

prof. Bolesław Karwat

AGH University of Science And Technology,
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
karwat@agh.edu.pl

mgr inż. Piotr Rubacha

AGH University of Science And Technology,
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
prubacha@agh.edu.pl

dr inż. Emil Stańczyk

AGH University of Science And Technology,
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
stanczykemil@gmail.com

**Symulacyjne i eksperymentalne wyznaczanie parametrów eksploatacyjnych
przenośnika ślimakowego.**

Słowa kluczowe: Przenośnik ślimakowy, Metoda Elementów Dyskretnych, materiały sypkie, charakterystyki eksploatacyjne

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę projektowania przenośników ślimakowych w aspekcie wyznaczenia parametrów eksploatacyjnych urządzenia z użyciem Metody Elementów Dyskretnych (DEM). Badania symulacyjne wpływu wybranych parametrów modelu materiałowego DEM pozwoliły określić kluczowe czynniki, takie jak: rozmiar cząstki DEM, wartość współczynnika tarcia wewnętrznego oraz zewnętrznego, czynniki które determinują wyniki charakterystyk pracy przenośnika ślimakowego. Badania eksperymentalne przeprowadzone przy użyciu laboratoryjnego przenośnika ślimakowego dostarczyły rzeczywiste charakterystyki eksploatacyjne urządzenia transportującego mączkę wapienną. W metodzie DEM zamodelowano stanowisko badawcze celem wyznaczenia analogicznych charakterystyk pracy. Porównanie wyników symulacji oraz badań eksperymentalnych określających parametry eksploatacyjne przenośnika dało satysfakcjonujące rezultaty. Dlatego symulacje DEM mogą być skutecznie wykorzystywane do wyznaczania i optymalizacji parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych przenośników ślimakowych.

Podsumowanie:

- Wpływ parametrów modelu DEM na wyniki symulacji transportu materiału sypkiego w przenośniku ślimakowym.
- Wyznaczanie charakterystyk pracy przenośnika ślimakowego za pomocą metody DEM.
- Duża zgodność wyników symulacyjnych i eksperymentalnych w aspekcie parametrów eksploatacyjnych przenośnika ślimakowego.

1. Wstęp

Przenośniki ślimakowe pracują jako samodzielne urządzenia transportowe lub stanowią wyposażenie linii technologicznych między innymi w zakładach przemysłu wapienniczego, cementowego, energetycznego, spożywczego i rolniczego. Zaletą przenośników ślimakowych

jest prosta budowa oraz łatwość dostrajania wydajności urządzenia do wymaganych potrzeb. Niestety, zachowanie się materiałów sypkich w czasie transportu przenośnikiem ślimakowym jest procesem skomplikowanym, zależnym od wielu czynników, takich jak: prędkość obrotowa ślimaka, stopień napełnienia czy własności fizyczne transportowanego materiału. Aktualne metody projektowania przenośników ślimakowych bazują na algorytmie uwzględniającym wymiary charakterystyczne ślimaka, prędkość obrotową wału, gęstość nasypową oraz empiryczne współczynniki charakterystyczne dla danego materiału sypkiego [15,19]. O ile w przypadku standardowych materiałów sypkich takich jak wapno czy cement metody te pozwalają na zaprojektowanie poprawnie funkcjonujących przenośników, o tyle w przypadku materiałów charakteryzujących się pewnymi szczególnymi własnościami, takimi jak: wysoką ścieralnością, tendencją do rozdrabniania czy też wysokim stopniem kohezji, tradycyjna metoda projektowania przenośników ślimakowych nie spełnia oczekiwań konstruktorów. Przekłada się to zazwyczaj na przewymiarowanie urządzenia oraz trudności w osiągnięciu wymaganej wydajności. Dlatego też dokładna identyfikacja własności fizycznych transportowanego materiału sypkiego jest bardzo istotna przy projektowaniu tego typu urządzeń. Co więcej, jak przedstawiono w pracy [18], wydajność przenośnika ślimakowego jest mocno skorelowana z własnościami transportowanego materiału sypkiego. Wobec tego, inżynierowie zajmujący się projektowaniem przenośników ślimakowych opierają się wielokrotnie na swoich dotychczasowych doświadczeniach projektowych i eksploatacyjnych [2].

