

Dr hab. inż. Joanna Pawłat  
Zemborzyce Podleśne 123A  
20-515 Lublin  
Tel.: 514907373  
E-mail: j.pawlat@pollub.pl

Lublin, 29.08.2018

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Wnukowskiego

Tytuł rozprawy doktorskiej:

**„Kondycjonowanie gazu generatorowego  
otrzymanego ze zgazowania biomasy plazmą mikrofalową”**

Niniejszą recenzję wykonałam na prośbę Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej.

Recenzję sporządziłam na podstawie przepisów dotyczących postępowania w przewodzie doktorskim, a w szczególności art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami), w brzmieniu ustalonym ustawą z dnia 18 marca 2011 r. (Dz. U. Nr 84, poz. 455 z późniejszymi zmianami), oraz zgodnie z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. Nr 204, poz. 1200).

Do zrecenzowania przedstawiono mi rozprawę doktorską mgr inż. Mateusza Wnukowskiego pt. „Kondycjonowanie gazu generatorowego otrzymanego ze zgazowania biomasy plazmą mikrofalową”. Promotorem pracy jest Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski.

DE/PW/1280/2018  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
Wpłynęło dnia 06.09.18r.

## 1. Ocena rozprawy doktorskiej

Podczas swej pracy naukowej Kandydat podjął tematykę związaną z zastosowaniem reaktorów plazmy mikrofalowej pracujących pod ciśnieniem atmosferycznym do kondycjonowania gazu generatorowego ze szczególnym uwzględnieniem wpływu plazmy na konwersję związków smół.

Rozprawa doktorska pt. „Kondycjonowanie gazu generatorowego otrzymanego ze zgazowania biomasy plazmą mikrofalową” została przygotowana w języku polskim, zawiera ona 203 strony wraz ze spisem literatury, skrótów, reakcji, rysunków, tabel oraz z załącznikami, na których w zadawalający sposób zostały opisane badania Kandydata dotyczące ustalenia interakcji między podstawowymi składnikami gazu procesowego poddanego działaniu plazmy mikrofalowej oraz wpływu powyższych składników na konwersję modelowych związków smół. Praca zawiera bogaty spis cytowanej literatury złożony z 274 pozycji.

Rozdział 1 (3 strony) stanowi krótki wstęp uzasadniający podjęcie problematyki zaproponowanej w pracy.

Rozdział 2 (16 stron) przybliży zagadnienia związane ze zgazowaniem wybranych surowców, uwzględniając przebieg procesu, istniejące technologie oraz ich wady i zalety. Na tle istniejących instalacji wykorzystujących różne paliwa do produkcji gazu syntezowego Kandydat zwraca uwagę na potencjał biomasy i odpadów jako paliw dostępnych, jednocześnie analizując stan prawny oraz możliwości logistyczne i techniczne związane z ich wykorzystaniem. W kręgu zainteresowań Autora istotne miejsce zajmuje problematyka smół, zwłaszcza powstałych przy zgazowaniu biomasy i mających negatywny wpływ na jakość generowanego gazu oraz sprawność wykorzystywanych do produkcji syngazu urządzeń. W tej części pracy opisano wiodące metody usuwania i konwersji smół.

Rozdział 3 (16 stron) poświęcony jest plazmie, jako jednej z metod konwersji i usuwania smół o stosunkowo dużej skuteczności. Autor przybliży podstawowe wiadomości: parametry charakteryzujące stan plazmy, typy generatorów plazmy, wyładowań elektrycznych oraz procesy chemiczne zachodzące w plazmie. Istotną częścią tego rozdziału jest przegląd literatury dotyczącej istniejących technik plazmowych wykorzystywanych do konwersji smół. Na podkreślenie zasługuje stosunkowo niewielka ilość rozwiązań w tej dziedzinie bazujących na plazmie mikrofalowej. Kandydat opisuje zasadę działania

i podstawowe elementy konstrukcyjne plazmotronu mikrofalowego pracującego pod ciśnieniem atmosferycznym odnosząc się jednocześnie do potencjalnego wpływu plazmy mikrofalowej na jakość gazu generatorowego.

