

dr hab. inż. Szymon Szufa

Łódź, 03.11.2024

Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Politechnika Łódzka

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani

mgr inż. Kamili Józwiak

pt. „Analiza warunków pracy i optymalizacja węzła kontaktowego konwersji SO₂/SO₃ współpracującego z kotłem odzysknicowym”.

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie Uchwały nr. **36/02/RDN08/2024-2028** Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 09 października 2024 r.

1. Charakterystyka i struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Józwiak zatytułowana „Analiza warunków pracy i optymalizacja węzła kontaktowego konwersji SO₂/SO₃ współpracującego z kotłem odzysknicowym” została wykonana na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym we Wrocławiu w ramach programu „doktorat wdrożeniowy”.

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Krzysztof Czajka, profesor uczelni, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Jędrzej Kantor. Rozprawa ta ma typową formę pracy doktorskiej. Składa się ona z sześciu głównych rozdziałów oraz bibliografii. Liczy ona 178 stron plus wykaz literatury, spis tablic i rysunków.

Recenzowaną rozprawę doktorską otwiera rozdział zatytułowany „wprowadzenie”, będący uzasadnieniem podjęcia rozprawy. Zawiera on wiele cennych spostrzeżeń dotyczących problematyka emisji tlenków siarki w Polsce, a także metody pozwalające

na redukcję emisji tych tlenków. Rozdział drugi zawiera opis analizowanego ciągu technologicznego w hucie miedzi „Legnica” oraz bardzo rozbudowaną analizę zasady funkcjonowania różnych aparatów. Doktorantka dokonała opisu w drugim rozdziale: aparatów absorpcyjnych, aparatów adsorpcyjnych, kotłów odzysknicowych oraz rodzajów stosowanych komercyjnie rodzajów katalizatorów służących konwersji SO_2 do SO_3 . Trzeci rozdział opisuje cel, podstawowe tezy badawcze oraz zakres pracy.

Celem pracy była szczegółowa analiza oraz optymalizacja pracy wężła kontaktowego do utleniania SO_2 z kotłem odzysknicowym. Doktorantka przedstawiła jako cel poboczny opracowanie katalizatora na bazie wanadu wzbogaconego renem umożliwiające pracę układu w zmiennych warunkach. Jako cel praktycznych analizowanej pracy doktorskiej doktorantka podjęła się próby stworzenia modelu matematycznego („bliźniak cyfrowy”) symulującego pracę wężła kontaktowego. Głównym założeniem modelu matematycznego jest optymalizacja pracy wężła w warunkach zmiennych uwzględniająca zużycie energii, jakość przetapianej rudy miedzi i kilku innych parametrów.

Doktorantka przyjęła następującą tezę badawczą ocenianej rozprawy doktorskiej:

Możliwe jest zwiększenie ilości kwasu siarkowego w wyniku optymalizacji parametrów pracy wężła kontaktowego należącego do Fabryki Kwasu Siarkowego Huta Miedzi „Legnica”.

W czwartym rozdziale Doktorantka przedstawiła w sposób bardzo przystępny i przejrzysty opis wykonanych badań: opisała materiał badawczy, przedstawiła rodzaj wykorzystywanej do badań aparatury oraz metod badawczych (XRF, XPS, ATR-FTIR, XRPD, TGA, DSC). Doktorantka również w tym rozdziale opisała pomiary obiektowe jak i co najważniejsze scharakteryzowała przygotowany przez siebie model matematyczny symulujący pracę aparatu kontaktowego wraz z algorytmem obliczeniowym.

