



dr hab. inż. Artur Gutkowski, prof. uczelni Politechnika Łódzka  
Wydział Mechaniczny  
Instytut Maszyn Przepływowych  
ul. Wólczańska 219/223, 90-924 Łódź  
email: artur.gutkowski@p.lodz.pl

mgr Kamila Czerniak

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Czyżewskiego

pt. „Analiza procesu spalania gazów syntezowych z wysokotemperaturowym podgrzewem powietrza”

### 1. Podstawa wykonania recenzji

Niniejszą recenzję wykonałem na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 2 listopada 2021 r.

### 2. Wybór tematu i ogólna charakterystyka pracy

Uważam, że temat rozprawy doktorskiej został bardzo dobrze wybrany. Problem, którym zajął się autor jest jak najbardziej aktualny i dotyczy sektora energetycznego całej Unii Europejskiej. Polityka UE przewiduje odchodzenie od energetyki opartej na paliwach kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii (OZE), takich jak energetyka wiatrowa i słoneczna. Systemy te ze względu na niestabilną generację energii wymagają wspomagania się innymi sposobami wytwarzania energii np. siłowniami gazowymi, w których można by spalać gaz ziemny (występujący w UE także w Polsce) ale zawierający duże ilości azotu lub dwutlenku węgla. Inną grupą mogą być gazy syntezowe, które charakteryzują się niestety dużą zmiennością składu. Gazy tego rodzaju trudno jest spalać stabilnie z wykorzystaniem typowych palników, dlatego metoda spalania wysokotemperaturowego HiTAC (*High Temperature Air Combustion*) wydaje się w tym przypadku najodpowiedniejsza.

Głównym celem naukowym pracy było eksperymentalne określenie wpływu udziału  $\text{NH}_3$  podczas spalania szeregu gazów syntezowych ( $\text{CH}_4$  z  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  i  $\text{CO}$ ) na emisję  $\text{NO}$  w póładiabatyckiej przemysłowej komorze spalania wyposażonej w regeneracyjny palnik gazowy.

Recenzowana praca liczy 107 stron i zawiera oprócz treści zasadniczych zapisanych w sześciu rozdziałach, także literaturę (80 pozycji), załącznik zawierający spis 36 rysunków i 11 tabel.

### 3. Szczegółowa ocena pracy

W rozdziale pierwszym autor przedstawia technologie spalania gazów jako etap pośredni pomiędzy energetyką opartą o wykorzystanie węgla kamiennego i brunatnego a energetyką zeroemisyjną. Specjalne znaczenie ma gaz ziemny rozcieńczony dużymi ilościami  $N_2$  i  $CO_2$  a także gazy syntezowe wygenerowane z biomasy czy nośniki wodorowe, które mogą być spalane z wykorzystaniem technologii wysokotemperaturowego spalania HiTAC. Obiecującymi wynikami (sprawność, niska emisja) prac badawczych realizowanych w Laboratorium Technologii Gazowych Politechniki Poznańskiej autor uzasadnia celowość podjęcia danego tematu.

Rozdział drugi jest przeglądem literatury. W rozdziale tym doktorant opisuje technologię spalania objętościowego i wymienia jej zalety. Następnie w podrozdziałach analizowany jest wpływ poszczególnych składników gazów na proces spalania: zaczynając od  $CO_2$  i  $N_2$ , poprzez  $H_2$  i  $NH_3$ . Zastrzeżenia mam do ostatniego z podrozdziałów ponieważ zamiast opisywać wpływ  $NH_3$ , autor przez pierwsze dwie i pół strony skupia się na streszczeniu sytuacji prawnej dotyczącej gospodarki energetycznej w państwach UE, sposobach magazynowania energii i wadach  $H_2$ . Według mnie te opisy jak najbardziej mogłyby się znaleźć w tej pracy, ale w innym miejscu. Materiał przedstawiony w tym rozdziale pokazuje jak trudno jest przewidzieć zjawiska zachodzące w komorze spalania, podczas spalania paliwa zawierającego  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$  lub  $NH_3$  i dlatego stanowi także mocne uzasadnienie celowości prowadzonych przez doktoranta badań.

