

Dr hab. inż. Rafał KOBYŁECKI, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych
ul. Dąbrowskiego 73, 42–201 Częstochowa

Częstochowa, 2026.02.16

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny MACIEJCZYK

PODSTAWA FORMALNA

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 23.X.2025 oraz pismo Pana prof. dr hab. Krzysztofa LABUSA – Przewodniczącego Rady Dyscypliny IŚGiE Politechniki Śląskiej (pismo RIE-BD.512.45.2025) z dnia 31.X.2025), jak również zawartą na ich podstawie z autorem niniejszej recenzji w dniu 29.X.2025 umową o dzieło UMC/3687/2025 do wniosku nr 3510/UMC/RIE0-1/2025.

ZASADNOŚĆ TEMATYKI I ZAKRES OCENIANEJ ROZPRAWY

Oceniana w ramach niniejszej recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Anny MACIEJCZYK nosi tytuł *Badania kinetyki korozji podosadowej materiałów rur przegrzewaczy w kotłach fluidalnych*. Rozprawę stanowi łącznie 157 stron maszynopisu, w tym spis skrótów i oznaczeń, spis tabel, rysunków oraz streszczenie w języku polskim. Brak jest w przedłożonym do recenzji manuskrypcie streszczenia w języku angielskim.

Praca poświęcona jest realizacji studiów teoretycznych i badań eksperymentalnych w zakresie próby ustalenia wpływu rodzaju paliwa (biomasa i paliwo alternatywne) oraz temperatury spalania na szybkość korozji wybranych gatunków stali. Badania, których wyniki zestawiono i omówiono w rozprawie, przeprowadzono w trzech różnych temperaturach (480°C, 520°C i 580°C) dla wybranych próbek wykonanych z trzech dość powszechnie stosowanych w energetyce gatunków stali, tj.: P235GH, 16Mo3 oraz 13CrMo4-5. Dodatkowo, przeprowadzono badania porównawcze dla próbek pokrytych napawanymi warstwami ochronnymi (Inconel 625 oraz Alloy 310).

Odnosząc się do zasadności podjęcia zaprezentowanych w rozprawie zagadnień merytorycznych stwierdzić można, że tematyka badawcza jest bezdyskusyjnie aktualna – zwłaszcza w ujęciu praktycznym, gdzie w obliczu zmian zachodzących w szeroko rozumianym sektorze wytwarzania energii elektrycznej zachodzi konieczność wykorzystywania coraz gorszej jakości paliw, co stwarza różnego rodzaju znane w branży problemy eksploatacyjne oraz generuje dodatkowe koszty. Podjęta przez Autorkę problematyka jest także istotna z tego punktu widzenia, że znakomita większość obecnie pracujących przemysłowych instalacji i

urządzeń bazujących na spalaniu paliw nie była oryginalnie projektowana oraz przewidywana dla realizacji konwersji energii z paliw „trudnych”, takich jak np. biomasa, czy też paliwa z odpadów (np. paliwa alternatywne – tzw. RDF).

Istotną wartość dodaną wynikłą z realizacji rozprawy, stanowi moim zdaniem możliwość bezpośredniego implementowania i wykorzystania uzyskanych oraz przedstawionych w rozprawie wyników badań w praktyce, co niewątpliwie powinno przełożyć się na wymierne pozytywne korzyści użytkowe.

ELEMENTY NOWOŚCI NAUKOWEJ ORAZ ASPEKTY PRAKTYCZNE

W odniesieniu do zaprezentowanych w pracy zagadnień i wyników badań można stwierdzić, że element nowości i oryginalności zawarty w recenzowanej rozprawie stanowi zwłaszcza analiza porównawcza wpływu powłok ochronnych, wykonanych na próbkach stalowych z materiałów wysokostopowych Inconel 625 oraz Alloy 310, na proces korozji próbek poddanych oddziaływaniu środowiska zbliżonego do tworzącego się wskutek spalania biomasy i paliwa RDF. Uzyskane w wyniku realizacji niniejszej pracy rezultaty mogą posłużyć do oceny możliwości oraz zasadności stosowania w urządzeniach kotłowych materiałów droższych lecz bardziej „wytrzymałych” i mogą przyczynić się tym samym do bardziej efektywnego oraz ekonomicznego projektowania elementów urządzeń energetycznych nowej generacji.