W rozdziale piątym Doktorantka przedstawiła wyniki badań, w tym opis właściwości fizykochemicznych katalizatorów, katalityczne utlenianie SO_2 w warunkach laboratoryjnych oraz analizę stanu aktualnego instalacji przemysłowej jak i walidację modelu matematycznego i optymalizację procesu. Ostatni szósty rozdział to bardzo kompaktowo potraktowane podsumowanie i wnioski. W ramach podsumowania

wskazane zostały najważniejsze obszary, w ramach których prowadzone były przez doktorantkę badania. Na ich podstawie Doktorantka sformułowała następujące wnioski:

- Obecność cezu, rola wanadu jako aktywnego składnika oraz zastosowanie związków sodu i potasu są kluczowe dla skutecznej pracy katalizatorów procesu utleniania SO_2 ;
- Wprowadzenie do katalizatora renu umożliwia rozpoczęcie procesu utleniania SO_2 w niższych temperaturach i może zwiększać zakres temperatur w jakich może być prowadzony tenże proces;
- Katalizatory wzbogacone w ren mają potencjał do zwiększenia efektywności procesu katalitycznego utleniania SO_2 , co może prowadzić do istotnych korzyści energetycznych i ekonomicznych w warunkach przemysłowych;

Na końcu rozprawy doktorantka umieściła bibliografię, spis rysunków i spis tabel. Widać, że Doktorantka dokonała na tym etapie pracy właściwego przeglądu dostępnych w literaturze treści oraz, że podjęty przez nią temat jest kontynuacją i rozszerzeniem badań opisanych w analizowanych źródłach.

2. Zakres pracy, celowość podjęcia tematu

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Józwiak zatytułowana „*Analiza warunków pracy i optymalizacja węzła kontaktowego konwersji SO_2/SO_3 współpracującego z kotłem odzysknicowym*” dotyczy bardzo istotnego zagadnienia inżynierii środowiska – minimalizacja zużycia energii w procesach produkcyjnych, intensyfikacja produkcji kwasu siarkowego oraz pary (cel poboczny).

Doktorantka dokonała bardzo ciekawego wyboru tematyki swojego doktoratu, otóż produkcji miedzi przy jednoczesnym wytwarzaniu kwasu siarkowego oraz pary to bardzo ważne zagadnienie z wielu powodów. Krajowa energetyka oraz przemysł metalurgiczny są kluczowymi filarami gospodarki, które w dobie wojny na Ukrainie z Rosją są jeszcze bardziej istotniejszymi zagadnieniami ze względów bezpieczeństwa energetycznego kraju i przemysłu zbrojeniowego (wytwarzanie środków wybuchowych). KGHM Polska Miedź S.A. to lider i jeden z największych producentów kwasu siarkowego w Polsce, co w głównej mierze związane jest z jego kluczową działalnością, to jest z wydobyciem i przetwarzaniem miedzi. Rozprawa doktorska dotyczy w głównej mierze metod optymalizacji w celu intensyfikacji produkcji



kwasu siarkowego w Hucie Miedzi „Legnica”, jednakże model wykorzystany w analizowanej rozprawie doktorskiej wydaje się modelem dość uniwersalnym możliwym do zastosowania po modernizacji w innych podobnych obiektach przemysłowych.

Zastosowanie kwasu siarkowego jest bardzo szerokie: kwas ten w głównej mierze służy do wytwarzania innych kwasów, do wyrobu barwników, włókien sztucznych, środków wybuchowych, nawozów sztucznych. Kwas siarkowy stosowany jest też w celu oczyszczania olejów, nafty, parafiny i do osuszania gazów. Stosuje się go do produkcji środków piorących, leków oraz jako elektrolit w akumulatorach ołowiowych. Konwersja SO_2 do SO_3 i optymalizacja tej konwersji poprzez obniżenie temperatury procesów konwersji w aparacie kontaktowym stosując nowe katalizatory wzbogacone renelem to rozwiązanie, które jest nowym rozwiązaniem jednakże wpisującym się w ogólnie stosowane praktyki i próby przemysłowe stosowane w przemyśle w celu uzyskania większego zakresu temperaturowego stosowanych komercyjnie katalizatorów.

