

dr hab. inż. Stanisław Gil, prof. PŚ

Katowice, 18 wrzesień 2025

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Skrzyniarz

pod tytułem:

Analiza możliwości zagospodarowania uciążliwych dla środowiska produktów termicznego przetwarzania odpadów kalorycznych do opalania hutniczych pieców grzewczych

przygotowana pod kierunkiem:

dr hab. inż. Paweł Niegodajew, prof. PCz. – promotor,
dr inż. Sławomir Morel - promotor pomocniczy.

Podstawa formalna opracowania:

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Skrzyniarz została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej z dnia 08.08.2025 w oparciu o podstawę prawną art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85 z późn. zm.).

1. Ogólna charakterystyka i celowość podjęcia tematu badawczego

Procesy termicznego przetwarzania odpadów o wysokiej wartości opałowej, do których można zaliczyć: tworzywa sztuczne, wyselekcjonowane odpady komunalne oraz frakcje nienadających się do recyklingu mogą być potencjalnie wykorzystane jako paliwo alternatywne w energochłonnych gałęziach przemysłu. Do tego typu odbiorców należą huty, w których procesy technologiczne wymagają dużych ilości energii cieplnej. Tradycyjnie stosowanymi

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Materiałowej
Katedra Metalurgii i Recyklingu

ul. Krasińskiego 8, pok. 0045, 40-019 Katowice
+48 32 603 42 21
stanislaw.gil@polsl.pl

NIP 631 020 07 36
ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211
3056

paliwami naturalnymi w tych zakładach metalurgicznych są: gaz ziemny, koks i olej opałowy. W ostatnich latach rosła ich cena, a ograniczona dostępność oraz negatywny wpływ na środowisko powodują konieczność poszukiwania nowatorskich i nieszablonowych rozwiązań. Termiczne przetwarzanie odpadów w procesach pirolizy, zgazowania lub spalania prowadzi do powstania produktów, które po odpowiedniej obróbce mogą być zastosowane jako paliwa alternatywne w energochłonnych procesach technologicznych (np. w hutnictwie). Paliwa wyprodukowane w wyniku termicznego przetwarzania odpadów pozwalają na osiągnięcie istotnych celów: energetycznych, finansowych, środowiskowych oraz w dziedzinie innowacji. Pierwszy z nich pozwala na częściowe uniezależnienie przemysłu hutniczego od konwencjonalnych nośników energii oraz poprawę bezpieczeństwa energetycznego, drugi na obniżenie kosztów produkcji oraz redukcję opłat środowiskowych, trzeci na zmniejszenie ilości odpadów na wysypiskach oraz ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń, natomiast czwarty cel pozwala na wdrożenie nowych technologii odzysku energii i współspalania w warunkach przemysłowych, co wpisuje się w strategię nowoczesnej gospodarki o obiegu zamkniętym i zrównoważonego rozwoju.

Celowość podjęcia tego zagadnienia wynika więc zarówno z wyzwań środowiskowych, jak i ekonomicznych. Analiza możliwości wykorzystania produktów termicznego przetwarzania odpadów o wysokiej wartości opałowej w hutniczych piecach grzewczych pozwoli na ocenę wpływu tych paliw na sprawność energijną pieców i jakość ogrzewanych wsadów.

Wyniki badań stanowiły podstawę do opracowania technologii wdrożeniowej, która znalazła zastosowanie w polskim przemyśle hutniczym. Tak więc podjęcie przez doktorantkę badań nad zagospodarowaniem uciążliwych produktów termicznego przetwarzania odpadów w energetyce hutniczej jest celowe, konieczne i uzasadnione zarówno z punktu widzenia gospodarczego, jak i ekologicznego, a poziom i elementy naukowej pracy w pełni uzasadniają jej przyjęcie jako przedmiotu rozprawy doktorskiej.

2. Merytoryczna ocena pracy doktorskiej

Praca zawiera 77 stron, streszczenia w języku polskim i angielskim, 9 tablic i 14 rysunków umieszczone w tekście, 1 tablicę oraz 9 artykułów (stanowiących podstawę do ubiegania się o stopień doktora) zamieszczonych w załącznikach. Zakres prac badawczych wykonanych przez doktorantkę jest obszerny i obejmuje między innymi:

- przegląd przedmiotowej literatury (114 zacytowanych pozycji),
- opracowanie metodyki pomiarowej,
- wykonanie pomiarów i analiza wyników,
- streszczenie wyżej wymienionych 9 artykułów stanowiących podstawę do ubiegania się o stopień doktora.

