

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pani mgr inż. Anny Słowak
„Opracowanie metody prognozowania składu gazu generatorowego”**

Promotor rozprawy prof. dr hab. inż. Anatolij Pavlenko.

1. Wprowadzenie

Recenzja została przygotowana w oparciu o decyzję Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 11 stycznia 2023, pismo znak IAA-002-01/2023 w sprawie powierzenia mi opracowania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Recenzja przygotowywana będzie w oparciu o następujące akty prawne:

- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789 z późniejszymi zmianami),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r. poz. 261 ze zmianami),
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r., poz. 1669 z późniejszymi zmianami).

Recenzja opracowana została na podstawie przekazanej wraz z w/w pismem rozprawy doktorskiej stanowiącej opracowanie zwarte.

2. Ogólna ocena rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

2.1 Zakres rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Słowak poświęcona jest problematyce zgazowania biomasy pod kątem dalszego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej.

Przewód doktorski był prowadzony w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Rozprawa została zawarta na 129 stronach tekstu zasadniczego. Pracę podzielono na pięć numerowanych rozdziałów oraz spis literatury obejmujący 88 pozycji, z czego przewagę stanowią pozycje anglojęzyczne. Pewna część cytowanych prac pochodzi z ostatnich lat, co świadczy o dobrym rozpoznaniu przez Doktorantkę dorobku naukowego w zakresie merytorycznym przedmiotu rozprawy. W wykazie doktorantka umieściła trzy publikacje własnego autorstwa (współautorstwa), na które powołała się w pracy.

*Data wpływu 27.03.2023r.
Martyna Cedro*

We **wprowadzeniu**, Autorka umiejscawia tematykę pracy w kontekście problemów związanych ze zwiększeniem udziału odnawialnych źródeł energii w ogólnym bilansie energetycznym. Zauważa, że wykorzystanie biomasy pochodzenia roślinnego może przynieść wymierne korzyści w postaci m.in. zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego. Jedną z technologii energetycznego wykorzystania biomasy może być zgazowanie biomasy i dalsze wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej.

Zdefiniowany tutaj został również cel pracy oraz zostały postawione tezy pracy.

W rozdziale **pierwszym** opisano ogólne zagadnienia związane ze znaczeniem i potencjałem zasobów biomasy w Polsce oraz główne sposoby energetycznego wykorzystania biomasy (takie jak spalanie, pirolizę, zgazowanie). Po tym wstępie, dalsza część rozdziału poświęcona jest zgazowaniu biomasy i przedstawiono tutaj podstawy zgazowania biomasy, w tym główne reakcje chemiczne zachodzące podczas tego procesu oraz m.in. skład gazu (syngazu) jako efekt prowadzenia procesu zgazowania. W dalszym ciągu przedstawione są podstawy matematycznego modelowania procesu zgazowania, Autorka omówiła tu takie modele jak: kinetyczne, hydrodynamiczne, równowagi termodynamicznej, stechiometryczne czy związane z minimalizacją energii swobodnej Gibbsa. Jest to wprowadzenie do modelowania podjętego przez Autorkę w dalszej części pracy.

Bardzo istotny rozdział **drugi** poświęcony jest opisowi szczegółów procesu modelowania zgazowania biomasy. Autorka wybrała tu metodę minimalizacji energii swobodnej Gibbsa, argumentując, że jest to najbardziej uniwersalna i dokładna metoda wśród innych przedyskutowanych. Dalsza treść rozdziału rozwijana jest pod kątem opisanej metody i przedstawione zostały tutaj takie kwestie jak:

- dyskusja założeń upraszczających stosowanych w tej metodzie (m.in. warunki ustalenia się stanu równowagi termodynamicznej),
- odstąpienie od pewnych uproszczeń celem zwiększenia dokładności modelowania (m.in. wzięcie pod uwagę konwersji węgla, emisji węglowodorów, czy uwzględnienie strat energii z gazogeneratora),
- bilans mas pierwiastków układu (m.in. skład pierwiastkowy biomasy, czynnik zgazowujący, spalanie stechiometryczne i z uwzględnieniem nadmiaru powietrza, kwestie wpływu wilgotności powietrza i biomasy i inne). Rozważania te prowadzą do zapisu równania procesu zgazowania i równań bilansu poszczególnych pierwiastków (węgla, wodoru, tlenu i azotu).
- równanie bilansu energetycznego z uwzględnieniem rzeczywistego bilansu gazogeneratora (straty ciepła z gazogeneratora , dopływ energii z zewnętrznych źródeł). Autorka przeanalizowała całkowitą energię suchej biomasy, wilgotności biomasy i powietrza, pary wodnej, energię podmuchu recyrkulowanego gazu syntezowego, produktów spalania oraz pochodząca z zewnętrznych źródeł i inne,
- na bazie tych rozważań został opracowany i przedstawiony zastosowany model matematyczny wraz z jego rozwiązaniem. W tym celu określona została całkowita energia Gibbsa układu, model wynika z minimalizacji energii Gibbsa wraz z ograniczeniami. W tym celu zdefiniowana została funkcja Lagrange'a i następnie zostało znalezione ekstremum tej funkcji (metoda mnożników Lagrange'a). W efekcie otrzymamy został układ równań będących pochodnymi cząstkowymi dla każdego składnika gazu generatorowego. Ten układ

