

Recenzja

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

„Data-Driven Insight into Ball Mill Scaling”

1. Wprowadzenie

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 15 maja 2024 r. w oparciu o otrzymany egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z pismem przewodnim z dnia 20.05.2024 r., sygnowanym przez Zastępcę Przewodniczącego RDN IŚGiE, Pana dr hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa pt. „Data-Driven Insight into Ball Mill Scaling” została złożona w formie zwartego manuskryptu. Przedstawiona do oceny praca zawiera 247 stron, na które składa się 7 rozdziałów, bibliografia i 14 załączników. Spis literatury liczy 194 pozycje i nie obejmuje żadnej publikacji związanej z udziałem Autora rozprawy. Maszynopis zawiera 75 stron załączników szerzej prezentujących założenia i wyniki badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych. W pracy zamieszczono również wykaz rysunków i tabel oraz ważniejszych oznaczeń, co stanowiło ułatwienie czytania pracy. Prezentowane w rozprawie badania i wyniki powstały w latach 2019-2024 w ramach projektu finansowanego przez program Diamentowy Grant. Należy podkreślić, że Autor był laureatem konkursu.

2.1. Ocena zasadności wyboru problematyki badawczej i zakresu pracy

Mielenie w młynach kulowych stanowi ostatnie stadium rozdrabniania rudy w procesie przeróbki kopalin. Nadrzędnym celem mielenia nie jest redukcja uziarnienia surowca, lecz uwolnienie minerałów użytecznych w stopniu zapewniającym ich skuteczny odzysk w kolejnych stadiach wzbogacania. Wobec powyższego wymagania stawiane końcowej granulacji silnie zależą od granulacji minerałów użytecznych. Ponadto w praktyce uwzględnia się wykorzystywaną w zakładzie metodę wzbogacania oraz wartość handlową uzyskiwanego koncentratu. Proces mielenia jest najbardziej energochłonnym procesem przeróbczym i przy tym wysoce nieefektywnym energetycznie. Zasadniczo zmniejszanie wielkości ziaren przez młyn kulowy pochłania niewielką część wykorzystywanej energii. Większość energii tracona jest bezpowrotnie na wytworzenie ciepła i hałasu. Z tego względu kontrola procesu mielenia jest kluczowa z perspektywy osiągnięcia optymalnych wyników wzbogacania przy relatywnie niskiej energochłonności procesu. Kluczowe jest uzyskanie odpowiedniego uziarnienia zmielonej rudy przy jak najmniejszym wydatku energetycznym i zużyciu podzespołów młyna oraz stosunkowo krótkim czasie przebywania pojedynczego ziarna w młynie.

Pomimo dużej popularności młynów kulowych w zastosowaniach przemysłowych, podstawy mechaniki rozdrabniania nadal nie są wystarczająco zrozumiane. Prawdopodobnie wynika to z braku dostatecznego wyjaśnienia wpływu wszystkich czynników procesu mielenia, co w praktyce jest trudne z uwagi na złożoność zjawisk jakie towarzyszą temu procesowi. Mianowicie chaotyczny ruch ziaren i losowy charakter ich zderzeń, jak i właściwości mielonego materiału, który w trakcie ulega rozdrobnieniu, skutkują ciągłą zmianą układu sił i naprężeń w ziarnach. Zmienność ta pozostaje nadal trudna do wyznaczenia, co skutkuje niedokładnością charakterystyki mechanizmu rozdrabniania ziaren. Problematyka złożoności procesu rozdrabniania w młynach kulowych stała się w literaturze powszechnie znanym przedmiotem zarówno w obszarze analiz teoretycznych, jak również badań doświadczalnych. Z uwagi na wymiar zagadnienia, konieczne jest zastosowanie zaawansowanych modeli symulacyjnych sprzężonych z badaniami laboratoryjnymi oraz rejestracją parametrów operacyjnych procesu w czasie rzeczywistym. Z tego względu Doktorant poprawnie stwierdza, że do zrozumienia mechaniki rozdrabniania oraz czynników efektywności procesu mielenia niezbędne jest: (1) opracowanie odpowiedniego stanowiska laboratoryjnego, (2) budowa cyfrowego bliźniaka do badań symulacyjnych oraz jego integracja z obiektem laboratoryjnym, (3) przeprowadzenie testów dla różnych scenariuszy odwzorowujących różne uwarunkowania operacyjne i techniczne, (4) wykonanie wielowymiarowej oceny czynników wpływających na przebieg procesu mielenia do pozyskania wiedzy nt. praw rządzących procesem oraz efektywnego zarządzania operacyjnego młyna kulowego.