UKŁAD PRACY

Praca podzielona jest na 12 głównych rozdziałów, których kolejność i struktura odpowiadają przyjętej zwyczajowo w rozprawach doktorskich. Praca zawiera zarówno spis oznaczeń i skrótów, jak i spis rysunków, tabel oraz jednostronicowe streszczenie w języku polskim – brak jest jednak streszczenia w języku angielskim.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi krótkie wprowadzenie do podjętej tematyki, w tym omówienie przyczyn i powodów zmian w szeroko rozumianym sektorze energetycznym, zwłaszcza w odniesieniu do nowych paliw – z grupy tzw. „kłopotliwych”, zawierających składniki intensyfikujące korozję i degradację materiałów stalowych zwłaszcza w warunkach podwyższonej temperatury, panującej w paleniskach instalacji energetycznych.

Drugi rozdział zawiera omówienie głównych rodzajów oraz wybranych podstawowych parametrów fizykochemicznych „nowych” potencjalnych paliw dla energetyki – energetyki dążącej w ostatnich dwóch dekadach do ograniczania zużycia węgla i innych paliw kopalnych. Ze względu na realny potencjał komercyjnego zastosowania możliwymi paliwami do stosowania są według Autorki biomasa leśna, rolna oraz różnego rodzaju odpady. W rozdziale drugim przedstawiono również charakterystyczne temperatury przemian fizycznych towarzyszących termicznej obróbce pozostałości mineralnej po spalaniu paliwa stałego oraz

zestawiono (Tabela 2-6) charakterystyczne wskaźniki pozwalające na predykcję ewentualnych problemów eksploatacyjnych podczas spalania paliwa o określonym składzie chemicznym pozostałego po spaleniu popiołu/żuźla.

W rozdziale trzecim Autorka omówiła wybrane i istotne z eksploatacyjnego punktu widzenia problemy związane ze spalaniem paliw alternatywnych w urządzeniach energetycznych – szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom korozji metali (w tym korozji wysokotemperaturowej) oraz przedstawieniu technik badania i oceny tego zjawiska, koncentrując się zwłaszcza na omówieniu możliwości jakie oferują badania grawimetryczne oraz mikroskopia SEM.

Rozdział czwarty poświęcony jest omówieniu problematyki ochrony stali (w domyśle: kotłowych) przed korozją. Treści merytoryczne przedstawione w tym rozdziale obejmują m.in. charakterystykę stali kotłowych niestopowych i niskostopowych, przedstawienie głównych pierwiastków dodawanych w celu poprawy właściwości stali (Cr, Ni, Mo, Mn, Si, Al, Cu, Ti, Nb), jak również krótkie przedstawienie przykładowych stali żaroodpornych oraz metod zabezpieczania stali przed korozją (skupiono się na rozwiązaniach konstrukcyjnych, stosowaniu inhibitorów, ochronie elektrochemicznej oraz stosowaniu powłok ochronnych). Szczególną uwagę poświęcono technologii napawania, przedstawiając ją jako skuteczny sposób inhibicji negatywnego wpływu spalania paliw „trudnych” m.in. w kotłach energetycznych. Jako materiał wart szczególnej uwagi przedstawiono Inconel625 (stop niklowo-chromowy z dodatkiem molibdenu i niobu) – stop wyjątkowo odporny na różnorodne, w tym bardzo agresywne, środowiska korozyjne.

Tezy, cel oraz zakres pracy zawarto w rozdziale piątym. Według deklaracji Autorki celem naukowym rozprawy było podjęcie próby analizy problemów związanych ze spalaniem paliw alternatywnych w kotłach fluidalnych. Sformułowano trzy tezy, które brzmią następująco:

1. Korozyjność zanieczyszczeń popiołowych powstających w warunkach spalania wielopaliwowego jest procesem złożonym, który, w sposób niewystarczający dla techniki kotłowej, jest wyznaczany na podstawie analizy poszczególnych paliw wchodzących w skład miksów wielopaliwowych,
2. Badania korozyjności przeprowadzone z wykorzystaniem rzeczywistych popiołów pozwalają na weryfikację modeli stechiometrycznych tempa korozji,
3. Powłoki ochronne zwiększają odporność na korozję i ich grubość można zweryfikować na podstawie badań tempa korozji.