Obecnie, dysponując odpowiednimi narzędziami symulacyjnymi, pozwalającymi na badanie zachowania się materiału sypkiego w czasie transportu przenośnikiem ślimakowym, projektant jest w stanie dobrać właściwe cechy geometryczne i eksploatacyjne przenośnika. W przypadku symulacji zachowania się materiałów sypkich powszechnie używa się Metody Elementów Dyskretnych (ang. DEM-Discrete Element Method). Wykorzystując narzędzia komputerowe implementujące tę metodę, projektant jest w stanie wyznaczyć parametry pracy projektowanego przenośnika (wydajność masową oraz zapotrzebowanie na moc). Jednakże, w celu uzyskania wiarygodnego odzwierciedlenia zachowania się materiału sypkiego w trakcie transportu w przenośniku ślimakowym i w konsekwencji wiarygodnych wyników symulacji, niezbędne jest dokładne określenie parametrów opisujących model materiałowy DEM na podstawie rzeczywistych własności fizycznych transportowanego materiału sypkiego.

Od wielu lat przenośniki ślimakowe są przedmiotem badań symulacyjnych wykorzystujących metodę DEM. Szereg dotychczasowych prac dotyczyło weryfikacji modelu symulacyjnego pod kątem wydajności przenośnika. W pracy [11] autorzy wykazali dużą zgodność wyników wydajności masowej pomiędzy symulacjami DEM oraz badaniami eksperymentalnymi przenośnika ślimakowego typu OLDS (szczególnych przypadków przenośnika ślimakowego, w którym obudowa przenośnika wykonuje ruch obrotowy wokół nieruchomego ślimaka, powodując w ten sposób osiowe przemieszczanie strugi materiału). W artykule [13] przedstawiono z kolei wyniki badań laboratoryjnych, symulacyjnych oraz teoretyczne obliczenia określające wydajność masową przenośnika ślimakowego w zależności od prędkości obrotowej i kąta nachylenia przenośnika. Badania symulacyjne wykazały, że analizy DEM dają dużą zgodność wyników z rzeczywistością w przypadku przenośników transportujących materiał poziomo i pionowo. W przypadku pośrednich kątów nachylenia przenośnika, symulacje DEM zaniżają wydajność masową w odniesieniu do wydajności zmierzonych na stanowisku laboratoryjnym. Natomiast, wyniki teoretyczne, mocno zawyżały szacowaną wydajność masową w odniesieniu do rzeczywistości. Badania symulacyjne zaprezentowane w pracy [10] wykazały, że wzrost stopnia napełnienia koryta oraz wzrost prędkości obrotowej ślimaka powodował wzrost wydajności objętościowej przenośnika. W pracy [14] autorzy poddali badaniom symulacyjnym kilka wariantów

przenośników ślimakowych różniących się pod względem geometrii (ślimak o stałej średnicy zewnętrznej wału i piór, a także stałej podziałce, ślimak o zmiennej średnicy zewnętrznej, ślimak o zmiennym skoku, ślimak osadzony na wale o zmiennej średnicy zewnętrznej). Badania symulacyjne oraz eksperymentalne dały dużą zbieżność wyników wydajności masowej dla wszystkich rozpatrywanych wariantów, oprócz ślimaka o zmiennej podziałce, dla którego symulowana wydajność masowa była zaniżona o 24%. Rozbieżność tą uzasadniono zbyt dużymi cząstkami DEM użytymi w symulacji w odniesieniu do długości skoku ślimaka. Badania symulacyjne przenośników ślimakowych prowadzono także pod kątem analizy wpływu parametrów wejściowych modelu DEM na wyniki symulacji. W pracy [11] przebadano wpływ wartości współczynnika tarcia zewnętrznego oraz współczynnika restytucji na wyniki symulacji DEM w aspekcie wydajności masowej oraz zapotrzebowania na moc przenośnika ślimakowego. Badania wykazały, że wzrost współczynnika tarcia powodował spadek wydajności masowej oraz wzrost zapotrzebowania na moc. Natomiast, wartość współczynnika restytucji miała marginalny wpływ na wyniki symulacji. Podobną relację pomiędzy wartością współczynnika tarcia zewnętrznego a wydajnością objętościową przenośnika zaobserwowano w pracy [10]. Wpływ promienia cząstki DEM na wyniki symulacji został przeanalizowany w pracy [14]. Zaobserwowano, że wydajność spada wraz ze wzrostem promienia użytej cząstki DEM. Z drugiej jednak strony, dla promienia mniejszego od 0.8 mm wydajność masowa była niezależna od rozmiaru cząstki DEM.