Jako cel badawczy pracy Doktorant przyjął uzyskanie szerszego spojrzenia na skalowanie laboratoryjnego młyna kulowego dla wybranych średnic młyna. Realizacja celu zakładała zbadanie wpływu parametrów operacyjnych na wydajność mielenia i efektywność energetyczną. Analizy złożonej dynamiki procesu, a także interakcji między mediami mielącymi, wnętrzem młyna i zawiesziną, zostały przeprowadzone poprzez połączenie zaawansowanych technik modelowania, takich jak metoda elementów dyskretnych (ang. Discrete Element Method, DEM) i wygładzona hydrodynamika cząstek (ang. Smooth Particle Hydrodynamics, SPH). Wykorzystanie symulacji DEM-SPH i metod eksperymentalnych pozwoliło uzyskać wiedzę na temat procesu skalowania młynów kulowych.

2.2. Ogólna charakterystyka pracy

Rozdział pierwszy pracy doktorskiej to wprowadzenie, w którym Autor zdefiniował problematykę badawczą, motywację pracy, cele badawcze oraz strukturę pracy.

Rozdział drugi stanowi przegląd literatury, w ramach którego na początku przedstawiono obiekt badań, tj. młyn kulowy, jego zasadę działania i kluczowe komponenty, mechanizm mielenia, wpływ parametrów operacyjnych na proces mielenia. W dalszej części omówiona została dynamika ruchu nadawy i medium mielącego z rozróżnieniem na mielenie na sucho i mokro. Osobną sekcję poświęcono również problematyce modelowania i symulowania pracy młyna kulowego oraz skalowania modelu. Przeprowadzony przegląd literatury pozwolił zdefiniować ograniczenia modeli według obecnego stanu wiedzy oraz określić luki badawcze. W dalszej części rozdziału Autor przedstawił powszechnie stosowane metody pomiarowe wykorzystywane w przedmiotowym zagadnieniu. W oparciu o przegląd literatury nakreślił dalsze kierunki badań oraz rekomendacje płynące z przytoczonej literatury.

Rozdział trzeci to opis podstaw teoretycznych wykorzystywanych w środowiskach numerycznych do symulacji procesu mielenia nadawy na sucho i na mokro. Przedmiotem modelowania w symulacjach procesu mielenia są zarówno kule, ruda, zawieszina, jak również komponenty młyna i jego parametry operacyjne. W rozdziale opisano czynniki wpływające

na proces poruszając kwestie dotyczące: jak zmiana wielkości ziaren w trakcie mielenia wpływa na lepkość zawiesiny oraz prędkość opadania i warunki tarcia między cząstkami; jak gęstość mielonej rudy wpływa na opory ruchu i przestrzenny rozkład cząstek w młynie; jak wielkość kul determinuje energochłonność procesu mielenia etc. W dalszej części rozdziału przedstawiono rozwinięcie równań wykorzystywanych w modelowaniu procesu mielenia w metodach SPH, DEM i DCDEM.

W rozdziale 4 zamieszczono główny cel badawczy oraz cele cząstkowe z ich szerszym opisem. Zaznaczono, że obecne stosowane podejście do projektowania młynów obciążone jest licznymi błędami, co w praktyce skutkuje tym, że osiągnięcie ich poprawnej wydajności wiąże się z nadmiernym zużyciem energii i zwiększonymi kosztami operacyjnymi. Zdaniem Doktoranta dzieje się tak, ponieważ w dalszym ciągu stosowane jest podejście oparte na wiedzy empirycznej i metodzie prób i błędów. Z tego powodu niezbędne jest zastosowanie bardziej wyrafinowanych metod, m.in. systematycznego i naukowego podejścia do gromadzenia i modelowania danych, które zapewnią uzyskanie skalowalności młynów ze skali laboratoryjnej do przemysłowej. Umożliwia to między innymi znaczący postęp w monitoringu procesów przemysłowych oraz modelowaniu obliczeniowym i technikach symulacyjnych, takich jak DEM i SPH. Umożliwiają one uzyskanie pełnego obrazu na temat interakcji między ziarnami rudy i zawiesiną oraz znaczącą redukcję liczby skomplikowanych eksperymentów. Zbadanie szczegółowych relacji i pozyskanie wiedzy na temat skalowania młynów kulowych za pośrednictwem technik modelowania i prac eksperymentalnych definiuje główny cel pracy.

