

Kraków, 25.11.2025

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Energetyki i Paliw  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
[wnowak@agh.edu.pl](mailto:wnowak@agh.edu.pl)

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Paweł Borecki**

**„MODYFIKACJA OBIEGU MATERIAŁU CYRKULUJĄCEGO W  
WYMIENNIKACH INTREX W CELU POPRAWY WARUNKÓW PRACY  
I UMOŻLIWIENIA WSPÓLSPALANIA PALIW ALTERNATYWNYCH”**

## **Wstęp**

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej z 23.10.2025 (pismo RIE-BD.512.44.2025).

## **Zasadność tematyki**

Wybór tematyki rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Boreckiego, skupiającej się na modyfikacji obiegu materiału cyrkulującego w zewnętrznych wymiennikach ciepła (zwanymi INTREX) jest w pełni uzasadniony, opierając się na przeglądzie literatury dotyczącej

mechanizmu fluidalnej wymiany ciepła. W dolnej części kanału nawrotnego, praktycznie na wejściu do komory paleniskowej kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (CFB), po lewej i prawej stronie paleniska zlokalizowany jest wymiennik ciepła typu INTREX, pełniący rolę przegrzewaczy pary. Przegrzewacz składa się z połączonych równolegle wiązek rur. Schładzacz typu wtryskowego regulują temperaturę pary. Są one umieszczone w rurociągach łączących pomiędzy przegrzewaczami. Woda zasilająca jest użyta jako czynnik wtryskowy. Ponadto można zastosować unikalne sterowanie powietrzem fluidyzującym wymianą ciepła w komorze INTREX do wyrównywania temperatury pary głównej.

Wymiennik typu INTREX szczególnie przydatny jest w kotłach CFB spalających paliwa o dużej zawartości chloru. Dla takich paliw tradycyjne przegrzewacze narażone są na korozję wysokotemperaturową spowodowaną obecnością związków alkaicznych w spalinach. W przegrzewaczu INTREX spaliny nie kontaktują się z powierzchniami rur. Istnieje kilka alternatywnych rozwiązań lokalizacji wymiennika. Może on całkowicie lub częściowo zastąpić przegrzewacze umieszczone wewnątrz komory paleniskowej lub przejąć część ciepła od parowników. Wymiennik INTREX może być również wykorzystany do kontroli zarówno temperatury w komorze paleniskowej jak i temperatury pary przegrzanej, a w niektórych przypadkach zastąpić wtrysk wody do regulacji temperatury pary. Należy w tym miejscu podkreślić, że w kotłach na parametry nadkrytyczne głównym czynnikiem ograniczającym wzrost parametrów pary jest ściana komory paleniskowej. Jedną z dróg obniżenia średniej temperatury ścianki jest minimalizacja wtrysku w układ przegrzewacza celem podniesienia przepływu w ścianach komory. Na przykład, zmniejszenie przepływu masowego z 7% do około 3% prowadzi do wzrostu przepływu w ścianach komory i obniżenia temperatury ścianki o około 10 K. Wymiennik INTREX z inteligentną regulacją parametrów pary (wtrysk i/lub zmiana przepływu powietrza fluidyzującego) zapewnia takie możliwości.

Wymiennik INTREX może pracować w zakresie prędkości odpowiadających filtracji powietrza poprzez prędkość krytyczną fluidyzacji do stanu fluidyzacji rozwiniętej. Warstwa materiału sypkiego może również być w stanie nieruchomym. Współczynnik wymiany ciepła zmienia się w szerokim zakresie od stanu nieruchomej warstwy do fluidyzacji rozwiniętej co daje olbrzymie możliwości regulacyjne układu. Możliwości takie są znacznie ograniczone w typowych wymiennikach fluidalnych, gdzie strumień ciepła odebranego od gorących ziaren regulowany jest poprzez wynurzenie bądź zanurzenie powierzchni grzewczych.

Można wymienić następujące zalety wymiennika INTREX:

- efektywny wymiennik ciepła pracujący przy dużych wartościach współczynnika wymiany ciepła,
- minimalizacja wtrysku w układ przegrzewacza,
- szeroki zakres regulacji strumienia ciepła odebranego od gorących ziaren,
- rozwiązuje problem korozji chlorowej w wysokich temperaturach,
- znikoma erozja powierzchni grzewczych zanurzonych w warstwie,
- możliwość zastosowania jako powierzchnie grzewcze przegrzewaczy, przegrzewaczy wtórnych, parownika,
- zastosowania specjalne: duże jednostki z warstwą atmosferyczną i ciśnieniową.