W Rozdziale 4 (3 strony) sprecyzowano główny cel pracy jako określenie skuteczności mikrofalowych reaktorów plazmowych w konwersji modelowych związków smół oraz analizę wpływu podstawowych składników gazu generatorowego na proces konwersji. Przeprowadzona wcześniej analiza literaturowa pozwoliła na postawienie tezy nakreślającej pole badań i dającej szansę na jej pozytywną weryfikację w czasie realizacji pracy.

W najbardziej cennych dla rozprawy Rozdziałach 5 i 6 podano metodykę przeprowadzonych eksperymentów, opisano wykorzystane reaktory plazmowe oraz wyniki badań własnych.

Rozdział 5 (23 strony) przybliży etapy prowadzonych badań. Na każdym etapie badań używano innego rodzaju reaktora plazmowego. Kandydat opisuje kolejne schematy stanowisk badawczych oraz geometrie plazmotronów. Wyróżniono etapy laboratoryjne: wstępny i główny, podczas których bazowano na związkach modelowych i sztucznych mieszkankach gazowych. Podczas ostatniego etapu badań wykorzystano rzeczywisty gaz generatorowy powstały ze zgazowania osadów ściekowych w instalacji prototypowej. W etapie wstępnym bazowano na azocie oraz na toluenie i benzenie w charakterze substancji smolistych. Celem pierwszym etapu głównego było wykonanie analiz jakościowych i ilościowych produktów rozkładu benzenu w azotowej plazmie mikrofalowej w obecności pary wodnej lub bez pary wodnej oraz rozkładu toluenu i 1-metylnaftalenu w azotowej plazmie mikrofalowej w obecności pary wodnej. Cel drugi obejmował zbadanie wpływu permanentnych składników gazu syntezowego na konwersję benzenu w plazmie mikrofalowej i analizę ich wzajemnych interakcji. W ostatnim etapie badań z wykorzystaniem gazu generatorowego prototypowe stanowisko badawcze wykonane zostało na potrzeby projektu w ramach grantu GEKON, mającego na celu zagospodarowanie osadów ściekowych poprzez zgazowanie. Powstały gaz mógł być oczyszczany przy użyciu reaktora plazmy mikrofalowej i utylizowany w układzie kogeneracyjnym z silnikiem tłokowym. Powyższy reaktor plazmowy posiadał cztery szeregowo połączone linie generacji mikrofal i umożliwiał znaczne zwiększenie mocy zasilania w stosunku do plazmotronów z poprzednich etapów badań.

W tej części pracy przybliżono metodykę obliczeń stopnia konwersji, energii właściwej wyładowania, sprawności energetycznej oraz zawartości węgla. Opisano również szeroką

gamę technik i urządzeń analitycznych wykorzystanych przez Kandydata podczas badań min.: chromatograf gazowy z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym lub termokonduktometrycznym, chromatograf gazowy ze spektrometrem masowym; analizatory: gazu syntezowego, spalin oraz składu elementarnego; spektrometr Ramana oraz dyfraktometr rentgenowski. Do diagnostyki plazmy zastosowano optyczną spektroskopię emisyjną z wykorzystaniem spektrometru siatkowego i kamery CCD, do pomiaru temperatur zastosowano termopary; zaś w ostatnim etapie badań korzystano również ze skaningowego mikroskopu elektronowego z przystawką do mikroanalizy rentgenowskiej.