Dotychczasowe badania wykazały, że symulacje transportu materiału sypkiego w przenośniku ślimakowym wykorzystujące metodę DEM dają zgodne rezultaty z rzeczywistością. Jednakże aktualny stan wiedzy w sposób minimalny skupia się na oszacowaniu zapotrzebowania na moc przenośnika ślimakowego. Poprawne określenie mocy i wydajności pozwala na wyznaczenie charakterystyk eksploatacyjnych przenośnika, dzięki którym możliwe jest dobranie właściwych parametrów pracy urządzenia w aspekcie redukcji energochłonności i zapewniania efektywności transportu.

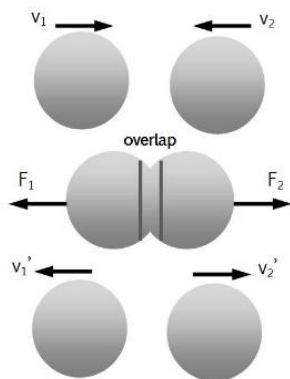
Autorzy słusznie zauważyli także, że wyniki symulacji są mocno zdeterminowane wartościami parametrów wejściowych modelu DEM, takimi jak: promień cząstki DEM czy wartość współczynnika tarcia zewnętrznego. Brakuje natomiast wiedzy, na temat wpływu pozostałych parametrów opisujących model DEM, takich jak: współczynnik tarcia wewnętrznego, czy opory toczenia cząstek DEM na wyniki symulacji. Ze względu na fakt, że przenośniki mogą pracować dla różnych prędkości obrotowych ślimaka oraz dla różnych stopni wypełnienia koryta, zasadne wydaje się sprawdzenie wpływu parametrów DEM na wyniki symulacji w aspekcie warunków pracy urządzenia.

W niniejszym artykule kompleksowo przedstawiono wpływ parametrów modelu materiałowego DEM w zależności od stopnia napełniania koryta i prędkości obrotowej ślimaka na wyniki parametrów eksploatacyjnych. Wyniki analizy dostarczają informacji na temat ilościowego i jakościowego wpływu poszczególnych parametrów modelu DEM na wyniki symulacji w aspekcie wyznaczenia wydajności masowej oraz zapotrzebowania na moc. Wiedza ta pozwala na właściwe zdefiniowanie modelu numerycznego DEM, pozwalającego na symulowanie transportu materiału sypkiego oraz wyznaczenie odpowiednich parametrów geometrycznych oraz eksploatacyjnych przenośnika ślimakowego w celu efektywnego zrealizowania zadania transportowego pod kątem energochłonności, redukcji masy urządzenia czy zmniejszenia zużycia ściernego piór ślimaka. Dodatkowo przedstawiono porównanie wyników eksperymentalnych oraz symulacyjnych, określających charakterystyki eksploatacyjne przenośnika ślimakowego.

