

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Natalii Pawelec
pt. „Analiza wpływu rodzaju spalanego paliwa w kotle ze złożem fluidalnym na parametry
pracy filtra workowego”

1. Podstawa prawna opracowania

Recenzję opracowano w oparciu o pismo RIE-BD.512.48.2024 prof. dr hab. Krzysztofa Labusa Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z 27 listopada 2024 r.

2. Informacje ogólne

Praca doktorska została wykonana na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej pod opieką promotora prof. dr hab. inż. Janusza Kotowicza oraz promotora pomocniczego dr inż. Marka Andrzejczyka.

Pracę przedstawiono na 258 stronach. Podzielono ją na 12 głównych rozdziałów, które poprzedza spis treści oraz spis najważniejszych oznaczeń, a kończą 3 załączniki, spis tabel i rysunków, literatura oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Praca zawiera 162 rysunki, 21 tabel oraz 118 pozycji bibliograficznych.

3. Omówienie treści pracy

Pracę rozpoczyna spis treści oraz bardzo rozbudowany spis oznaczeń i symboli. W rozdziale 1 Doktorantka sformułowała następujący cel pracy *dogłębna analiza procesów zachodzących podczas adsorpcji kwasowych zanieczyszczeń przez sorbent wapniowy oraz ocena parametrów pracy filtra workowego*, przedstawiła zakres pracy oraz uzasadniła podjętą tematykę. W dalszej części tego rozdziału dokonała przeglądu stanu wiedzy dotyczącego limitów emisji zanieczyszczeń z procesów przemysłowych wynikających z obowiązujących norm, dyrektyw oraz konkluzji BAT. Skupiła się na emisjach z kotłów fluidalnych ze złożem cyrkulacyjnym, sposobach ich ograniczania, w szczególności obniżania emisji SO₂, SO₃, HCl i HF. Omówiła również metody podawania i typy stosowanych sorbentów oraz zwróciła szczególną uwagę na dotychczasowy brak w literaturze wyników wzajemnej korelacji pomiędzy stopniem usuwania SO₂ i HCl ze spalin na skutek reakcji z wapnem hydratyzowanym. Opisała również sposób wyznaczania ilości podawanego sorbentu, w tym za pomocą modelowania kinetyki reakcji. W dalszej części tego rozdziału skupiła się na wykorzystaniu filtrów workowych do usuwania emisji zanieczyszczeń. Opisała wykorzystywane materiały na filtry workowe, proces filtracji oraz wpływ parametrów gazu i cech cząstek na ten proces.

Rozdział 2 to zakres, cel i tezy pracy. W tym rozdziale Doktorantka nie zamieściła jednak zarówno celu, jak i zakresu pracy – są w rozdziale 1, przedstawiła natomiast przyjętą tezę,

która brzmi *Istnieje wzajemna korelacja pomiędzy maksymalną wartością redukcji obu gazów, HCl i SO₂, dla danego strumienia dozowanego sorbentu. Oznacza to, że wiedząc o jaką wartość jedno zanieczyszczenie zostało zredukowane z gazów procesowych, można na tej podstawie przewidzieć redukcję drugiego zanieczyszczenia.* Pozostała część tego rozdziału to opis wykonanych prac, stąd uważam, że rozdział powinien mieć inny tytuł np. *Teza i opis wykonanych prac.*

W rozdziale 3 Doktorantka opisała cztery obiekty oznaczone od A do D, na których zostały wykonane badania sprawdzające parametry pracy oraz weryfikujące efektywność instalacji oczyszczania spalin. Były to kotły z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym o mocy chemicznej dostarczanej w paliwie odpowiednio ok. 210 MW (A), 1022 MW (B), 310 MW (C) oraz dwa kotły 350 MW (D). Do każdego obiektu wskazała miejsce i sposób dozowania sorbentu, opisała wykorzystaną instalację i wskazała lokalizację lanc dozujących sorbent. W rozdziale zamiast rysunku 4 można było wykorzystać schemat instalacji mobilnej, na podstawie którego można lepiej opisać zasadę jej działania. Podobnie z miejscem montażu lanc dozujących sorbent, które również można wskazać na ogólnym schemacie instalacji przepływu spalin – podobnie jak na rysunku 11.