W Rozdziale 6 (72 strony) omówiono wyniki badań eksperymentalnych. Pierwszy podrozdział dotyczy widm emisyjnych plazmy mikrofalowej zarejestrowanych w falowodzie oraz w dalszych częściach reaktora oraz podjętych prób wyznaczenia temperatur rotacyjnej i oscylacyjnej dla wybranych mieszanek gazowych. Dyskusja dotycząca otrzymanych wyników potwierdza odpowiedni warsztat badacza i jest satysfakcjonująca. Wynikiem pomiarów było przyjęcie 5000-6000 K jako temperatury plazmy mikrofalowej w drugim reaktorze. Następnie Kandydat przybliżył wyniki badań nad wpływem stężenia oraz przepływu gazu na rozkład modelowych związków smół w azotowej plazmie mikrofalowej oraz analizuje energię właściwą wyładowania i sprawność energetyczną dla modelowych związków smół. Kolejny podrozdział koncentruje się na analizie produktów rozkładu powyższych związków smół, analizie prawdopodobnych mechanizmów rozkładu oraz wpływu stężenia początkowego smół na proces ich rozkładu. Produkty procesu dekompozycji smół oraz powstałe sadze zbadano przy użyciu wyrafinowanych technik analitycznych. Autor omawia pozytywny wpływ pary wodnej min. na skuteczność konwersji smół, na powstawanie cząsteczek tlenku węgla i wodoru oraz produktów ubocznych. Następny opisany w pracy problem badawczy dotyczy interakcji permanentnych składników gazu syntezowego takich jak tlenek węgla, dwutlenek węgla, metan i wodór w plazmie mikrofalowej oraz ich wpływu na konwersję benzenu; przy czym podkreślona zostaje znacząca rola rodników generowanych w plazmie na procesy jego rozkładu. Kolejne rozdziały obejmują prezentację wyników pomiarów dotyczących produktów ubocznych konwersji benzenu w plazmie mikrofalowej oraz analizę wpływu temperatury i cząstek aktywnych, zwłaszcza na produkty uboczne w postaci związków aromatycznych. Cennym elementem Rozdziału 6 jest dyskusja wyników badań wykonanych przy użyciu gazu generatorowego w instalacji prototypowej dla wybranych punktów pracy plazmotronu mikrofalowego. Opisano eksperymenty dotyczące wpływu plazmy na permanentne składniki gazu, oraz na związki aromatyczne, cykliczne

i alifatyczne. Pomimo, że wynikiem prac badawczych prowadzonych w warunkach rzeczywistych był gaz relatywnie niskiej jakości to wykazano pozytywny wpływ plazmy mikrofalowej na jego skład. Wyniki pomiarów z etapu laboratoryjnego z gazem syntetycznym oraz z końcowego z wykorzystaniem rzeczywistego gazu generatorowego są spójne.

Rozdział 7 (9 stron) zawiera podsumowanie wyników badań, które potwierdziły możliwość zastosowania plazmy mikrofalowej do konwersji związków smół, której skuteczność, co oczywiste, jest uzależniona min. od ich początkowego stężenia, od składu gazu i jego przepływu. Kluczową rolę w przypadku plazmy mikrofalowej odgrywała wysoka temperatura panująca w reaktorze oraz aktywne cząstki (zwłaszcza rodniki OH, O i H) generowane w plazmie. W niektórych przypadkach uzyskano bardzo zadowalający stopień konwersji (98%) jednak proces charakteryzował się dużą energochłonnością a dużym zagrożeniem jego ciągłości w warunkach kondycjonowania gazu generatorowego była obecność pyłu nieorganicznego. Kandydat podkreśla, że pomimo naukowego charakteru przeprowadzonych badań, jest możliwe podjęcie wielu działań optymalizacyjnych mających na celu poprawę stabilności pracy układu oraz jakości uzyskanego gazu syntezowego i nakreśla pole do dalszych prac w tym kierunku.

Mgr inż. Mateusz Wnukowski zrealizował wyznaczony cel badawczy mający na celu weryfikację skuteczności mikrofalowych reaktorów plazmowych w konwersji modelowych związków smół oraz dokonał analizy wpływu podstawowych składników gazu generatorowego na proces konwersji. Postawiona teza została potwierdzona.

#### Uwagi redakcyjne:

- Kompozycja pracy jest przejrzysta, lecz korzystne byłoby zamieszczenie streszczeń w języku polskim i angielskim oraz opisu dorobku naukowego Kandydata.
- Cel i zakres pracy mógłby zostać określony w sposób bardziej syntetyczny.
- Rozdział 5 opisuje kolejne etapy badań, mimo to ułatwieniem dla czytającego byłoby sprecyzowanie rodzaju zastosowanego reaktora plazmowego w opisach rysunków w Rozdziale 6.
- Język pracy jest poprawny i zrozumiały. Kandydat nie ustrzegł się drobnych błędów edytorskich, jednak są one nieliczne i nie wpływają znacząco na jakość pracy.

Rozprawę doktorską mgr inż. Wnukowskiego oceniam bardzo dobrze. Rozprawa nie budzi zastrzeżeń merytorycznych i ma wkład w rozwój nauki rozszerzając istniejącą wiedzę w zakresie wykorzystania plazmy mikrofalowej w kondycjonowaniu gazu generatorowego. Analiza wyników prac eksperymentalnych umożliwiła identyfikację kolejnych interesujących zagadnień badawczych, zasługujących w mojej opinii na rozwinięcie w dalszej perspektywie czasowej.

