

Kraków, 31.01.2022r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Wydział Energetyki i Paliw

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

wnowak@agh.edu.pl

Tel: 604410913

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Józwiaka „Assessment of Using Low-calorific Synthesis Gas as a Source of Heat in an Industrial Bogie Hearth Furnace”

Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej, pismo RND-IŚGiE/8/2022 z 19 stycznia 2022r.

Zasadność tematyki

W intensywnie rozwijającym się przemyśle metalurgicznym piece przemysłowe muszą sprostać nowym wyzwaniom w aspekcie poprawy ich wydajności, niezawodności, elastyczności oraz rosnących wymogów środowiskowych, zwłaszcza emisji CO₂. Aby osiągnąć wymagane temperatury w procesach ogrzewania i topienia zapotrzebowanie pieców przemysłowych na energię jest bardzo duże. Stąd wysiłek wielu badaczy skupia się na minimalizacji zapotrzebowania energetycznego w tych procesach. Optymalizacja procesowa oznacza poprawę nie tylko konkurencyjności, ale także kosztowej procesu oraz spełnienie zastrzegających się przepisów w zakresie emisji CO₂.

Przemysł stalowy, szklarski, ceramiczny i aluminiowy charakteryzuje się wysokim poziomem emisji gazów cieplarnianych ze względu na duże zapotrzebowanie niemal

wyłącznie nieodnawialnych źródeł energii (zwłaszcza gazu ziemnego) w procesach związanych z obróbką cieplną materiałów wsadowych lub wyrobów gotowych. Jednym ze sposobów ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko pieców zasilanych gazem ziemnym jest częściowe zastąpienie gazu ziemnego paliwem alternatywnym, takim jak odpadowy gaz syntezowy (zwany również off-gazem) lub syngaz pochodzący z procesu zgazowania biomasy i odpadów, które można uznać za mniej zanieczyszczające niż paliwa kopalne. Zastosowanie syngazu pozwala na zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery z paliw kopalnych. Z drugiej strony gaz ten może powodować problemy z palnikami gazowymi i pracą pieca. Powodem tego jest fakt, iż skład gazów syntezowych różni się diametralnie od składu gazu ziemnego, co ma istotny wpływ na jego podstawowe parametry, takie jak wartość opałowa, szybkość reakcji czy temperatura płomienia adiabatycznego, a także na prędkości przepływu gazu wewnątrz pieca. W wielu zastosowaniach przemysłowych istotna jest jednorodność, stabilność i przewidywalność pola temperatury podczas procesu obróbki cieplnej wyrobu znajdującego się wewnątrz pieca, dlatego też określenie wpływu podawania syngazu wraz z gazem ziemnym na przepływ gazu i rozkład temperatury w piecu, a tym samym intensywność procesu wymiany ciepła jest kluczowym aspektem w ocenie substytucyjności gazu ziemnego.

Istnieje więc pilna potrzeba przeprowadzenia analizy procesu nagrzewania wsadu w przykładowym przemysłowym piecu do wstępnego podgrzewania stali w celu przeanalizowania wpływu zastąpienia gazu ziemnego paliwami alternatywnymi.

I właśnie tą tematyką zajmuje się Doktorant w swojej rozprawie doktorskiej proponując m.in. nowatorskie podejście trójwymiarowego, nieustalonego modelowania CFD procesu nagrzewania wsadu na przykładzie pieca gazowego zlokalizowany w Štore (Słowenia). Wybór tego pieca nie był przypadkowy ponieważ rozprawa w dużej mierze obejmuje wyniki symulacji CFD współspalania syngazu z gazem ziemnym w obecnych i zmodyfikowanych palnikach prowadzonych w ramach projektu VULKANO EC-GA (the Project VULKANO EC-GA contract no 723803).

Stąd tematyka rozprawy doktorskiej wiąże się bezpośrednio z nowymi trendami poszukiwania i implementacji takich rozwiązań procesowych, które pozwalają na ograniczenie emisji CO₂. Problem naukowy został postawiony poprawnie oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie

wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autora.