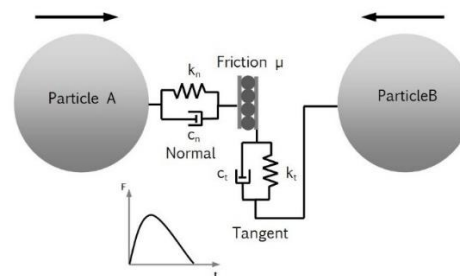
2. Opis metody DEM

Ciągły rozwój komputerowych metod symulacyjnych (ang. CAE – Computer Aided Engineering) sprawił, że stały się one obecnie znaczącymi narzędziami wykorzystywanymi zarówno w prowadzeniu badań naukowych, jak i również wspomagającymi prace konstruktorskie i projektowe. Wysokie moce obliczeniowe komputerów oraz powszechność programów obliczeniowych implementujących rozbudowane metody numeryczne sprawiają, że skomplikowane zjawiska fizyczne modelowane są z jednej strony z dużą łatwością, a z drugiej z niebywałą dokładnością w odniesieniu do rzeczywistości. Stąd też, za pomocą symulacji komputerowych możliwe jest szybkie zweryfikowanie i porównanie wielu koncepcji konstrukcyjnych bez konieczności budowania i testowania drogich prototypów. Z ogromnym sukcesem w mechanice ośrodków ciągłych wykorzystywana jest Metoda Elementów Skończonych (ang. FEM-Finite Element Method) [3,12], w mechanice płynów metoda CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) [21]. W przypadku symulacji zachowania materiałów ziarnistych opracowano Metodę Elementów Dyskretnych (DEM-Discrete Element Method) [17]. U jej podstaw teoretycznych leży założenie, że modelowany materiał traktowany jest jako zbiór pojedynczych cząstek wchodzących ze sobą w wielokrotne interakcje. Istotą metody DEM jest algorytm opierający się na mechanice kontaktu, dzięki której poprzez odpowiednie modele kontaktowe obliczane są siły działające na poszczególne cząstki. Na podstawie równań ruchu Newtona wyliczane są przyspieszenia cząstek, następnie poprzez całkowanie równań ruchu wyznaczone są prędkości oraz współrzędne położenia cząstek DEM w danej chwili czasowej [22]. Z założenia, modelowane bryły (ziarna) są bryłami sztywnymi. Jednak metoda DEM zakłada deformacje cząstek podczas kolizji poprzez wyliczanie głębokości wzajemnej penetracji cząstek, przy założeniu, że kształt brył pozostaje niezmienny (rys. 1a).

a)



b)



Rys. 1 a) Kolizja sztywnych cząstek, gdzie: v_1, v_2 – prędkości cząstek przed zderzeniem, F_1, F_2 – siły wynikające ze zderzenia cząstek, v_1', v_2' – prędkości cząstek po zderzeniu

b) Model kontaktowy dwóch cząstek w czasie kolizji, gdzie: k_n – moduł sztywności w kierunku normalnym do płaszczyzny styku dwóch cząstek, k_t – moduł sztywności w kierunku stycznym do płaszczyzny styku dwóch cząstek, c_n – współczynnik tłumienia wiskotycznego działającego w kierunku normalnym do płaszczyzny styku dwóch cząstek, c_t – współczynnik tłumienia wiskotycznego działającego w kierunku normalnym do płaszczyzny styku dwóch cząstek, μ – współczynnik tarcia Coulomba

Zadaniem modelu kontaktowego jest powiązanie głębokości penetracji (obliczanej w kierunku normalnym i stycznym do kierunku ruchu zderzających się cząstek) z wartością siły kontaktowej.

Na rysunku 1b przedstawiono model kontaktowy dwóch cząstek w czasie kolizji. Różnorodność opracowanych modeli kontaktowych oferuje możliwość modelowania wielu

