

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej inż. **Błażeja Doroszuka** pt.:

*Data-driven insight into ball mill scaling*

Recenzja rozprawy doktorskiej została wykonana na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Wrocławskiej, dr. hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. uczelni, zgodnie z pismem RDND08/134/2024 z dnia 20.05.2024 r.

### 1. Ogólna charakterystyka treści rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska inż. Błażeja Doroszuka pt. „*Data-driven insight into ball mill scaling*” składa się z siedmiu rozdziałów, zawiera 156 stron tekstu, 194 numerowanych pozycji literaturowych, 54 rysunki, 16 tabel oraz 75. stronicowy załącznik podzielony na części oznaczone kolejnymi literami alfabetu od A do N, i zawierający 20 rysunków oraz 50 tabel. W rozprawie zamieszczono także streszczenie, słowo wstępne, spis treści, spis rysunków i tabel, oraz spis użytych skrótów. Praca została napisana w języku angielskim. Wyniki pracy zostały częściowo opublikowane w dwóch współautorskich publikacjach Doktoranta, w tym jednej posiadającej *Impact Factor (IF)*, i jednym manuskrypcie znajdującym się w recenzji w czasopiśmie posiadającym IF.

W rozdziale pierwszym Autor zwięźle przedstawia umotywowanie podjęcia tematyki oraz opisuje strukturę pracy. Rozdział drugi zawiera przegląd literaturowy z zakresu procesu mielenia w młynie kulowym, oraz podejścia do modelowania i symulacji pracy młyna kulowego. Autor charakteryzuje techniki pomiarowe i monitoringowe wraz z aktualnymi ograniczeniami i kierunkami potencjalnych badań w tym zakresie. Rozdział trzeci to kolejny z rozdziałów teoretycznych, Doktorant opisuje w nim podstawy teoretyczne modelowania numerycznego, wraz z algorytmami i strukturą formułowania problemu, funkcją celu i warunkami brzegowymi.

W rozdziale czwartym został sformułowany cel badawczy, którym jest poszerzenie wiedzy dotyczącej procesu mielenia w młynie kulowym poprzez badanie wpływu operacyjnych parametrów młyna na skuteczność i energochłonność procesu. Oprócz głównego celu badawczego sformułowanych zostało 6 pomocniczych celów badań.

Rozdział piąty rozpoczyna część praktyczną rozprawy, w rozdziale tym Autor przedstawia metodykę i program badań przeprowadzony w skali laboratoryjnej, charakterystykę materiału oraz procedurę przeprowadzenia testów i kalibracji modelu. Badania laboratoryjne obejmowały testy mielenia na sucho i mokro z odpowiednio czterema i pięcioma zmiennymi parametrami operacyjnymi młyna i charakterystyki nadawy, na dwóch poziomach wartości (zmienności) każdy. Badania zostały wykonane osobno dla trzech różnych średnic bębna 300, 400 i 500 mm. W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki symulacji komputerowej przeprowadzonej w oparciu o dedykowane oprogramowanie. Opracowane modele dotyczyły m.in. wyznaczenia modeli regresji dla następujących wielkości: *Torque*, *Force Ratio*, *Size Reduction*, *Energy Consumed*, *Specific Energy*, oraz *Specific Energy per rotation*. Rozdział siódmy to wnioski końcowe, gdzie Autor dokonuje walidacji opracowanych modeli symulacyjnych a także podsumowuje wpływ *charge motion*, *torque* oraz *scaling constant* na efektywność pracy. Wnioski są bardzo rozbudowane i zostały przedstawione osobno z punktu widzenia powyżej wymienionych czynników. Autor odniósł się także ze swoimi wynikami do literatury.

## **2. Ocena merytoryczna rozprawy**

Głównym osiągnięciem naukowo-badawczym pracy jest przeprowadzenie programu badawczego mielenia rudy miedzi w laboratoryjnym młynie kulowym oraz stworzenie cyfrowego modelu młyna z wykorzystaniem numerycznej metody elementów skończonych (DEM) oraz numerycznej metody SPH (wygładzonej hydrodynamiki cząstek). Osiągnięcie to zostało uzyskane poprzez przeprowadzenie odpowiedniego programu badawczego w skali laboratoryjnej z wykorzystaniem eksperymentu czynnikowego na sucho i na mokro, ze zmiennymi wartościami wybranych parametrów pracy młyna (średnica bębna, liczba i wysokość progów wynoszących w komorze roboczej) oraz parametrów przebiegu procesu (poziom wypełnienia komory roboczej, prędkość obrotowa młyna). Dodatkowo dla przemiałów na mokro zmiennym parametrem była gęstość zawiesiny. Na podstawie uzyskanych wyników został zaimplementowany cyfrowy model młyna, dla którego przeprowadzone zostały symulacje dla zmiennych wartości parametrów operacyjnych, i w efekcie wyznaczone zostały