W części dotyczącej przeglądu literatury omawiany rozdział zawiera analizę dokonań w badaniach nad: transformacją energetyczną przemysłu hutniczego, kierunkami energetycznego wykorzystania odpadów, możliwością zagospodarowania odpadów i produktów termicznego przetwarzania w hutnictwie, sposobami wykorzystania gazu pirolitycznego oraz koniecznością dekarbonizacji tej gałęzi przemysłu. Ostatnim zagadnieniem poruszonym w części literaturowej była charakterystyka technologii pirolizy odpadów, gdzie doktorantka podkreśla, że w sposób przyjazny dla środowiska można przekształcać różnego rodzaju odpady stałe, tworząc wartościowe produkty chemiczne i paliwa. Zebrany materiał zawiera wyczerpujące omówienie przedmiotu rozprawy, a autorka charakteryzuje się dużą dociekliwością oraz obiektywnym krytycyzmem w odniesieniu do informacji zawartych w publikacjach literaturowych.

Trzeci rozdział pracy został poświęcony opisowi metodyki badań, w tym doborowi technik pomiarowych, przeprowadzeniu eksperymentów i analizie ich wyników. W części wstępnej skoncentrowano się na podstawowej charakterystyce surowców, obejmującej pomiary ich właściwości fizykochemicznych. W dalszej części rozszerzono zakres badań o parametry istotne z punktu widzenia energetycznego i środowiskowego, takie jak skład pierwiastkowy, zawartość wybranych zanieczyszczeń czy wartość opałowa. Eksperymenty zasadnicze dotyczyły procesów termicznego przekształcania materiału, w szczególności pirolizy prowadzonej w różnych warunkach temperaturowych i czasowych. Zastosowane procedury badawcze zostały dobrane w sposób umożliwiający uzyskanie porównywalnych wyników, jednak ich zakres i sposób realizacji wymagają krytycznej oceny pod kątem reprezentatywności, powtarzalności oraz potencjalnych ograniczeń związanych z warunkami eksperymentalnymi (np. wybór temperatur, czasów wygrzewania czy parametrów gazu obojętnego).

Produkty procesu pirolizy zostały poddane szeregowi analiz instrumentalnych, obejmujących techniki chromatograficzne, spektroskopowe i termogravimetryczne. Dzięki temu możliwa była charakterystyka wszystkich powstałych w procesie faz: gazowej, ciekłej i stałej. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano oceny właściwości energetycznych gazu

pirolitycznego, w tym wyznaczenia jego wartości opałowej. Analiza wykazała znaczną zmienność składu gazu, co można wiązać z heterogenicznością badanego materiału RDF oraz wpływem parametrów procesu. Zaobserwowano, że czas i temperatura prowadzenia pirolizy oddziaływały na udział poszczególnych składników, choć efekty tych zmian nie zawsze były jednoznaczne i przewidywalne.

Wnioski z badań wskazują, że optymalizacja warunków procesu jest utrudniona ze względu na niestabilność właściwości surowca oraz złożoność mechanizmów pirolizy. Uzyskane zależności, choć istotne poznawczo, wymagają dalszej weryfikacji – szczególnie w kontekście powtarzalności wyników i możliwości ich uogólnienia na inne materiały odpadowe. Należy też zwrócić uwagę, że sama wartość opałowa, mimo że kluczowa w ocenie potencjału energetycznego, nie oddaje w pełni przydatności praktycznej gazu pirolitycznego, zwłaszcza gdy jego skład chemiczny wykazuje dużą zmienność i obecność niepożądanych związków.

Analiza FTIR-ATR uwidoczniała, że badane kondensaty popirolityczne są złożonymi mieszaninami zawierającymi liczne grupy funkcyjne, m.in. alifatyczne, nienasycone oraz tlenowe. Charakterystyczne pasma wskazują na obecność zarówno węglowodorów o różnej długości łańcucha, jak i związków zawierających grupy hydroksylowe czy karbonylowe. Należy jednak zaznaczyć, że interpretacja widm FTIR w przypadku tak heterogenicznych próbek ma ograniczoną wartość – nakładające się pasma i brak jednoznacznej specyficzności utrudniają identyfikację poszczególnych składników, a różnice w intensywności sygnałów mogą wynikać zarówno ze zmian ilościowych, jak i efektów matrycowych. Dlatego technika ta pełni tu głównie rolę orientacyjną, a szczegółowa identyfikacja związków wymagała zastosowania chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrią mas. Analiza techniką GC-MS potwierdziła, że kondensaty popirolityczne są złożonymi mieszaninami, w których zidentyfikowano setki związków organicznych. Dominują węglowodory alifatyczne, w tym olefiny i dieny będące produktami rozpadu poliolefin, a także związki aromatyczne, tlenowe i chlorowcopochodne, wskazujące na obecność biomasy oraz polimerów zawierających chlor w surowcu. Wyniki te są zgodne z obserwacjami FTIR, choć należy zaznaczyć, że identyfikacja GC-MS, mimo swojej większej selektywności, obarczona jest ograniczeniami związanymi m.in. z nakładaniem się sygnałów i niejednoznacznością dopasowań bibliotecznych. Analiza ta dostarcza jednak bardziej szczegółowych informacji o charakterze i potencjalnym pochodzeniu składników kondensatów.

