Dr hab. inż. Tomasz Suponik, prof. PŚ
Politechnika Śląska, Gliwice

Gliwice, 05.08.2024r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
inż. Błażeja Doroszuka
pt. Data-Driven Insight into Ball Mill Scaling

Podstawa opracowania

Podstawą opracowania niniejszej recenzji było pismo Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej dra hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. Politechniki Wrocławskiej z dnia 20 maja 2024 roku (pismo nr RDND08/132/2024). Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska inż. Błażeja Doroszuka pt. „Data-Driven Insight into Ball Mill Scaling". Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Robert Król.

Ogólna charakterystyka recenzowanej rozprawy doktorskiej

Inż. Błażej Doroszuk w rozprawie doktorskiej zaproponował zastosowanie nowej stałej skalowania dla młynów kulowych. Udowodnił, że przy zastosowaniu tego parametru wartości wskaźników efektywności energetycznej w warunkach mielenia na sucho i na mokro pozostają spójne dla różnych wielkości młynów. To samo zaobserwował w przypadku redukcji rozmiaru produktu dla mielenia na mokro.

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów oraz 14 załączników od A do N zawierających tabele, rysunki i obliczenia będące bezpośrednim wynikiem przeprowadzonych badań. Praca została napisana w języku angielskim. Z punktu widzenia redakcyjnego rozprawa została napisana przez Autora w sposób profesjonalny. Pisząc rozprawę doktorską, Autor postanowił skorzystać z narzędzia pomocniczego z dziedziny sztucznej inteligencji. Podczas czytania pracy nie zauważyłem większych błędów redakcyjnych.

Praca liczy łącznie 156 stron (nie wliczając załączników A - N oraz spisów literaturowego, rysunków i tabel), i w części zasadniczej zawiera 54 rysunki oraz 16 tabel. Większość jednak danych służących do analizy modelowania mielenia w młynie kulowym zostało zamieszczonych w postaci tabel

i rysunków w załącznikach A - N. Wszystkie tabele i rysunki zostały poprawnie sporządzone i dobrze wkomponowane w tekst rozprawy. W spisie literatury ujęto 194 pozycji bibliograficznych.

We wprowadzeniu (rozdział 1) Doktorant opisał, co skłoniło go do podjęcia zaprezentowanej tematyki pracy oraz przedstawił cele i strukturę rozprawy doktorskiej. Przedstawiony w rozdziale 2 przegląd literaturowy, dokonany na potrzeby rozprawy doktorskiej, został przeprowadzony prawidłowo, a jego zawartość dobrze współgra z tekstem pracy. W rozdziale tym Autor identyfikuje luki w wiedzy i definiuje pytania badawcze, które będą później omówione. Stosowane w rozprawie skróty są wyjaśnione, co ułatwia śledzenie toku i sposobu prowadzenia eksperymentów oraz ich interpretacji. Do osiągnięć należy zaliczyć dobór i użycie zaawansowanych technik modelowania procesu mielenia w młynie kulowym.

W rozdziale 3 omówiono teorię dotycząca symulacji zachowania się wsadu podczas mielenia na sucho i mielenia na mokro z zawiesiną. Są to oddziaływania wielofazowe, które Doktorant scharakteryzował w sposób jasny i skondensowany, stosując złożone równania matematyczne. W rozdziale 4 Doktorant przedstawił cel i zakres rozprawy doktorskiej nieco bardziej szczegółowo niż we wprowadzeniu.

Zgodnie ze standardami pisania prac naukowych, Doktorant poświęcił rozdziały 5 i 6 na omówienie odpowiednio zastosowanych metod badawczych i materiałów oraz przedstawienie wyników badań i ich analiz, tak aby w ostatnim, siódmym rozdziale móc wyciągnąć właściwe wnioski i wskazać możliwe miejsca wdrożenia uzyskanych wyników. Tym samym zweryfikował hipotezy roboczy dotyczące proponowanego procesu skalowania oraz korelacji między skalami młynów.

Ocena rozprawy doktorskiej

W mojej opinii recenzowana rozprawa i jej materiały źródłowe są merytorycznie ważne, aktualne oraz użyteczne naukowo i aplikacyjnie.

Doktorant w pracy przeanalizował możliwość skalowania młynów kulowych o różnych średnicach za pomocą zaawansowanych technik modelowania, takich jak: metoda elementów dyskretnych (DEM), metoda wygładzonej hydrodynamiki cząstek (SPH), połączonych z metodami eksperymentalnymi i podejściem projektowania eksperymentów (DoE). Zbadał wpływ wybranych parametrów operacyjnych na wydajność mielenia i efektywność energetyczną. Zajął się więc optymalizacją i skalowaniem wydajności młynów kulowych, dzięki czemu kadra techniczno-projektowa będzie w stanie w szybki i bezproblemowy sposób zaprojektować, wdrożyć i zweryfikować parametry techniczne młyna i zdecydować o budowie wielkogabarytowej maszyny według zapotrzebowania wydajnościowego i energetycznego. Ostatecznie może to doprowadzić do zwiększenia produktywności, rentowności i zrównoważonego rozwoju środowiska w branżach wykorzystujących młyny kulowe, tj. m.in. w górnictwie, koksownictwie, a w szczególności w zakładach wzbogacania rud.

