

Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Bis
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Politechnika Częstochowska
Ul. Brzeźnicka 60a
42-200 Częstochowa

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Piotra JÓŹWIAKA
pt. „Assessment of using low-calorific synthesis gas as a source of heat in an
industrial bogie heart furnace”

Podstawa opracowania

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest decyzja Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka – pismo przewodnie nr RND-IŚGIE/8/2022 z dnia 11 stycznia 2022 r.

1. Tytuł rozprawy

Tytuł rozprawy nie budzi zastrzeżeń i w pełni odpowiada jej treści.

2. Układ rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska, wydana drukiem, liczy 131 stron i została napisana w języku angielskim. Poza Przedmową (1 strona), Streszczeniami w języku angielskim i polskim (po 2 strony każde), spisem treści, wykazem oznaczeń i objaśnień skrótów, wykazem literatury obejmującym łącznie 136 pozycji, wykazem rysunków (60 pozycji) zawiera dodatki w postaci rysunków uzupełniających treść rozprawy i zawierających zestawienia wybranych wyników obliczeń w postaci wykresów. Główna część rozprawy poza Wprowadzeniem została podzielona na 8 rozdziałów głównych z których większość dodatkowo podzielono na podrozdziały.

Pierwszy rozdział Autor nazwał wprowadzeniem i podzielił go na trzy podrozdziały w których kolejno w pierwszym zawarł ogólny opis procesów metalurgicznych specyfikując te procesy, które cechują się największą energochłonnością której jednocześnie towarzyszy największa emisja CO₂ w drugim zawarł krótką charakterystykę obiektu zainteresowania, czyli pieca komorowego z ruchomym wózkiem przy użyciu którego do wnętrza pieca wprowadzany jest i wyprowadzany po ogrzaniu obrabiany przedmiot.

W rozdziale drugim Doktorant omawia różne źródła ciepła stosowane do nagrzewania wsadu w tego rodzaju piecach w tym głównie stosowany gaz ziemny oraz podstawowe właściwości procesu spalania takiego paliwa oraz mechanizmów i parametrów procesów wymiany ciepła w warunkach komór pieców do cieplnej obróbki wsadu, który może znacznie różnić się kształtem, rozmiarami oraz masą. W dalszej części tego rozdziału Doktorant

dokonuje przeglądu możliwych substytutów, szczególnie gazu ziemnego. Wśród tej analizy jako perspektywiczny wskazuje gaz syntezowy pozyskiwany w procesie zgazowania biomasy, traktowanej jako źródło energii o zerowej emisji CO₂.

Właściwości ewentualnego substytutu gazu ziemnego i mechanizmy wymiany ciepła wewnątrz a dokonano na podstawie przeglądu pieca paleniskowego (rozdział 2). Przykładowy piec grzewczy znajdujący się w Štore (Słowenia) została wybrana na przedstawiciela pieców z paleniskiem wózkowym – ich wyposażenie i warunki pracy zostały omówione w rozdziale 3. W rozdziale 4 po szczegółowym uzasadnieniu Doktorant przedstawił dokonany przez niego wybór kryteriów temperaturowych, które winno być spełnione by uznać alternatywny sposób zasilania pieca za dopuszczalny. Wykorzystując jako kryterium liczbę Biota Autor rozprawy uzasadnia wykorzystanie metod numerycznych do obliczeń pola temperatury. W rozdziale tym Autor dokonano także przeglądu problemów jak i korzyści ze stosowania niskokalorycznych paliw alternatywnych, związanych m.in. ze stabilnością spalania i emisją związków azotu.

W rozdziale 5 Doktorant zestawiał założenia dla modelu numerycznego opartego o obliczeniową mechanikę płynów, opracowanego w celu odwzorowania zmiennych w czasie parametrów wewnątrz pieca. W rozdziale tym opisał także w jaki sposób zbierano dane pomiarowe w rzeczywistej instalacji, które posłużyły następnie do walidacji modelu obliczeniowego.