Podsumowując:

*Tematyka pracy doktorskiej bezpośrednio odnosi się do nowych trendów poszukiwania i wdrażania takich rozwiązań, które umożliwiają zwiększenie efektywności zewnętrznych wymienników ciepła w kotłach fluidalnych. Naukowy problem został prawidłowo zdefiniowany i rozwinięty za pomocą zaprezentowanych tez pracy. Zarówno cel, jak i zakres badania adekwatnie wynikają z wykonanej analizy literatury naukowej oraz problemu zdefiniowanego przez Doktoranta.*

## **Układ pracy**

Układ recenzowanej pracy rozprawy doktorskiej obejmuje logiczny ciąg rozdziałów od opisu problemu badawczego i kontekstu przemysłowego, poprzez część teoretyczną i analityczną, aż do badań eksperymentalnych i wniosków praktycznych.

W rozdziale pierwszym przedstawiono wstęp, który określa współczesne uwarunkowania rozwoju energetyki zawodowej w kontekście transformacji niskoemisyjnej i konieczności ograniczania emisji dwutlenku węgla. Autor omawia przyczyny modernizacji istniejących jednostek węglowych oraz potrzebę wprowadzenia do miks paliwowego

biomasy i paliw alternatywnych, takich jak RDF, SRF czy odpady drzewne. Rozdział ten stanowi wprowadzenie do problematyki technicznej związanej z eksploatacją kotłów fluidalnych CFB, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska zasypywania wymienników INTREX materiałem złoża, wzrostu zużycia powietrza fluidyzacyjnego oraz trudności w utrzymaniu stabilnych parametrów przegrzewu pary przy częściowych obciążeniach kotła. Autor wskazuje też ograniczenia wynikające z bezpośredniego połączenia komory spalania z komorami wymienników oraz ryzyko przenikania ziaren paliwa i chloru do stref przegrzewu, co może prowadzić do korozji wysokotemperaturowej.

Rozdział drugi określa zakres, cel i tezę pracy. Celem badań jest ocena wpływu modyfikacji obiegu materiału cyrkulującego w wymiennikach INTREX na efektywność wymiany ciepła i możliwość utrzymania projektowych parametrów pary w kotle CFB. Autor formułuje hipotezę badawczą, zgodnie z którą eliminacja wewnętrznej cyrkulacji materiału z komory spalania i zasilanie wymienników wyłącznie materiałem pochodzącym z cyrkulacji zewnętrznej nie powoduje pogorszenia parametrów przegrzewu pary, a jednocześnie pozwala na obniżenie zapotrzebowania na energię na potrzeby własne oraz poprawę warunków pracy wymiennika. W rozdziale przedstawiono również zakres badań obejmujący analizę teoretyczną, modelowanie matematyczne, badania laboratoryjne i przemysłowe.

Rozdział trzeci zawiera opis technologii fluidalnej spalania paliw w kotłach CFB, stanowiący podstawę teoretyczną dalszych analiz. Przedstawiono w nim zasadę działania cyrkulacyjnego złoża fluidalnego, omówiono reżimy fluidyzacji oraz charakter przepływu materiału złoża wzdłuż wysokości komory spalania. Autor opisuje proces spalania, odsiarczania i cyrkulacji materiału w układzie separator, zamknięcie syfonowe, komora INTREX oraz wskazuje zalety technologii CFB, takie jak wysoka sprawność spalania, elastyczność paliwowa, niska emisja NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub> oraz możliwość szybkiego dostosowania mocy jednostki do potrzeb systemu elektroenergetycznego.

Czwarty rozdział poświęcono opisowi obiektu badawczego kotła CFB-1300 w Elektrowni Łagisza. Autor szczegółowo przedstawia jego parametry techniczne, w tym moc, temperatury i ciśnienia pary, wymiary komory spalania oraz układ wodno-parowy. W dalszej części scharakteryzowano budowę i zasadę działania wymienników INTREX, zarówno typu dolnego, jak i górnego, stosowanych w tej jednostce. Opisano środowisko pracy wymiennika, typowe wartości prędkości fluidyzacji, rozkład temperatur materiału cyrkulującego oraz jego skład ziarnowy. Ten rozdział stanowi odniesienie do rzeczywistych warunków przemysłowych, które posłużyły do opracowania modeli i badań eksperymentalnych.