Analizy elementarne, FTIR i TGA wykazały, że karbonizaty uzyskane w procesie pirolizy charakteryzują się obniżoną zawartością węgla i wodoru oraz stopniowym zanikiem grup funkcyjnych obecnych w surowym RDF (zanikają pasma charakterystyczne dla grup hydroksylowych i alifatycznych), przy równoczesnym wzroście udziału struktur aromatycznych. Wyższa temperatura i dłuższy czas obróbki sprzyjały dalszej degradacji materii organicznej, co przełożyło się na większą stabilność termiczną materiału i zmniejszone ubytki masy podczas spalania. Wyniki te potwierdzają istotne przekształcenia chemiczne zachodzące podczas pirolizy, choć ze względu na złożony charakter RDF jednoznaczna identyfikacja mechanizmów rozkładu pozostaje utrudniona.

Proponowana koncepcja współspalania gazu ziemnego z gazem pirolitycznym w piecu hutniczym ma atrakcyjny wymiar aplikacyjny, lecz obarczona jest istotnymi ograniczeniami technicznymi i ekonomicznymi. Skład gazu pirolitycznego jest zmienny i często zanieczyszczony (smoła, cząstki, związki chlorowcoorganiczne), co może prowadzić do problemów eksploatacyjnych i niestabilności procesu spalania. Brakuje także szczegółowej analizy bilansu energetycznego, wpływu na proces nagrzewania wsadu oraz kosztów eksploatacyjnych, w tym oczyszczania gazu i zagospodarowania produktów ubocznych. Koncepcja ta wymaga więc znacznie szerszej weryfikacji pod kątem stabilności procesu, bezpieczeństwa i opłacalności, zanim na stałe znajdzie zastosowanie przemysłowe.

W pracy następnie przedstawione zostało wykorzystanie programu Ansys Chemkin-PRO do modelowania procesów spalania. Stanowi ono wartościowe narzędzie symulacyjne, jednak opisane podejście wiąże się z szeregiem ograniczeń, które powinny być jasno podkreślone. Po pierwsze, przyjęty model nie uwzględnia zjawisk dyfuzyjnych ani transportu masy w rzeczywistych warunkach spalania, co ogranicza możliwość wiernego odwzorowania procesów zachodzących w piecach przemysłowych, gdzie gradienty stężenia i temperatury odgrywają istotną rolę. Zastosowanie modeli PSR i PFR zapewnia uproszczone odwzorowanie warunków palnikowych i komorowych, jednak nie oddaje w pełni złożoności gazodynamiki, turbulencji czy nierównomiernego mieszania gazów. Dodatkowo, użyty mechanizm chemiczny GRI-Mech 3.0, mimo szerokiego zastosowania w literaturze, jest zoptymalizowany głównie dla spalania metanu i prostych węglowodorów. Choć został rozszerzony o związki C1–C6, może nie w pełni odzwierciedlać kinetykę spalania bardziej złożonych frakcji obecnych w gazach pirolitycznych lub odpadach RDF. W rezultacie przewidywane składy spalin należy traktować

orientacyjnie, a ich dokładność powinna być weryfikowana eksperymentalnie. Warto również zauważyć, że samo powoływanie się na popularność oprogramowania (częstość stosowania w literaturze) nie stanowi wystarczającego uzasadnienia do jego wyboru w danym przypadku. Kluczowe znaczenie ma ocena przydatności modelu dla specyficznych warunków badanego procesu. Bez takiej krytycznej refleksji wyniki symulacji mogą zostać przeszacowane pod względem ich reprezentatywności dla rzeczywistych warunków przemysłowych.