jest użyty w dalszej części pracy a jego rozwiązanie wynika z przyrównania wartości pochodnych do zera,

- przedstawiony został ogólny algorytm rozwiązania opisanego układu równań wraz z dyskusją na temat sprawdzalności tego modelu i ocenie dokładności modelowania. W tym celu przedstawiono porównanie wyników modelowania i zmierzonych stężeń CO₂, CO i H₂ w funkcji nadmiaru powietrza (niedomiaru) dla kilku wariantów temperatury procesu i wilgotności biomasy oraz dla zmiennej temperatura zgazowania.

Rozdział ten też stanowi przegląd literatury poświęcony temu zagadnieniu, przywołanych jest wiele prac różnych autorów i omówione i przedyskutowane wyniki osiągnięte przez nich.

W rozdziale **trzecim**, przedstawione zostały badania doświadczalne zgazowania biomasy. Badania opisane w tym rozdziale prowadzone były w KTH w Szwecji na stanowisku gazogeneratorskim z warstwą fluidalną. W rozdziale przedstawione są w sposób skrótowy podstawowe informacje odnośnie instalacji badawczej. Przedstawiona jest metodyka prowadzenia badań, w tym plan prowadzenia doświadczeń. Rozdział zawiera obszerną część poświęconą analizie otrzymanych wyników, gdzie przedstawione jest porównanie wyników pomiarowych i modelowych poszczególnych składników syngazu w zależności od współczynnika nadmiaru (niedomiaru) powietrza dla różnych wariantów temperatury procesu i wilgotności biomasy. Inne porównywane wielkości to masa gazu, ciepło spalania, wydajność gazogeneratorska. Ponadto została przeprowadzona analiza smół, w tym ich masa i skład. Na bazie tych wyników Autorka uznała za celowe kontynuacje prac i pod tym kątem zaprojektowała i wykonała rozbudowaną instalację o większym zakresie współczynnika nadmiaru (niedomiaru) powietrza.

Rozdział **czwarty** opisuje badania wykonane na autorskiej instalacji do pirolizy biomasy. Instalacja powstała na bazie poprzednio otrzymanych wyników. Instalacja umożliwia otrzymywanie syngazu o temperaturze do 1200°C i różnym ciśnieniu, co stanowi rozszerzenie możliwości instalacji w Szwecji. Powstała instalacja łączy w sobie elementy instalacji ze złożem stałym i złożem pęcherzykowym i możliwością fluidyzacji biomasy. Drugi reaktor ze złożem fluidalnym umożliwia wykonanie badań podobnych jak w Szwecji i został wykonany w celach porównawczych dla wyników badań przeprowadzonych w Szwecji. Opisane zostało działanie poszczególnych elementów instalacji i sposób prowadzenia pomiarów. Zastosowane do badań próbki peletu drzewnego zostały wstępnie poddane różnym pomiarom, m.in. wyznaczenia gęstości, wilgotności, wartości opałowej itp. W dalszej części rozdziału następuje opis uzyskanych wyników: uzyski poszczególnych gazów (CO₂, CO, H₂, CH₄) w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza dla wybranych wartości temperatury i wilgotności. Zestawione zostały wyniki otrzymane na tej instalacji i w Szwecji. Rozdział zakończony jest rozważaniami na temat istotności czynników wpływających na efektywność zgazowania

Rozdział **piąty** stanowi podsumowanie pracy, zebrane są w nim i usystematyzowane wnioski z całej pracy

2.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu

Problematyka poruszona w pracy, tj. w ogólności zgazowania biomasy jest istotna co najmniej z punktu widzenia dwóch aktualnie bardzo ważnych zagadnień:

- energetycznego wykorzystania biomasy, bardziej efektywnego i elastycznego niż proste spalanie tej biomasy,
- zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w całkowitej produkcji energii elektrycznej, m.in. ze względu na odpowiednie dyrektywy unijne i inne regulacje. Jedną z tych technologii polega na wykorzystaniu syngazu ze zgazowania biomasy.