Rozdział 5 to charakterystyka materiałów, metod oraz stanowiska laboratoryjnego wykorzystanych w badaniach nad skalowaniem młyna kulowego oraz opracowaniu stałej skalowania. W ramach pracy zostało zbudowane stanowisko laboratoryjne do prac eksperymentalnych, które stanowi młyn kulowy z wymiennymi bębnami o różnych średnicach. Warstwa sensoryczna stanowiska laboratoryjnego obejmuje czujniki poboru mocy, momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz szybką kamerę do rejestracji ruchu nadawy i medium mielącego. Jako nadawę wykorzystano rudę miedzi pochodzącą z różnych regionów KGHM PM SA, którą odpowiednio uśredniono. Przed wykonaniem badań właściwych nadawa została sparametryzowana. Metodologia eksperymentalna obejmowała ocenę rozkładu wielkości ziaren i czasu mielenia, a także identyfikację parametrów opisujących ruch nadawy podczas mielenia w dwóch wariantach. Przebieg procesu mielenia został poddany badaniom w oparciu o symulację DEM-SPH. Parametry modelu zostały skalibrowane w celu uzyskania maksymalnej spójności z rezultatami części eksperymentalnej. W oparciu o wyniki analizy korelacyjnej dokonano rozpoznania relacji między parametrami operacyjnymi młyna, a jego wskaźnikami wydajnościowymi, z uwzględnieniem różnych skali młyna. Analiza korelacji uwzględniała takie zmienne jak: średnica młyna, stopień wypełnienia nadawą, liczba żeber (progów wznoszących), wysokość żebra, gęstość zawiesiny, masa rudy, masa kul, prędkość obrotowa młyna, liczba kul w przeliczeniu na powierzchnię roboczą, stopień rozdrobnienia, zużycie energii, średni moment etc.

Dalej opracowano stałą skalowania zapewniającą odniesienie wyników ze skali laboratoryjnej do skali przemysłowej. Wykonano również kontrolowane eksperymenty i analizę statystyczną opartą na ANOVA ukierunkowane na testy skuteczności zdefiniowanej stałej skalowania. Ponadto niezależnie każda seria eksperymentów (dla różnych średnic młyna) obejmowała eksperymenty z projektowaniem doświadczeń (DoE) w celu określenia czynników wpływających na wydajność młyna z uwzględnieniem stopnia rozdrobnienia i poboru mocy.

Rozdział 6 obejmuje prezentację głównych wyników badań wraz z eksperymentalnym określeniem stałej skalowania młyna kulowego. Rozdział rozpoczyna kalibracja cyfrowego

bliźniaka, w tym: (1) pomiary eksperymentalne dynamicznego kąta usypu i profilu powierzchni zawiesiny w oparciu o nagrania wideo oraz (2) określenie zbieżności symulacji. Dla samych kul zdefiniowano optymalne parametry tarcia kinetycznego i restytucji redukując do minimum sumę kwadratów błędów (SSE) między kątami uzyskanymi z eksperymentów i symulacji. W przypadku mielenia na sucho w pierwszej kolejności przeprowadzono kalibrację opartą na wynikach symulacji przeprowadzonych dla samych kul. Następnie wyniki te porównano z kątami zmierzonymi z nagrań eksperymentów kalibracyjnych zarejestrowanych podczas mielenia na sucho. W mieleniu na mokro, aby uzyskać akceptowalny poziom dopasowania krzywych profili powierzchni zawiesiny pomiędzy badaniami eksperymentalnymi i symulacyjnymi, niezbędne było dostosowanie w modelu gęstości i lepkości zawiesiny do wartości rzeczywistych. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki uzyskane osobno dla mielenia na sucho oraz mielenia na mokro, opisując główne wnioski płynące z pomiarów sensorami, krzywej składu ziarnowego produktów mielenia, symulacji, nagrań wideo oraz analizy korelacji pomiędzy badanymi zmiennymi.

W przypadku mielenia na sucho, badania wykazały m.in., że większe średnice młynów pozwalają osiągnąć większy stopień rozdrobnienia nadawy. Największą efektywność podczas mielenia na sucho uzyskano dla młyna o średnicy 500 mm. Z uwagi na warunki operacyjne i parametry techniczne młyna uzyskane wyniki były niespójne w różnych skalach, co świadczy o słabym dopasowaniu stałej skalowania dla mielenia na sucho. W celu osiągnięcia lepszego stopnia rozdrobnienia produktu końcowego, kluczowe jest utrzymanie dominacji siły statycznej poprzez większą średnicę młyna, większą masę rudy i kul oraz większy stopień wypełnienia młyna nadawą i medium mielącym. Negatywny wpływ na dominację siły statycznej mają natomiast liczba kul na obszar roboczy, prędkość obrotowa młyna oraz wysokość żeber. Zwiększony moment obrotowy korelował z dominacją siły statycznej. Przyczyniał się do przewagi ruchu kaskadowego nad ruchem kataraktowym. Przy większym momencie obrotowym ładunek był bardziej skoncentrowany, a ramię momentu dłuższe. Dobrymi wskaźnikami opisującymi dynamikę ładunku w mieleniu na sucho mogą być takie parametry jak skośność i kurtoza liczone z sygnału momentu obrotowego.

Odnosnie mielenia na mokro, główny wniosek z prowadzonych badań wskazuje, że kluczowym czynnikiem efektywności procesu mielenia jest gęstość zawiesiny. Determinuje ona również koszty operacyjne. Im wyższa gęstość zawiesiny tym niższy średni moment obrotowy oraz stopień rozdrobnienia. Ponadto zwiększenie gęstości zawiesiny powoduje spadek stosunku sił we wszystkich skalach. Najdrobniejszą średnią wartość d_{80} i zarazem największy stopień rozdrobnienia nadawy, uzyskano dla młyna o średnicy 400 mm.