W rozdziale trzecim w poprawny sposób sformułowano tezę pracy, jak i jej cele. Autor zamiennie stosuje pojęcia teza i hipoteza, co nie jest poprawne.

W rozdziale czwartym, najpierw przedstawiono szczegółowy zakres prowadzonych badań, następnie omówiono stanowisko badawcze, którego głównym elementem była komora spalania wyposażona w zestaw służący do przygotowania mieszanki o odpowiednim składzie oraz w systemy do pomiaru składu spalin i temperatury. W dalszej części doktorant omówił zasadę działania palnika regeneracyjnego HRS-Ux wykorzystywanego w czasie badań. Szkoda, że bardzo lakonicznie opisał modyfikację palnika pilotującego. Następnie opisano badania wstępne, które posłużyły do określenia podstawowych parametrów eksploatacyjnych dla badań głównych. W dalszej części omówiono badane paliwa oraz zdefiniowano współczynniki, które w dalszej części pracy posłużyły do porównywania wyników. Współczynnikami tymi są: współczynnik konwersji amoniaku do tlenu azotu  $CF$ , współczynnik nierównomierności temperatury  $R_m$  i współczynnik  $R$  określający stopień recyrkulacji. Zastanawiające jest czemu doktorant podaje, że współczynnik ten jest bezwymiarowy jeżeli jego jednostką jest sekunda i sam autor w dalszej części pisze, że „pośrednio określa czas przebywania reagentów...”. W tabeli 4.6 (strona 50) podano wartości opałowe i adiabatyczne temperatury spalania, ze względu na to, że dla danego gazu syntezowego są to pojedyncze wartości a jednocześnie

podano, że ilość  $\text{NH}_3$  zmieniała się od 0 do 10%, pojawia się pytanie czy te wartości biorą pod uwagę ten dodatkowy gaz?

*Rozdział piąty* przedstawia najbardziej wartościowe wyniki badań eksperymentalnych doktoranta. Najpierw zaprezentował emisję NO podczas spalania  $\text{CH}_4$  z dodatkiem  $\text{NH}_3$  (od 1 do 5%) dla trzech współczynników ekwiwalencji: 0,75, 0,85 i 0,95. Następnie zamiast czystego metanu, paliwem były mieszaniny  $\text{CH}_4$  i  $\text{N}_2$  (30 i 50%  $\text{N}_2$ ) a także  $\text{CH}_4$  i  $\text{CO}_2$  (30 i 50%  $\text{CO}_2$ ) oraz  $\text{CH}_4$  i  $\text{H}_2$  (od 10 do 30%  $\text{H}_2$ ) i gazy syntezowe, dla ostatnich dwóch przypadków dodawano  $\text{NH}_3$  w zakresie od 1 do 10%. Za każdym razem doktorant wykorzystując znane z literatury mechanizmy, objaśniał pomierzone poziomy emisji. Dla wybranych przypadków przedstawiono także rozkłady temperatury, CO i NO wewnątrz komory spalania. Wyniki zaprezentowane w tej części są bardzo interesujące, ale ich przyswojenie jest trudne ze względu na stronę edycyjną manuskryptu. Po pierwsze wybór sposobu prezentacji wyników jako wykresy punktowe bez linii je łączącej nie jest najlepszym rozwiązaniem. Może dobrze by było wybrać kolor punktów i linii taki sam np. dla danego rodzaju mieszanki a kształt punktów w zależności od współczynnika ekwiwalencji. Po drugie błędy dotyczące oznaczenia danych mieszanek. Symbole wykorzystywanych mieszanin występujące w tekście nie odpowiadają symbolom stosowanym na wykresach, np. w tekście mamy NM50 (mieszanina składająca się z 50%  $\text{CH}_4$  i 50%  $\text{N}_2$ ) natomiast w legendzie jest N2M50, ale bardziej mylący jest zapis NM30 (70%  $\text{CH}_4$  i 30%  $\text{N}_2$ ) na rysunkach oznaczony jako N2M70. Podobnie ma się sprawa z mieszaninami  $\text{CH}_4$  z  $\text{CO}_2$ , gdzie CO2M30 oznacza skład, w którym jest 70%  $\text{CH}_4$  i na rys.5.4 jest oznaczony jako CO2M70.

