



Częstochowa, 21.11.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Jarosław Krzywański  
Katedra Zaawansowanych Metod Obliczeniowych  
Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych  
Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy  
im. Jana Długosza w Częstochowie

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Kamili Józwiak**

**pt. „Analiza warunków pracy i optymalizacja węzła kontaktowego konwersji  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  współpracującego z kotłem odzysknicowym”**

### **A. Wprowadzenie**

Ograniczenie emisji szkodliwych gazów oraz efektywność energetyczna to jedne z głównych obszarów zainteresowania flagowego raportu International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2024 r.

Konieczność ograniczenia zużycia paliw kopalnych na rzecz czystej energii oraz znaczącej poprawy efektywności energetycznej zostały wymienione wśród głównych postulatów raportu.

Wskazany tam jednak cel, jakim jest podwojenie globalnego tempa poprawy efektywności energetycznej, który mógłby zapewnić największe poziomy redukcji emisji do 2030r., przy obecnie realizowanej polityce energetycznej, wydaje się być nieosiągalny.

Z tego względu tematykę pracy doktorskiej mgr inż. Kamili Józwiak należy uznać za ważną z punktu widzenia poznawczego, ale przede wszystkim utylitarne.

## **B. Zakres rozprawy**

Przedłożona do oceny praca doktorska mgr inż. Kamili Józwiak nosi tytuł „Analiza warunków pracy i optymalizacja węzła kontaktowego konwersji  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  współpracującego z kotłem odzysknicowym”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Krzysztof Czajka.

Praca została zrealizowana w ramach programu pn. „Doktorat Wdrożeniowy – edycja IV”, finansowanego z funduszy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Prace wykonano zgodnie umową trójstronną o współpracy Nk KGHM-HL-U-0029-2021, zawartą dn. 29.04.2021r. pomiędzy doktorantką, KGHM Polska miedź S.A. oraz Politechniką Wrocławską. Praca wykonana została we współpracy z Hutą Miedzi „Legnica”, stąd część praktyczna skupia się na zaganieniach związanych z ciągiem technologicznym tego podmiotu.

Część badań zrealizowano też dzięki dofinansowaniu pozyskanemu w ramach konkursu Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, pt. „Wspieramy młodych naukowców 2023”.

Praca liczy łącznie 178 stron, na które składa się 6 rozdziałów, bibliografia w ilości 127 pozycji (w tym 3 pozycje w których Doktorantka jest współautorem), spis rysunków i tabel, uzupełnionych przez schemat technologiczno-montażowy węzła kontaktowego oraz wydruk kodu bilansu instalacji.

W rozdziale 1-szym Autorka przedstawia stan wiedzy w zakresie emisji oraz metod wychwytu tlenków siarki; osobny podrozdział poświęcono metodom stosowanym w skali przemysłowej.

Rozdział 2 dotyczy analizowanej instalacji przemysłowej, ze szczególnym uwzględnieniem węzła kontaktowego z komorą kontaktową i kotłem odzysknicowym.

Cel, zakres oraz tezę pracy podano w rozdziale 3. Sformułowana teza zakłada możliwość zwiększenia ilości produkowanego kwasu siarkowego w wyniku optymalizacji parametrów pracy przemysłowego węzła kontaktowego należącego do Fabryki Kwasu Siarkowego Huty Miedzi „Legnica”.

W rozdziale 4 Doktorantka przedstawiła opis badań. Obejmują one badania laboratoryjne, pomiary obiektowe oraz badania modelowe w oparciu o opracowany model matematyczny symulujący pracę aparatu kontaktowego.

Wyniki obszernych badań, zarówno eksperymentalnych, jak i modelowych przedstawiono i omówiono w rozdziale 5. Opracowany model matematyczny posłużył do symulacji pracy węzła kontaktowego dla pięciu scenariuszy optymalizacyjnych.