Niniejsza praca doktorska mgr inż. Kamili Józwiak doskonale wpisuje się w nurt związany z minimalizacją zużycia energii na cele wytwarzania kwasu siarkowego i zawiera wiele elementów nowości, nie analizowanych dotychczas w znanych pracach z tego zakresu. Można więc uznać, że jest to praca, jakiej temat i zakres zostały trafnie wytypowane, ponieważ dotyczy on istotnego problemu inżynierii i ochrony środowiska, zagospodarowania energii w procesach wytwórczych.

W świetle przedstawionych przez Doktorantkę wyników prac badawczych oraz sformułowanych przez nią na jej zakończenie wniosków, można uznać, że przyjęty w rozprawie doktorskiej główny cel został zrealizowany, a przyjęta teza badawcza udowodniona. Biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy w przedmiotowym zakresie badań uznaję to za oryginalny dorobek naukowy Doktorantki.

3. Uwagi krytyczne

Wartość naukowa i aplikacyjna rozprawy

Zaprezentowana praca doktorska charakteryzuje się dobrą strukturą logiczną, doktorantka zachowała prawidłową kolejność rozdziałów oraz proporcje pomiędzy nimi, co pozwala na jej łatwe śledzenie metodyki badań oraz na szybką interpretację wyników prac.



Oceniając kompleksowo rozprawę doktorską Pani mgr inż. Kamili Józwiak należy powiedzieć, że:

1. Temat rozprawy doktorskiej został poprawnie zdefiniowany, a jego wybór uzasadniony w sposób wyczerpujący.
2. Dobór literatury jest dobrze wykonany, spójny z zakresem i obszarem tematycznym pracy.
3. Rozprawa ma dobrą poprawną strukturę, zachowaną prawidłową kolejność rozdziałów, kompletność celów, tez i uzasadnione wnioski.
4. Doktorantka poprawnie opracowała i opisała metodykę badawczą.
5. Praca doktorska ma posiada cechy nowości, charakter technologiczny, wielowątkowy. Przedstawione badania pozwoliły na twórcze rozwinięcie zagadnień technologicznych i uzyskanie praktycznych wyników, pozwalających na wykorzystanie uzyskanych rezultatów.
6. Praca z całą stanowczością stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.
7. Duża wartość aplikacyjna analizowanej rozprawy pozwala na wdrożenie praktycznych rozwiązań w zakresie konwersji SO_2/SO_3 bezpośrednio do praktyki przemysłowej.
8. Uzyskane wyniki badań potwierdziły postawione tezy oraz pozwalają wnioskować, że zrealizowany został cel pracy
9. Uzyskane w rozprawie wyniki i rezultaty, potwierdzone także artykułami naukowymi, można uważać za istotne i liczące się w dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Józwiak została opracowana w sposób przemyślany i uporządkowany. Oceniana rozprawa jest napisana zwięzłym, zrozumiałym językiem, a sposób zaprezentowania zarówno stanu wiedzy autorki dotyczącego metod konwersji SO_2/SO_3 , procesów produkcyjnych związanych z wytwarzaniem miedzi, procesów wytwarzania i odzyskiwania pary i energii cieplnej, pracy



aparatów kontaktowych i ich optymalizacji, analiz właściwości fizykochemicznych katalizatorów oraz budowania modeli matematycznych nie budzi zastrzeżeń. Jeżeli chodzi o sformułowane przez Doktorantkę wnioski końcowe to są one syntetycznie opisane i nie budzą moich zastrzeżeń, z małą uwagą co do kompleksowości samej analizy techniczno-ekonomicznej, jaką przy doktoracie wdrożeniowym uważam za nieco zbyt ogólnie potraktowaną. Należy zauważyć, iż lektura pracy doktorskiej jednak pozwala na stwierdzenie, iż w paru analizowanych przez Doktorantkę obszarach istnieją pewne małe braki. Według mnie dla uzyskania wyższej jakości pracy należało by:

