

Warszawa 23.12.2025

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Pawła Boreckiego,
z tytułu „*Modyfikacja obiegu materiału cyrkulującego w wymiennikach
Intrex w celu poprawy warunków pracy i umożliwienia współspalania paliw
alternatywnych*”

1. Podstawa formalna. Sylwetka Doktoranta

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 31.10.2025 r. w wyniku uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka tej uczelni z dnia 23.10.2025 r. Rozprawa powstała w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. Doktorant jest pracownikiem firmy Sumitomo SHI FW Sp. z oo., w której przeprowadził badania.

2. Cel pracy, zasadność podjęcia tematu

W przedstawionej do oceny pracy zadaniem podjętym przez Doktoranta, sformułowanym jako jej cel, było dokonanie oceny wpływu modyfikacji obiegu materiału cyrkulującego w wymiennikach Intrex na efektywność wymiany ciepła oraz możliwość utrzymania parametrów pary w cyrkulacyjnym kotle fluidalnym. Działania skoncentrowane zostały w znacznej mierze na wyeliminowaniu wewnętrznej cyrkulacji materiału z komory spalania do komory wymiennika Intrex i ograniczeniu zasilania materiałem cyrkulującym do pochodzącego wyłącznie z cyrkulacji zewnętrznej. Jak zostało to zaznaczone już w tytule pracy jest to działanie istotne przy rozważaniu współspalania w kotle CFB paliw alternatywnych.

Wskazane zadanie wynika z aktualnych potrzeb operatorów węglowych bloków energetycznych związanych z koniecznością ich eksploatacji w warunkach silnie zmiennego obciążenia. Wymuszenie pochodzi od zasilających system źródeł odnawialnych o zmiennej mocy. Kolejnym aspektem jest konieczność utrzymania niskiej emisji gazów cieplarnianych, a nawet jej redukcji (warunki Rynku Mocy) oraz możliwość utrzymania wysokiej efektywności ekonomicznej dużych jednostek węglowych. Kotły z paleniskiem fluidalnym cechują się dużą elastycznością paliwową. Układ połączeń wymiennika Intrex umożliwiający cyrkulację wewnętrzną popiołu z obecnością nie w pełni spalonego węgla stanowi tu ograniczenie. Dostrzeżony został problem a postawione zadanie badawcze, realizowane w ramach programu Doktorat wdrożeniowy, jest interesujące z naukowego i aplikacyjnego punktu widzenia.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Oceniana rozprawa została podzielona na 11 ponumerowanych rozdziałów. Jej treść uzupełniają: streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz najważniejszych oznaczeń, wykaz wykorzystanych źródeł literaturowych (67 pozycji), spis rysunków oraz spis tabel.

Pierwszy rozdział rozprawy „Wstęp” zawiera informacje związane z wprowadzeniem czytelnika w aspekty dotyczące uzasadnienia podjętej tematyki. Jako obiekt rozważań wskazany został wyposażony w cyrkulacyjne palenisko fluidalne kocioł CFB-1300. Jako rozważany problem eksploatacyjny Doktorant wskazał zasypywanie, przy niskim obciążeniu, grubym materiałem złoża wymienników zewnętrznych typu Intrex zastosowanych w tej jednostce kotłowej w liczbie ośmiu. Wymienniki te pełnią rolę ostatniego stopnia przegrzewacza pary świeżej oraz przegrzewaczy regeneracyjnych (przegrzew wtórny) – po cztery w każdej ze wskazanych ról. Skutkiem pracy przy niskim obciążeniu bloku jest pogorszenie warunków wymiany ciepła i konieczność poszukiwania środków zaradczych. Działaniem zaradczym może być podniesienie prędkości fluidyzacji, ale niesie to za sobą negatywne skutki, w tym wzrost zagrożenia erozyjnego oraz wzrost zużycia energii na potrzeby własne. Doktorant wskazał w końcowej części rozdziału na zasadność podjęcia badań w skali laboratoryjnej nad rozwiązaniem problemu. Badania prowadzone bezpośrednio na obiekcie rzeczywistym prowadzą do wysokiego kosztu oraz ryzyka uszkodzeń.