Wykorzystując nowoczesne techniki modelowania procesu mielenia w młynie kulowym, udowodnił ich aplikacyjność. W związku z powyższym tematykę badawczą podjętą w pracy doktorskiej przez pana Błażeja Doroszuka uważam za aktualną i w pełni uzasadnioną, tak z poznawczego jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

W badaniach Doktorant zaproponował systematyczną metodę kalibracji cyfrowego bliźniaka laboratoryjnego młyna kulowego poprzez integrację symulacji DEM/SPH z danymi eksperymentalnymi z nagrań wideo. Skalibrowany cyfrowy bliźniak był następnie wykorzystywany w wielowymiarowej analizie mielenia rudy miedzi, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu parametrów operacyjnych, takich jak średnica młyna, stopień wypełnienia, prędkość obrotowa, rozmiar i liczba podnośników, i właściwości zawiesiny na główne wskaźniki wydajności.

Co ważne Doktorant potrafił dobrać odpowiednie techniki modelowania do skalowania młynów kulowych i je zastosować. Dzięki tym technikom, połączonym z metodami eksperymentalnymi i podejściem projektowania eksperymentów (DoE) wraz z dobrą wiedzą na temat teorii i praktyki procesu mielenia był w stanie przeprowadzić badania, zaobserwować zachowanie się mielonego materiału w komorze mielenia i przeanalizować wyniki, by na zakończenie wyciągnąć słuszne konkluzje. Na tym tle widać wyraźnie, że **Doktorant wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** w obszarze przygotowania stanowisk laboratoryjnych i materiału badawczego oraz ich opisu, jak również przygotowania procedury prowadzenia badań i realizacji prac badawczych, stosując poprawnie dobrane techniki badawcze, analityczne i modelowe. Jest to jedna z istotniejszych części realizacji prac naukowo-badawczych. Jednym słowem Doktorant potrafił dobrać odpowiednie techniki modelowania, przygotować stanowiska laboratoryjne do mielenia rudy, prawidłowo zaplanować prace badawcze i przeprowadzić eksperyment zgodnie z planem, a co ważne, całość czytelnie przedstawić w rozprawie.

Oryginalność pracy oraz ocena wiedzy teoretycznej Doktoranta

Główne zależności między badanymi parametrami i ich wpływem na wskaźniki wydajności młynów były badane przez Doktoranta przy użyciu techniki projektowania eksperymentów (DoE). Wyniki tych badań dostarczyły informacji na temat parametrów, które mają największy wpływ na wydajność młyna kulowego i jakość produktu. Wyniki służyły również do określenia korelacji pomiędzy średnicą młyna, parametrami operacyjnymi i wskaźnikami wydajności podczas mielenia na sucho i na mokro, co dostarczyło informacji pomocnych w opracowaniu strategii zwiększania skali produkcji. Jest to bardzo ważne osiągnięcie, które z całą pewnością może być wykorzystane przez przedsiębiorstwa wykorzystujące młyny kulowe. Można więc stwierdzić, że przedłożona do oceny **rozprawa doktorska autorstwa inż. Błażeja Doroszuka stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań w sferze gospodarczej.** Trzeba podkreślić, że dotychczasowe

SX

podejście skalowania mielenia w młynie kulowym opierało się na wiedzy empirycznej i metodach „prób i błędów", które często skutkowały suboptymalną wydajnością, nadmiernym zużyciem energii i zwiększonymi kosztami operacyjnymi. Dzięki zastosowaniu systematycznego i naukowego podejścia do podstawowych zasad rządzących mieleniem kulowym przedsiębiorstwa będą mogły zwiększyć produktywność i rentowność produkcji oraz pracować zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju.

Największym osiągnięciem naukowym Doktoranta było uzyskanie wglądu w skalowanie laboratoryjnego młyna kulowego przez zbadanie wpływu parametrów operacyjnych na wydajność mielenia i efektywność energetyczną dla wybranych średnic młyna. Doktorant opracował stałą skalowania i ocenił ją jako parametr utrzymania podobnej wydajności mielenia w różnych skalach młynów. Udowodnił, że przy zastosowaniu tego parametru wartości wskaźników efektywności energetycznej w warunkach mielenia na sucho i na mokro pozostają spójne dla różnych wielkości młynów. Wykazał, że stała skalowania jest bezpośrednio skorelowana z prędkością obrotową zarówno w przypadku mielenia na sucho, jak i na mokro, i że działa lepiej w warunkach mielenia na mokro. W przypadku mielenia na sucho sytuacja wygląda nieco inaczej. Redukcja wielkości ziaren podczas tego mielenia nie była spójna w różnych skalach, szczególnie między średnicami młyna 300 mm i 500 mm. Doktorant ponadto stwierdził, że do czynników, które mają największy wpływ na wydajność i efektywność młyna kulowego należały konstrukcja podnośnika oraz gęstości zawiesiny dla mieleniu na mokro. Przedstawione spostrzeżenia charakteryzują się znacznym poziomem poznawczym i można je zaliczyć do ważnych osiągnięć naukowych. Stąd można stwierdzić, że przedłożona do oceny **rozprawa doktorska autorstwa inż. Błażeja Doroszuka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie skalowania młynów kulowych o różnych średnicach.**