Układ pracy

Praca podzielona jest na osiem rozdziałów i liczy 131 stron. Praca napisana jest w języku angielskim. Bibliografia zawiera 136 pozycji, w tym cztery pozycje, w których Doktorant jest współautorem (trzy pozycje o zasięgu międzynarodowym). Praca zaczyna się od wprowadzenia (Rozdział 1). Następnie dokonano przeglądu właściwości możliwego substytutu gazu ziemnego oraz mechanizmów wymiany ciepła w piecu paleniskowym (rozdział 2). Wybrano przykładowy piec grzewczy znajdujący się w Štore (Słowenia), który został wybrany jako reprezentatywny dla pieców z paleniskiem wózkowym. Jego wyposażenie i warunki pracy omówiono w rozdziale 3. W rozdziale 4 zaproponowano kryteria substytucji uwzględniające rozkład temperatury. Wykorzystane w pracy narzędzia, tj. modelowanie obliczeniowej dynamiki płynów (CFD) oraz termografia w podczerwieni (IRT), zostały wskazane wraz z opisem matematycznym analizowanego problemu grzewczego. Podkreślono również tematykę niezawodności pieca oraz kosztów modernizacji. Szczegóły metody numerycznej dotyczące badanych zjawisk fizycznych (takich jak turbulentny przepływ gazu, wymiana ciepła czy szybkość reakcji chemicznych) zostały wyjaśnione w rozdziale 5. Walidacja modelu numerycznego w oparciu o dane eksperymentalne została również opisana w tym rozdziale.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki wyboru najbardziej obiecujących substytutów gazu ziemnego na podstawie ich dostępności i właściwości. Omówiono powody wyboru paliwa pochodzącego z biomasy oraz nowatorskie podejście do podawania go w stanie gorącym. Następnie przedstawiono sposoby wprowadzania gazu przy różnych konfiguracjach palników. Preferowana metoda została wybrana w oparciu o dane analityczne, eksperymentalne i symulacyjne. Omówiono zagrożenia związane z kondensacją smoły i niestabilnością spalania. Dodatkowo opisano procedurę określenia wymiarów i lokalizacji dedykowanych palników syngazowych w piecu przemysłowym.

W rozdziale 7 przedstawiono szczegóły dotyczące modelu numerycznego wybranego pieca. Oszacowano błędy modelu, dyskretyzacji przestrzennej i czasowej. Określono dokładność modelu poprzez porównanie jego wyników z danymi zebranymi z ruchu próbnego pieca. Ponadto zaproponowano i przeanalizowano zestaw reżimów zasilania (w tym referencyjny zasilany gazem ziemnym) w celu znalezienia jego wpływu na pracę pieca.

Zaproponowano i przeanalizowano wpływ współczynnika nadmiaru powietrza, mocy pieca i udziału syngazu na przebieg obróbki cieplnej. Wyniki symulacji zostały wykorzystane do określenia w jakim stopniu scenariusze grzewcze spełniły kryteria substytucji i przedstawiają potencjalne problemy z działaniem pieca (np., niepożądane strumienie spalin).

Wyniki badań zostały omówione i podsumowane w rozdziale 8. Przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań, podkreślając niepewność uzyskanych danych numerycznych. Wskazano rekomendacje i możliwe kierunki przyszłych badań w tym zakresie.

Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej

Najważniejsze osiągnięcia naukowe recenzowanej pracy doktorskiej to:

1. Stworzenie zaawansowanego modelu numerycznego pieca przemysłowego.

Stworzony model odzwierciedla niestacjonarne warunki panujące wewnątrz analizowanego wózkowego pieca grzewczego dla różnych sposobów jego zasilania. Model uwzględnia mechanizm spalania wszystkich najważniejszych składników gazów syntezowych i gazu ziemnego oraz zjawiska turbulentnego ruchu gazów, konwekcji, przewodzenia ciepła i promieniowania.

Oryginalnym elementem pracy jest opracowanie rozwiązania dostarczającego dokładne wyniki przy zredukowanych nakładach mocy obliczeniowej. Efekt ten uzyskano m.in. dzięki dobraniu odpowiednich długości kroków czasowych umożliwiających wierne odzwierciedlenie warunków termodynamicznych zarówno dla etapu rozruchu pieca, jak i powolnego nagrzewania jego wnętrza.

2. Porównanie wyników obliczeń z danymi pomiarowymi na obiekcie rzeczywistym.

Wysoka dokładność danych uzyskanych z symulacji została potwierdzona dzięki przeprowadzeniu pomiarów w rzeczywistym obiekcie. Przeprowadzone przez Doktoranta badania z wykorzystaniem kamery termowizyjnej oraz termoelementów pozwoliły potwierdzić założenia zaproponowanego modelu numerycznego i wiarygodność otrzymanych wyników.

Ponadto praca zawiera informacje nt. eksperymentalnych i numerycznych badań spalania syngazu w prototypowym palniku, odnoszących się do artykułu naukowego współautorstwa doktoranta. Świadczy to o prowadzeniu analizy nie tylko w oparciu o obliczenia komputerowe, ale też o rzeczywiste dane pomiarowe.