W rozdziale drugim zostały omówione: przytoczony na wstępie niniejszej opinii cel, zakres oraz teza pracy. Jako główny problem badawczy doktorant podał analizę wskazującą czy wyeliminowanie strumienia materiału pochodzącego z cyrkulacji wewnętrznej analizowanego kotła wpływa istotnie na efektywność wymiany ciepła oraz na końcowe parametry pary za wymiennikami Intrex. Hipoteza badawcza dotyczy możliwości wykazania czy eliminacja cyrkulacji wewnętrznej prowadzi do istotnego pogorszenia warunków pracy wymiennika, zmniejszenie zużycia energii na potrzeby własne i potencjalne umożliwienie spalania paliw alternatywnych. Wskazany w rozdziale zakres prac jest adekwatny do podanych potrzeb badawczych.

Rozdział trzeci zawiera opis fluidalnej technologii spalania ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań stosowanych w cyrkulacyjnych kotłach fluidalnych. Zestawione zostały zalety kotłów CFB: niska w stosunku do palenisk pyłowych emisja tlenków azotu, tlenków siarki oraz duża elastyczność paliwowa. Omówiona została budowa rozważanego kotła CFB-1300 ze wskazaniem podstawowych komponentów, w tym wymienników Intrex i sposobu ich zasilania. Bardziej szczegółowy opis przedmiotowego kotła oraz wymienników Intrex zamieszczony został w rozdziale czwartym rozprawy. Opisany został rozkład granulacji materiału z cyrkulacji zewnętrznej oraz wewnętrznej, z uwzględnieniem wpływu obciążenia na jego zmiany.

Rozdział piąty poświęcony został opisowi mechanizmów wymiany ciepła w warstwie fluidalnej ze wskazaniem cech charakterystycznych, udziału promieniowania, konwekcji cząsteczek, konwekcji gazowej, wpływu wielkości cząsteczek materiału złoża oraz prędkości fluidyzacji na wartość współczynnika wymiany ciepła. Opis poparty został analizą źródeł literaturowych.

W rozdziale szóstym przedstawiona została koncepcja wykorzystania stanowiska badawczego mającego posłużyć do przeprowadzenia testów wpływu zmiany obiegu cyrkulacyjnego na wymianę ciepła w wymienniku Intrex. Do badań został wykorzystany istniejący model kotła CFB-1300 w skali 1/10, pozostający w dyspozycji firmy Sumitomo w laboratorium w Sosnowcu. Model pokrywa jedną z ośmiu pętli cyrkulacyjnych kotła obejmującą komorę spalania, separator, nogę opadową, zamknięcie syfonowe, komorę Intrex oraz komorę spalania. Zapewniona została możliwość prowadzenia badań z włączoną i wyłączoną cyrkulacją wewnętrzną materiału złoża. Osobny element stanowił model wymiennika Intrex powstały do badań wymiany ciepła. Jak się wydaje, został on specjalnie dedykowany do

potrzeb prac nad rozprawą. Z treści nie wynika jasno rola Doktoranta w jego opracowaniu. Mam prośbę o podzielenie się bliższymi szczegółami. Istotną cechą tego modelu jest odwrócenie kierunku wymiany ciepła. Materiał złoża z cyrkulacji zewnętrznej odbiera tu ciepło od gorącej wody płynącej w rurkach wymiennika a następnie oddaje je do powietrza służącego do fluidyzacji w komorze spalania. Metodyka badań oparta na wykorzystaniu zasad podobieństwa hydrodynamicznego, związanym doborze materiału cyrkulującego, doborze warunków przepływu powietrza odpowiadających stanom obciążenia z zakresu 40-100% oraz pomiarach przeprowadzonych z zasilaniem komory Intrex z materiałem z cyrkulacji wewnętrznej i z jego wykluczeniem dobrze odpowiadała potrzebom wynikającym z celu pracy. W rozdziale siódmym opisany został zestaw użytych przyrządów pomiarowych, metodyka pomiarów, także określenia niepewności pomiarowej.