W *rozdziale szóstym* podsumowano pracę i przedstawiono wnioski końcowe a także wskazano wytyczne do dalszych prac badawczych.

#### **4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

W pracy przedstawiono dużo nowych i interesujących danych eksperymentalnych, ale jednocześnie pojawiły się wątki, które wymagają pewnego wyjaśnienia.

Uważam, że można było dobrać składy gazów syntezowych w taki sposób, aby interesujące doktoranta zjawiska były łatwiejsze do zaobserwowania. Doktorant napisał, że kierował się dwoma kryteriami. Pierwsze z nich to szeroka rozpiętość wartości opałowej, zawartość  $\text{H}_2$  oraz  $\text{CO}_2$ . Drugim miała być możliwość porównania wyników z rezultatami z wybranych prac. Niestety, ale recenzentowi nie udało się znaleźć takiego porównania w pracy doktorskiej.

Podczas spalania mieszanek  $\text{CH}_4$  i  $\text{CO}_2$  z dodatkiem  $\text{NH}_3$ , widoczny spadek udziału molowego NO w spalinach wraz ze wzrostem współczynnika ekwiwalencji doktorant tłumaczy dysocjacją cząstek  $\text{N}_2\text{H}_j$  ( $j=1-3$ ), ale jak sam podaje jest to reakcja, która zaczyna dominować podczas spalania bogatych mieszanek (str. 64), natomiast współczynnik ekwiwalencji w jego badaniach mieścił się w zakresie od 0,75 do 0,95, a więc są to mieszanki wciąż ubogie. Czy w takim razie można spadek NO tłumaczyć tym mechanizmem?

Wydaje się, że dane dotyczące  $\text{CH}_4$  z dodatkiem  $\text{NH}_3$  z rys.5.4 nie odpowiadają tym przedstawionym na rys.5.1, np. dla  $\text{M100}_{\phi=0.75}$  i 5%  $\text{NH}_3$  (rys.5.4) udział  $\text{NO}$  jest powyżej 500 ppm, natomiast na rys.5.1 jest poniżej tej wartości, czy te wielkości powinny być sobie równe?

