłych badań w tym zakresie.

Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej

Najważniejsze oryginalne osiągnięcia recenzowanej pracy doktorskiej to:

- W pracy przeprowadzono szczegółową analizę przebiegu procesu toryfikacji w różnego typu reaktorach dla różnych rodzajów biomasy pod kątem między innymi określenia ciepła reakcji dekompozycji biomasy na przykładzie biomasy drewnianej, szybkości toryfikacji oraz zmian parametrów fizykochemicznych biomasy różnego typu w efekcie toryfikacji w temperaturze do 350°C .
- Doktorant w celu oceny mechanizmu procesu toryfikacji opracował metodykę badawczą oraz stanowisko do badań pozwalające na określenie parametru mogącego stanowić kontrolę procesu więc stopnia karbonizacji.

- Osiągnięciem tych badań i analiz było :
 - znalezienie korelacji pomiędzy stężeniem formaldehydu (CHOH) w torzazie, a stopniem konwersji toryfikowanej biomasy (na przykładzie drewna).
 - porównanie rzeczywistej kinetyki procesu toryfikacji z kinetyką pozorną, w oparciu o obserwowane efekty egzotermiczne,
 - określenie rozkładu temperatury wzdłuż promienia toryfikowanej cząstki biomasy,
 - określenie zmian parametrów fizycznych pojedynczej cząstki biomasy (objętość, masa) podczas procesu toryfikacji.

Najważniejsze osiągnięcia praktyczne to:

- określenie kryterium kontroli procesu toryfikacji wykorzystując stężenie formaldehydu jako markera w automatyzacji procesu toryfikacji,
- wyznaczenie optymalnych warunków toryfikacji w zależności od wymiaru cząstki,
- wyznaczenie relacji pomiędzy udziałami produktów toryfikacji na przykładzie drewna
- wyznaczenie charakterystycznego rozmiaru cząstki drewna, dla którego procesy samonagrzewania nie wpływają na przebieg procesu, a zatem umożliwiają badanie procesu metodą termogravimetryczną (TGA),
- optymalizacja procesu torfikacji w zależności od typu reaktora (stacjonarny reaktor poziomy, obrotowy reaktor skośny i wielostopniowy reaktor taśmowy) oraz biomasy (zrębka drewniana, pozostałości po produkcji oliwek, łupiny ziaren palmowych, słoma rzepakowa),
- wykazanie wpływu wilgoci w procesie toryfikacji w reaktorze w skali pilotażowej
 - usprawnienie procesu toryfikacji osadu ściekowego poprzez dodatek CaO.

Poziom warsztatowy

Przedstawiona rozprawa napisana jest wynikiem bardzo trudnych i uciążliwych prac zarówno laboratoryjnych, jak i na obiekcie pilotażowym.

Doktorant wykazał bardzo dobre przygotowanie eksperymentalne. Posiada głęboką wiedzę teoretyczną, a także wysokie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W szczególności podkreślić należy na swobodę z jaką Doktorant posługuje się stosowanymi metodami badawczymi i interpretacja otrzymanych wyników. Zarówno dobór

tematyki jak i analizowanych źródeł uznać należy za prawidłowy. Praca posiada przejrzysty układ treści, konsekwentnie stosowane nazewnictwo oraz symbolikę. Drobne uwagi redakcyjne, w tym dotyczące terminologii naukowej i używanych sformułowań zaznaczyłem w maszynopisie. Uwagi te mają postać całkowicie drugorzędnych stosowanych sformułowań uważam ogólnie za właściwe i całkowicie poprawne. Nie mam żadnych zastrzeżeń do materiału ilustracyjnego, pomijając drobne usterki redakcyjne zaznaczone w tekście. Materiał ilustracyjny jest celowy i dobrany właściwie.

Uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne, które nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką wartość merytoryczną przedstawionej rozprawy, a dotyczą zagadnień omówionych poniżej.