3. Przeanalizowanie licznych wariantów zasilania pieca przemysłowego.

Ograniczony koszt prowadzenia obliczeń umożliwił określenie przebiegu procesu nagrzewania w czasie dla licznych wariantów zasilania palnika, w tym dla unikalnie szerokiego zakresu substytucji gazu ziemnego gazem syntezowym pochodzenia biologicznego. Pozwoliło to na przeprowadzenie rozbudowanej analizy wrażliwości temperatury wewnątrz pieca na zmianę warunków zasilania instalacji.

Wieloaspektowa ewaluacja pozwoliła ustalić dopuszczalny, ze względu na kryteria temperaturowe, udział oraz sposób współspalania paliwa alternatywnego w badanej instalacji przemysłowej.

4. Kompleksowa analiza doboru alternatywnego sposobu zasilania pieca.

Rozprawa zawiera kompleksową analizę problemu zastąpienia gazu ziemnego paliwem alternatywnym. Na wyróżnienie zasługuje czytelny sposób opisanie kryteriów, którymi Doktorant kierował się przy wyborze tak rodzaju paliwa zastępczego, jak i konfiguracji układu współspalania. Szeroko omówiono przyczyny trudności substytucji tkwiące w odmiennych własnościach paliw (m.in. wartości opałowej i zawartości zanieczyszczeń) oraz zaproponowano unikalne rozwiązania – w szczególności należy wymienić koncepcję spalania gorącego, nieoczyszczonego ze smoły syngazu oraz umiejscowienia palników zasilanych syngazem tak, by płomień gazu ziemnego wspomagał i stabilizował spalanie niskokalorycznego paliwa alternatywnego.

W pracy zwrócono też uwagę na ważny aspekt niezawodności instalacji, zapewniając możliwość pracy pieca w oparciu o paliwo wyjściowe na wypadek awarii układu gazu syntezowego.

Najważniejsze osiągnięcia praktyczne to:

1. Wdrożenie metody zasilania pieca w rzeczywistej instalacji.

Istotnym praktycznym rezultatem jest wdrożenie zaproponowanej w pracy doktorskiej metody zasilania pieca w paliwo alternatywne. Analizowany piec znajdujący się w Słowenii został wyposażony w palniki dedykowane spalaniu gazu syntezowego, które zainstalowano w bezpośrednim sąsiedztwie palników zasilanych gazem ziemnym, umożliwiając realizację przedstawionej w pracy koncepcji współspalania. Ponadto zaimplementowano zasugerowany sposób doprowadzenia gazu syntezowego w stanie gorącym.

2. Potwierdzenie możliwości wykorzystania syngazu jako źródła ciepła w przemyśle.

Dowiedziano eksperymentalnie, że możliwe jest stabilne spalanie gorącego syngazu w palniku o odpowiedniej konstrukcji. Przeprowadzone badania pozwoliły potwierdzić hipotezę, że z termicznego punktu widzenia możliwe jest zastąpienie gazu ziemnego co najmniej w 40% niskokalorycznym syngazem pochodzenia biologicznego w paleniskowych piecach podgrzewczych.

Możliwość istotnego zmniejszenia zależności przemysłu od gazu ziemnego może mieć praktyczne znaczenie dla gospodarek, w których produkcja rolna i leśna ma istotny udział – tak w kwestii niezależności energetycznej, jak i dekarbonizacji.

Poziom warsztatowy

Przedstawiona rozprawa napisana jest wynikiem bardzo trudnych i uciążliwych prac zarówno numerycznych jak i eksperymentalnych na obiekcie rzeczywistym.

Doktorant wykazał bardzo dobre przygotowanie w formułowaniu modelu CFD w oparciu o metodę URANS (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes). W celu walidacji wyników symulacji wykonał badania eksperymentalne na piecu przemysłowym. Ponadto przeprowadził analizę błędów w celu oceny dokładności otrzymanych wyników.

W szczególności podkreślić należy na swobodę z jaką Doktorant posługuje się stosowanymi pojęciami oraz zależnościami. Zarówno dobór tematyki jak i analizowanych źródeł uznać należy za prawidłowy. Praca, napisana w języku angielskim, posiada przejrzysty układ treści, konsekwentnie stosowane nazewnictwo oraz symbolikę.

Uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne, które nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką wartość merytoryczną przedstawionej rozprawy, a dotyczą zagadnień omówionych poniżej.

