



sześciokrotnym wzroście produkcji gazu procesowego w roku 2018 w porównaniu ze stanem z 2010 roku. Rozwój ten był spowodowany przede wszystkim globalną nierównowagą dostępu do zasobów gazu ziemnego i ropy naftowej, mniejszymi globalnymi zasobami gazu i ropy naftowej i w konsekwencji prognozowanym szybszym wyczerpywaniem się tych surowców, substytucją importowanego gazu ziemnego dla produkcji chemicznej, co wpływa na wzrost bezpieczeństwa energetycznego krajów posiadających zasoby węgla oraz ochroną środowiska, gdyż specyfika procesu zgazowania pozwala na separację substancji szkodliwych przy wysokich sprawnościach i relatywnie niskich kosztach.

Szczególnie atrakcyjnym procesem jest zgazowanie strumieniowe zapewniające duży stopień konwersji węgla oraz praktyczny brak produkcji substancji smolistych. Wadą tego procesu jest wysoki koszt inwestycyjny spowodowany koniecznością stosowania żarowytrzymałych materiałów oraz zaawansowanych technologicznie wymienników do chłodzenia gazu procesowego.

Wyzwania technologiczne tego typu rozwiązań spowodowały, że reaktory te wciąż wymagają prowadzenia prac koncepcyjnych, badawczych i rozwojowych. Modelowanie numeryczne CFD sprzyja tym działaniom, pozwala bowiem na możliwość badania pracy urządzenia w warunkach, które są niemożliwe do osiągnięcia podczas rzeczywistych pomiarów. I temu zagadnieniu poświęcona jest praca doktorska Pana mgr inż. Jakuba Mularskiego

Celem ocenianej rozprawy pracy było opracowanie i zastosowanie procedur optymalizacyjnych modeli, które powszechnie są stosowane w opisie procesu zgazowania, w celu poprawy dokładności modeli numerycznych wykorzystujących numeryczną mechanikę płynów.

Mając powyższe na względzie, uważam rozprawę doktorską mgr inż. Jakuba Mularskiego pt. "CFD modeling of the gasification process of solid fuels" za ważną zarówno z poznawczego jak i użytecznego punktu widzenia, a tematykę pracy za aktualną.

### **3. Zakres rozprawy**

Praca doktorska mgr inż. Jakuba Mularskiego została napisana w języku angielskim. Zawiera łącznie 176 stron, na które składa się 7 ponumerowanych kolejno rozdziałów merytorycznych, spis treści, streszczenie, zestawienie stosowanych skrótów, spis tabel i rysunków oraz spis literatur. Praca zawiera liczne rysunki i tabele oraz 247 odnośników literaturowych.



W rozdziale 1 (str. 1-11) zatytułowanym „Introduction” Autor wskazał genezę problemu oraz tematu pracy opisując proces zgazowania na tle krajowej, europejskiej i światowej energetyki. Przedstawił typy reaktorów zgazowania. Rozdział został zakończony wstępnym opisem problematyki numerycznej mechanik płynów czyli narzędzia wykorzystanego do realizacji celów ocenianej pracy doktorskiej.

Bardzo obszerny rozdział 2 (str. 12-68) zatytułowany „Literature review on CFD modeling of entrained flow coal gasification” Autor rozpoczął niekonwencjonalnie, od wskazania celów pracy doktorskiej (podrozdział 2.1). Kolejne rozdziały dotyczą opisu numerycznego kolejnych faz procesu zgazowania – odgazowania, fazy gazowej oraz fazy stałej. Każdą ze składowych faz procesu zgazowania Autor opisał za pomocą modelu kinetycznego globalnego oraz szczegółowego.

W rozdziale 3 (str. 69-80) Autor opisał model numeryczny, który został zastosowany w pracy w celu symulacji procesu strumieniowego zgazowania węgla. W bardzo szczegółowy sposób zostały przedstawione wykorzystane równania, oraz składowe modele cząstkowe (tzw. key sub-models) dla poszczególnych faz procesu zgazowania. Opisano również zastosowany model radiacji.