W obu wariantach mielenia badania wykazały skorelowanie stałej skalowania tylko z prędkością obrotową. Optymalny ruch ładunku można osiągnąć poprzez odpowiednią konfigurację takich parametrów jak: prędkość obrotowa młyna, stopień jego wypełnienia nadawą i medium mielącym oraz wysokość żeber w połączeniu ze średnicą młyna. Wzrost średnicy młyna przyczynia się również do zmiany charakteru ruchu ładunku z ruchu wirowego do kaskadowego. Dla wszystkich średnic młyna wykazano, że zwiększenie liczby żeber może pozytywnie wpłynąć na stabilizację ruchu ładunku.

Rozdział 7 systematyzuje wnioski uzyskane w rozdziale 6 oraz rozważania Autora na temat ograniczeń opracowanego cyfrowego bliźniaka, implikacje dla skalowania i optymalizacji młynów kulowych z nakreśleniem dalszych kierunków badawczych.

2.3. Ocena realizacji celu naukowego pracy

Rozprawa doktorska dotyczy złożonej problematyki badawczej, dla której zastosowano rozwiązania symulacyjne, walidowane następnie z badaniami eksperymentalnymi. Praca

została opracowana w uporządkowanym i logicznym układzie, co stanowczo jest dużą jej zaletą. Prezentowane założenia modelowe, część eksperymentalna oraz interpretacja wyników zapewniają rozpoznanie możliwości ich dalszej aplikacyjności. Aby osiągnąć wielowymiarowy obraz czynników wpływających na przebieg procesu mielenia, Doktorant postanowił przeprowadzić badania w mocno zróżnicowanych uwarunkowaniach technicznych i operacyjnych młyna.

Do osiągnięcia celów naukowych pracy niezbędne było, m.in.:

- Przygotowanie stanowiska laboratoryjnego do przeprowadzenia eksperymentów z możliwością rejestracji on-line parametrów operacyjnych młyna i obrazów wideo cyrkulacji nadawy i medium mielącego.
- Zdefiniowanie scenariuszy badań eksperymentalnych uwzględniających różne parametry techniczne i operacyjne młyna.
- Opracowanie technik przetwarzania obrazów do detekcji trajektorii ruchu materiału oraz jego dalszej klasyfikacji.
- Budowa procedur walidacji danych.
- Rozwój cyfrowego bliźniaka z wykorzystaniem symulacji DEM-SPH.
- Opracowanie metodologii kalibracji cyfrowego bliźniaka dla młyna laboratoryjnego.
- Budowa i ocena stałej skalowania – ilościowej miary zapewniającej skalowanie młyna kulowego bez wpływu na jego oczekiwaną wydajność.
- Wykonanie analizy wielowymiarowej z wykorzystaniem wyników w celu uzyskania informacji nt. dynamiki obciążenia i typów sił dominujących w młynie.
- Określenie korelacji między parametrami i metrykami dla różnych skali na potrzeby skalibrowania cyfrowego bliźniaka oraz zdefiniowania prawidłowości możliwych do wykorzystania w projektowaniu i eksploatacji młynów kulowych.
- Określenie przyszłych kierunków badań.

Doktorant postawił sobie trudne zadanie jakim jest zrozumienie mechaniki rozdrabniania, aby uzyskać szerszy obraz czynników wpływających na efektywność procesu mielenia i zrównoważoną pracę młyna. Zakładał podejście umożliwiające skalowalność rozwiązania do zastosowań przemysłowych. Problematyka ta stanowi aktualne wyzwanie zakładów przerobczych. Opracowanie tego typu środowisk obliczeniowo-inżynierskich czy symulacyjnych jest bardzo istotne z punktu widzenia kontroli i zarządzania operacyjnego procesem mielenia, jak również samego projektowania młynów kulowych. Na uwagę zasługuje również fakt, że celem postawionym przez Doktoranta było stworzenie modelu cyfrowego bliźniaka do przeprowadzenia obliczeń w relatywnie krótkim czasie. Uzyskanie efektywnego obliczeniowo modelu symulacyjnego dla tak złożonego procesu z pewnością jest dużym atutem tej pracy, dzięki któremu możliwe było przeprowadzenie szerszego zakresu testów eksperymentalnych.