- 1. Uzupelnąć w rozprawie doktorskiej wykaz symboli;**
- 2. Rozbudować pracę o badania żywotności i badania metod regeneracji badanych katalizatorów wzbogaconych o ren i porównanie ich do katalizatorów powszechnie stosowanych komercyjnie dostępnych;**
- 3. Rozbudować/zmodyfikować model matematyczny tak aby mógł symulować różne geometrie i kształt aparatów kontaktowych oraz możliwości stosowania modelu jako uniwersalnego dla innych obiektów przemysłowych o podobnym przeznaczeniu?**
- 4. Dodać analizę różnic związanych ze skalowaniem badań zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych do badań przemysłowych (np. stopień wymieszania gazów, różne nadwyżki utleniacza, intensywność wymiany ciepła – wyższe prędkości nagrzewu);**
- 5. Ustosunkować się do wykonywania innych wariantów optymalizacyjnych związanych z produkcją pary jako celu równorzędnego do produkcji kwasu siarkowego w związku ze wzrostem cen nośników energii i samej energii cieplnej;**
- 6. Opowiedzieć na pytanie czy istnieje możliwość w niedalekiej przyszłości wykonania przedstawionych badań laboratoryjnych z wykorzystaniem katalizatorów wzbogaconych renem przynajmniej w skali półtechnicznej?**
- 7. Wykonać szczegółową analizę techniczno-ekonomiczną analizę badanych wariantów optymalizacyjnych rozbudowanych np. o analizę SWOT, PEST korzystając z danych z obiektów rzeczywistych, badań własnych i danych dostępnych w literaturze;**
- 8. Zostało przemilczane jakie istnieją potencjalne ryzyka w związku z potencjalnym wytwarzaniem badanych katalizatorów wzbogaconych renem na skalę przemysłową? Jakie są koszty wytwarzania badanych katalizatorów wzbogaconych renem w skali przemysłowej?**



Zdaniem recenzenta, jest to pomimo sformułowanych powyżej uwag krytycznych bardzo dobra praca wnosząca elementy nowości do naszej wiedzy dotyczącej metod konwersji SO_2 do SO_3 . Moje uwagi i pytania nie umniejszają wartości naukowej przedstawionego opracowania. Jest to praca o dużym potencjale aplikacyjnym i wysokiej prawdopodobności wykorzystania w celu uzyskania wyższej rentowności procesów wytwórczych związanych z produkcją miedzi, kwasu siarkowego i produktów ubocznych jak para.

4. Wnioski

Mimo sformułowanych kilku uwag krytycznych recenzowaną rozprawę doktorską mgr inż. Kamili Józwiak należy ocenić bardzo pozytywnie. Związana jest ona z niezmiernie ważnym obszarem inżynierii i ochrony środowiska – konwersji SO_2/SO_3 i redukcji zużycia energii podczas wytwarzania miedzi. Praca jest spójna, przemyślana, uporządkowana i stanowi istotną nowość w zakresie inżynierii środowiska.

Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorantka dowiodła umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej poprzez zaplanowanie eksperymentu, postawienie tez badawczych, prowadzenie badań i wnioskowanie z przeprowadzonych badań.

Przygotowana rozprawa dowodzi, że doktorantka dobrze poznała i opanowała warsztat pracy naukowo-badawczej oraz dysponuje znaczną wiedzą z zakresu reprezentowanej specjalności. Stwierdzam, że sformułowane w niniejszej recenzji uwagi mają charakter redakcyjno-dyskusyjny i nie obniżają wartości recenzowanej pracy, która spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

W świetle powyższego stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Kamili Józwiak, przygotowana pod opieką promotorską Pana dr. hab. inż. Krzysztofa Czajki, prof. Politechniki Wrocławskiej, spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim **Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 poz. 574 z późn. zm.)**. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz potwierdza posiadane przez doktorantkę Panią mgr inż. Kamilę Józwiak



umiejętności samodzielnego prowadzenie przez Nią pracy naukowej. Przedmiotowa rozprawa doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem w zakresie stosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Kamili Józwiak do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora **nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.**

Z poważaniem,

dr hab. inż.

Szymon Sufa