W związku z powyższym istotne jest opracowanie technologii efektywnego zgazowania biomasy wraz z narzędziami mogącymi służyć do kontroli tego procesu, prognozowania składu i parametrów wytwarzanego gazu.

Przewiduje się, że przyszła polityka energetyczna będzie dążyła do zwiększenia roli biomasy, w tym poprzez nowoczesne metody jej wykorzystania, takie jak np. zgazowanie.

Z tego powodu wszelkie prace, łączące aspekty techniczne i środowiskowe zmierzające do wsparcia rozwoju technologicznego paliw biomasowych uznają za bardzo wartościowe.

Mając na uwadze wyżej przytoczone argumenty, uznają że temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Słowak został wybrany prawidłowo, jako bardzo aktualny, a całość podjętej pracy wynikała nie tylko z problematyki naukowo-badawczej, ale przede wszystkim nakierowana była na osiągnięcie potencjalnych efektów praktycznych z obszaru energetycznego wykorzystania biomasy poprzez jej zgazowanie.

3. Analiza treści rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

W niniejszym rozdziale recenzji skupiam się na zagadnieniach naukowych samodzielnie rozwiązanych przez doktorantkę, krytyce prawidłowości rozważań zawartych w pracy, pozyskanych wynikach i wniosków przedstawionych przez Doktorantkę. Przedstawię pewne uwagi dyskusyjne i wątpliwości, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy. Przedstawię również uwagi na temat oryginalności rozprawy jak i wskażę główne walory rozprawy.

3.1 Zagadnienia naukowe i uytylitarne rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy stwierdzam, że postawiony przez Doktorantkę cel pracy został zrealizowany.

Do najważniejszych zagadnień naukowych rozwiązanych samodzielnie przez Doktorantkę zaliczam:

- krytyczna analiza literatury,
- przeprowadzenie szerokiego zakresu pomiarów na stanowiskach badawczych,
- opracowanie i budowa własnych instalacji badawczych,
- opracowanie modelu matematycznego procesu zgazowania i analiza statystyczna wyników badań.

Za najistotniejsze elementy pracy w aspekcie praktycznym uważam:

- przeprowadzenie rozbudowanych analiz eksperymentalnych,
- opracowanie zestawu narzędzi umożliwiających kontrolę procesu zgazowania pod kątem otrzymywania syngazu o zadanych parametrach.

3.2 Uwagi krytyczne do pracy

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorantka bardzo dobrze orientuje się w przedstawionej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie uchybień i oceniam znajomość przedmiotu zagadnienia przez Doktorantkę, w tym jej przygotowanie zawodowe i naukowe – pozytywnie.

Poniżej zamieszczam uwagi, które uznaję za mniej istotne lub posiadające charakter porządkowy, niektóre z nich jednakże wymagają pewnej dyskusji naukowej podczas publicznej obrony pracy. Uwagi do pracy można podzielić na trzy kategorie:

Uwagi formalne związane ze strukturą pracy, tj.

- Sformułowanie tez pracy poprzez wskazanie sposobów wykorzystania wyników pracy, czy w formie pewnych wniosków uważam za niezbyt zręczne. Takie sformułowanie tez pracy, powoduje to, że brak jest podstaw poznawczych, które przyjmuje się dążąc do rozwiązania postawionego problemu naukowego, które niejako pełnią rolę punktów oparcia pracy.
- W posumowaniu brak jest odniesienia się do postawionych tez pracy, brak jednoznacznego stwierdzenia czy tezy pracy zostały wykazane/obalone w wyniku realizacji pracy (jednakże, to by było bardziej wskazane w przypadku przeformułowania tez pracy).

Uwagi związane z redakcją pracy i sposobem prezentacji materiału

- Podstawową wątpliwość związaną z redakcją pracy i prezentacją materiału budzi opis stanowisk pomiarowych: brak jest istotnych informacji odnośnie wielu aspektów konstrukcjach, zastosowanych układów pomiarowo-kontrolnych czy sposobów prowadzenia pomiarów, schematy stanowisk są bardzo nieprecyzyjne, są one mało czytelne, zawarte są tylko niewielkie rysunki na których pozaznaczane jest kilka podstawowych elementów stanowiska
- W pracy jest zamieszczone bardzo dużo różnych zdjęć nic nie wnoszących, np. zdjęcia armatury, przyrządów pomiarowych, układów automatyki itp. Zawarta na tych zdjęciach informacja jest żadna, natomiast brak jest zestawienia i omówienia istotnych (z punktu widzenia prowadzenia procesu i otrzymanych wyników) parametrów tych urządzeń (choćby niepewności pomiarowej).
- Prezentacja wyników pomiarowych i porównywanie ich na wykresach z wynikami modelowania jest niezbyt zręczna, nie jest jasne dla jakich wartości wykonywane było modelowanie (czy tylko dla punktów pomiarowych) czy też dla szerokiego zakresu danego parametru – co sugerują linie ciągłe.
- W pracy (na początku) powinien znaleźć się spis użytych symboli. Znacznie ułatwiłoby to analizę pracy bowiem byłaby pewność, że wszystkie wielkości zostały zdefiniowane, teraz w niektórych przypadkach kłopotliwa była identyfikacja oznaczeń.
- Wiele sformułowań jest bardzo nieprecyzyjnych i należało by je uściślić, dla przykładu podaję:

- ...zastosowanie mocnych grzałek .. (str. 105),
- ... co dowodzi dużej precyzyjności (str. 105)
- wielokrotne używanie wymienne sformułowań zgazowanie i gazyfikacja (czy to znaczy to samo?),
- ... proces jest płynnie sterowany (co to jest płynne sterowanie)?
- .. przy użyciu urządzeń pomiarowych z właściwym błędem pomiaru
- termopara platynowa – platyna (str. 65, tab. 3.1) – co to jest?
- ... uzyskanie z dużą niezawodnością głównych charakterystyk procesu

Uwagi merytoryczne

- Na stronie 49 opisane jest określanie strat cieplnych przez obudowę gazogeneratora – czy to było analizowane w pracy? Jeśli tak, to w jaki sposób zostały określone niezbędne wielkości do takiej analizy (współczynniki wymiany ciepła, emisyjności, temperatury obudowy,)?
- W algorytmie przedstawionym na rysunku 2.1 występuje wielkość T_{react} . Bardzo proszę o informację jak wielkość ta jest zdefiniowana. Nie jest jasne w jaki sposób wyliczana jest nowa wartość T_{react} w przypadku jeżeli nie osiągniemy kryterium zbieżności dla ΔH ? Ponadto proszę o informację, czy ten model matematyczny sprawdzi się, jeżeli w złożu będzie występował gradient temperatury? Jeśli tak, to jaka jest wymagana modyfikacja odpowiednich równań?
- Algorytm z rys. 2.1. pozwala na określenie temperatury procesu, natomiast w wynikach porównawczych (wykresy) podawane są wartości temperatury, przy czym nie wiadomo czy są to temperatury obliczone jak wyżej, czy wartości pomiarowe? Bardzo proszę o informację jaka jest relacja pomiędzy wyliczaną w modelu temperaturą procesu i wartościami pomiarowymi.
- Jaki jest sens wyliczania w modelu temperatury procesu, jeżeli wartość ta jest mierzona na stanowiskach pomiarowych? Jeżeli wartości różniły się, to powinny być podane obydwie. Interesujące byłoby porównanie temperatury wyliczanej przez model z wartościami pomiarowymi ze stanowisk (w tym z wartością uśrednioną) podanymi z odpowiednimi niepewnościami pomiarowymi. Pozwoliłoby to odnieść się do problemu występowania gradientu temperatury w badanym złożu biomasy.
- W pracy brakuje podania niepewności pomiarowych wyznaczanych wielkości, nie pozwala to w wielu przypadkach na weryfikację stwierdzeń zawartych w pracy, np. zgodności wyników modelu matematycznego i pomiarów. W wielu przypadkach konkluzje nie są poparte danymi liczbowymi.
- Gdzie w praktyce mogą znaleźć zastosowania wyniki pracy – czy pod kątem budowy praktycznych układów zgazowania, czy przedstawione badania są bardziej dedykowane pod

zgazowarki allotermalne z jakimś odseparowanym źródłem ciepła? Czy opracowany model sprawdzi się, jeżeli na złożu w takiej zgazowarce będzie występował pewien gradient temperatury? Bo, zdaniem recenzenta, raczej problematyczne może być zastosowanie uzyskanych wyników do zgazowarki autotermalnej ze względu na zachodzenie procesów spalania i silny gradient temperatury w warstwach biomasy. Proszę o odniesienie się do tej uwagi.