W rozdziale 6 Doktorant dokonuje wielokryterialnej analizy możliwości substytucji gazu ziemnego różnymi nośnikami energii, wskazując jako perspektywiczny gaz syntezowy ze zgazowania biomasy identyfikując jednocześnie trudności z praktyczną realizacją wynikające z zawartości zanieczyszczeń, szczególnie smoły. Dla wyeliminowania procesu jej kondensacji Doktorant zaproponował nowatorski sposób wykorzystania syngazu w stanie gorącym, które ma dwie pozytywne cechy: zwiększa sprawność energetyczną układu oraz uniemożliwia kondensację smoły. W rozdziale tym Doktorant dokonał przeglądu technicznych możliwości doprowadzenia gazu syntezowego do istniejącego pieca oraz dokonał wyboru położenia nowych palników o zmodyfikowanej konstrukcji.

Rozdział 7 Doktorant poświęcił opisowi warunków oraz parametrów realizacji obliczeń numerycznych (wybór siatki obliczeniowej, ustalenie warunków brzegowych, dobór kroków czasowych itp.) jak również opisał zasady walidacji modelu m.in. poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów. Dodatkowo opisał i przeanalizował zagrożenia wynikające m.in. z utraty stabilności płomienia oraz nierównomierności nagrzewania wsadu. W rozdziale 8 Doktorant dokonał podsumowania czynności oraz osiągnięć dokonanych w trakcie realizacji zadania naukowego. Co ważne podsumowanie to zakończył sugestiami co do kierunku dalszych prac związanych z wykorzystaniem gazu syntezowego jako alternatywnego źródła ciepła dla pieców przemysłowych.

2.1. Ocena

Oceniana rozprawa została napisana z zachowaniem standardowego układu, jaki stosuje się w tego rodzaju pracach. Niestety podział na nadmierną liczbę podrozdziałów utrudnia prawidłową percepcję jej treści. Brak akapitów, wyróżnienia rozmiarów i grubości czcionek użytych do pisania nazw rozdziałów i podrozdziałów nie ułatwia czytania pracy.

3. Zastosowane piśmiennictwo

Rozprawa oparta jest o bogate liczbowo piśmiennictwo (136 pozycji). Obejmuje ono praktycznie tą część bogatej literatury z zakresu nowoczesnej metalurgii jak również stosowania i charakterystyki paliw alternatywnych, cechujących się zerową emisją CO₂, która wynika z polityki klimatycznej UE. Znaczna liczba pozycji literaturowych związana jest wyborem i realizacją metodyki realizacji celu naukowego (obliczeniowej mechaniki płynów, kodów komputerowych, podstaw chemii i kinetyki spalania, wymiany ciepła itp.). Wybrana literatura jest aktualna.

4. Cel pracy

Ze względu na założenie wstępne dotyczące wyboru realizacji przewodu doktorskiego jako doktoratu wdrożeniowego, cel pracy ustalono tak, by spełniał wymóg oryginalności naukowej lecz jednocześnie był ściśle powiązany z przemysłem (praktycznym zastosowaniem). Uwzględniając te wymogi Doktorant za cel naukowy rozprawy postawił sobie określenie wpływu na przebieg procesu nagrzewania wsadu w piecu przemysłowym jako źródła ciepła gorącego gazu syntezowego, częściowo zastępującego gaz ziemny. Cel naukowy powiązany jest ściśle z celem użytecznym, za który Doktorant postawił sobie ustalenie możliwości zastąpienia gazu ziemnego spalanego w wybranym piecu przemysłowym niskokalorycznym syntetycznym paliwem alternatywnym w ilości 40% (pytanie - czyli o tyle miałyby nastąpić zmniejszenie zużycia gazu ziemnego – objętościowo czy też masowo – nie zostało to sprecyzowane) przy zachowaniu wymaganych parametrów cieplnych procesu, które są ściśle dobierane do warunków realizacji procesów nagrzewania i rodzaju obróbki cieplnej.

5. Zastosowane metody badawcze

Rozwiązanie postawionego zadania naukowego oparto o analizę możliwości współspalania różnych paliw dokonaną drogą przeglądu dostępnej literatury, dostępnych w niej danych i wniosków z przeprowadzonych w nich obliczeń oraz wyników badań. Zasadniczą weryfikację tez sformułowanych na podstawie tej analizy, Doktorant przeprowadził jednak z wykorzystaniem narzędzi CAE (ang. Computer Aided Engineering) co w obecnych czasach staje się powszechną praktyką. Wykorzystanie komputerowego wspomaganie prac studyjnych umożliwia analizę właściwości projektowanego lub modernizowanego obiektu bez konieczności budowania instalacji testowych i pośrednich, co ma znaczenie zwłaszcza w przypadku dużych obiektów. Wybór ten należy ocenić pozytywnie, gdyż prowadzenie badań eksperymentalnych w rzeczywistym obiekcie dla tak dużej liczby wariantów zasilania wiązałaby się z wysokimi kosztami (tak inwestycyjnymi, jak i eksploatacyjnymi). Ponadto, takie działanie zmuszałoby do długotrwałego wyłączenie pieca z użytku komercyjnego.