Przedstawione w rozdziale czwartym streszczenia oraz w załączniku 2 publikacje obejmują szeroki zakres tematyczny — od badań nad pirolizą maseczek ochronnych i odpadów RDF w warunkach pandemii COVID-19, poprzez modelowanie kinetyczne i analizy eksperymentalne, aż po koncepcje aplikacyjne w hutnictwie i analizy ekonomiczne. Zaletą jest spójność całego cyklu badawczego: począwszy od badań laboratoryjnych (TGA, SEM, analizy elementarne), przez symulacje komputerowe (Chemkin, modele PSR/PFR), aż po wdrożeniowe propozycje w przemyśle stalowym. Tak szeroka perspektywa wskazuje na umiejętne łączenie badań podstawowych z aplikacyjnymi, co jest silnym atutem doktorantki.

Jednocześnie zauważyć można kilka ograniczeń i ryzyk. Część prac opiera się w znacznym stopniu na modelowaniu komputerowym, które — choć wartościowe — wymaga zawsze solidnej walidacji eksperymentalnej. W opisanych publikacjach weryfikacja ta jest prowadzona, jednak często na ograniczonej skali i dla materiałów modelowych (np. RDF o określonym składzie, mieszanki PP z biomasą), co może rodzić pytania o reprezentatywność wyników dla strumieni odpadów rzeczywistych, charakteryzujących się dużą zmiennością. Kolejną kwestią jest stosowanie popularnych mechanizmów chemicznych (np. GRI-Mech 3.0, Creck), które dobrze odwzorowują spalanie prostych węglowodorów, ale nie zawsze w pełni opisują kinetykę spalania złożonych roztworów gazowych. Może to prowadzić do zbyt optymistycznych przewidywań składu gazów i wartości opałowych.

W części dotyczącej analiz aplikacyjnych i ekonomicznych dostrzegalny jest brak krytycznej dyskusji potencjalnych barier technologicznych oraz ryzyka wdrożeniowego (np. zmienność składu RDF, konieczność spełnienia rygorystycznych norm emisji, wysokie koszty dostosowania instalacji hutniczych, utylizacji odpadów popirolitycznych). Choć wyliczenia opłacalności inwestycji są imponujące (zwrot w 3–4 lata), oparte są na przyjętych założeniach, których spełnienie w skali przemysłowej może być trudne.

Podsumowując, cykl publikacji stanowi wartościowy wkład w rozwój wiedzy o termicznym przetwarzaniu odpadów i jego potencjalnym wykorzystaniu w hutnictwie. Mocną stroną jest interdyscyplinarne podejście, łączące inżynierię materiałową, chemię, energetykę i ekonomię. Jednak dla pełniejszej wiarygodności i aplikacyjności konieczne byłoby szersze uwzględnienie zmienności rzeczywistych strumieni odpadów, ryzyka procesowego i barier technologicznych, które mogą ograniczać praktyczną implementację proponowanych rozwiązań.

3. Uwagi, pytania i komentarze

Praca została zredagowana bardzo starannie, napisana zwięzłym językiem, a podawane stwierdzenia są dobrze wyważone. Podczas jej czytania nasunęło mi się stosunkowo niewiele uwag merytorycznych. Zauważyłem także niewiele błędów formalnych i drukarsko-redakcyjnych. Dla kompletności recenzji poniżej przytaczam ważniejsze z nich:

- odnośnie zakresu badań – czy przedstawione eksperymenty laboratoryjne i pilotażowe w pełni oddają złożoność procesów w warunkach przemysłowych? Jakie są ograniczenia skali i czy wyniki można uogólnić?
- przedstawiona koncepcja współspalania gazu ziemnego z gazem pirolitycznym w piecu przepychowym jest interesująca pod względem aplikacyjnym, jednak budzi szereg wątpliwości technicznych i ekonomicznych. Doktorantka zakłada, że gaz pirolityczny można bezpośrednio wprowadzić do układu palników bez wcześniejszego oczyszczania czy kondensacji frakcji cięższych. W praktyce skład tego gazu jest silnie zmienny, zależny od rodzaju wsadu i warunków procesu, a obecność smoły, cząstek stałych czy związków chlorowcoorganicznych może prowadzić do poważnych problemów eksploatacyjnych (m.in. korozji, zanieczyszczenia elementów automatyki i palników, niestabilności płomienia). Brakuje również analizy wpływu takiego paliwa na bilans energetyczny pieca i jakość procesu nagrzewania wsadu hutniczego. Proszę o wypowiedzenie się doktorantki w tej sprawie;
- pod względem ekonomicznym oszacowanie Capital Expenditures (CAPEX) reaktora pirolitycznego wydaje się uproszczone i nie uwzględnia kosztów eksploatacyjnych (OPEX), w tym konieczności serwisowania, oczyszczania gazu czy zagospodarowania produktów ubocznych (np. smoły, pyłów). Wątpliwości budzi także przyjęte założenie wysokiej sprawności energetycznej procesu i stałej wydajności rocznej, które w praktyce mogą być

trudne do osiągnięcia przy zmiennym i heterogenicznym strumieniu odpadów. Proszę o komentarz do oszacowania CAPEX;