- Uwagi do schematu instalacji przedstawionej na rys. 3.7:
 - czym steruje sterownik 11, tj. jak w ogólności wygląda algorytm sterowania, sygnały wejściowe, nastawy itp.?
 - jak zasilane i sterowane są grzałki 13,14,15 (ze sterownika 11?),
 - czy sterowniki 11 i 23 pracują niezależnie, czy też istnieje jakaś korelacja ich pracy? Wydaje się, że podmuch może spowodować (chwilowe?) silne zmiany parametrów procesu, np. temperatury,
 - w jaki sposób sterowany był napęd 12?
- Brak jest opisu metodologii określania współczynnika nadmiaru/niedomiaru powietrza α . Proszę podać jakie wyrażenia matematyczne i jakie dane pomiarowe zostały użyte w tym celu, ponadto jaka jest szacowana wartość niepewności pomiarowej tego współczynnika? Na stronie 67 zasugerowany jest związek(?) współczynnika α ze zużyciem tlenu, ale jest to niezbyt jasne i nie jest dalej rozwijane w pracy.
- Kwestia stosowanego paliwa – podano, że zastosowano pelet z trocin, przy czym podane jest, że znajomość składu paliwa pochodzi z pracy opublikowanej w roku 2007! Czy zatem jest to to samo paliwo (przetrzymany od roku 2007?!) czy inne? Jest to istotna kwestia, gdyż skład elementarny został użyty w modelu matematycznym.
- Czy możliwe jest bliższe przedstawienie pracy automatyki dla instalacji z rysunku 4.4a? W pracy znajduje się stwierdzenie, że automatyka umożliwia płynne prowadzenie procesu, jednakże nic mi to nie mówi. Zdjęcie 4.9 sugeruje, że za sterowanie odpowiada regulator temperatury z jednym wejściem sygnałowym i jednym wyjściem przekaźnikowym. Z której termopary (a są dwie) pobierany był sygnał i jaki tryb (algorytm) sterowania został użyty?
- Przykładowo na rysunku 4.19, 4.20 – widać, że dla wartości $\alpha=0$, wartości pomiarowe CO i H₂ dla najwyższej temperatury osiągają górny zakres pomiarowy analizatora. Czy możliwe jest zweryfikowanie czy rzeczywiste stężenie tych gazów nie było wyższe, a tu obserwujemy wskazanie będące maksimum zakresu?
- Str. 105, rys. 4.22, jeżeli weźmiemy skład gazu z rysunku ($\alpha=0$, 1100°C) to mamy: CO₂ – 1%, CO-20%, H₂-18%, CH₄-20, co daje 59%, a co z resztą?
- Str. 110, „Analizując ...stwierdzono, że zależność tą najdokładniej odzwierciedla równanie drugiego rzędu .” W jaki sposób to stwierdzono, tj. jakie kryterium „dokładności odzwierciedlenia” przyjęto?

Podkreślić należy, że wskazane uwagi nie umniejszają w sposób znaczący wartości naukowej pracy. Przedstawiony cel pracy został osiągnięty, zakres pracy także umożliwił recenzentowi odpowiednie odniesienie się do postawionego problemu badawczego.

3.3 Oryginalność pracy i jej główne walory

Doktorantka zrealizowała dość szeroki zakres prac zarówno badawczych zarówno pod kątem analitycznym jak i na stanowiskach pomiarowym (w tym własnoręcznie opracowanych i zbudowanych).

Zakres zrealizowanych prac stanowi oryginalny dorobek Doktorantki a uzyskane wyniki dostarczają wniosków, które mogą być przydatne na etapie tworzenia nowych układów zgazowania biomasy, w tym do analizy ich działania i optymalizacji pracy. Wyniki są cenne zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia.

Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest wartościowy i z pewnością wart dalszej popularyzacji poprzez np. zaprezentowanie uzyskanych wyników na konferencjach naukowych czy w czasopiśmie. W tym kontekście wiele uwag krytycznych tyczy się poprawy jakości takiej prezentacji.

4. Wnioski końcowe

Zdaniem recenzenta, przedstawiona do recenzji praca oraz dotychczasowy dorobek naukowy Autorki w pełni spełniają wymagania stawiane do uzyskania tytułu doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka określone w Art. 13.1 przywołanej w pkt. 1 Ustawy warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Praca poświęcona jest zagadnieniu w pełni aktualnemu, wpisując się w prowadzone w wielu laboratoriach naukowych i przemysłowych prace związane z energetycznym wykorzystaniem biomasy, a w szczególności z jej zgazowaniem. W pracy otrzymane zostały wartościowe wyniki, które zdaniem recenzenta mogą zostać wdrożone w praktyce.

Reasumując, **pomimo pewnych niedociągnięć redakcyjnych i uwag natury formalnej i merytorycznej związanych ze strukturą pracy oraz zarzutów merytorycznych, jednak nie umniejszających istotnie wartości otrzymanych wyników, recenzent wnioskuje o dopuszczenie pracy Pani mgr inż. Anny Słowak do publicznej obrony.**