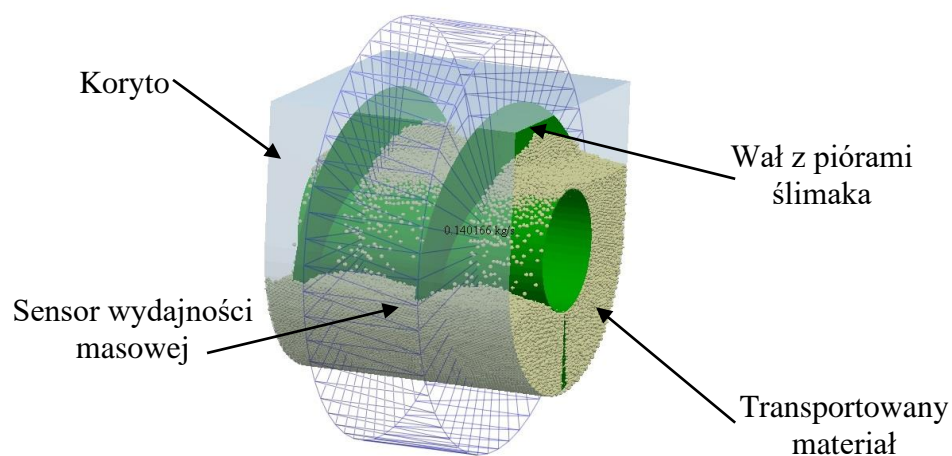
interakcji międzycząsteczkowych, tj. model oddziaływania z tarcieniem bez kohezji, model oddziaływania kontaktowego z odpornością na rozciąganie (z kohezją).

Na zachowanie badanego ośrodka sypkiego składającego się z dużej liczby cząstek DEM mają wpływ zarówno parametry poszczególnych cząstek (rozmiar, kształt, gęstość), jak i również parametry kontaktowe (współczynniki tarcia, opory toczenia, współczynnik restytucji) [1,4,6]. Podstawowym kształtem cząstki DEM jest sfera, jednak rzeczywiste ziarna lub bryły materiału rozdrobnionego rzadko przybierają idealny, kulisty kształt. Wobec tego metoda DEM umożliwia tworzenie skomplikowanych kształtów w wyniku trwałego scalenia sferycznych cząstek w niepodzielne bryły. Niestety, niesie to jednak konsekwencje związane z intensywnym wzrostem czasu obliczeń. Dlatego istotne jest znalezienie kompromisu pomiędzy rzeczywistym kształtem i rozmiarem brył, a tym reprezentowanym w metodzie DEM [16]. Aby odzwierciedlić realne zachowanie się materiału w symulacjach DEM, należy poddać kalibracji parametry wejściowe modelu (tj. współczynniki tarcia, gęstość itp.) na podstawie rzeczywistych własności fizycznych materiału sypkiego [4,6,9].

3. Wpływ parametrów wejściowych modelu DEM na parametry eksploatacyjne przenośnika ślimakowego

Wartości przyjętych parametrów wejściowych modelu DEM, tj.: rozmiary cząstek, wartości współczynników tarcia zewnętrznego i wewnętrznego, współczynników restytucji czy oporów toczenia, determinują zachowanie się modelu materiału sypkiego, jak pokazano w licznych publikacjach [5,7,8,20]. Dlatego bardzo ważne jest poprawne zdefiniowanie modelu materiałowego DEM w symulacji transportu materiału sypkiego przenośnikiem ślimakowym. W praktyce inżynierskiej często zdarza się, że dane określające własności fizyczne materiału są niekompletne. Dlatego, powszechnie stosowanym podejściem jest założenie brakujących własności w sposób arbitralny.

W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych parametrów wejściowych modelu DEM na wartości wydajności masowej i zapotrzebowania mocy przez przenośnik ślimakowy. Na potrzeby badań symulacyjnych zamodelowano fragment przenośnika ślimakowego o następujących wymiarach: średnica zewnętrzna pióra ślimaka $D_{zew} = 160$ mm, średnica wału $D_{wew} = 70$ mm oraz skok piór ślimaka $s = 75$ mm. Długość całkowita modelu przenośnika wynosiła $l = 150$ mm, co odpowiadało podwójnej wartości skoku ślimaka. W celu zapewnienia ciągłości przepływu strugi materiału w modelu użyto tzw. okresowego warunku brzegowego (ang. periodic boundary) co przedstawiono na rysunku 2.