Koncepcję badań zawarto w kolejnym rozdziale – szóstym. Autorka pozyskała z rzeczywistych obiektów energetycznych trzy różne paliwa (w tym alternatywne) oraz dokonała wyboru trzech gatunków stali, na których najczęściej w praktyce eksploatacyjnej pojawiały się uszkodzenia spowodowane korozją. Dodatkowo, dokonano selekcji warstw ochronnych

aplikowanych na rury wymienników ciepła z wybranych gatunków stali wybierając finalnie dwie powłoki, które poddano badaniom porównawczym w zakresie możliwości ograniczania korozji.

Kolejny rozdział (siódmy) stanowi wyjaśnienie przyjętej przez Autorkę metodyki badań, w tym wyboru paliwa, analizy technicznej, elementarnej oraz analizy składu popiołu. Podkreślić należy, że w ramach przeprowadzonych czynności wykorzystano paliwa pochodzące z rzeczywistych obiektów energetyki zawodowej z kotłami fluidalnymi. Wybrane do badań paliwa stanowiła: 1/ biomasa drzewna, 2/ paliwo z odpadów (RDF) oraz 3/ biomasa z obiektu kogeneracyjnego współspalającego węgiel i biomasę. Dodatkowo, w rozdziale siódmym Autorka omówiła także kwestie przygotowania próbek stali użytych w badaniach eksperymentalnych oraz kwestie doboru warstw napawanych i sposobu realizacji badań kinetyki korozji oraz prowadzenia badań mikroskopowych (SEM).

Trzy kolejne rozdziały (ósmy, dziewiąty i dziesiąty) zawierają zestawienie wyników badań eksperymentalnych ujętych w pracy, obejmujących odpowiednio oznaczanie składu i paliw oraz popiołów (rozdział ósmy), wyniki badań korozji próbek (rozdział dziewiąty) oraz wyniki badań z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej (rozdział dziesiąty).

Analiza ekonomiczna odnosząca się – niestety szkoda, że bardzo lapidarnie – jedynie do porównania możliwości wytwarzania powłok napawanych z materiałów Inconel625 i Alloy310 omówiona jest w rozdziale jedenastym. Autorka stwierdziła, że stosowanie powłoki ochronnej Alloy310 zapewnia porównywalny poziom ochrony przed korozją jak powłoka Inconel625 lecz jej koszty jednostkowe są o połowę niższe.

Podsumowanie wyników zestawionych w recenzowanej rozprawie zawiera rozdział 12 – ostatni, po którym w pracy umieszczono spis literatury, a następnie spis rysunków i tabel. Rozprawę kończy jednostronicowe streszczenie w języku polskim.

POZIOM WARSZTATOWY I OCENA ROZPRAWY

Moim zdaniem poziom warsztatowy rozprawy spełnia niezbędne wymagania – zarówno w aspekcie przyjętej koncepcji, jak i struktury oraz treści merytorycznych. Praca napisana jest językiem poprawnym, układ i kolejność poszczególnych rozdziałów pracy nie budzi większych uwag, a przedstawiane wywody są zrozumiałe, tworząc logiczną całość. W pracy zdarzają się jednak tzw. „literówki” (np. w spisie skrótów), czy też nieprecyzyjne sformułowania (np. zwrot w tytule rozdziału 3 „w warunkach energetycznych”), które jednak nie wpływają znacząco na finalną pozytywną ocenę poziomu warsztatowego rozprawy.

UWAGI KRYTYCZNE

Mimo iż moja ogólna ocena przedłożonej pracy jest pozytywna, podczas lektury nasuwają się jednak również uwagi krytyczne. Najważniejsze z nich to:

1. W odniesieniu do rozdziału 1.2 i zawartych sugestii o konieczności opracowania skutecznych rozwiązań...” oraz w aspekcie badań korozji zwrócić należy uwagę, że badania tego rodzaju są prowadzone co najmniej od kilkudziesięciu lat, stąd też należałoby się raczej odnieść do dostępnej literatury – prace w zakresie przedmiotu prowadzono m.in. w Polsce np. w Politechnice Śląskiej i Politechnice Częstochowskiej. Zagadnienie oddziaływania rzeczywistych osadów popiołowych też na pewno nie jest „słabo zbadane” co sugerowane jest na str. 11. Podobne zarzuty można odnieść do stwierdzenia na str. 13.
2. Str. 14 – co oznacza zwrot „chemicznie magazynowana energia elektryczna”? Ponadto, wątpliwości budzi, czy aby na pewno biomasa jest „paliwem alternatywnym”?
3. Tabela 2.2 – brak podania jakiego stanu dotyczą wyniki (to samo dla Tabeli 2.4)? Dlaczego „zalecana wilgotność słomy na cele energetyczne” to 18-22% i skąd pozyskano te dane? Proszę o wyjaśnienie, jakie to są – według Autorki – „zalecane parametry”? Ponadto, proszę sprecyzować (Tabela 2.3) o jakiej gęstości mówimy?
4. Czy aby na pewno, jak pisze Autorka na str. 23, pojęcie RDF obejmuje również odpady niebezpieczne – proszę o ustosunkowanie się do sprawy?
5. Str. 26 – proszę o wyjaśnienie czy zawsze w stacjonarnej warstwie fluidalnej (BFB) powstają pęcherze? Ponadto, od czego zależy przyjęty rozmiar komory w kotlech BFB i CFB i czy obniżanie temperatury warstwy fluidalnej do 850-900°C to zawsze jest atut rozwiązania?
6. Rażą pewne zwroty niestosowane w branży: np. (str. 28) „pozostałość koksownicza” (powinno być „koksowa”), „karbonizat będący pozostałością po spaleniu części lotnych” (raczej po odgazowaniu), czy też podana definicja ciepła spalania (niepoprawna).
7. Istotną sprawą jest cytowana bibliografia – nie rozumiem, czym kierowano się nie cytując „klasycznych” publikacji, a powołując się na nowsze prace. Czyżby nie studiowano prac pionierskich w zakresie tematu? W wielu miejscach brak ponadto odniesienia do literatury – np. str. 48, 51, 57, Tabela 7-1, 7-2, itp.
8. Str. 34: chyba nieprawdą jest, że styropian zawiera chlor – proszę o komentarz, podobnie jak o wyjaśnienie (str. 39) co oznacza „kondensacja soli i eutektyków”? Proszę także o wyjaśnienie (np. tekst na str. 42) czy w efekcie korozji mamy do czynienia z ubytkiem czy ze zwiększeniem masy badanej próbki?
9. Tekst na str. 60-61 jest w znacznej mierze „tekstem życzeniowym” Autorki, podobnie jak (str. 62) stwierdzenie „...na podstawie analizy literaturowej paliwa te zostały poddane analizom paliwowym...”? Co miano na myśli?
10. Dlaczego przyjęto jedynie zrealizowanie badań w trzech temperaturach? Czy nie jest to zbyt mało na wyciąganie generalnych wniosków, tym bardziej, że wpływ temperatury na korozję jest chyba raczej znany.

11. W materiałach zaprezentowanych na rys. od 7-1 do 7-3 brak podania temperatury i czasu spalania oraz masy próbki i sposobu jej pobrania (reprezentatywność)? W jaki sposób (str. 69) osiągnięto powierzchnię „idealnie płaską” na kuponach i co ona oznacza? Ponadto, skoro jak twierdzi Autorka (str. 72), klienci wymagają optymalnej ochrony co zapewnia 2mm warstwa napawana to po co robić w takim razie badania? Moim zdaniem takie stwierdzenie jest nieprecyzyjne.
12. Brak podania (str.73) danych odnośnie masy popiołu, masy próbek, strumienia gazu, masy początkowej i końcowej próbek oraz składu popiołu – bez podania tych wartości wyniki są trudne do oceny. Ponadto nie znalazłem w pracy informacji o liczbie próbek oraz komentarza odnośnie powtarzalności wyników?
13. Czy aby na pewno (str. 80 pierwszy akapit) można w oparciu o zawartość jedynie C oraz H w paliwach ocenić ich wartość opałową i dobrać technologię spalania oraz zoptymalizować proces energetyczny? To chyba byłoby zbyt proste – proszę o wyjaśnienie tej kwestii. Ponadto, proszę o komentarz czy paliwa biomasowe mają zawsze mniej chloru niż RDF? Brak również odniesienia się w pracy do roli siarki oraz udziałów siarki i chloru w paliwie i ich wpływu na korozję.
14. Dla jakiego stanu opracowano wyniki w Tabeli 8-1? Z ilu próbek są to dane? Czy paliwo P2 (Tabela 8-2) charakteryzowało się aby na pewno wyższą zawartością tlenków sodu niż P1 (biomasa)?
15. Czy Autorka dysponuje (rozdział 8.3) zdjęciami próbek w charakterystycznych temperaturach – jeśli tak, dlaczego ich nie zamieszczono w pracy? Z czego wynikają podane możliwe zakresy przedziału temperatur (Tabela 8-3)? Tabela 8-4: brak cytowania literatury, ponadto niejasne jest co to są tlenki „upłynnienia”? Proszę o wyjaśnienie (str. 85) zwrotów „eutektyk, które unoszone w objętości komory w formie aerozoli...” oraz (str. 86) „...pierwiastki te odparowują i rozkładając się tworzą związki eutektyczne...”.
16. Brak – choćby krótkiego – komentarza od czego zależy temperatura aglomeracji złoża fluidalnego oraz wyjaśnienia czym różni się (str. 87) „dobrze znana dynamika procesów korozji i osadzania popiołów” z węgla od popiołów z biomasy/odpadów, że jest ona „o wiele bardziej skomplikowana”? I czy aby nie na wyrost są stwierdzenia Autorki o pełniejszym zrozumieniu kinetyki korozji w efekcie analizy materiałów zestawionych w rozprawie skoro w pracy kinetyka korozji nie jest wyliczana?
17. Przedstawione w rozdziale 9 wyniki powinny być chyba aproksymowane, zwłaszcza wobec treści Tezy nr 2 (weryfikacja modeli stechiometrycznych tempa korozji – str. 59). Podpisy pod rysunkami od 9-1 do 9-5 oraz 9-7 i 9-13 są moim zdaniem błędne. Czy te wyniki to średnia (jeśli tak – z ilu próbek?). Prosiłbym o krótki komentarz z czego mogą wynikać różnice w przebiegach czasowych zestawionych na rys. 9-7d-f, lecz także 9-9 i 9-11.