#### Uwagi edytorskie:

- Strona 7 – w wykazie oznaczeń i symboli są wielkości powtarzające się np. średnia temperatura spalin i średnia temperatura komory spalania a jednocześnie brakuje innych parametrów jak współczynnik  $k$ .
- Strona 16 – na rys. 2.2a. przedstawiono bilans energetyczny pieca pracującego w trybie klasycznym, ale strumienie ciepła spalin, ciepła traconego przez ściany oraz ciepła użytecznego sumując się nie dają 100%.
- Strona 18 – napisano, że „*Dzięki znajomości mechanizmu reakcji można badać przebieg reakcji spalania tak, aby uzyskać pożądany jej przebieg w kontekście energetycznym i emisyjnym*” czy w takim razie badać, czy kontrolować?
- Strona 19 – napisano niefortunnie „*Jako, że brak jest badań nad wpływem wpływu poszczególnych składników ...*”.
- Strona 24 – brakuje odnośnika do literatury odnoszącego się do pracy doktorskiej Ślefarskiego.
- Strona 30 – gęstość energetyczna przedstawiona jest w jednostkach  $\text{MWh/kg}$  i  $\text{MWh/m}^3$  (czemu nie w  $\text{MJ/kg}$  albo  $\text{MJ/m}^3$ ?), w celach porównawczych lepiej by było, aby stosować tą samą jednostkę.
- Strona 35 – napisano „*Podgrzanie temperatury powietrza...*”, chyba chodziło o podwyższenie temperatury, albo podgrzanie powietrza?
- Strona 39 używane są różne jednostki temperatury ( $^{\circ}\text{C}$  i  $\text{K}$ ) a powinna być tylko jedna, ta druga.
- Strona 43 – podpis pod rysunkiem 4.5. jest „*d) dopływ zimnej wody, e) odpływ zimnej wody*”, woda na odpływie nie będzie zimna, dlatego lepiej byłoby napisać dopływ wody chłodzącej i odpływ wody chłodzącej.
- Strona 51 – w tabeli 4.8 pojawia się pozycja „*Adiabatyczna temperatura spalania  $T_A$  [31, 63]  $\phi=1$  [K]*”, taki zapis sugeruje, że współczynnik ekwiwalencji ma jednostkę  $\text{K}$ .
- Strona 52 – napisano, że „*Laminarna szybkość spalania  $S_L$  definiuje charakter rozprzestrzeniania się nierozciągniętego płomienia laminarnego...*”, Po pierwsze prawidłowa nazwa tego parametru to prędkość spalania laminarnego a po drugie chyba lepiej napisać nierozciąganego płomienia.
- Strona 59 – na rys. 5.2 pojawia się skład  $\phi = 0,76$ , który nie był określany, dodatkowo błędny jest opis w legendzie,  $\text{M100}_{\phi=0.75}$  powinien być  $\text{M100}_{\phi=0.95}$ .
- Strona 60, 10 wiersz od góry – jest „*tlenków amoniaku*” a powinno być tlenków azotu.
- Strona 61 – na rys. 5.3 jest skład  $\text{CO}_2\text{M}_3\text{O}$  a powinien być  $\text{CO}_2\text{M}_7\text{O}$ .
- Strona 64 – czy równania 5.7 i 5.8 są poprawnie napisane? Liczba atomów substratów nie jest równa liczbie atomów produktów.
- Strona 64, 7 wiersz od góry – pojawiają się zwroty „*dla bogatych płomieni*” i „*spalania bogatych płomieni*” chyba chodzi o bogate mieszanki.

- Strona 68 – na rys. 5.5h jest w legendzie M100\_9%NH<sub>3</sub> chyba powinno być M100\_10%NH<sub>3</sub>.
- Strona 68 i 79 – na rys.5.6 w legendzie nie wymieniono przypadku 10%NH<sub>3</sub> w dodatku rys.5.5a jest taki sam jak 5.5c, brakuje wykresu dla współczynnika ekwiwalencji równego 0,75. Na rys.5.6 zebrano wyniki dla trzech wartości współczynnika ekwiwalencji, natomiast na rys.5.5 widać, że punkty pomiarowe nie są dokładnie równe tym współczynnikiem, jak to można wytłumaczyć?
- Strona 70 – na rys.5.7a brakuje wyników dla 10% NH<sub>3</sub>.
- Strona 73, 11 wiersz od góry, jest N270 i N250 a powinno być N2M70 i N2M50.
- W Bibliografii pozycje 22 i 67 odnoszą się do tej samej pracy.

Reasumując wszystko powyższe należy podkreślić, że praca dostarczyła szeregu oryginalnych i ważnych informacji o procesach zachodzących w komorze spalania. Wraz z zaprezentowaną interpretacją tych zjawisk stanowi to cenny materiał do publikacji w dobrych czasopismach. Doktorant osiągnął planowane cele i potwierdził tezę badawczą.

## 5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Czyżewskiego p.t.: „*Analiza procesu spalania gazów syntezowych z wysokotemperaturowym podgrzewem powietrza*” spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i dlatego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*A. Gutkowski*