1. dane podane we Wstępie są nieaktualne; dotyczą lat 2014 i 2016 – należało pokazać aktualne dane szeroko publikowane w raportach i dostępnej literaturze,
2. str. 37 – Autor szacuje współczynnik przenikania ciepła w reaktorze konwekcyjnym, ale nie podaje tej wartości w reaktorze fluidalnym,
3. str. 37 „Reaktor ze złożem fluidalnym” – wymienione zakresy ziarnowe nadają się fluidyzacji i nie powodują problemów, o których wspomina Autor pod warunkiem odpowiedniego ich zaprojektowania procesowego,
4. jakie były przesłanki wykorzystania sieci neuronowych do wyznaczania przebiegów czasowych ciepła spalania ?
5. str. 93 – Autor twierdzi, że sieci neuronowe może wykorzystać do sterowania procesem toryfikacji. Tymczasem w pracy nie prowadzi analizy sterowania i optymalizacji procesowej z użyciem AI.
6. W tekście pojawiają się miejscami nienaukowe wyrażenia („z grubsza”, „nie da się zniwelować”),
7. w tekście pojawiają się literówki (s. 133 „taryfikacja”),
8. szkoda, że badania w różnych skalach dotyczą różnych typów biomasy. Nie do końca jest dla mnie jasny ich wybór oraz dla przykładu dlaczego nie przeanalizowano TGA drewna bukowego lub w większych kawałkach w obrotowym reaktorze skośnym?
9. z pracy wynika, że Autor jako odpad postrzega jedynie osady ściekowe. Wydaje mi się, że wytloki z oliwek i PKS to też jest odpad,

10. Autor używa zamiennie terminów pelet i brykiet. Wydaje mi się, że są one dość jasno zdefiniowane w literaturze oraz normach,
11. pewien niedosyt może budzić brak w pracy oceny wskaźników efektywności ekonomicznej zastosowania biomasy toryfikowanej w energetyce. Prawdopodobnie w chwili obecnej brak jest rynku biomasy toryfikowanej dostępnej dla energetyki w ilościach przemysłowych (nie ukształtowała się zatem cena „rynkowa” tego towaru), a opłacalność przedsięwzięcia polegającego na wdrożeniu spalania biomasy toryfikowanej zależy mocno od wartości uprawnień do emisji CO₂ i ewentualnie kształtu systemu wsparcia energii z OZE (którym może zostać objęta energia wytworzona z biomasy toryfikowanej). Być może kolejne publikacje Autora będą mogły być o ten element uzupełnione.

Wnioski końcowe

Reasumując można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Krystiana Krochmalnego pt. „Wpływ warunków toryfikacji biomasy i odpadów na właściwości fizykochemiczne produktów” wiąże się bezpośrednio z koniecznością wprowadzenia nowego podejścia i rozwiązań procesowych do zastąpienia surowej biomasy toryfikatorem.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy zaliczam:

- poprawnie postawiony problem naukowy oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Doktoranta,
- rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest szczegółowa analiza przebiegu procesu toryfikacji w różnego typu reaktorach dla różnych rodzajów biomasy,
- przeprowadzenie trudnych prac eksperymentalnych na wysokim poziomie naukowym,
- umiejętność praktycznego wykorzystania wyników badań naukowych,

- poprawnie wybrano przedmiot analiz i metodykę, uzyskano ważne kompleksowe wyniki,
- Doktorant wykazał się dużymi umiejętnościami i talentem w prowadzeniu trudnych badań eksperymentalnych.

Reasumując, stwierdzam że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego *wniosuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej dopuściła mgr inż. Krystiana Krochmalnego do dalszego etapu postępowania doktorskiego.*

Jednocześnie biorąc pod uwagę zarówno walory naukowe jak i praktyczne opisane powyżej *wniosuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.* Wysoka wartość naukowa recenzowanej pracy jest rzeczą niewątpliwą. Ujęto w niej w dotychczas niespotykany, kompleksowy sposób problematykę toryfikacji biomasy oraz wykorzystania biomasy toryfikowanej na cele energetyczne. Obszerne rozważania zawierają zarówno elementy o charakterze naukowo – poznawczym (takie jak wyniki analiz laboratoryjnych procesów toryfikacji, badania TGA, wskaźniki emisji), jak też analizy mające znaczenie praktyczne.