Model matematyczny obejmujący bilanse masy i ciepła dla obiektu przemysłowego (kocioł CFB-1300) oraz instalacji badawczej, prowadzący do wyznaczenia strumienia masy czynnika cyrkulującego z podziałem na cyrkulację zewnętrzną i wewnętrzną przedstawiony został w rozdziale ósmym rozprawy. Moim zdaniem w opisie równań (22) oraz (24) wkradły się pewne niespójności. Mam prośbę ich sprawdzenie i objaśnienia oraz ewentualne sprostowania. W przypadku równania (22) mowa jest początkowo w opisie o bilansie dla wody/pary. W zdaniu poprzedzającym równanie znalazł się w związku z tym zapis: *Bilans cieplny po stronie pary*, po czym dalej, w tekście pod równaniem c_p wskazane zostało jako ciepło właściwe wody, podobnie T_{IN} , T_{OUT} – odpowiednio temperatura wody na zasilaniu wymiennika Intrex i temperatura na wylocie kolektora odbiorczego wymiennika. Podobne niekonsekwencje widoczne są przypadku równania (24) odnoszącego się do ciepła przenoszonego przez ściany membranowe (element parownika).

Rozdział dziewiąty zawiera opis przeprowadzonych przez Doktoranta badań eksperymentalnych. Przeprowadzono je dla czterech stanów obciążenia stanowiska badawczego (40%, 60%, 80% oraz 100%), każdorazowo przy otwartej i zamkniętej cyrkulacji wewnętrznej. Wykazana została zgodność profilu ciśnienia dla kotła CFB-1300 oraz modelu we wszystkich przypadkach oraz malejący wraz ze wzrostem mocy udział cyrkulacji wewnętrznej. Testy dotyczące zmniejszenia prędkości fluidyzacji przeprowadzone zostały na kotle CFB-1300. Doktorant wykazał możliwość redukcji prędkości fluidyzacji w kotle, a w konsekwencji oszczędności w zużyciu powietrza do fluidyzacji, energii na potrzeby własne oraz zużycia węgla. Mam prośbę o poddanie analizie przez Doktoranta poprawności mianownika zależności wzoru (40) w początkowej części tego rozdziału (str. 74). Moim zdaniem w mianowniku powinna się pojawić średnia różnica temperatur w wymienniku obejmująca dwie wartości różnic ($T_{IN} - T_{MAT}$) oraz ($T_{OUT} - T_{LF}$), logarytmiczna lub arytmetyczna.

W rozdziale dziesiątym przeprowadzona została analiza wpływu zmiany obiegu materiału cyrkulującego na pracę wymiennika Intrex w kotle CFB-100 w oparciu o wykorzystanie analizy wyników badań modelowych. Dla rozważanych stanów obciążenia wykazany został, w wyniku zmiany obiegu materiału cyrkulującego, wzrost ilości ciepła przejmowanego przez wymiennik Intrex, rosnący wraz z obciążeniem kotła.

W ostatnim, jedenastym rozdziale przedstawione zostało krótkie podsumowanie rozprawy oraz syntetyczne, wynikające z przeprowadzonych prac wnioski. Jeden z nich dotyczy tytułowej kwestii związanej z możliwością wprowadzenia do współspalania w rozważanym kotle paliw alternatywnych. Jest to rezultatem eliminacji ryzyka przedostawania się do fluidalnej komory spalania cząsteczek paliwa w wyniku (proponowanej do zamknięcia)

cyrkulacji wewnętrznej. Całość podsumowania oraz pula wniosków przygotowane zostały rzeczowo i stanowią dobrze przygotowaną kwintesencję pracy.

Struktura pracy stanowi poprawnie skomponowaną sekwencję zrealizowanych zadań obejmujących wszystkie istotne dla rozwiązywanego problemu elementy. Praca ma niewątpliwy charakter aplikacyjny. Poruszono, a także w znacznej mierze rozwiązano w niej, z użyciem opracowanej przez Doktoranta metodyki, istotny problem badawczy dotyczący zmiany konfiguracji połączeń wymiennika Intrex w cyrkulacyjnym kotle fluidalnym. Cel pracy został osiągnięty, hipoteza badawcza została pozytywnie zweryfikowana. Na liście cytowań nie odnalazłem żadnej pracy sygnowanej przez Doktoranta. Jest to przypuszczalnie skutek ograniczeń wynikających z polityki pracodawcy.