Rozdział 4 (str. 80-110) przedstawia procedurę optymalizacyjną zgazowania oraz odgazowania, zastosowaną w celu poprawy dokładności symulacji numerycznych. Autor przedstawił między innymi procedurę optymalizacyjną parametrów kinetycznych w oparciu o szybkości grzania oraz analizę techniczną i elementarną paliwa. Ważne, że Autor do procesu optymalizacji wykorzystuje chwilowe szybkości grzania, a nie średnie wartości, jak to robią Autorzy wcześniejszych prac z tego zakresu. Iteracyjny charakter optymalizacji pozwolił zwiększyć dokładność obliczeń nie wydłużając ich czasu.

Rozdział 5 (str. 110-135) dotyczy badań nad fazą gazową. Badania numeryczne przeprowadzono dla dwóch typów reaktorów „idealnych” oraz trzech reaktorów rzeczywistych. Dane referencyjne pochodziły z rzeczywistych prac eksperymentalnych oraz z dwóch modeli mechanizmów reakcji. Rozdział 6 z kolei (str. 136-162) dotyczy badań nad konwersją fazy stałej. Autor pokazał, że faza konwersji koksiku i towarzyszące jej reakcje powierzchniowe mają największy wpływ na proces zgazowania.

Rozdział 7 zawiera generalne wnioski z pracy oraz zdefiniowane plany badawcze na przyszłość.

Podsumowując stwierdzam, że tytuł rozprawy obejmuje jej zakres. Geneza tematu i uzasadnienie celowości jego podjęcia jako problemu badawczego, wynikają z przeglądu stanu wiedzy. W rozprawie postawiono cel i określono zakres badań.

**Mając powyższe na względzie, merytoryczną i układ recenzowanej pracy uznaję za właściwe.**



#### 4. Ocena rozprawy

Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest oryginalna, aktualna i interesująca. Na uwagę zasługuje duża szczegółowość przeprowadzonych analiz oraz ich kompleksowość.

Za główne osiągnięcia Autora pracy uważam:

1. Wykonanie przeglądu literatury w tematyce stosowanych modeli numerycznych w modelowaniu zjawisk składowych procesu zgazowania, który pozwolił na wskazanie głównych luk badawczych stanowiących bezpośredni cel pracy.
2. Zbudowanie wielkoskalowego modelu procesu zgazowania strumieniowego węgla.
3. Przeprowadzenie wieloparametrycznej walidacji zaproponowanego modelu numerycznego z wykorzystaniem danych pochodzących z szerokiej gamy konstrukcji i typów reaktorów zgazowania, pirolizy oraz tzw. reaktorów idealnych, obejmujących zarówno reaktory tlenowe jak i powietrzne, atmosferyczne oraz ciśnieniowe, działające w skali laboratoryjnej jak i półtechnicznej, obejmującą zarówno proces zgazowania jak i odgazowania (pirolizy).
4. Wskazanie, że przeprowadzenie procedury optymalizacyjnych parametrów kinetycznych reakcji odgazowania (skład gazu) oraz konwersji stałych produktów procesowych (wskaźnik konwersji koksiku) umożliwiła uzyskanie dużej zgodności pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i modelowych. Duża zgodność nie powoduje wydłużenia czasu obliczeń numerycznych. Z uwagi na uniwersalność zastosowanej optymalizacji możliwe jest jej wykorzystanie w innych obszarach badawczych.

#### 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne i dyskusyjne jakie nasunęły się podczas lektury pracy. Moim zdaniem są one istotne dla dalszej dyskusji podczas publicznej obrony:

1. Wzór (2.1) – błędna jednostka; jest  $J/kmol/K$  winno być  $J/(kmolK)$ ; z kolei we wzorze 2.18 jednostka  $R$  została napisana jako  $J/kmol^*K$  (co oznacza gwiazdka?); podobne gwiazdki pojawiły się w innych miejscach pracy, np. wzór (2.4), wzór (3.15).
2. Autor energię aktywacji we wzorze (2.1) oznacza symbolem  $E$ , we wzorze (2.8) jako  $E_0$ , zaś we wzorze (2.18) –  $E_a$ . Czym spowodowane są te różnice? Czy to jest ta sama energia aktywacji?
3. Dla jakiej szybkości grzania zaprezentowano wyniki przedstawione na rys. 2.3?
4. Wartości na osi odciętych na wykresie pokazanym na rys. 2.5 wydają się niekompletne (1,?).
5. Czy na rysunku 2.4 przedstawiono udziały masowe?