W rozdziale piątym Autor omawia mechanizm wymiany ciepła w warstwach fluidalnych i przedstawia analizę poszczególnych składowych wymiany ciepła: konwekcji cząstek, konwekcji gazu i promieniowania. Opisano znaczenie poszczególnych mechanizmów w zależności od temperatury, gęstości złoża i wielkości cząstek. Przytoczono równania opisujące wymianę ciepła w warstwie fluidalnej oraz omówiono wyniki badań literaturowych i eksperymentalnych. W dalszej części rozdziału Autor analizuje wpływ średnicy cząstek materiału warstwy oraz prędkości fluidyzacji na wartość całkowitego współczynnika wymiany ciepła, przedstawiając zależności oparte na danych z literatury i własnych obliczeniach.

Szósty rozdział opisuje stanowisko badawcze. Autor przedstawia koncepcję i budowę fizycznego modelu kotła CFB oraz wymiennika INTREX pracującego w warunkach „zimnych”. Opisuje sposób skalowania warunków przepływowych w modelu, konstrukcję komory fluidalnej, rozmieszczenie rur wymiennika, system doprowadzania materiału i powietrza fluidyzacyjnego. Szczegółowo omówiono układ pomiarowy, rozmieszczenie czujników, system akwizycji danych oraz metodę określania strumienia masy materiału w cyrkulacji zewnętrznej. Wskazano także modyfikacje obiegu materiału umożliwiające przeprowadzenie badań porównawczych dwóch konfiguracji zasilania wymiennika.

W rozdziale siódmym zaprezentowano charakterystykę aparatury pomiarowej. Autor omawia zastosowane czujniki temperatury, przepływu, ciśnienia i masy, przedstawia ich zasady działania, zakresy pomiarowe oraz miejsca instalacji. Opisano również procedurę kalibracji i sposób oceny niepewności pomiarów, co pozwala na późniejszą ocenę dokładności wyników badań.

Rozdział ósmy poświęcony jest modelowi matematycznemu opisującemu proces wymiany ciepła w wymienniku INTREX. Autor przedstawia modele dla obiektu przemysłowego i stanowiska badawczego, formułując równania bilansu energii i masy. Uwzględnia czynniki wpływające na współczynnik wymiany ciepła, takie jak strumień masy materiału, gęstość warstwy fluidalnej, prędkość fluidyzacji i parametry cieplne materiału. Model ten stanowi podstawę do predykcji pracy wymiennika w zmienionych warunkach zasilania materiałem cyrkulującym.

W dziewiątym rozdziale przedstawiono badania eksperymentalne przeprowadzone zarówno na modelu laboratoryjnym, jak i na obiekcie przemysłowym. W części laboratoryjnej Autor analizuje zmianę przepływu materiału cyrkulującego przy różnych obciążeniach kotła

(od 40 do 100% mocy maksymalnej) oraz wpływ prędkości fluidyzacji na wymianę ciepła. Następnie opisuje badania przemysłowe dotyczące ograniczenia zużycia powietrza sprężonego i możliwości utrzymania stabilnych parametrów pary przy obniżonej prędkości fluidyzacji. Wyniki tych badań pozwalają na ocenę wpływu modyfikacji obiegu materiału na sprawność cieplną układu i potencjalne oszczędności eksploatacyjne.

Rozdział dziesiąty stanowi predykcję wpływu modyfikacji obiegu materiału cyrkulującego na pracę wymiennika INTREX w kotle CFB-1300. Autor zestawia wyniki obliczeń i eksperymentów analizując efektywność wymiany ciepła oraz zmiany temperatury pary w funkcji obciążenia kotła. Dokonuje porównania konfiguracji referencyjnej (z cyrkulacją wewnętrzną i zewnętrzną) z układem po modyfikacji (tylko cyrkulacja zewnętrzna). Ocenia wpływ tej zmiany na warunki pracy wymiennika, stabilność przepływu i możliwość zastosowania paliw alternatywnych.