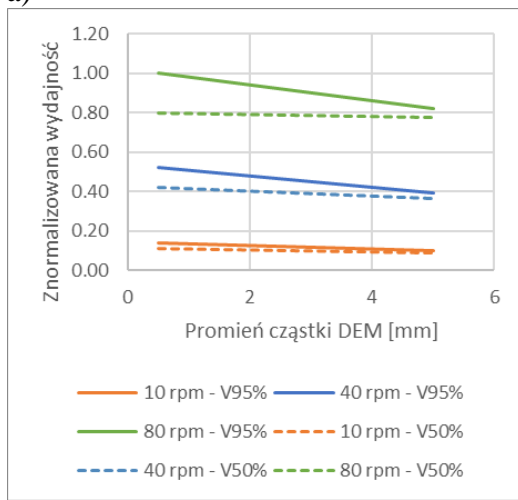


Rys. 2. Widok przedstawiający fragment przenośnika ślimakowego.

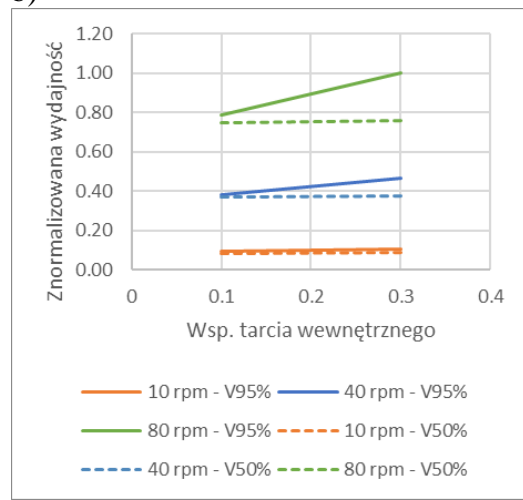
Na potrzeby prowadzonych badań symulacyjnych przyjęto dwa współczynniki napełnienia koryta przenośnika – 50% oraz 95%. Założono również jednorodny rozmiar cząstek DEM o sferycznym kształcie. Symulacje transportu materiału w przenośniku ślimakowym były przeprowadzone dla trzech różnych prędkości obrotowych wału ślimaka, tj.: 10, 40 i 80 obr./min. Czas symulacji dla każdej z prędkości obrotowych był tak dobrany, aby ślimak był w stanie wykonać minimum 3 pełne obroty, co zapewniało ustabilizowanie się przemieszczającej strugi materiału. Do badań wykorzystano komercyjny pakiet EDEM 2019.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wyniki analizy wpływu wybranych parametrów wejściowych modelu DEM na wydajność masową oraz moc przenośnika potrzebną do przetransportowania materiału. W celu łatwiejszej interpretacji różnic pomiędzy wynikami posłużono się wartościami znormalizowanymi dla poszczególnych wielkości.

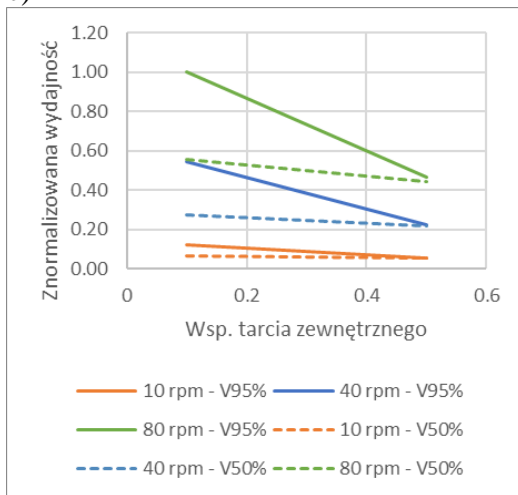
a)



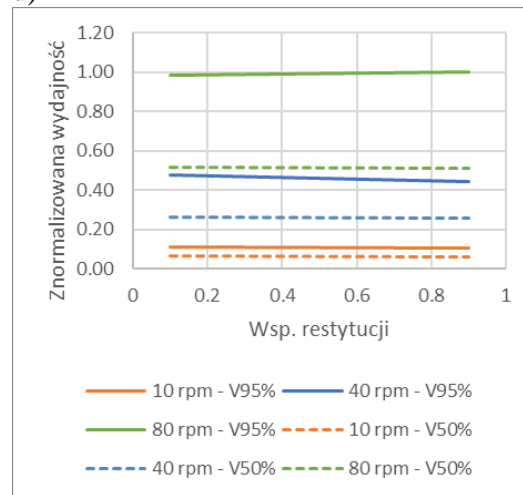
b)