Bardzo ciekawy element pracy stanowią wizualizacje ruchu masy materiału w młynie na podstawie obserwacji wideo i wyników symulacji. Doktorant zaproponował liczne wskaźniki i metryki, dzięki którym uzyskał obszerną charakterystykę procesu mielenia. W każdym z eksperymentów badał jak: wielkość młyna, liczba i rozmiar żeber, stopień wypełnienia, masa nadawy, masa kul, stosunek objętości kul do powierzchni roboczej, obciążenie, gęstość zawiesiny wpływają na takie parametry jak: moment obrotowy, rozkład sił, położenie i ruch materiału, stopień rozdrobnienia, zużycie energii. Doktorant dokonał wnikliwej analizy struktury korelacyjnej zbioru danych wynikowych z badań symulacyjnych, jak również eksperymentalnych dla różnych warunków eksploatacyjnych młyna. Znaczącym dokonaniem Doktoranta było wielokrotne potwierdzenie, że zidentyfikowane wzorce i prawidłowości nie tylko są zbieżne pomiędzy obiektem rzeczywistym a jego cyfrowym odzwierciedleniem,

ale również są potwierdzone w literaturze fachowej. Doktorant przedstawił kompleksowo złożoność i zmienność mechaniki rozdrabniania ziaren dla wariantu mielenia na sucho i mokro.

Istotnym osiągnięciem Doktoranta jest doświadczalne potwierdzenie skuteczności proponowanych w rozprawie rozwiązań w warunkach zbliżonych do zastosowań przemysłowych. Dodatkowo, w przypadku otrzymania wyników modelowania niespójnych z rzeczywistymi, Doktorant dokonał próby ich wyjaśnienia, wielokrotnie nakreślając dalsze kierunki badawcze.

2.4. Oryginalność pracy

Praca związana jest z opracowaniem oryginalnego i nowatorskiego podejścia do badania złożonego mechanizmu rozdrabniania ziaren w młynie kulowym na potrzeby optymalizacji procesu mielenia w skali przemysłowej. Autor zaproponował jedno z niewielu tego typu rozwiązań dających możliwość śledzenia przebiegu procesu mielenia w dwóch wariantach, z uwzględnieniem różnych parametrów operacyjnych. Opracował model cyfrowego bliźniaka odwzorowującego stanowisko laboratoryjne. Do tego celu wykorzystał metodę elementów dyskretnych i wygładzoną hydrodynamikę cząstek, które w sposób komplementarny pozwoliły zasymulować ruch załadunku i dynamikę zawiesiny w mieleniu na mokro. Jak wynika z rozprawy, na podstawie znanego rozmiaru młyna oraz stosowanego wariantu mielenia, możliwe jest zaproponowanie optymalnych parametrów technicznych i eksploatacyjnych w celu uzyskania pożądanego stopnia rozdrobnienia przy zrównoważonym wydatku energetycznym. Oryginalnym rozwiązaniem jest z pewnością zaproponowana stała skalowania umożliwiająca przeprowadzenie symulacji na młynach o różnej średnicy. Pomimo pewnych ograniczeń modelu, które jak wskazuje sam Autor wymuszają kontynuację badań w tym zakresie, rozwiązanie już dziś może znaleźć zainteresowanie pośród nie tylko eksploatatorów młynów kulowych, ale również ich producentów. Prezentowany w rozprawie cyfrowy bliźniak jest podejściem innowacyjnym w sektorze polskiego górnictwa oraz w innych gałęziach przemysłu, wszędzie tam gdzie młyny kulowe znajdują zastosowanie.

2.5. Uwagi szczegółowe

Jak wielokrotnie wspominam, Autor podjął się złożonej i trudnej problematyki. Zakres pracy stanowczo przekracza ramy pojedynczej rozprawy doktorskiej. Poniżej zestawiam moje uwagi, które w mojej ocenie nie są krytyczne, ale z pewnością mogą naprowadzić Doktoranta w prowadzeniu dalszych badań. Z pewnością wiele z tych uwag nie sposób było przewidzieć w momencie planowania prac, niektóre wynikają z ograniczeń stanowiska laboratoryjnego.

Struktura pracy jest poprawna i logiczna, mimo to w mojej ocenie treść poszczególnych rozdziałów mogłaby być rozłożona w sposób bardziej zrównoważony. Przykładowo, rozdział 1 ma 4 strony, rozdział 2 ma 21 stron, rozdział 3 ma 14 stron, rozdział 4 ma 2 strony, rozdział 5 ma 34 strony, rozdział 6 ma 54 strony, rozdział 7 ma 42 strony. Oczywiście takie różnice w wielkości rozdziałów są akceptowalne, natomiast w pewnych miejscach jasno widać, że Autor mógł wydzielić i lepiej rozłożyć przedstawiany materiał. W szczególności wskazują na to rozdziały 1 i 4, których opracowanie jako osobne rozdziały wydaje się przesadzone. Kilka rozdziałów nie utrzymuje podobnej struktury. Przykładowo, rozdział 1 przechodzi od razu w rozdział 1.1 (podobnie również rozdziały 3.2 i 3.2.1), podczas gdy pozostałe rozdziały mają dodany wstęp.

W pracy odnotowałem małą liczbę błędów edytorskich i językowych (głównie brak spacji lub kropki oraz kilka literówek). Wszystkie uwagi zawarłem w formie komentarzy do przekazanego mi pliku pdf w celu ich eliminacji przed ewentualnym drukiem rozprawy.