Ostatni, jedenasty rozdział zawiera podsumowanie i wnioski. Autor syntetyzuje uzyskane wyniki, potwierdza tezę pracy i formułuje wnioski praktyczne dotyczące możliwości zastosowania modyfikacji w rzeczywistych jednostkach przemysłowych. Wskazuje na poprawę stabilności pracy wymiennika, redukcję zużycia powietrza fluidyzacyjnego i potencjalne obniżenie kosztów eksploatacyjnych. Podkreśla również znaczenie zaproponowanego rozwiązania dla przyszłości technologii CFB, zwłaszcza w kontekście współspalania paliw alternatywnych oraz adaptacji do wymogów gospodarki niskoemisyjnej.

## **Elementy nowości naukowej i praktycznej rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Boreckiego wnosi istotne elementy nowości zarówno w zakresie badań naukowych dotyczących procesów wymiany ciepła w złożach fluidalnych, jak i w wymiarze praktycznym, związanym z eksploatacją kotłów CFB wyposażonych w wymienniki INTREX.

Z punktu widzenia nowości naukowej, praca stanowi istotny wkład w badania nad charakterystyką wymiany ciepła w zewnętrznych wymiennikach ciepła typu INTREX, w których zastosowano zmodyfikowany układ zasilania materiałem cyrkulującym. Autor jako pierwszy przeprowadził kompleksową analizę wpływu eliminacji wewnętrznej cyrkulacji materiału pochodzącego bezpośrednio z komory spalania na proces wymiany ciepła w

komorze INTREX. Dotychczasowe badania literaturowe koncentrowały się głównie na zjawiskach związanych z prędkością fluidyzacji, wielkością cząstek i geometrią wymiennika, natomiast brakowało opracowań analizujących wpływ zmian konfiguracji obiegu materiału cyrkulującego. W pracy opracowano i zweryfikowano model matematyczny opisujący zjawiska wymiany ciepła w wymienniku INTREX przy różnych wariantach zasilania oraz dokonano skalowania warunków przepływowych pomiędzy obiektem rzeczywistym a stanowiskiem laboratoryjnym. Model ten umożliwia prognozowanie efektywności wymiany ciepła w warunkach zmienionej cyrkulacji, a więc rozszerza dotychczasowy stan wiedzy o fluidalnych wymiennikach ciepła w systemach CFB.

Nowatorskim elementem jest także opracowanie fizycznego modelu wymiennika INTREX w skali laboratoryjnej, pozwalającego na prowadzenie badań w warunkach kontrolowanych z wykorzystaniem niskotemperaturowej fluidyzacji i rzeczywistych cząstek złoża. Stanowisko to umożliwiło ilościową ocenę wpływu zmian strumienia materiału oraz prędkości fluidyzacji na współczynnik wymiany ciepła, co dotąd nie było badane dla wymienników o takiej geometrii i konfiguracji przepływu. W efekcie uzyskano dane eksperymentalne, które mogą służyć do kalibracji modeli numerycznych i analitycznych stosowanych w projektowaniu nowoczesnych układów CFB.

Z punktu widzenia nowości praktycznej, praca wprowadza innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne polegające na modyfikacji obiegu materiału cyrkulującego w wymiennikach INTREX poprzez odłączenie połączenia z komorą spalania i pozostawienie zasilania wyłącznie z cyrkulacji zewnętrznej. Takie rozwiązanie eliminuje ryzyko przedostawania się cząstek paliwa i popiołów z dużą zawartością chloru do wnętrza wymienników, co znacząco zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia korozji wysokotemperaturowej na powierzchniach przegrzewaczy końcowych. Jednocześnie pozwala na redukcję prędkości fluidyzacji w komorach INTREX, co prowadzi do zmniejszenia zużycia powietrza sprężonego, a tym samym ograniczenia potrzeb własnych kotła CFB.

W wymiarze eksploatacyjnym i przemysłowym opracowana koncepcja stanowi rozwiązanie umożliwiające dostosowanie kotłów CFB do współspalania paliw alternatywnych, w tym paliw o podwyższonej zawartości chloru i alkaliów (RDF, SRF, biomasa). Dzięki modyfikacji obiegu materiału cyrkulującego wymienniki INTREX zostają odizolowane od strefy spalania, co zwiększa trwałość powierzchni przegrzewu i umożliwia bezpieczne prowadzenie procesu przy zmiennym składzie paliwa.