Rozdział 4 dysertacji, to *Metodyka pomiarowa*, który zawiera opis zastosowanych urządzeń pomiarowych i ich lokalizację na badanych instalacjach. Autorka zacytowała normy, według których prowadziła pomiary oraz normy, według których przeprowadziła analizy laboratoryjne próbek materiałów pozyskanych w trakcie badań. Opis metod pomiarowych wykonała dla każdego badanego obiektu. Uważam jednak, że jako początek tego rozdziału można było przedstawić uniwersalny program badań dla wszystkich obiektów w formie opisowej lub schematu blokowego, a dla poszczególnych obiektów opisać jedynie wykorzystaną do pomiarów aparaturę.

W rozdziale 5 Doktorantka przedstawiła wyniki badań na opisanych w rozdziale 3 obiektach. Testy prowadziła dozując sorbent do kanałów spalin w zależności od jego powierzchni właściwej oraz miejsca zabudowy instalacji jego dozowania. Mierzyła emisję zanieczyszczeń na wylocie z instalacji. Wyniki badań opracowała w postaci charakterystyk czasowych emisji SO₂, HCl oraz strumienia podawanego sorbentu. Przeprowadziła analizę otrzymanych charakterystyk. Drobnym mankamentem tego rozdziału są niejednolicie opracowane podziałki osi czasu, raz jest on podawany w konkretnych godzinach, a raz w minutach trwania testu, gdzie czas równy 0 oznacza rozpoczęcie pomiarów.

Na podstawie otrzymanych i opisanych w rozdziale 5 wyników badań Autorka wyciągnęła wnioski, które przedstawiła w rozdziale 6. Najważniejszym z nich jest zaobserwowanie silnej zależności pomiędzy redukcją emisji HCl oraz SO₂, co dowodziło, że założona w rozdziale 2 teza pracy jest słuszna. Zauważyła, że im więcej molekuł HCl reaguje z cząsteczkami sorbentu, tym większa jest redukcja SO₂, co jest niezależne od strumieni HCl i SO₂ w spalinach. Stąd można stwierdzić, że znając stopień usunięcia jednego zanieczyszczenia możemy określić stopień redukcji drugiego. Zaobserwowane korelacje Doktorantka przedstawiła w postaci wykresów $SO_{2\text{redukcja}} = f(HCl_{\text{redukcja}})$. W rozdziale tym przeprowadziła analizę zależności pomiędzy nadmiarem stechiometrycznym sorbentu a stopniem redukcji zanieczyszczeń kwasowych oraz analizę wpływu zastosowanego sorbentu (powierzchni właściwej) na przebieg reakcji redukcji. Wyniki porównała z danymi literaturowymi badań prowadzonych z sorbentami o innej powierzchni właściwej.

W rozdziałach 7 i 8 Autorka przeprowadziła analizy pracy filtra workowego polegającą na określeniu oporu pyłowej warstwy filtracyjnej, współczynnika przepuszczalności i porowatości warstwy na podstawie wytwarzanego przez nią spadku ciśnienia. W rozdziale 7 przedstawiła formuły obliczeniowe do analizy procesu filtracji przez czystą oraz zanieczyszczoną tkaninę, a także przez warstwę pyłu gromadzącego się na filtrze. Wielkości we wzorach (6-8) oraz (11) opisane są jako spadki ciśnienia i oznaczone ogólnie jako dP , uważam, że w tych przypadkach te wielkości powinny być opisane jako różnica ciśnienia (6) lub opory przepływu (7, 8, 11) i powinny zostać oznaczone jako ΔP , co sugeruje nawet rysunek 108. Oznaczenie dP to raczej wielkość jednostkowa. W związku z tym, czy wielkość w formule (18) oznacza szybkość zmiany ciśnienia?

W rozdziale 8 Doktorantka przeprowadziła analizę pracy filtra, podczas której zauważyła, że uzyskuje się gorsze parametry redukcji emisji w przypadku zbyt częstego czyszczenia jego powierzchni. Również wykazała jak istotne jest uzyskiwanie równomiernego zapylenia powierzchni filtra, które zdecydowanie wpływa na wzrost redukcji emisji. W rozdziale pokazała i opisała skutki błędnego ustawienia lanc dozujących sorbent. Następnie przedstawiła wyniki badania czystej i zapyłonej tkaniny filtra workowego z badanego obiektu A i D, wskazała miejsca poboru próbek tkaniny oraz przedstawiła przekroje przez tkaninę po 12, 24, 36 i 48 miesiącach pracy filtra. Ostatnia część tego rozdziału to analiza spadku ciśnienia na filtrze spowodowana osadzającą się warstwą pyłu na obiektach A i D.