Rozdział 1.3 w mojej ocenie jest zbędny. Autor we wstępie do pracy wydzielił osobny podrozdział, w którym przedstawił strukturę pracy. Według mnie powinna ona zostać opisana w formie pojedynczego akapitu.

Przeprowadzony w rozdziale 2 przegląd literatury przedstawia zakres prac prowadzonych w obszarach: badanie mechanizmu rozdrabniania ziaren, optymalizacja procesu mielenia oraz rozwój monitoringu. Przyjęta forma opisu nie pozwala dokładnie stwierdzić czego dotyczyły poszczególne badania w cytowanych publikacjach, jak przebiegał rozwój nauki w danym obszarze. Ciężko więc czytelnikowi samodzielnie wnioskować o lukach badawczych oraz poprawności przyjętych celów naukowych bez samodzielnego przeglądu literatury. Doktorant zidentyfikował ograniczenia obecnego modelowania procesu oraz luki badawcze w poprawny sposób, które zawarł w osobnym podrozdziale, natomiast mankamentem tutaj jest to, że nie wszystkie z nich były przedmiotem badań poruszanych w rozprawie, co nie zostało wyraźnie zaznaczone. Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem byłoby podjęcie polemiki z pojedynczymi badaniami w odniesieniu do stanu wiedzy niż przedstawienie go w zgeneralizowanej postaci. W rozdziale 2, w sekcji 2.1 poświęconej charakterystyce pracy młyna zabrakło opisu przebiegu i wydajności procesu mielenia w warunkach zakładu przerobczego. Brakowało również jasnego sprecyzowania potencjału optymalizacyjnego i jego skali oraz przejrzystego określenia aktualnych potrzeb przemysłu. Ponieważ młyn kulowy stanowi wysoce nieefektywny energetycznie oraz najbardziej energochłonny obiekt techniczny, a z drugiej strony postrzegany jest jako wąskie gardło zakładu przerobczego, wyjaśnienie skali problemu z pewnością bardziej podkreśliłyby użyteczność rozwiązania proponowanego w rozprawie. Ponadto w rozdziale 2 występują nadmiar duplikujących się treści o tym samym znaczeniu, nie wnoszących nic nowego do rozważanej problematyki. Rysunek 2.4 nie zawiera opisanych elementów. Na rysunku przedstawiono rozkład sił oddziałujących na kulę w najwyższym punkcie młyna podczas wirowania. Pomimo wykorzystania potocznie przyjętych oznaczeń, powinny one zostać opisane.

W rozdziale 3 w paragrafie „Verlet time integration scheme” brakuje numeracji prezentowanych równań.

Cel pracy oraz przyjęta metodyka badań zostały sformułowane poprawnie, jednak wydaje mi się, że lepszym wariantem byłoby przedstawienie celu jako zbadanie procesu mielenia pod kątem „uzyskania ilościowych miar do procesu skalowania młyna i jego optymalizacji”, niż określenie celu jako „dostarczenie dodatkowych informacji” czy „uzyskanie wglądu”. Inaczej można przypuszczać, że celem tej pracy było przeprowadzenie badań.

W sekcji 5.6 prezentującej metodykę analizy danych z warstwy akwizycji kolejność opisywanych procesów jest nie do końca poprawna. W mojej opinii w pierwszej kolejności powinien być zawarty opis jakie sygnały zostały zarejestrowane (5.6.3), w drugiej jakie były procedury ich walidacji (5.6.1), a dopiero potem powinno zostać przedstawione to, co z nich było kalkulowane (5.6.2).

Sekcje 5.11 i 6.7 stanowiące podsumowanie rozdziału, w mojej ocenie są zbędne. Ich treść mogłaby być podana na początku rozdziałów 5 i 6 jako wstęp do nich, tak by uniknąć niekonsekwencji w strukturze pozostałych rozdziałów.

Autor używa metody DEM-SPH do symulacji zachowania nadawy młyna. W celu dopasowania parametrów modelu wyniki jego symulacji zostały zestawione z wynikami eksperymentów kalibracyjnych w oparciu o analizę wideo. Dla różnych scenariuszy eksperymentów

wykorzystano różne metody przetwarzania obrazów wideo. W przypadku symulacji pracy pustego młyna użyto gotowy model sztucznej inteligencji udostępniony przez jednego z liderów branży technologicznej. Dla mielenia na sucho wykorzystano klasyczne podejście do przetwarzania obrazów oparte na progowaniu i binaryzacji obrazu. Z kolei w przypadku mielenia na mokro segmentację przeprowadzono ręcznie. Każda z metod jest dokładnie opisana, jednak uzasadnienie wyboru poszczególnych metod dla różnych scenariuszy jest powierzchowne. Dla metod automatycznych brakuje analizy dokładności. Długość eksperymentów kalibracyjnych może budzić niepokój. Autor podaje, że w związku z ograniczoną widocznością zawartości młyna, kalibracja trwała jedynie 60 sekund, natomiast eksperymenty właściwe trwały 1800 sekund. Dobrym uzupełnieniem byłoby zatem teoretyczne uzasadnienie albo eksperymentalna weryfikacja założenia, że wyznaczone na podstawie eksperymentów kalibracyjnych parametry modelu symulacyjnego są poprawne dla całej długości eksperymentów właściwych.