6. Omówienie wyników badań

Wyniki badań to w przypadku ocenianej pracy w większości wyniki obliczeń numerycznych m.in. pola prędkości, trajektorii (linii prądu) cyrkulacji gorących gazów wewnątrz pieca z ulokowanym w nim wielkogabarytowym elementem nagrzewanym. Obliczenia wykonano dla dużej liczby wariantów począwszy od warunków odniesienia (to samo wnętrze pieca

z nagrzewanym elementem) z wykorzystaniem naturalnego gazu ziemnego poprzez obliczenia z różnymi udziałami syngazu i gazu ziemnego. Liczba wariantów obliczeń zwiększyła konieczność przeanalizowania różnych konfiguracji palników ich ustawień oraz lokalizacji.

7. Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników badań

Wyniki badań zastosowano w istniejącym piecu grzewczym znajdującym się w zakładach metalurgicznych Štore (Słowenia). Piec ten wybrano jako przedstawiciela pieców z paleniskiem wózkowym w których analizowane w pracy rozwiązania można by stosować.

8. Uwagi krytyczne

Mimo ogólnie pozytywnej oceny rozprawy, Doktorant nie uniknął jednak drobnych błędów, które zostały już w części wymienione we wcześniejszych częściach opinii, Dotyczą one m.in.:

- Nadmiernego podziału rozprawy szczególnie na podrozdziały,
- Brak rozróżnienia wielkości i grubości czcionki użytej do opisu tytułów rozdziałów i podrozdziałów,
- Brak odpowiednik akapitów pomiędzy tytułami rozdziałów/podrozdziałów i ich treścią,
- Braku zestawień podstawowych parametrów paliw używanych w analizach i obliczeniach,
- Szczegółowej specyfikacji opisu roli Doktoranta w realizacji grupowego zadania.

Wymienione uwagi nie umniejszają pozytywnych osiągnięć pracy z których najważniejszym jest fakt, że realizacja zadania powiodła się.

9. Oryginalność rozwiązania problemu naukowego

Ze względu na charakter przewodu doktorskiego Doktoranta, oryginalność rozwiązania problemu naukowego należy rozpatrywać także pod kątem praktycznego zastosowania. Na uwagę i podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorantowi udało się umiejętnie pogodzić te często sprzeczne wymagania. Oryginalność naukowa związana jest z wyborem drogą analizy tych czynników i parametrów, które z punktu widzenia podstawowego (uogólnionego) są kluczowe dla ustalenia kryteriów doboru warunków organizacji procesu nagrzewania wsadu w piecu przemysłowym w warunkach odmiennych od projektowych (piece przemysłowe projektowane są do spalania określonego paliwa – najczęściej gazu ziemnego). Prawidłowo zidentyfikował on słabe strony m.in. procesu zastępowania spalania wysokokalorycznego, pozbawionego zanieczyszczeń stałych gazu ziemnego, gazem o znacznym stopniu zanieczyszczenia, szczególnie tak uciążliwa smołą oraz o znacznie niższej kaloryczności. Na podkreślenie zasługuje nowatorski pomysł Doktoranta, polegający na wykorzystaniu gorącego gazu ze zgazowania, co rozwiązuje co najmniej dwa problemy:

- Merytoryczny – zwiększa kaloryczną temperaturę spalania ubogiego gazu,
- Praktyczny – eliminuje kosztowny i niełatwy proces chłodzenia i czyszczenia gazu syntezowego w którym największą przeszkodą jest kondensująca i trudna do usunięcia smoła, która osiada na „zimnych” ściankach kanałów przepływowych i rurociągów w której „grzęzną” zanieczyszczenia mechaniczne prowadzące do

zablokowania przepływu. Należy podkreślić, że trudności z usuwaniem smoły wynikają z co najmniej dwu czynników: jej dużej lepkości oraz koksowania (zestalania) w podwyższonych temperaturach

Pozytywnie należy ocenić wykorzystanie najnowszych metod obliczeniowych numerycznej mechaniki płynów powiązanej z wymianą ciepła. Niewątpliwie na wyróżnienie zasługuje wykorzystanie nietrywialnych metod analizy procesów niestacjonarnych do rozwiązania zadań postawionych w pracy, co urealnia uzyskane wyniki obliczeń w relacji do warunków rzeczywistych.