Pracę zamyka rozdział 6 zawierający szczegółowe zebranie i podsumowanie wyników pracy.

### **C. Ocena rozprawy**

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest interesująca, ważna i wpisuje się w najnowsze światowe trendy badawcze w inżynierii środowiska i energetyce. Praca podzielona jest na logicznie rozdziały, wynikające z jej układu, a jej opracowanie wymagało od Doktorantki dobrego opanowania zagadnień teoretycznych związanych zarówno z technikami pomiarowymi, jak i modelowymi.
2. Badania eksperymentalne i modelowe mgr inż. Kamila Józwiak przeprowadziła na obiektach w skali przemysłowej, co w kontekście aspektów aplikacyjnych podnosi wartość pracy.
3. W pracy zaprezentowano autorski model matematyczny wykorzystany do symulacji pracy aparatu kontaktowego w Oddziale Huty Miedzi "Legnica", przy czym badania modelowe zrealizowane zostały w zespole naukowym o niekwestionowanej renomie, co w kontekście modelowanych obiektów dużej skali również podnosi wartość pracy.
4. Opracowany, zgromadzony i przeanalizowany w pracy materiał badawczy cechuje się wysokim potencjałem publikacyjnym, odpowiadającym wymogom czasopism naukowych o zasięgu międzynarodowym.

### **D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

- Na rys. 54 przedstawiono zbiorcze zestawienie obliczeń produkcji kwasu siarkowego w instalacji dla HML. Doktorantka zwraca uwagę na znaczące

odstępstwa od zaproponowanej tam liniowej zależności strumienia produkowanego kwasu w funkcji strumienia gazu kierowanego do instalacji wartości powyżej 50 kNm<sup>3</sup>/h. Nie podjęto próby wyjaśnienia przyczyn zaobserwowanej zależności.

- Wspomniany wyżej liniowy trend zmienności przyjęto również dla kolejnych zależności, o których mowa w dalszej części recenzji. W pracy nie uzasadniono takiego wyboru.
- Przedstawione na rysunku 55, strona 139 zbiorcze zestawienie obliczeń produkcji pary wodnej w instalacji HML zostało zaproksymowane liniową funkcją trendu. Analizując wykres, Autorka pisze: „Dane dotyczące różnych wsadów są rozproszone wokół linii trendu, co sugeruje, że skład mieszaniny jest liniowo skorelowany z poziomem produkcji pary wodnej”.

Tymczasem rozkład punktów obliczeniowych z rysunku 55 może sugerować inny niż przyjęty liniowy trend zmian, przez co zagadnienie to należałoby poddać w pracy dokładniejszej analizie.

- Zawarte na rysunkach 56-59 wykresy zmienności temperatur za kolejnymi półkami katalizatora w funkcji strumienia objętości gazu kierowanego do instalacji, wykazują odstępstwa od przyjętego liniowego trendu zmian. Doktorantka w tych sytuacjach wskazuje na potrzebę „bardziej szczegółowej kontroli pracy urządzenia”. Sformułowaną rekomendację należałoby uzasadnić i wskazać sposób jej realizacji.
- Na stronie 111 Doktorantka opisuje zmianę stężenia SO<sub>2</sub> na wylocie z reaktora, w obecności katalizatora A0 w czasie eksperymentów, w temperaturze 400 °C, co przedstawiono na rysunku 41. W ostatnim akapicie zapisano: „W 35 minucie eksperymentu zarejestrowane stężenie SO<sub>2</sub> osiągało wartość minimalną (dla prezentowanego przypadku równą ok. 1430 ppm), która pozostawała stała, bez względu na dalszy przebieg procesu. Wartość tę uznawano za maksymalny stopień konwersji SO<sub>2</sub> możliwy do uzyskania w analizowanych warunkach”. Tymczasem z wykresu na rys. 41 wynika, że wartość minimalna, jaką uzyskano dla stężenia SO<sub>2</sub> w przedstawionym zakresie czasowym jest niższa niż wspomniana wartość odpowiadająca 35 minucie trwania eksperymentu. Analizując wykres, stężenie SO<sub>2</sub> nadal obniża się z kolejnymi minutami prowadzenia eksperymentu, osiągając wartości niższe od wartości uznanej jako

minimalna. Tym samym należałoby uzasadnić przyjęte w pracy wyżej opisane założenie i wynikające stąd konsekwencje.