W rozdziale 9 Autorka przedstawiła formuły i równania matematyczne wykorzystane do analizy parametrów reakcji chemicznych pomiędzy sorbentem oraz kwasowymi gazami. W tym celu wykorzystwała równania zachowania masy i zachowania energii dla przepływu przez kanał spalin oraz przez warstwę filtracyjną. W bilansie energii uwzględniła ciepło niesione przez substraty i produkty reakcji, pobierane lub generowane w wyniku przemian chemicznych i fizycznych oraz straty do otoczenia. W dalszej części opisała równania wykorzystane do analizy procesu zmian, które zachodzą w pojedynczej cząstce sorbentu o strukturze porowatej. Równania będą służyły do opracowania programu komputerowego do analizy danych pomiarowych. W przypadku rozdziału tak rozbudowanego w równania i zależności matematyczne, uważam, że powinno znaleźć się więcej bardziej szczegółowych opisów (np. równania od 59 do 69), czy informacji o wykorzystanych wielkościach. Powracanie do spisu oznaczeń znajdującego się na początku pracy zdecydowanie utrudnia analizę tego rozdziału.

Rozdział 10 to wyniki obliczeń otrzymane z rozwiązania formuł opisanych w rozdziale 9. Wyniki badań Autorka przedstawiła w postaci charakterystyk m.in. współczynnika szybkości reakcji w funkcji redukcji emisji SO_2 i HCl , stężenia HCl oraz zmiany temperatury w funkcji długości kanału spalin, liczby Damkohlera dla SO_2 i HCl w funkcji porowatości złoża. Przeprowadziła analizę otrzymanych wyników, uważam jednak, że analiza otrzymanych wyników mogła być zdecydowanie bardziej rozbudowana.

W rozdziale 11 Doktorantka przedstawiła opracowany autorski program komputerowy do analizy parametrów pracy instalacji oczyszczania spalin. Program składa się z trzech modułów i umożliwia analizę składu paliwa oraz analizę pracy instalacji suchego odsiarczania bez i we współpracy z filtrem workowym. Porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów Autorka przedstawiła w postaci charakterystyk i przeprowadziła ich analizę.

Rozdział 12 to podsumowanie, wnioski i uwagi końcowe.

Ostatnia część pracy to trzy załączniki zawierające moduły programu obliczeniowego odpowiednio do analizy: parametrów paliwa, analizy pracy systemu DSI oraz analizy pracy systemu DSI z filtrem workowym, a także bibliografia, w skład której wchodzi 118 pozycji cytowanej literatury.

4. Ocena pracy

4.1. Wybór tematu rozprawy

W swojej pracy Autorka podejmuje bardzo interesującą i ważną tematykę zmniejszania emisji zanieczyszczeń w postaci kwaśnych gazów SO_2 i HCl . Badanie efektywności metod usuwania zanieczyszczeń, takich jak chlorowodór i ditlenek siarki, ze spalin w instalacjach przemysłowych, w tym kotłach fluidalnych jest ciągle kluczowe ze względu na rosnące wymagania dotyczące ochrony środowiska i ograniczania emisji szkodliwych substancji. Wprowadzenie konkluzji BAT wymusiło dalsze działania, dzięki którym emisje zanieczyszczeń kwasowych będą dalej ograniczane.

Wykorzystana w pracy sucha metoda oczyszczania spalin jest jak wiadomo alternatywą dla metod mokrych i półsuchych, ponieważ nie generuje ścieków i jest stosunkowo łatwa w implementacji. Dodatkowo charakteryzuje się niższymi kosztami eksploatacji oraz mniejszym zużyciem wody, co jest istotne w kontekście zrównoważonego rozwoju. Analiza efektywności tej metody w połączeniu z zastosowanymi filtrami workowymi pozwala na jej optymalizację pod kątem wzrostu skuteczności usuwania HCl i SO_2 , a także minimalizacji zużycia sorbentów i ilości powstających odpadów. Jest to szczególnie istotne w przypadku kotłów fluidalnych, które ze względu na specyficzne warunki spalania mogą wymagać dostosowania parametrów pracy instalacji oczyszczania. Stąd uważam, że postawione przed Doktorantką zadanie polegające na badaniu efektywności suchej metody usuwania zanieczyszczeń HCl , SO_2 ze spalin kotłów fluidalnych jest niezwykle ważne z punktu widzenia badawczego, utylitarnego i ma niewątpliwie znaczenie aplikacyjne.