10. Ocena końcowa

Opiniowana rozprawa doktorska powstała w rezultacie realizacji programu „Doktorat Wdrożeniowy” uruchomionego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Podstawą realizacji projektu było porozumienie trójstronne pomiędzy Wydziałem Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, Instytutem Energetyki w Warszawie i Autorem niniejszej rozprawy w którym zdefiniowano zasady współpracy pomiędzy stronami. Znaczący udział w pozyskaniu wyników prezentowanych w rozprawie Autor uzyskał dzięki pracy w Instytucie Energetyka dla projektu VULKANO finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Horyzont 2020 na podstawie umowy o dotację nr 723803. Część obliczeniową i analizę danych zawartych w rozprawie przeprowadzono po zakończeniu w/w projektu dzięki dostępowi do oprogramowania i sprzętu komputerowego Zakładu Procesów Ciepłych Instytut Energetyki. Praca ta była również możliwa dzięki wsparciu Instytut Energetyki w formie przyznania środków na prace statutowe mające na celu wspierać rozwój naukowy pracowników jak również ubieganie się Autora o uzyskania stopnia naukowego doktora dzięki uzyskanemu stypendium.

Dane dotyczące procesu będącego przedmiotem analiz w rozprawie doktorskiej zostały dostarczone przez dwie firmy ze Słowenii: Valji d.o.o. oraz Bosio d.o.o. Znaczący udział w realizacji badań wykorzystanych w rozprawie Autor pozyskał we współpracy z pracownikami Instytutu Energetyki z których dwu wymienia z imienia i nazwiska. Wśród licznych podziękowań Doktorant nie zapomina o swojej narzeczonej Karolinie.

Oceniana rozprawa podejmuje aktualny temat jakim jest ograniczenie emisji CO₂ w przemyśle metalurgicznym. Ten ważny dla każdej gospodarki przemysł niewątpliwie zalicza się do największego emitora tego cieplarnianego gazu co w naturalny sposób wynika ze zużywania znacznych ilości energii zarówno elektrycznej jak i chemicznej paliw, szczególnie gazu ziemnego. Doktorant za obiekt swych zainteresowań wybrał przemysłowy piec (nazywany w pracy komorowym, wózkowym piecem grzewczym) do nagrzewania wsadu poddawanego następnie obróbce plastycznej lub tylko cieplnej (np. wyzarzanie, odprężanie i odpuszczanie). W tego rodzaju piecach podstawowym źródłem ciepła na ogół jest spalany w dużych ilościach gaz ziemny, który po węglu i paliwach ropopochodnych należy do grupy paliw o wysokich wskaźnikach jednostkowej emisji CO₂. Słusznie więc Doktorant (należy założyć, że miał on w podejmowaniu decyzji znaczący udział) przyjął założenie, że jedynym racjonalnym sposobem redukcji emisji CO₂ w procesie nagrzewania wsadu w piecach przemysłu metalurgicznego jest zastąpienie części spalanego w nich gazu ziemnego gazem o w miarę zbliżonych właściwościach cieplnych (a to najtrudniejsze, gdyż gaz ziemny cechuje

wysoka wartość opałowa), chemicznych oraz parametrach emisyjnych płomienia. Celem pracy było ustalenie możliwości zastąpienia w 40% gazu ziemnego spalane go w wybranym piecu przemysłowym niskokalorycznym syntetycznym paliwem alternatywnym przy zachowaniu wymaganych parametrów cieplnych procesu, które są ściśle dobierane do warunków realizacji procesów i rodzaju obróbki. Ważną jest kontrola atmosfery pieca by była ona wypełniana jest obojętnymi gazami.