modele regresyjne dla: a) momentu obrotowego (*Torque*), b) siły działającej na mielniki (*Force Ratio*), c) stopnia rozdrobnienia (*Size Reduction*), d) zużytej energii (*Energy Consumed*), e) energochłonności (*Specific Energy*), f) energii na jeden obrót (*Specific Energy per rotation*).

Należy podkreślić, że tak zaprojektowany plan badań jest bardzo ambitnym i skomplikowanym przedsięwzięciem i stanowi istotną wartość dodaną w pogłębienie wiedzy na temat opisu procesu mielenia w młynie kulowym, gdyż badania w takim zakresie nie były dotychczas realizowane, zwłaszcza w kraju.

Główny cel badawczy pracy definiuje Doktorant jako zdobycie wiedzy dotyczącej skalowania laboratoryjnego procesu mielenia w młynie kulowym poprzez zbadanie wpływu wybranych parametrów operacyjnych na efektywność pracy młyna oraz energochłonność w zależności od zmiennej średnicy młyna. Osiągnięcie tego celu planowane jest poprzez realizację następujących celów cząstkowych: a) opracowanie metodyki dla kalibracji cyfrowego modelu młyna stworzonego dla młynka laboratoryjnego, b) określenie i ocena stałej skalowania, c) przeprowadzenie wielowymiarowej analizy dla wyników symulacji, d) określenie wpływu parametrów operacyjnych na wybrane charakterystyki i efekty pracy młyna, e) określenie zależności korelacyjnych pomiędzy poszczególnymi parametrami, f) określenie dalszych potencjalnych kierunków badań.

Plan badań został zaplanowany bardzo drobiazgowo, Doktorant w rozprawie szczegółowo opisuje poszczególne etapy realizacji zamierzonych celów, wyczerpująco charakteryzuje urządzenie oraz materiał do badań, a także przygotowania do symulacji pracy młyna, wraz z wykorzystywanymi narzędziami i oprogramowaniem. Materiałem do badań jest ruda miedzi będąca mieszanką z trzech kopalń KGHM, tj. ZG Polkowice, ZG Rudna oraz ZG Lubin.

Na podstawie powyższych działań można zauważyć, że Doktorant posiada niezbędny warsztat, umiejętności i wiedzę w tym zakresie. Jest świadomy jak duże znaczenie ma reprezentatywność każdej próbki oraz jak krytyczne konsekwencje mogą wynikać z niedochowania staranności na tym etapie badań. W opisie procedury symulacyjnej dostrzegana jest duża wiedza teoretyczna i praktyczna doktoranta, w bardzo przystępny sposób wyjaśniona i opisana jest część badawcza związana ze stworzeniem cyfrowego modelu, jego kalibracja i testowanie. Doktorant jest w pełni świadomy ograniczeń i trudności, jakie może napotkać w wyniku realizacji niniejszej pracy, o czym wspomina niejednokrotnie w rozprawie. Dodatkowo można zauważyć, że Doktorantowi nie obce są dosyć trudne zagadnienia związane z modelowaniem matematycznym i planowaniem eksperymentów, gdyż w sposób poprawny

zostały wytypowane parametry będące jednocześnie zmiennymi niezależnymi do modeli regresyjnych.

Doktorant poprawnie formułuje uzyskane wyniki zarówno na etapie przeprowadzonych testów laboratoryjnych, jak i na etapie symulacji. Uzyskane wyniki są zgodne ze specyfiką przebiegu procesu mielenia w młynie kulowym.

Autor w sposób swobodny porusza się w zagadnieniach statystycznych, poprawnie stosuje wybrane statystyczne miary i testy weryfikacji, oraz dokonuje trafnej interpretacji otrzymanych wyników obliczeń. Sprawnie porusza się także w obliczeniach z dużym znawstwem problemów optymalizacji i obliczeń komputerowych, co pozwoliło mu na trafne wyciągnięcie wniosków końcowych.