4.2. Metodologia prowadzonych badań

W mojej opinii, zastosowana przez Doktorantkę metodologia badań jest właściwa i nie budzi zastrzeżeń. Podjęte prace badawcze tworzą właściwy ciąg logiczny od sformułowania celu, poprzez przegląd aktualnego stanu wiedzy, omówienie badanych obiektów – kotłów fluidalnych ze złożem cyrkulacyjnym wyposażonych w elektrofiltry lub filtry workowe, opisanie sposobu prowadzenia pomiarów, opracowanie danych pomiarowych, przedstawienie ich w postaci charakterystyk oraz przeprowadzenie ich analizy, na podstawie której sformułowano wnioski i zalecenia. Doktorantka przeprowadziła analizę pracy filtra workowego i analizę kinetyki reakcji, dokonała analizy zjawisk zachodzących pomiędzy HCl i SO_2 oraz zastosowanym sorbentem wapniowym. Na podstawie wszystkich zebranych doświadczeń opracowała autorski program obliczeniowy do analizy parametrów paliwa, pracy systemu DSI bez filtra oraz wyposażonego w filtr workowy. Wykorzystana aparatura do badań nie budzi żadnych zastrzeżeń. Na tej podstawie stwierdzam, że Doktorantka wykazała się umiejętnością sformułowania problemu badawczego i pokazała, że potrafi go samodzielnie rozwiązać. Stąd uważam, że może samodzielnie prowadzić prace badawcze w przyszłości.

4.3. Ocena wyników badań

Moim zdaniem praca jest interesująca, a otrzymane wyniki badań potwierdzają, że istnieje korelacja pomiędzy redukcją HCl i SO₂ w zależności od strumienia dozowanego sorbentu. Uważam również, że wnioski wynikające z pracy mają znaczenie aplikacyjne, co może wpłynąć na minimalizację zużycia sorbentów i ilości powstających odpadów.

Do najważniejszych osiągnięć tej pracy doktorskiej zaliczam:

- wykazanie korelacji pomiędzy redukcją HCl i SO₂ w zależności od strumienia dozowanego sorbentu;
- wykonanie badań na obiektach w skali przemysłowej;
- opracowanie autorskiego programu obliczeniowego do analizy parametrów paliwa oraz pracy instalacji DSI bez i w konfiguracji z filtrem workowym.

4.4. Uwagi krytyczne

Po przeczytaniu pracy pojawiło się kilka wątpliwości i uwag, które warto uwzględnić w dalszej pracy naukowej:

- brak schematu instalacji tymczasowej – rysunki 4 i 5 są mało czytelne;
- brak rysunków wskazania lokalizacji dozowania sorbentu dla obiektów A, C i D – takich jak rysunek 11 do obiektu B;
- brak jednego ogólnego programu badań sprecyzowanego do wszystkich obiektów w postaci opisu lub schematu blokowego poprzedzającego rozdział 4;
- wielkości we wzorach (6-8) oraz (11) opisane są jako spadki ciśnienia i oznaczone ogólnie jako dP , uważam, że w tych przypadkach te wielkości powinny być opisane jako różnica ciśnienia (6) lub opory przepływu (7, 8, 11) i powinny zostać oznaczone jako ΔP , co sugeruje nawet rysunek 108. Oznaczenie dP to raczej wielkość jednostkowa. W związku z tym, czy wielkość w formule (18) oznacza szybkość zmiany ciśnienia?
- liczby kryterialne Reynoldsa, Nusselta, Pecleta, Sherwooda, Schmidta zostały poprzedzone zapisem za pomocą litery N np. N_{Re} , N_{Nu} , N_{Pe} , ...jaki miało to cel, skoro w literaturze zapisuje się je po prostu Re , Nu , Pe itd.? Uważam również, że np. rozdział 9 wymagał większej uwagi i precyzji, o czym świadczą często lakoniczne opisy równań oraz konieczność częstego powrotu do spisu oznaczeń, co w rozdziale z tak dużą liczbą oznaczeń zdecydowanie utrudnia podążanie za myślą Autorki;
- wielkość A na str. 171 i 172 jest wyrażona w m/s, może się jednak mylić, ponieważ zgodnie ze spisem oznaczeń wyrażona jest w m²;
- w rozdziale 10 brakuje analizy większości rysunków, cały komentarz sprowadza się jedynie do stwierdzenia co na nim zamieszczono;
- jaki był cel zastosowania linii przerywanych na większości charakterystyk w rozdziałach 6, 8, 10, 11? Na niektórych zauważono ich brak np. str. 178, czy 179;
- na potrzeby pracy wykonano dużą liczbę pomiarów, czy przeprowadzono jakąś analizę ich niepewności, jeżeli tak to jaką?