Analiza wpływu obciążenia na parametry mielenia została obarczona niewielkimi błędami. Autor założył przeprowadzenie badań dla dwóch wartości obciążeń (małych i dużych) zadawanych za pomocą prędkości obrotowej młyna. Badania zostały przeprowadzone osobno dla młynów o średnicy 300, 400 i 500 mm i uwzględniły przeskalowanie obciążenia tych przedziałów odpowiednio z założeniem 90% i 110% wartości prędkości referencyjnej dla danej skali, odpowiednio dla niższych i wyższych przedziałów rpm. Jak wskazuje praca, rzeczywiste wartości prędkości obrotowej uwzględnione w eksperymencie były nieco wyższe od uwzględnionych w symulacjach (mielenie na sucho), co jest powodem aktualnego rozwiązania konstrukcyjnego młyna. Zdaniem Autora była to główna przyczyna rozbieżności wyników otrzymanych symulacji z wynikami eksperymentów. 6 na 24 przypadków zostało nieodpowiednio zamodelowanych. Spowodowało to m.in. obserwacje wirowania zamiast kataraktowania czy kataraktowania zamiast kaskadowania. Dalsze badania mogłyby więc zostać ukierunkowane na poprawę parametrów konstrukcyjnych młyna eliminującą te błędy. Proces skalowania nie uwzględnił zmiany gęstości zawiesiny, z uwagi że zawiesiny o większej gęstości w dużym stopniu przylegały do przezroczystej ściany młyna utrudniając przez to obserwacje procesu. Z tego względu dla wszystkich skali młynów Autor założył stałą wartość gęstości na poziomie 1400 kg/m^3 . To kolejny czynnik, od którego mocno zależy ruch ziaren w młynie, który mógłby zostać dokładniej sprecyzowany w przyszłych badaniach.

W mojej ocenie dobrym uzupełnieniem badań byłoby również przeprowadzenie w przyszłości analizy sygnałów w perspektywie innej niż czas. Analizując sygnały z urządzenia rotacyjnego, w praktyce przeprowadza się również sprawdzenie struktury częstotliwościowej. Szczególnie dotyczy to danych gestopróbkowanych. Autor co prawda obliczył szereg statystyk ze sygnałów, ale wszystkie były obliczone w dziedzinie czasu.

Prezentowane wyniki analizy struktury korelacyjnej zostały szeroko opisane dla każdego badanego parametru osobno w rozdziale 6 poświęconym opisowi wyników badań, jak również w rozdziale 7 dotyczącym podsumowania rozprawy. Oba rozdziały liczą łącznie 80 stron maszynopisu. Z uwagi na liczbę badanych parametrów i scenariuszy testów czytanie wyników analiz widocznych w tabeli momentami było przytłaczające i uciążliwe przy ich weryfikacji. Należy zaznaczyć, że Autor osobno dla każdej sekcji zamieszczał dodatkowo podsumowanie najistotniejszych wniosków, mimo to ta część pracy mogła zostać opisana w sposób bardziej zwięzły. Ponadto nie było konieczne przedstawianie wniosków powszechnie znanych, zwłaszcza, że Autor wymienił je już wcześniej podczas oceny stanu wiedzy. Wykresy korelacji mogłyby być również oczyszczone z oczywistych związków. Autor zdecydował się przeprowadzić dość znaczące czyszczenie wykresów korelacji, poprzez ukrycie wszystkich wartości znajdujących się w przedziale $(-0.4 \leq x \leq 0.4)$. Można to kwestionować, ale taka była jego decyzja. Niemniej jednak, skoro już w dość znaczącym stopniu wyczyścił ten wykres,

mógł również ukryć oczywiste (idealne) korelacje wynikające ze związków pomiędzy zmiennymi, takie jak np. zmierzona prędkość rpm i ustawiona prędkość rpm.

Kwestia oceny efektywności energetycznej procesu mielenia momentami była przedstawiona w zbyt marginalnym stopniu. Prezentowane wnioski bazują na poborze mocy i mówią jedynie w sposób zero-jedynkowy czy zużycie energii dla danego scenariusza eksperymentu było wyższe czy niższe. W przyszłych badaniach dobrym rozwiązaniem mogłoby być zaproponowanie ilościowej miary pozwalającej zbiorczo ocenić wydatek energetyczny np. za pomocą tabeli krzyżowej. Z pewnością wartością dodaną byłoby oszacowanie strat energetycznych dla różnych scenariuszy prowadzonych badań. Jak wiadomo większa część energii tracona jest na wytworzenie ciepła i hałasu. Uwzględnienie tych pomiarów na stanowisku laboratoryjnym byłoby dobrym uzupełnieniem w tym zakresie. Również porównanie efektywności poszczególnych wyników pod kątem produktu końcowego i wydatku energetycznego mogłoby dać lepszy wgląd na uzyskane wyniki.