Wyniki badań przemysłowych potwierdzają, że wprowadzenie proponowanej modyfikacji pozwala na utrzymanie parametrów przegrzewu pary na poziomie projektowym przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia powietrza fluidyzacyjnego o kilkanaście procent. Uzyskane efekty wskazują, że rozwiązanie to ma znaczący potencjał wdrożeniowy w jednostkach CFB dużej mocy i może być stosowane jako narzędzie optymalizacji pracy wymienników INTREX w istniejących kotłach.

Podsumowując, nowość naukowa rozprawy polega na opracowaniu i weryfikacji koncepcji modyfikacji obiegu materiału cyrkulującego w wymiennikach INTREX wraz z modelem matematycznym i fizycznym stanowiskiem badawczym, natomiast nowość praktyczna dotyczy wprowadzenia rozwiązania technicznego umożliwiającego poprawę efektywności energetycznej, obniżenie kosztów eksploatacyjnych oraz rozszerzenie zakresu paliw dopuszczalnych do spalania w technologii CFB.

## **Poziom warsztatowy**

Rozprawa doktorska, którą oceniam, stanowi rezultat starannie zaplanowanych i rzetelnie przeprowadzonych badań obejmujących zarówno eksperymenty laboratoryjne, jak i analizy oparte na modelach matematycznych odnoszących się do pracy wymienników typu INTREX w kotle CFB-1300. Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem do realizacji badań, umiejętnie łącząc wiedzę teoretyczną z praktycznym doświadczeniem wyniesionym z pracy z rzeczywistym układem fluidalnym. Osiągnięte wyniki świadczą o wysokim stopniu samodzielności badawczej oraz o dobrej znajomości zagadnień związanych z wymianą ciepła w warstwie fluidalnej, cyrkulacją materiału w obiegu kotła oraz specyfiką pracy wymienników INTREX.

Na podkreślenie zasługuje umiejętne posługiwanie się metodami pomiarowymi i analitycznymi oraz dojrzała interpretacja uzyskanych danych. Dobór tematu jest trafny i w pełni osadzony w aktualnych wyzwaniach eksploatacji kotłów CFB, a literatura wykorzystana w pracy jest właściwie dobrana i rzetelnie omówiona. Rozprawa cechuje się logiczną, przejrzystą strukturą i konsekwentnym stosowaniem terminologii technicznej oraz symboliki, co ułatwia śledzenie toku wyводу.

W maszynopisie zaznaczyłem jedynie drobne uwagi redakcyjne, głównie o charakterze językowym oraz terminologicznym. Mają one charakter marginalny i nie



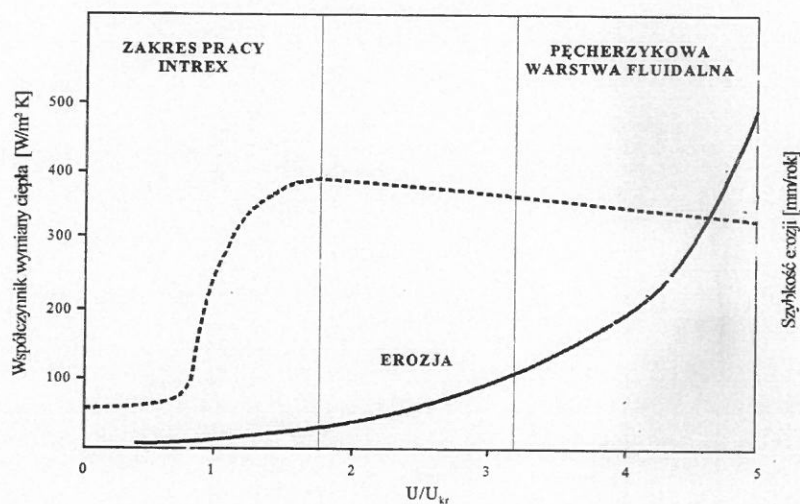
wpływają na wartość merytoryczną rozprawy, a zastosowane przez Autora sformułowania oceniam jako poprawne i adekwatne do analizowanych zagadnień. Materiał ilustracyjny dobrano właściwie, a rysunki, schematy i wykresy są czytelne, merytoryczne i wspierają prezentację wyników badań.