- W rozdziale 5.4 Doktorantka przedstawiła walidację modelu matematycznego, opisującego działanie aparatu kontaktowego. Walidację tę przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów. Porównując wyniki obliczeń z wybranymi danymi obiektowymi, okazuje się, że wartość błędu względnego przekracza 20% (np. dla strumienia objętości gazu równego  $47 \text{ kNm}^3/\text{h}$ ). Pojawia się więc tu pytanie o analizę błędów pomiarów oraz o akceptowalność rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń. Zagadnienie to powinno być dokładniej przeanalizowane, skoro w pracy nie odniesiono się do przyczyn występowania wyżej opisanych rozbieżności.

## E. Uwagi szczegółowe

- Praca sporządzona została starannie. Drobne błędy językowe i stylistyczne, nie obniżają jej walorów merytorycznych.
- Rysunek 26 nie został opatrzony legendą identyfikującą różne znaczniki przedstawione na wykresie,
- Podane na stronach 13 i 60 równania reakcji chemicznych (5), (8) i (9) zawierają błędy,
- Brakuje spisu oznaczeń z wyjaśnieniem znaczenia poszczególnych symboli użytych w pracy.
- Rysunek 18, obrazujący konstrukcję kotła, powinien być bardziej szczegółowy i opatrzony opisem poszczególnych elementów konstrukcyjnych urządzenia.
- Wskazane byłoby umieszczenie przez Doktorantkę elementów graficznych, w miejscach gdzie opisuje analizowany węzeł kontaktowy na str. 47 i 48. To samo dotyczy rozpatrywanego kotła odzysknicowego, omawianego na str. 54-57 pracy.
- Na stronie 13 Autorka pisze: „Organiczne związki siarki ulegają spalaniu, podczas gdy cząstki pirytu ulegają przekształceniu, głównie do postaci magnetytu i dwutlenku węgla”.  
Na stronie 28 zapisano: „Dwutlenek siarki pochłaniany przez węgiel przekształca się w kwas siarkowy, a gaz odprowadza się przez cyklon do atmosfery”.



Na stronie 44 Autorka pisze: „Aparaty z warstwą nieruchomą są wykorzystywane, gdy strumień gazu jest na tyle duży, że koszt świeżego adsorbentu byłby za wysoki w stosunku do kosztu regeneracji”.

Na str. 56 zawarto zapis: „Obowiązkowo kocioł musi zostać wyłączony z eksploatacji, kiedy stężenie SO<sub>2</sub> w gazie będzie mniejsze niż 5.5%”.

Wszystkie powyższe stwierdzenia należałoby szerzej rozwinąć i opisać w pracy.

## **F. Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Kamili Józwiak pt. „Analiza warunków pracy i optymalizacja węzła kontaktowego konwersji SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> współpracującego z kotłem odzysknicowym” zawiera oryginalne i ważne dla inżynierii środowiska i energetyki sformułowanie i rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne zastosowanie wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, wpisujące się w aktualne światowe trendy badawcze.

Doktorantka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Praca stanowi przemyślaną, logiczną i spójną całość, potwierdzającą umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Doktorantkę pracy naukowej.

**Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Kamili Józwiak spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach.**

**Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.**

KIEROWNIK  
Katedry Zaawansowanych Metod Obliczeniowych  
Wydziału Nauk Ścisłych, Przyrodniczych  
i Technicznych  
*Jarosław Krzywański*  
prof. dr hab. inż. Jarosław Krzywański