W przypadku obiektu będącego przedmiotem zainteresowania w opiniowanej pracy jest to piec z paleniskiem wózkowym do podgrzewu wstępnego, zasilany wyłącznie kopalnym gazem ziemnym. Badania opisane w rozprawie mają na celu ocenę możliwości zmniejszenia zużycia gazu ziemnego w wybranym piecu poprzez wprowadzenie paliwa alternatywnego, które zastąpiłoby w części gazowe paliwo kopalne i najlepiej wpisywałoby się w cele zrównoważonej gospodarki o obiegu zamkniętym (określenie użyte przez Doktoranta na wyrost). Wybrany poziom zastąpienia wynoszący 40 % niestety Autor nie precyzuje - co jest bardzo istotne – czy to udział cieplny, czy też udział w emisji CO₂. Z opisu uzasadnienia poziomu zastąpienia można się domyślić, że chodzi tu o zastąpienie takiej ilości gazu ziemnego, która w efekcie obniży emisję CO₂ o 40%. Niestety to tylko domysł autora niniejszej opinii.

Doktorant prawidłowo zidentyfikował te słabe strony i zagrożenia, które wiążą się z takim zastępstwem i zaproponował rozwiązania polegające na wykorzystaniu gazu gorącego (podwyższa to wartość kalorycznej temperatury spalania takiego gazu) oraz eliminuje konieczność niezwykle kłopotliwego procesu czyszczenia gazu używanego jako zamiennik.

Doktorant opracował model numeryczny z zakresu obliczeniowej mechaniki płynów wybranego komorowego wózkowego pieca grzewczego, obejmujący niestacjonarny turbulentny ruch gazu, spalanie oraz wymianę ciepła. Dzięki niemu sprawdził wpływ częściowej zmiany rodzajów paliw na przebieg procesu nagrzewania oraz na temperaturę wsadu. Przeanalizowano warianty zasilania pieca o różnym stopniu substytucji gazu ziemnego paliwem alternatywnym, a także odmienne sposoby dostarczania syngazu, wpływ nadmiaru powietrza oraz mocy palników na pracę instalacji. Dokonano udanej walidacji (na miarę wynikającą z założeń upraszczających) modelu matematycznego pieca na podstawie danych pomiarowych z istniejącej instalacji. Omówiono także wyniki testów eksperymentalnych palnika zdolnego do współspalania gazu ziemnego i syngazu, który produkowano na miejscu z biomasy. Oceniono również możliwość dostarczania gorącego gazu syntezowego do dedykowanego palnika bez kondensacji smoły. W celu znalezienia skutecznego sposobu na zmniejszenie zużycia gazu ziemnego w piecu wózkowym, rozważono wiele scenariuszy zasilania. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę możliwości wprowadzenia różnych paliw alternatywnych w celu wskazania najbardziej obiecującego sposobu podawania do paleniska nowych, niskokalorycznych paliw. Wcześniej wybrano najbardziej odpowiedni rodzaj paliwa alternatywnego do tego zadania. Następnie zbadano numerycznie efekty cieplne zastąpienia różnych udziałów gazu ziemnego gazem syntezowym. Ponadto zbadano wpływ dostarczania różnych ilości powietrza do spalania i modyfikacji mocy cieplnej zainstalowanych palników z naciskiem na kryteria substytucji gazu ziemnego.

W rezultacie zweryfikowana została hipoteza badawcza, że możliwe jest zastąpienie w 40% gazu ziemnego gazem syntezowym ze zgazowania biomasy jako źródła ciepła w procesie obróbki cieplnej, przy jednoczesnym utrzymaniu parametrów termicznych procesu i niższej emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Określono też zabiegi techniczne, dzięki którym

współspalanie może zostać przeprowadzone dla różnych warunków pracy pieca przemysłowego. Proces został pozytywnie zweryfikowany w pełnowymiarowym piecu przemysłowym.

Biorąc pod uwagę całokształt dokonań Doktoranta, należy stwierdzić, wykazał on umiejętność samodzielnego rozwiązywania zadań naukowych powiązanych ściśle z możliwościami wdrożenia ich do praktyki.

11. Wniosek końcowy

Wobec przedstawionych ustaleń, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra JÓŹWIAKA spełnia wymogi określone w art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i winna być dopuszczona do obrony.

Częstochowa, 14 marzec 2022