W dyskusji nad oceną uzyskanych modeli matematycznych Doktorant nie pominął bardzo istotnego zagadnienia a mianowicie weryfikacji jednorodności wariancji. Należy podkreślić, że zdarza się w praktyce, że prowadzący badania dokonują milczącego założenia o jednorodności wariancji bez uprzedniej weryfikacji tego faktu, co jest błędem merytorycznym. Należy pochwalić Doktoranta, że nie zaniedbał tej ważnej kwestii związanej z oceną statystyczną modeli, co kolejny raz dowodzi jego dobrego warsztatu naukowego.

Autor wykazał w pracy, iż na drodze określenia zadania modelowania i symulacji w wyniku przeprowadzonego eksperymentu naukowego a następnie rozwiązania tego zadania jest możliwe ustalenie takich warunków pracy młyna, które spowodują uzyskanie zamierzonych efektów.

### **3. Uwagi do pracy**

Niezależnie od oceny merytorycznej rolą recenzenta jest zwrócenie uwagi na błędy, niedociągnięcia oraz ujęcia danego zagadnienia, które w opinii recenzenta mogło być przedstawione inaczej. Praca jest napisana bardzo dobrze pod kątem zarówno merytorycznym jak i edytorskim. Podczas jej analizy dostrzec można poniższe kwestie dyskusyjne:

1. Z uwagi na to, że Doktorant położył duży nacisk na kwestię eksperymentu czynnikowego, bardziej szczegółowy opis metodyki i założeń teoretycznych do tej procedury powinien znaleźć się w części teoretycznej niniejszej rozprawy. Nie zostało także wyczerpująco uargumentowane dlaczego Doktorant przyjął w swoich badaniach ułamkowy schemat eksperymentu czynnikowego. Dla testów mielenia na sucho, przy czterech parametrach

(prędkość obrotowa, liczba pólek wynoszących, wysokość pólki, stopień wypełnienia młyna) i dwóch poziomach zmienności każdego z nich liczba pojedynczych doświadczeń dla stałej średnicy młyna wynosi  $2^4$ , czyli 16, a przeprowadzono 8 testów. Przy testach na mokro, zmiennych jest pięć parametrów (dodatkowo gęstość zawiesiny), czyli liczba testów powinna wynosić  $2^5 = 32$ , a przeprowadzono 8 testów. Autor postępował zgodnie z metodyką eksperymentu ułamkowego, co jest jak najbardziej poprawne. Należałoby jednak skomentować bardziej szczegółowo, dlaczego wybrano eksperyment ułamkowy oraz czy mniejsza liczba pojedynczych testów, wynikająca z tej procedury mogła mieć wpływ na dokładność uzyskanych modeli.

2. Proszę o wyjaśnienie dlaczego materiał użyty do badań został przygotowany jako mieszanka z trzech kopalń, a nie wzięto rudy z jednego zakładu górniczego?
3. W rozdziale 6.4. przedstawione są obliczone modele regresyjne dla wybranych zmiennych zależnych. Tabele 6.5 – 6.9. nie są do końca czytelne w części, gdzie przedstawione są wartości dla poziomu wypełnienia ( $f_d$ ), liczby progów wynoszących ( $n_i$ ), wysokości progów wynoszących ( $l_h$ ), prędkości obrotowej ( $\omega$ ) oraz gęstości zawiesiny ( $\rho$ ). Nie we wszystkich przypadkach podane są wartości, np. w Tab.6.5 dla czynnika  $n_i$  wartość widnieje tylko dla testu w młynie 300 mm, mielenie na sucho, dla czynnika  $l_h$ , tylko dla testów na sucho w młynie 300 i 500. Skutkiem tego w obliczonych modelach nie znajdują się wszystkie zmienne niezależne. Dla modeli regresyjnych nie podano także błędów poszczególnych współczynników. Należałoby skomentować powyższe kwestie.
4. W badaniach Autor posługuje się stopniem rozdrobnienia  $S_{80}$  jako wskaźnikiem miary efektywności technologicznej pracy młyna, jednak w pracy nie został on zdefiniowany bezpośrednio, z podaniem wzoru, według którego jest wyliczany. Jego opis pojawia się w rozdziale 5.2.1. jednak powinien być zdefiniowany za pomocą wzoru i z użyciem przyjętego w nomenklaturze symbolu  $S_x$ .