18. Tabela 9-1 – z czego wynika i jak przyjęto kryterium „najlepsze vs. najgorsze” właściwości antykorozyjne – proszę wyjaśnić? Ponadto w wielu przypadkach używane są terminy „wyższy” bądź „niższy”, „przyrost masy nieznacznie zwolnił”, „wyraźnie wyższy”, „znacznie niższy”, „kontrolowanej agresywności”, bez podania wartości (np. str. 98, 100, 103, 111, 112) – w rozprawie naukowej, zwłaszcza z dziedziny nauk technicznych, podawanie wartości jest w takich miejscach kluczowe i istotne dla własnej oceny wyników dokonywanej przez czytelnika.
19. Brak w rozprawie informacji (w odniesieniu do uzyskanych wyników) odnośnie sposobu ważenia próbek i kiedy (jeśli oraz w jaki sposób) usuwano z nich popiół? Proszę również o wyjaśnienie w jaki sposób określano wartości zestawione w Tabeli 9-2? Nie ma również informacji jak zdefiniowano „efektywność ochrony przed korozją”? Ponadto (str. 112) Autorka pisze, że decyzję o wyborze reprezentatywnej temperatury do analizy mikrostrukturalnej podjęto na podstawie wcześniejszych analiz kinetyki korozji – dlaczego nie umieszczono tych wyników w rozprawie?
20. Treść rozdziału 11 jest bardzo uboga i w tym ujęciu tytuł rozdziału jest chyba nieco na wyrost – brak podania istotnych informacji, np. jakie były uwzględnione główne składniki kosztów, jakie wartości przyjmowano, itp. Rynkowe wartości są mniej więcej znane w branży i moim zdaniem można je podać w rozprawie (w skrajnym przypadku – z powodów np. biznesowych – można zawsze podawać przecież wartości względne).
21. Treść rozdziału 12 (Podsumowanie) w znacznej mierze obejmuje ogólnie znane informacje, które należałoby raczej umieścić we wstępie – w rozdziale Podsumowanie Autorka powinna moim zdaniem odnieść się do uzyskanych własnych wyników badań oraz kwestii potwierdzenia/zaprzeczenia postawionym w rozprawie tezom.
22. Spis publikacji jest w paru miejscach chyba niepełny (np. poz. 123, 158), ponadto, jak wspomniałem wcześniej, lista nie zawiera znanych pionierskich publikacji z zakresu np. fluidyzacji.

WNIOSEK KOŃCOWY

Mimo wyszczególnionych powyżej uwag krytycznych w podsumowaniu przedstawionej treści recenzji uważam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Anny MACIEJCZYK p.t. *Badania kinetyki korozji podosadowej materiałów rur przegrzewaczy w kotłach fluidalnych* spełnia niezbędne wymagania stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach, zawierając – zarówno w aspekcie naukowym, jak i praktycznym – elementy oryginalne dla rozwoju wiedzy w obszarze dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Tym samym **wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**

Podpisał Rafał Kobyłecki