- w pracy przydałby się spis oznaczeń, niektóre skróty są niewyjaśnione w tekście (np. CAPEX),
- w tablicach 2 -5 skrót względnej niepewności pomiarowej jest zapisany jako NP, % - w metrologii posiada on odpowiedni symbol;
- rozdział 3 „Metodyka badawcza” byłby bardziej czytelny, gdyby podzielić go na trzy odrębne rozdziały: „Metodyka badawcza”, „Eksperymenty i analiza wyników” oraz „Energetyczne wykorzystanie produktów termicznego przekształcenia frakcji nadsitowej odpadów komunalnych”;
- na ile zastosowane w modelowaniu mechanizmy kinetyczne odzwierciedlają faktyczny, zróżnicowany skład odpadów RDF i maseczek ochronnych? Czy przeprowadzono walidację modeli dla wielu typów odpadów, czy tylko dla wybranych frakcji?
- jakie emisje wtórne (np. dioksyny, furany, metale ciężkie) mogą powstawać podczas pirolizy RDF zawierającego plastik i jak są kontrolowane?
- czy badania przeprowadzono w sposób umożliwiający powtarzalność w innych ośrodkach badawczych? Jakie były potencjalne źródła błędów eksperymentalnego i modelowego?
- dlaczego w artykułach skupiono się głównie na pirolizie RDF, a nie porównano jej z innymi procesami (np. zgazowanie plazmowe, piroliza katalityczna) w tym samym kontekście?
- str. 20 – co doktorantka rozumie poprzez pojęcie „recykling żelaza”?
- str. 32, tablica 7 – wartość opałowa jest wyrażona w %. Jaka powinna być jednostka?
- str. 40 – strumień substancji podany jest w t/h. W pracy naukowej powinien być wyrażony w Mg/h.
- nieliczne usterki stylistyczne i błędy literowe zaznaczyłem w dostarczonym egzemplarzu pracy i z tego powodu nie będę ich zamieszczał w tym miejscu.

Przytoczone powyżej uwagi mają w większości charakter dyskusyjny lub mówią jedynie o niedociągnięciach i w niczym nie pomniejszają zasadniczej wartości pracy. Przedstawia ona oryginalne opracowanie zagadnienia, które ma znaczenie zarówno naukowe jak i użyteczne.

4. Podsumowanie

Recenzowana praca przedstawia wiele oryginalnych elementów naukowych i poznawczych, a także zawiera wiele wątków i wymaga szczegółowego opisu występujących zjawisk fizykochemicznych, co stanowi trudne wyzwanie dla autorki. Za największe osiągnięcie doktorantki uważam opracowanie metodyki analizy surowców i produktów pirolizy, przygotowanie stanowiska i przeprowadzenie eksperymentów pirolizy, a także dokonane wdrożenie wykorzystania gazu pirolitycznego do ogrzewania pieca przepychowego w jednej z polskich hut.

Czytając pracę nie można oprzeć się wrażeniu, że każdy eksperyment był przygotowany starannie, z dużą dbałością o szczegóły. W każdym przypadku autorka przedstawia wyraźny cel, jaki zamierza osiągnąć, a następnie głęboko analizuje uzyskane wyniki, wykazując cechy doświadczonego badacza i eksperymentatora. Cechuje ją przy tym duża dociekliwość badawcza oraz obiektywny krytycyzm w odniesieniu do informacji zawartych w publikacjach literaturowych, jak również w odniesieniu do wyników badań własnych.

Postawiony w pracy ambitny cel został osiągnięty, a uzyskane wyniki stanowią cenny materiał uzupełniający dotychczasową wiedzę dotyczącą procesów termicznego przetwarzania odpadów i wykorzystania produktów tych procesów jako paliwo alternatywne w energochłonnych gałęziach przemysłu.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Magdaleny Skrzyniarz do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynierijsko-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