6. W tabeli 2.2., 2.3., 2.14. i innych nie ma jednostek.
7. Co oznacza zapis występujący m.in. w tabeli 2.5 i 2.6 s-m-kmol?
8. Jaka jest różnica między równaniami (2.20) i (2.20) –rev?
9. Zazwyczaj termin „syngas” jest zarezerwowany dla gazu do celów syntezy o udziałach molowych  $\text{CO}+\text{H}_2=100\%$ ; Autor używa jednak tego terminu dla gazu, który zawiera więcej składników, w tym ditlenek węgla i metan. Czym to jest spowodowane?
10. Jaki wymiar ma wielkość przedstawiona na osi rzędnych na wykresie przedstawionym na rysunku 2.8?
11. W tabeli 2.7 Autor wskazuje wpływ katalizatora na uzyskane parametry kinetyczne reakcji WGS. Jakiego stosuje się katalizatory w procesie zgazowania i czym ten wybór jest podyktowany?
12. Wielkości ze wzoru (2.27) nie mają jednostek.
13. Niezrozumiałe są oznaczenia liczbowe 1-7 na rys. 2.9. Proszę o wyjaśnienie.
14. Strona 82 – ile wynoszą szybkości grzania oraz jakie są właściwości paliwa wykorzystane w procedurze optymalizacyjnej? Autor wykorzystywał różne typy węgla na różnych etapach swej pracy. Proszę o uściślenie.
15. Autor wielokrotnie dokonuje „grupowej”, często niezbyt dokładnej, analizy pewnych danych. Np. na stronie 101 w trzech zdaniach podsumował to, co można zaobserwować na ośmiu wykresach.
16. Rys. 4.23 – wydaje się niekompletny. Czy nie należałoby w tym miejscu pokazać większej części reaktora (tego opisanego na str.93).
17. Autor w niewystarczający sposób umotywowal dlaczego zastosował model GRI-Mech 3.0 i dlaczego wybrał akurat te mechanizmy reakcji, które przedstawiono w tabeli 5.2.
18. Jak zdefiniowano występujący w tabeli 6.3 parametr „char conversion degree”?

Podkreślić należy, że powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy.

Inne uwagi, w tym edycyjne i językowe:

- Należałoby konsekwentnie używać formy bezosobowej. Zamiast np. „postanowiłem” – „postanowiono”, „stwierdziłem” – „stwierdzono” itd.
- Autor wielokrotnie używa języka potocznego: np. „rozwijane są non-stop”, „w celu stosowania GRI-Mecha”
- Wskazane byłoby wprowadzenie spisu stosowanych oznaczeń na wstępie pracy.



- Należałoby konsekwentnie stosować jednostki układu SI, np. Mg a nie tony, bar a nie Pa itd.,
- Autor wielokrotnie jako rysunków stosuje skany zaczerpnięte z innych (także swojego autorstwa) publikacji.
- Zamiast „własności paliwa” należałoby napisać „właściwości paliwa”.
- Str. vi – podwojone słowa: „otrzymane zależności zostały otrzymane”.
- Str. vii - Słowo oksydacja winno być zastąpione „utlenianie”.
- Str. vii – słowo podproces winno być zastąpione np. sformułowaniem procesów jednostkowych zgazowania.
- Str. 5 – poz. Lit. [28] pojawiła się przed [23].
- Str. 12 i kolejne – Autor wielokrotnie stosuje tzw. multycytowania (np. [42-49] oraz [77, 83, 101-104, 107-110, 144, 115 itd....]).
- Str. 22 – 4 wiersz od dołu – jest X, winno być x.
- Strona 30 – tabela 2.4 ma dwa podpisy.
- Strona 75 – wartość  $\mu$  winna być nazwana współczynnikiem lepkości dynamicznej.

## 6. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że odnoszące się do rozprawy uwagi krytyczne nie mają wpływu na jej ocenę, która jest w pełni pozytywna i wysoka. Oceniana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorant w pełni zrealizował postawione cele. Uważam, że należy podkreślić kompleksowy charakter przeprowadzonych analiz numerycznych. Autor rozprawy, mgr inż. Jakub Mularski wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z treści pracy.

Na podstawie przedstawionej do recenzji pracy stwierdzam, że Doktorant wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań. Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska **Jakuba Mularskiego pt. “CFD modeling of the gasification process of solid fuels”** spełnia w całości określone Art. 13.1. Ustawą o stopniach naukowym i tytule naukowym oraz w przepisami wprowadzającymi Ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1669 z późn. zm.). warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

23/06/2021

Jelonek ME