- na stronie 177 jest napisane, że rozrzedzenie produktów poreakcyjnych poprzez dodanie popiołu lotnego wpływa na redukcję obu kwasów, warto doprecyzować to zdanie o informację jaki to jest wpływ?
- uważam, że w rozdziale 11 brakuje informacji, jaki język programowania wykorzystano do napisania autorskiego programu do analizy pracy systemu DSI, ta informacja pojawia się dopiero w streszczeniu pracy na jej końcu. Czy program może zostać wykorzystany w przemyśle, jeżeli tak to czy są plany gdzie?

Wszystkie przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie wpływają jednak na wartość naukową i utylitarną recenzowanej pracy.

4.5. Uwagi redakcyjne

W pracy zauważono wiele niedociągnięć redakcyjnych, które dotyczą zarówno błędów literowych jak i interpunkcyjnych. Do tego dość często Autorka stosuje niepoprawne lub nienaukowe sformułowania takie jak: „okres czasu”, „moc energii”, „produkcja mocy”, „postanowiono”, „konsumpcja” zamiast „zużycie”, „żywołność worka” zamiast „jego trwałość”, „strumień objętościowy” zamiast „strumień objętości”, „proces transportu masowego” zamiast „proces transportu masy”, „wylistowanych” zamiast „wymienionych”, „pomiar różnicowy ciśnienia” zamiast „pomiar różnicy ciśnienia”, dodatkowo w wielu miejscach zamiast często i chętnie używanego przez Doktorantkę sformułowania „spadek ciśnienia” zdecydowanie bardziej zasadne było użycie innego np. „różnica ciśnienia”, czy „opór przepływu”, co dotyczy zarówno tekstu, jak i podpisów pod rysunkami.

Niektóre zdania bywają nieprecyzyjne jak np. „Dozowanie sorbentu rozpoczęto od niskich wydajności” (str. 45) – co to znaczy niskich?, „Badania zostały wykonane za pomocą normy...” (str. 123), „...gazy wybierają najkrótszą drogę do obszaru o najniższej wartości podciśnienia” (str. 132), itp.

Na kilku rysunkach pojawiają się opisy w języku angielskim np. rys. 2 i 3, oraz 16 i 17, niektóre rysunki są nieczytelne np. 6, 7, 8, 10, 14, 102 i 103.

Na tej podstawie uważam, że w przyszłości należy zwrócić szczególną uwagę na użycie właściwej nomenklatury i sformułowań naukowych oraz czytelność rysunków.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując przedstawione przeze mnie opinie i uwagi dotyczące wyboru tematu rozprawy, zastosowanych metod badawczych i osiągniętych wyników oraz mimo pewnych niedociągnięć redakcyjnych pracy stwierdzam, że Pani mgr inż. Natalia Pawelec wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy badawczej. Potrafi sformułować i rozwiązać samodzielnie istotny z punktu widzenia naukowego i utylitarnego problem. Jej aktualna wiedza oraz umiejętności pozwalają na prowadzenie prac badawczych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Na tej podstawie stwierdzam, że recenzowana przeze mnie praca doktorska Pani mgr inż. Natalii Pawelec pt.: *„Analiza wpływu rodzaju spalanego paliwa w kotle ze złożem fluidalnym na parametry pracy filtra workowego”* odpowiada warunkom określonym w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnoszę o jej dopuszczenie do obrony oraz nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

dr hab. inż. Piotr Szulc, prof. uczelni