Pragnę zadać Kandydatowi następujące pytania:

1. Jak w ocenie Kandydata przedstawia się proponowana metoda w porównaniu z metodami konwencjonalnymi konwersji i usuwania smół? Co jest jej główną zaletą?
2. Jakie w opinii Kandydata byłyby najprostsze do wprowadzenia modyfikacje układu prototypowego prowadzące do podniesienia efektywności energetycznej oraz jakości gazu?
3. Czy Kandydat dysponuje już wynikami pierwszych badań dotyczących zastosowania reaktorów plazmy mikrofalowej w kontekście przemian związków siarki, azotu i wybranych składników syngazu?

## **2. Osiągnięcia naukowo-badawcze Kandydata**

Poniżej prezentuję dotychczasowe osiągnięcia naukowo-badawcze Kandydata:

W bazie Web of Science i Scopus znajduje się 6 publikacji autorstwa mgr inż. Mateusza Wnukowskiego, h-index wynosi odpowiednio 2 (14 cytowań) oraz 3. Według Google Scholar h-index dla 16 znajdujących się w tej bazie publikacji wynosi 3 (stan na 29.08.2018).

Na szczególną uwagę zasługują publikacje w uznanych czasopismach naukowych o międzynarodowym zasięgu np. w Fuel Processing Technology (IF=3,9) czy w Energies (IF=2,6).

Publikacje, w których mgr inż. Mateusz Wnukowski jest pierwszym autorem to min.:

- M. Wnukowski, "Metody stosowane w usuwaniu związków smół z gazu otrzymanego ze zgazowania biomasy – praca przeglądowa", *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, vol. 18, nr 2, str. 17-34, 2016.
- M. Wnukowski, P. Owczarek, Ł. Niedźwiecki, "Wet torrefaction of miscanthus – characterization of hydrochars in view of handling, storage and combustion properties", *Journal of Ecological Engineering*, vol. 16, nr. 3, str. 161-167, 2015.
- M. Wnukowski, "Decomposition of tars in microwave plasma – preliminary results", *Journal of Ecological Engineering*, vol. 15, nr. 3, str. 23-28, 2014.
- M Wnukowski, P Jamroz, „Microwave plasma treatment of simulated biomass syngas: Interactions between the permanent syngas compounds and their influence on the model tar compound conversion”, *Fuel Processing Technology*, vol. 173, str. 229-242, 2018.

Mateusz Wnukowski brał udział w projektach: „Kogeneracyjny układ zgazowywania osadów ściekowych z plazmowym doczyszczeniem gazu” (GEKON) oraz „Technologia plazmowego zgazowania biomasy i odpadów dla wytwarzania paliw płynnych” (NCBiR). Oba projekty wpisują się w tematykę prezentowanej rozprawy doktorskiej. Kandydat realizuje obecnie projekt w ramach programu Preludium „Przemiany siarkowodoru i amoniaku w obecności podstawowych składników syngazu wskutek oddziaływania ciepłą plazmą mikrofalową” (NCN).

Mgr inż. Wnukowski otrzymał również pierwszą nagrodę w plebiscycie na najciekawsze referaty wygłoszone podczas X edycji Konferencji Młodzi w Energetyce w 2018 roku.

### **3. Wnioski końcowe**

Przedstawiona rozprawa doktorska Kandydata pt. „Kondycjonowanie gazu generatorowego otrzymanego ze zgazowania biomasy plazmą mikrofalową” przygotowana pod opieką promotora Prof. dr hab. inż. Włodzimierza Kordylewskiego w pełni odpowiada warunkom określonym w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r.

Rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego reaktorów plazmy mikrofalowej do kondycjonowania gazu generatorowego. Wyniki prowadzonych badań stanowią istotny wkład w rozwój nauki.

Warsztat naukowy Kandydata jest wystarczający do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie energetyka.

**Podsumowując, w mojej ocenie Kandydat spełnia wymagania, jakie zgodnie z przepisami zacytowanymi na początku niniejszej recenzji muszą spełniać kandydaci do stopnia doktora.**

Mgr inż. Mateusz Wnukowski wykazuje się istotną aktywnością naukową i uważam, że **zasługuje na wyróżnienie.**

Joanna Pawłat

/Dr hab. inż. Joanna Pawłat/