## **Uwagi krytyczne**

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

1. Wymiennik typu INTREX może pracować w bardzo szerokim zakresie prędkości przepływu powietrza od warunków odpowiadających filtracji i prędkości minimalnej fluidyzacji, aż po stan fluidyzacji w pełni rozwiniętej. W zależności od intensywności fluidyzacji warstwa materiału sypkiego może pozostawać niemal nieruchoma lub przyjmować charakter w pełni fluidalny. Jak pokazano na rysunku 1, współczynnik wymiany ciepła w takim układzie zmienia się znacząco pomiędzy tymi stanami, co daje duże możliwości regulacji pracy wymiennika. Umieszczenie ostatnich stopni przegrzewaczy zarówno pary pierwotnej, jak i wtórnej w wymiennikach typu INTREX umożliwia sterowanie strumieniem przejmowanego ciepła w bardzo szerokim zakresie poprzez odpowiednią zmianę współczynnika wnikania ciepła po stronie czynnika grzewczego. W przypadku przegrzewacza międzystopniowego takie rozwiązanie pozwala ograniczyć lub nawet całkowicie uniknąć konieczności regulacji wtryskowej przy zmiennych obciążeniach kotła.

Z tego względu zagadnienie to ma kluczowe znaczenie dla możliwości regulacyjnych i stabilności pracy układu. Pominięcie go w analizie stanowi istotne ograniczenie, ponieważ moim zdaniem właśnie ten aspekt powinien być centralnym elementem tezy rozprawy, określającym naukową i praktyczną wartość proponowanych rozwiązań.

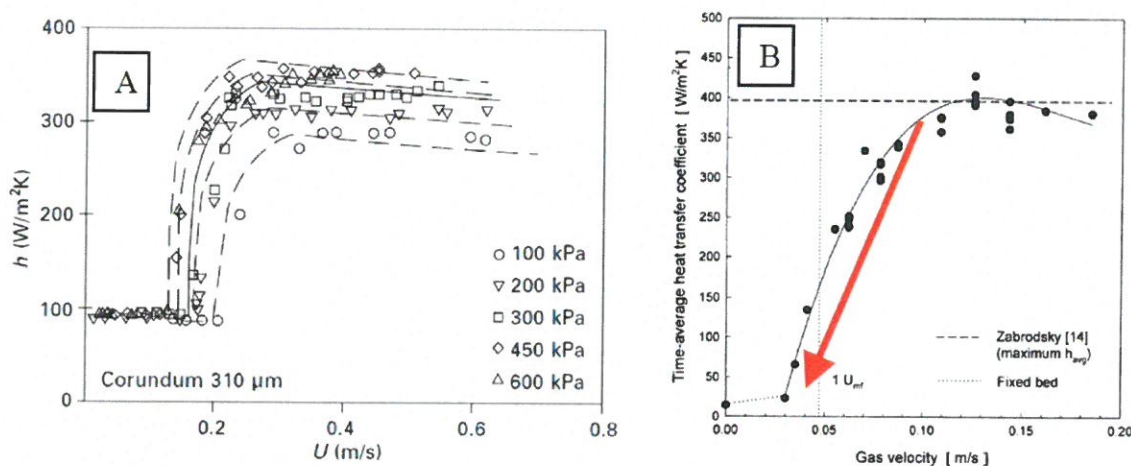


Rys. 1. Wymiana ciepła i erozja w wymienniku INTREX (materiał własny w ekspertyzy dla PKE, luty 2003).

2. Dlaczego Autor zdecydował się na wybór prędkości fluidyzacji na poziomie 0,3 m/s i 0,56 m/s? W literaturze [46], w której prowadzono badania na tym samym typie wymiennika INTREX, maksymalna analizowana prędkość fluidyzacji wynosiła 0,23 m/s, czyli była zbliżona do wartości projektowej. Zakres badanych prędkości mieścił się w przedziale od 0,14 do 0,23 m/s (por. Rys. 9 i Tabela 4 w [46]). Autorzy tej publikacji wskazują, że wymiennik INTREX pracuje w reżimie fluidyzacji pęcherzykowej, choć w rzeczywistości charakter przepływu jest raczej zbliżony do filtracji, bliskiej prędkości krytycznej fluidyzacji (patrz Rys. 3 w tej pracy). Takie warunki są uzasadnione, ponieważ wówczas układ pracuje w zakresie stromego wzrostu współczynnika wymiany ciepła czyli od wartości minimalnych do maksymalnych, co zostało również potwierdzone przez Autora niniejszej rozprawy na Rys. 26.
3. A teraz spójrzmy na wyniki pomiarów współczynnika wymiany ciepła przedstawione w Tabeli 20, które wymagają szerszego komentarza przez Autora. W całym