Pomimo wysokiego poziomu rozprawy Doktorant nie ustrzegł się od nielicznych drobnych błędów (niektóre dyskusyjne), które należałoby uwzględnić przy ewentualnej publikacji wyników badań:

1. Str. 42, ostatnie zdanie przed rozdziałem 5.1.: należałoby zdefiniować  $R^2$  jako współczynnik determinacji modelu w regresji wielorakiej.
2. Str. 44: wzór 5.1. lepiej byłoby zaprezentować w części teoretycznej.

3. Str. 46, wzór 5.2.: Doktorant podaje wg jakiego wzoru dobierał kule, ale można dla przejrzystości podać w tabeli skład kul.
4. Rozdział 3: brakuje opisu zmiennych w niektórych wzorach, np. (3.20), (3.23). Na stronie 33 nie zostało zanumerowanych sześć wzorów opisujących zmienne w procedurze WCSPH.
5. Str. 52: rys. 5.13 wydaje się zbędny. Na podstawie tego rysunku widać, że wstępnie dobrane czasy mielenia były chyba za długie, gdyż zmiany w wartościach D80 były minimalne. Prawdopodobnie najlepsze dopasowanie uzyskać można z wykorzystaniem funkcji hiperbolicznej.
6. Str. 58: niepoprawny zapis naukowy krotności „10 do potęgi -5”
7. Str. 65, 3-4 linijka od dołu: uzyskane wyniki, które znacznie odbiegają od przedziału +/- 3 sigma należałoby pominąć, za miast uśredniać.
8. Str. 68-69, rozdział 5.7.: istotność współczynnika korelacji powinna być weryfikowana dedykowanym testem t-Studenta, zamiast arbitralnego przyjęcia wartości 0.4 jako granicznej, powyżej której korelacja jest istotna.
9. Str. 71, wzór (5.9): stosowne jest powołanie literaturowe, jeśli nie jest to wzór opracowany przez Doktoranta.
10. Tabele 6.1 i 6.3.: wskazane byłoby podanie oprócz wartości średnich stopni rozdrobnienia także wartości odchyłeń standardowych

Według subiektywnej opinii recenzenta praca została napisana bardzo dobrze w języku angielskim. Znaleziono w pracy bardzo nieliczne przykłady drobnych uchybień:

1. Str 18, 3. akapit od dołu, 1 linijka: powinno być „liner” zamiast „linear”.
2. Str 20, 4 linijka: powinno być “should” zamiast „shoudl”.
3. Str. 51: Doktorant pisze „The experiments were conduceted on averaged standardized copper ore sample” – co oznacza “standardized”?
4. Str 52, rys. 5.12.: “feed” zamiast “input”.
5. Str 65, rozdział 5.6., 5 linijka: powinno być „were” zamiast „was” – czasownik odnosi się do „relationships”.

6. Niejednolite określanie stopnia rozdrobnienia. Powinno się przyjąć albo „reduction ratio” albo „comminution degree”.

#### 4. Konkluzja końcowa

Doktorant wykazał w swojej rozprawie, że na drodze przeprowadzenia eksperymentu czynnikowego oraz symulacji jest możliwe określenie wpływu wybranych czynników operacyjnych na przebieg i efektywność procesu mielenia w młynie kulowym. Zrealizowano tym samym sformułowany w rozdziale trzecim cel pracy. Uzyskane rozwiązania mają bardzo istotne znaczenie praktyczne.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska inż. Błażeja Doroszuka pt. *“Data-driven insight into ball mill scaling”* **spełnia warunki** stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2023 r., poz. 742), gdyż prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej, a przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej. Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ponadto uważam rozprawę za wyróżniającą ze względu na:

- realizację zamierzonego zadania symulacyjnego poprzedzone eksperymentem czynnikowym w skali laboratoryjnej a tym samym własnoręczne zgromadzenie potrzebnych danych wsadowych do opracowania modelu, zamiast wykorzystania gotowych wzorców;
  - fakt, iż Doktorant rozwiązał trudne zagadnienie symulacyjne, które stosunkowo rzadko jest przedmiotem badań krajowych,
  - fakt, że uzyskane w rozprawie wyniki są bardzo istotne zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia gdyż, stwarzają możliwości optymalizacji energetycznej pracy młyna,
  - to, że praca została napisana w języku angielskim, na wysokim poziomie,
- dlatego **wnioskuje o wyróżnienie** rozprawy doktorskiej inż. Błażeja Doroszuka *„Data-driven insight into ball mill scaling”*.