1. Zgazowanie biomasy wydaje się być obiecującą technologią dla wózkowego pieca grzewczego. Wyzwania technologiczne w takich procesach związane są głównie z jakością syngazu, przede wszystkim niskim stosunkiem H_2/CO i obecnością zanieczyszczeń (smoły i drobnych zanieczyszczeń) i w dużym stopniu zależą od jakości surowca oraz warunków operacyjnych procesu zgazowania. Poza bardzo pogładowym opisie procesu (Rys. 36) brakuje mi bardziej szczegółowej analizy i opisu procesu zgazowania biomasy (czy tylko biomasy?).
2. Poza wartością opałową syngazu i jakością produkowanego gazu, jednym z kluczowych czynników ograniczających zgazowanie jest jakość popiołu lotnego, a zwłaszcza zawartość węgla w popiele. Za cyklonem (Rys. 36) pojawi się popiół lotny, być może sole, karbonizat, aerozole, które wpłyną na emisyjność płomienia ze spalania syngazu. Dlaczego pominięto je w obliczeniach CFD?
3. Zgadzam się, że powietrze jest bardzo powszechnym czynnikiem zgazującym, ponieważ jest prawie darmowe i łatwo dostępne. Jednakże, użycie powietrza jako czynnika zgazującego powoduje rozcieńczenie gazu produktowego azotem zawartym w powietrzu, w wyniku czego produkt gazowy jest o niskiej wartości opałowej. Dlaczego nie rozpatrywano innych czynników zgazujących, np. tlen czy para?
4. Gorący syngaz może być bezpośrednio spalany w celu wytworzenia ciepła bez oczyszczania, tak jak zaproponowano w tej rozprawie, ale czy zanieczyszczenia nieorganiczne (alkalia) i halogenki, (głównie HCl) zawarte w syngazie nie stanowią dużego ryzyka w procesie obróbki cieplnej wyrobów.
5. Biomasa zawiera niskie stężenie halogenków, zwłaszcza chlorków, a ilość HCl w wytworzonym gazie zależy od początkowego stężenia chlorków w surowcu. Czyli należy chyba dobrać odpowiedni surowiec zanim się go podda procesowi zgazowania w takich aplikacjach jak komorowe wózkowe piece grzewcze.
6. Na str. 105 stwierdzono, iż aby uniknąć potencjalnych problemów operacyjnych związanych z podawaniem gorącego biogenicznego gazu syntezowego, zaleca się utrzymywać jego temperaturę tak wysoką temperaturę, jak to tylko możliwe, ale

nie niższą niż 400°C. Tymczasem, aby utrzymać mieszanki syngazu i powietrza powyżej temperatury kondensacji smoły tą temperaturę przyjęto jako 350°C (Rysunek 26).

7. Wybrano dwa palniki o mocy 400 kW do spalania alternatywnego, niskokalorycznego paliwa gazowego pochodzącego z biomasy zostały wybrane jako najbardziej obiecująca opcja umożliwiająca piecowi zmniejszenie jego śladu węglowego (str. 72). Proszę o komentarz bowiem w Tabeli 3, 4 i dalej (str. 96) pojawiają się inne moce palników.
8. Projekt VULKANO Grant agreement ID: 723803 skończył się 31 grudnia 2019 r. Jakie są losy zaproponowanego rozwiązania w przemyśle stalowym i ceramicznym? Symulacje CFD wykazały, że najlepszą modyfikacją palnika w sektorze stalowym jest wprowadzenie dodatkowego kanału gazowego na zewnątrz kanału powietrznego. Natomiast w przypadku przemysłu ceramicznego zaproponowano nowy kanał dla strumienia syngazu i dwie geometrie płyty wirowej. Te propozycje się różnią i proszę o komentarz z czego to wynika.

Wnioski końcowe

Reasumując można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Józwika „Assessment of Using Low-calorific Synthesis Gas as a Source of Heat in an Industrial Bogie Hearth Furnace” wiąże się bezpośrednio z koniecznością wprowadzenia nowego podejścia i narzędzi do zastąpienia gazu ziemnego gazem syntezowym ze zgazowania biomasy jako źródła ciepła w procesie obróbki cieplnej.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy zaliczam:

- poprawnie postawiony problem naukowy oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Doktoranta,
- rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest stworzony model odzwierciedla niestacjonarne warunki panujące

wewnątrz analizowanego wózkowego pieca grzewczego dla różnych sposobów jego zasilania; stanowi to oryginalne osiągnięcie rozprawy doktorskiej,

- przeprowadzenie trudnych analiz na wysokim poziomie naukowym,
- umiejętność wdrożenia wyników badań naukowych w sektorze metalurgicznym
- poprawnie wybrano przedmiot analiz i metodykę, uzyskano ważne kompleksowe wyniki,
- Doktorant wykazał się dużymi umiejętnościami i talentem w prowadzeniu trudnych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych.

Reasumując, stwierdzam że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego wnioskuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej dopuściła mgr inż. Piotra Józwiaka do dalszego etapu postępowania doktorskiego.