analizowanym zakresie obciążeń od 40% do 100% MCR wartości współczynnika mieszczą się między 344,4 W/m<sup>2</sup>K a 403,7 W/m<sup>2</sup>K, i to niezależnie od analizowanego wariantu zasilania wymiennika. Takie poziomy są zgodne z danymi raportowanymi w pracy [46], co potwierdza spójność wyników.

4. Jeśli odwołać się do Rys. 19 z rozprawy, widać wyraźnie, że uzyskane wartości współczynnika wymiany ciepła znajdują się blisko maksimum, jakie można osiągnąć dla zastosowanych prędkości fluidyzacji. Ten sam wykres pokazuje również, że wymiennik INTREX dysponuje szerokim zakresem możliwości regulacyjnych. Wynika to z faktu, że zmiana prędkości fluidyzacji pozwala znacząco wpływać na intensywność wymiany ciepła, czego graficznym potwierdzeniem jest stromo wznoszący się fragment krzywej.



Rys. 19. Wpływ prędkości fluidyzacji na współczynnik wymiany ciepła. A - [32], B - [33].

5. Proszę o komentarz do Tabeli 35 i Rys. 57. Wyliczony z bilansu współczynnik wymiany ciepła na obiekcie rzeczywistym wynosił 144 W/m<sup>2</sup>K dla 0.56 m/s do wartości maksymalnej 217 W/m<sup>2</sup>K przy 0.3 m/s, a więc znacznie poniżej od tych zmierzonych na stanowisku modelowym. Co więcej ten sam współczynnik na tym samym obiekcie pokazany w pracy [46, Rys. 7] mieścił się w zakresie 350 W/m<sup>2</sup>K do 400 W/m<sup>2</sup>K. Skąd więc takie różnice ?
6. Uwaga do wniosku 3 „Badania przeprowadzone na obiekcie przemysłowym CFB-1300 Łagisza mające na celu ustalenie wpływu zmiany prędkości fluidyzacji na proces wymiany ciepła w wymienniku Intrex, potwierdziły dane literaturowe – wraz ze

zmniejszeniem prędkości fluidyzacji wzrasta współczynnik wymiany ciepła (w danym zakresie prędkości fluidyzacji)". W procesie fluidyzacji zazwyczaj obserwuje się odwrotną zależność, czyli wraz ze wzrostem prędkości fluidyzacji (powyżej prędkości minimalnej) rośnie intensywność ruchu cząstek, mieszanie i turbulencja w złożu, co prowadzi do zwiększenia współczynnika wymiany ciepła między warstwą fluidalną, a powierzchnią wymiany ciepła. Jednak w pobliżu prędkości minimalnej fluidyzacji ( $U_{mf}$ ) sytuacja może być bardziej subtelna. W zakresie tuż powyżej  $U_{mf}$  współczynnik wymiany ciepła wzrasta gwałtownie, bo następuje przejście od przewodzenia (warstwa stacjonarna) do konwekcji (warstwa ruchoma). Po osiągnięciu pewnej prędkości w zależności od charakteru warstwy i gazu dalsze zwiększanie prędkości może już nie przynosić dużego wzrostu, a nawet prowadzić do pewnego spadku, jeśli warstwa fluidalna staje się zbyt rozrzedzona (pneumatyczne unoszenie cząstek). Ta uwaga wymaga komentarza.