Nie miałym przesadzeniem jest stwierdzenie, że badania prowadzone w ramach rozprawy skupiają się na skalowaniu procesu mielenia w młynach kulowych ze skali laboratoryjnej do przemysłowej, bez porównania (nawet częściowego) parametrów mielenia tej samej nadawy w warunkach przemysłowych. Badania nie uwzględniały również analizy parametrów mielenia w funkcji czasu, ale wykorzystując stopień rozdrobnienia można uzyskać pewne odniesienie do tego parametru.

Prezentowane w pracy rekomendacje dla dalszych badań momentami wydają się być podane w zdawkowej formie. Autor nie wskazał w kilku miejscach w jaki sposób należałoby powtórzyć badania, w jaki sprzęt doposażyć stanowisko oraz jakie kompetencje są potrzebne do rozwiązania danego problemu.

2.6. Pozostałe uwagi

W słowniku pojęć zabrakło wyjaśnień dla: pool, dynamic angle of repose, coefficients of restitution, coefficients of friction.

Pojęcie tumbling mill (młyn bębnowy) pojawia się po raz pierwszy na stronie 146, wcześniej używane jest pojęcie ball mill (młyn kulowy).

Dyskusyjne jest stwierdzenie (str. 21), że doświadczeni operatorzy potrafią wykryć nieprawidłowości w pracy młyna poprzez odczuwanie wibracji na jego obudowie. Wiele lepszym sformułowaniem byłoby „za pomocą subiektywnych wrażeń uzyskanych za pośrednictwem zmysłów.”

Pozycje w spisie literatury prowadzone są alfabetycznie, jednak nie są ujednolicone. Poza tym, gdy w tekście w pojedynczym nawiasie kwadratowym cytowanych jest kilka prac nie są one cytowane rosnąco, a losowo. Doktorant wielokrotnie cytował w dłuższym fragmencie tekstu to samo cytowanie w każdym kolejnym zdaniu osobno, co uważam, że było przesadzone.

3. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa porusza nadal nierozpoznaną całkowicie problematykę badawczą związaną z mechanizmem rozbijania ziaren w młynie kulowym, ukierunkowaną na rozpoznanie czynników efektywności procesu mielenia oraz możliwość skalowania. Zbudowane stanowisko laboratoryjne, opracowany cyfrowy bliźniak z modelami symulacyjnymi stworzyły możliwość wykonania unikatowych badań doświadczalnych, jak również kompleksowych

analiz. Uzyskane wyniki dały wielowymiarowy wgląd na przebieg procesu mielenia dostarczając wiedzy, która znacznie poszerzyła obecny stan wiedzy w badanym zagadnieniu. Należy podkreślić, że wnioski płynące z przeprowadzonych badań wyjaśniają wiele kwestii i pytań stawianych aktualnie przez eksploatatorów i producentów młynów. Doktorant skupił się na rozwijaniu modeli symulacyjnych według rekomendacji płynących z najnowszej literatury fachowej dostarczając narzędzi, które mogą mieć jeszcze większe przełożenie na praktykę. Wobec powyższego oceniam rozprawę bardzo wysoko.

4. Wniosek końcowy

Uwzględniając wszystkie istotne aspekty pracy, tj. dobranie zagadnień teoretycznych, udokumentowane badania potwierdzone eksperymentalnie oraz osiągnięte praktyczne cele rozprawy, bardzo pozytywnie oceniam jej wartość naukową i poznawczą. W mojej ocenie Doktorant rozwiązał aktualny i ważny problem z zakresu dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. **Wobec powyższego, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska inż. Błażeja Doroszuka spełnia wymogi** stawiane w obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742). Z tego względu wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżyniera Środowiska, Górnictwo i Energetyka o przyjęcie i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Doktorant swobodnie porusza się w zagadnieniach w podjętym obszarze badań. Wartym podkreślenia jest fakt znacznego i twórczego zaangażowania Autora w prowadzone prace badawcze. Proponowana koncepcja badań jest niewątpliwie oryginalna, a osiągnięte wyniki mają ważne znaczenie naukowe. Opracowane stanowisko laboratoryjne wraz z jego modelem cyfrowego bliźniaka stanowią użyteczne narzędzie do prowadzenia badań w zakresie modelowania mechaniki rozdrabniania ziaren w młynie kulowym oraz daje możliwość dalszego rozwoju metod optymalizacji procesu mielenia czy parametrów technicznych młyna. Pozyskany zbiór danych stanowi interesujący materiał naukowy. Z uwagi na kompleksowe podejście do badań, Autor stworzył dość szeroki obszar do dalszego rozwoju nauki w danej problematyce. Z tego względu wnioskuję również o wyróżnienie pracy.