W rozprawie pojawiły się również nie wspomniane powyżej usterki. Są one miejscami dość liczne, choć dotyczą w głównej mierze drobnych usterek redakcyjnych i mają zasadniczo charakter drobnych. Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Liczba zauważonych przeze mnie w trakcie lektury usterek redakcyjnych w pracy jest, jak to zostało wspomniane, miejscami dość znaczna. Sam tekst napisany został w sposób wzbudzający zainteresowanie czytelnika. Niektóre usterki wymagają komentarza objaśniającego ze strony Doktoranta. W uwagach w poprzednim rozdziale oraz poniżej zaznaczyłem kilka pytań z prośbami o wyjaśnienia.

Dominującą część usterek stanowią typowe literówki lub drobne potknięcia redakcyjne związane z brakiem zakończeń niektórych słów, głównie brakiem ich ostatnich liter. Przykłady usterek o charakterze głównie redakcyjnym przedstawiam poniżej:

- str. 13, pierwszy akapit, 14. wiersz od góry: (*różnica w wielkości emisji NO_x między CFB a PC jest pięciokrotnie niższa [5]*);
- str. 21, piąty wiersz nad rysunkiem: *komory spalania poprzez kanały powrotne*;
- str. 22, siódmy wiersz od dołu: *o niski stopniu zagrożenia* (podobnych braków ostatnich liter w wyrazach pojawia się znacznie więcej);
- str. 24, rys. 12: w opisie osi poziomej podano błędne jednostki (mm zamiast μm);
- str. 29, równanie (3) – istotna część użytych tu oznaczeń nie występuje w wykazie, równanie pochodzi z cytowanej przez doktoranta pozycji literatury, jednak przydatne byłoby wskazanie przynajmniej znaczenia symboli po lewej stronie;
- str. 66, wzór nad Tab.19 – przeciągnięty zbyt daleko znak pierwiastka;
- str. 96, pierwsze słowa w rozdziale 10.4: *Zgodnie z założeniami przyjętymi w rozdziale 14.1.4*. Rozdział o takim numerze nie został w pracy zamieszczony. Ostatni jest rozdział nr 11.

Stwierdzenie ze str. 16 rozprawy: *Wysoka skuteczność procesu odsiarczania prowadzona w komorze kotła bez potrzeby dodatkowych instalacji zewnętrznych* wskazane jako zaleta technologii CFB wymaga, moim zdaniem, pewnego doprecyzowania i dyskusji. Obowiązujące obecnie standardy emisyjne mogą powodować potrzebę głębszej redukcji emisji dwutlenku siarki za kotłem poprzez zabudowę dodatkowych instalacji odsiarczania, podobnie wygląda sprawa ewentualnej redukcji emisji NO_x. Mam prośbę do Doktoranta o przedstawienie tej kwestii nieco szerzej w trakcie obrony.

Pełną listę ze wskazaniem wszystkich zauważonych usterek przekazuję Doktorantowi do dyspozycji, celem wykorzystania przy ewentualnych dalszych publikacjach.

4. Ostateczna ocena pracy

Do najważniejszych osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji pracy należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- ustalenie wpływu zmniejszenia prędkości fluidyzacji na wymianę ciepła w wymienniku Intrex kotła CFB-1300 w oparciu o przeprowadzone badania;
- uzasadnienie możliwości pełnego zamknięcia połączenia pomiędzy komorą spalania a komorą Intrex w rozważanym kotle, ze wskazaniem na redukcję erozji oraz korzyści wynikające z ograniczenia prędkości fluidyzacji.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy. Doktorant zrealizował przedstawiony w rozdziale 2 rozprawy cel pracy. Uważam, że należy podkreślić użyteczny oraz wieloaspektowy charakter przeprowadzonych prac.

Autor rozprawy, mgr inż. Paweł Borecki, wykazał się wiedzą praktyczną i teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z treści ocenianego dokumentu.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Paweł Borecki wykazał umiejętność formułowania zadania naukowego, opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, znajomość stanu osiągnięć w obszarach wiedzy związanych z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąc przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Boreckiego pt.: *„Modyfikacja obiegu materiału cyrkulującego w wymiennikach Intrex w celu poprawy warunków pracy i umożliwienia współspalania paliw alternatywnych”* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki a także w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Podpisał Krzysztof Badyda