7. Wniosek 6 jest nieuzasadniony bowiem Autor nie prowadził badań zużycia erozyjnego powierzchni wymiany ciepła w wymienniku INTREX.
8. I zasadnicze pytanie odnośnie mechanizmu wymiany ciepła w wymienniku INTREX. Autor posługuje się klasycznym mechanizmem z wymiany ciepła w pęcherzykowej warstwie fluidalnej. Tymczasem nie podejmuje się wnikliwej analizy różnicy między klasyczną fluidyzacją, a tzw. *loosely fluidized* lub *downward moving fluidized bed*, charakterystyczną dla zewnętrznych wymienników ciepła, czyli INTREX. W takim wymienniku materiał stały (głównie popiół i piasek, czasem częściowo nieprzereagowane paliwo) napływa grawitacyjnie od góry, tworząc powoli opadającą warstwę. Warstwa jest tylko lekko fluidyzowana niewielkim strumieniem powietrza, które nie ma funkcji spalania, lecz jedynie utrzymuje ruch cząstek i równomierne rozprowadzenie temperatury. Cząstki mają długi czas kontaktu z powierzchnią wymiany ciepła (rurkami ścian wymiennika), nie tworzą się duże pęcherze gazu ani kanały gazowe, więc kontakt między fazą stałą, a ścianką jest bardzo stabilny. W efekcie, mimo że prędkość fluidyzacji jest niska (często tylko nieco powyżej  $U_{mf}$ ), współczynnik wymiany ciepła jest wysoki właśnie dlatego, że udział kontaktu cząstek z powierzchnią jest duży, strumień masy cząstek jest wysoki (ciągły dopływ materiału z głównego cyklu CFB), temperatura jest wyrównana dzięki mieszaniu drobnym strumieniem powietrza. Współczynnik wymiany ciepła w takim zewnętrznym wymienniku (czyli w INTREX) może osiągać 300-400 W/m<sup>2</sup>K, podczas gdy

wewnątrz głównego reaktora CFB, w reżimie pęcherzowym lub turbulentnym, typowo notuje się 100–250 W/m<sup>2</sup>K. Innymi słowy w INTREX niska prędkość fluidyzacji nie obniża, lecz stabilizuje wymianę ciepła, bo proces opiera się nie na intensywnej turbulencji, tylko na dużej gęstości i kontakcie cząstek ze ścianką.

Proszę Autora o komentarz.

## **Wnioski końcowe**

Reasumując, można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Boreckiego „MODYFIKACJA OBIEGU MATERIAŁU CYRKULUJĄCEGO W WYMIENNIKACH INTREX W CELU POPRAWY WARUNKÓW PRACY I UMOŻLIWIENIA WSPÓLSPALANIA PALIW ALTERNATYWNYCH” wiąże się bezpośrednio z koniecznością wprowadzenia nowego podejścia i rozwiązań w zewnętrznych wymiennikach ciepła kotłów CFB.

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

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy zaliczam:

- aktualność i znaczenie tematyki związanej z modernizacją kotłów fluidalnych CFB w kontekście transformacji energetycznej oraz potrzeby przystosowania ich do współspalania paliw alternatywnych i biomasy,
- oryginalność podejścia badawczego, polegającą na analizie wpływu eliminacji wewnętrznej cyrkulacji materiału z komory spalania na pracę wymienników INTREX, zagadnienia dotychczas nieuwzględnianego w literaturze naukowej i praktyce projektowej,
- zastosowanie zarówno metod eksperymentalnych, jak i analitycznych, obejmujących opracowanie modelu matematycznego oraz wykonanie badań laboratoryjnych i przemysłowych, co nadaje pracy kompleksowy i wielowymiarowy charakter,
- opracowanie i wykonanie fizycznego modelu wymiennika INTREX, pozwalającego na badania w skali laboratoryjnej z zachowaniem podobieństwa przepływowego i cieplnego,
- wysoki poziom merytoryczny analiz i logiczne powiązanie części teoretycznej z praktyczną, umożliwiające weryfikację hipotez w oparciu o dane rzeczywiste,

- umiejętne połączenie aspektów naukowych z praktyką przemysłową, co czyni pracę wartościową nie tylko dla środowiska akademickiego, ale także dla inżynierów eksploatujących kotły CFB,
- wyraźny walor wdrożeniowy pozwalający na możliwość bezpośredniego zastosowania wyników badań w jednostkach energetycznych w celu poprawy efektywności wymiany ciepła i ograniczenia zapotrzebowania energetycznego na potrzeby własne,
- przejrzystą i dobrze udokumentowaną strukturę pracy, bogato ilustrowaną wynikami pomiarów, wykresami i schematami technologicznymi.

Reasumując, stwierdzam że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym. Wobec powyższego *wniosuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej dopuściła mgr inż. Pawła Boreckiego do dalszego etapu postępowania doktorskiego.*

Podpisał Wojciech Nowak