Obserwacje te, poza rozprawą doktorską, zostały również przedstawione w artykule pt. *Scaling Energy Transfer in Ball Mills: A Scale-Agnostic Approach through a Universal Scaling Constant*, autorstwa Doroszuk, B., Bortnowski, P., Ozdoba, M., Król, R. (Energies 17.11 (2024): 2693), opublikowanym po przedłożeniu wniosku do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o wszczęcie postępowania o nadanie stopnia doktora. Według bazy Scopus Doktorant jest jeszcze autorem 9 innych pozycji (w tym 6 artykułów w czasopismach recenzowanych oraz 3 w materiałach konferencyjnych). Prace te były cytowane 82 razy, a indeks H wynosi 4. W 7 z nich Doktorant był pierwszym autorem. Większość opublikowanych prac dotyczyło tematyki poruszanej w rozprawie doktorskiej, a niektóre z nich również kruszarek młotkowych i transportu na przenośnikach taśmowych. Publikując swoje osiągnięcia w recenzowanych czasopismach oraz prezentując w rozdziałach 2 i 3 rozprawy doktorskiej szczegółową wiedzę z zakresu m.in. podstaw mielenia w młynach kulowych oraz modelowania i symulacji tych maszyn **inż. B. Doroszuk potwierdził, że wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w obszarze inżynierii mineralnej**, która mieści się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

5.1

Warto podkreślić, że praca badawcza przedstawiona w rozprawie została sfinansowana ze środków projektu badawczego w ramach prestiżowego programu „Diamentowy Grant", który Doktorant otrzymał do realizacji w latach 2019-2024. Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczyło ten programu na wsparcie jednostek naukowo-badawczych w tworzeniu wybitnie uzdolnionym absolwentom studiów pierwszego stopnia warunków rozwoju przez umożliwienie im prowadzenia badań naukowych pod kierunkiem opiekuna naukowego.

Kwestie dyskusyjne i inne uwagi

Mimo znaczących walorów poznawczych i praktycznych rozprawy podczas jej lektury pojawiają się dodatkowe pytania wymagające wyjaśnienie i szerszej dyskusji.

Ważną kwestią w warunkach inżynieryjnych jest uniwersalizm opisu określonych zjawisk/zależności. W przypadku rozprawy doktorskiej Autor zaproponował zastosowanie dla określonych warunków stałej skalowania w młynach kulowych. Badania były prowadzone dla rud miedzi. Czy istnieje możliwość zastosowania tej stałej dla różnych materiałów wsadowych i stosując inne niż w przemyśle metalurgicznym warunki pracy. Czy Doktorant próbował w ramach prac badawczych zbadać możliwość zastosowania stałej skalowania dla innych rodzajów nadawy na młyn kulowy i np. innych mielników? Ciekawe czy osiągnięcie Doktoranta mogłoby być zastosowane do mielenia skał miękkich takich jak wapień, wapień marglisty, margiel czy minerały ilaste tj. surowców do produkcji cementu lub węgiel kamienny, tj. surowca do przygotowania mieszanki koksowej - chociaż obecnie w JSW SA ze względu na dedykowane uziarnienie najczęściej stosowane są młyny młotkowe. Czy istnieje w ogóle możliwość ustanowienia tej stałej jako niezależnej od materiału wsadowego i rodzaju mielników? Jeżeli nie to czy można określić wytyczne dla skalowania młynów kulowych, by kadra inżynieryjno-projektowa mogła je wykorzystać i wyznaczyć stałą skalowania dla innych materiałów wsadowych i warunków pracy.

Drugie pytanie związane jest z ograniczeniami stosowalności stałej skalowania. Czy Doktorant ma pomysł jak rozwiązać problem skalowania młynów kulowych w mieleniu na sucho, aby można było oceniać stopień redukcji wielkości ziaren, zwłaszcza w przypadku młynów o średnicy od 300 mm do 500 mm?

Wniosek końcowy

Zapoznawszy się z treścią przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że zawiera ona oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora inż. Błażeja Doroszuka ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie naukowej inżynierii środowiska, górnictwo i energetyka. Doktorant jednocześnie wykazał się dużą umiejętnością samodzielnego

5/

prowadzenia pracy naukowej. W związku z powyższym stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska Pana inż. Błażeja Doroszuka spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668). Zwracam się do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z wnioskiem o dopuszczenie inż. Błażeja Doroszuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoką jakość osiągnięcia naukowego i jego walory utylitarne i naukowe oraz interdyscyplinarne podejście do rozwiązywania problemów technicznych wnioskuję o wyróżnienie niniejszej rozprawy.