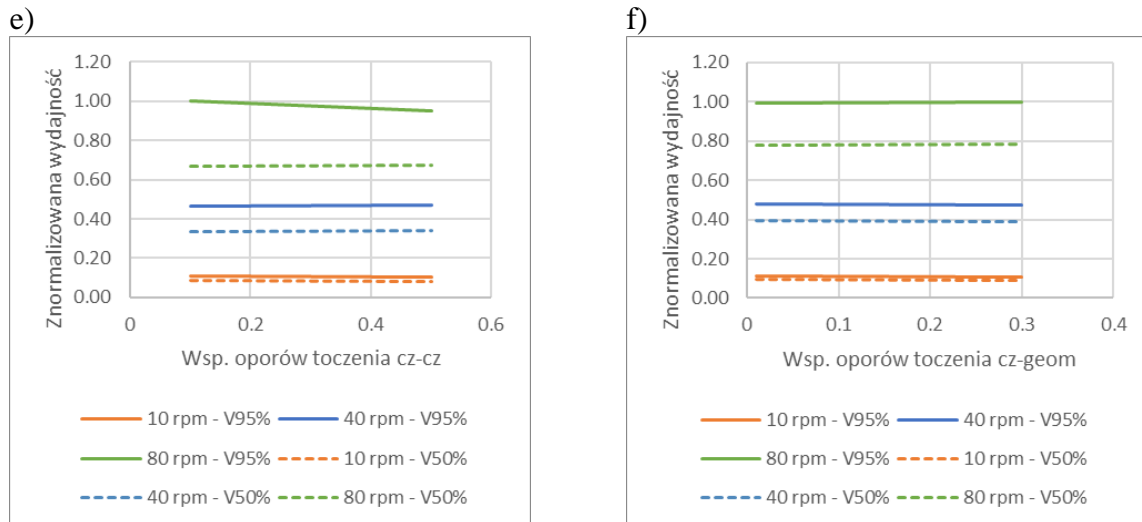


c)



d)

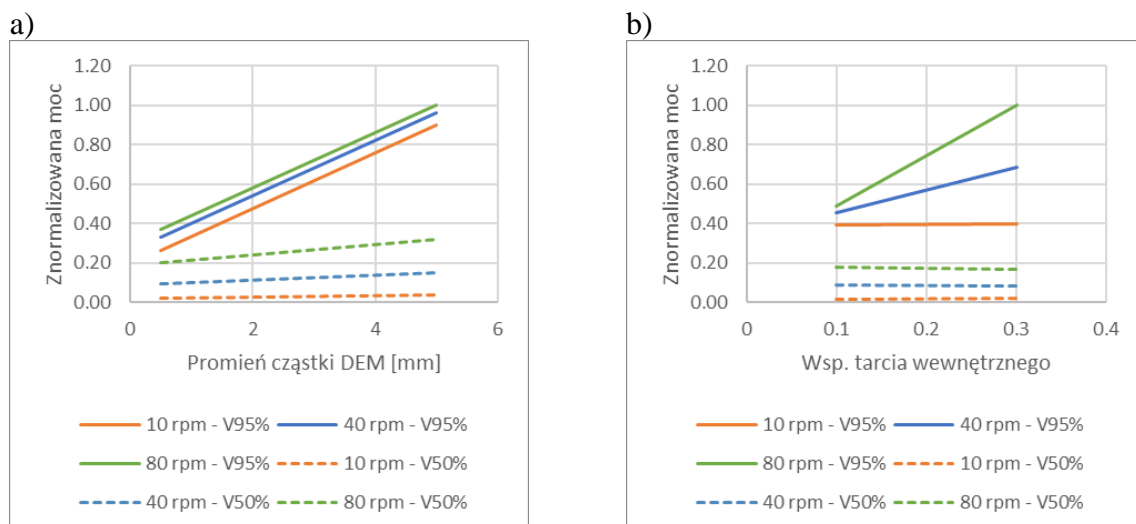


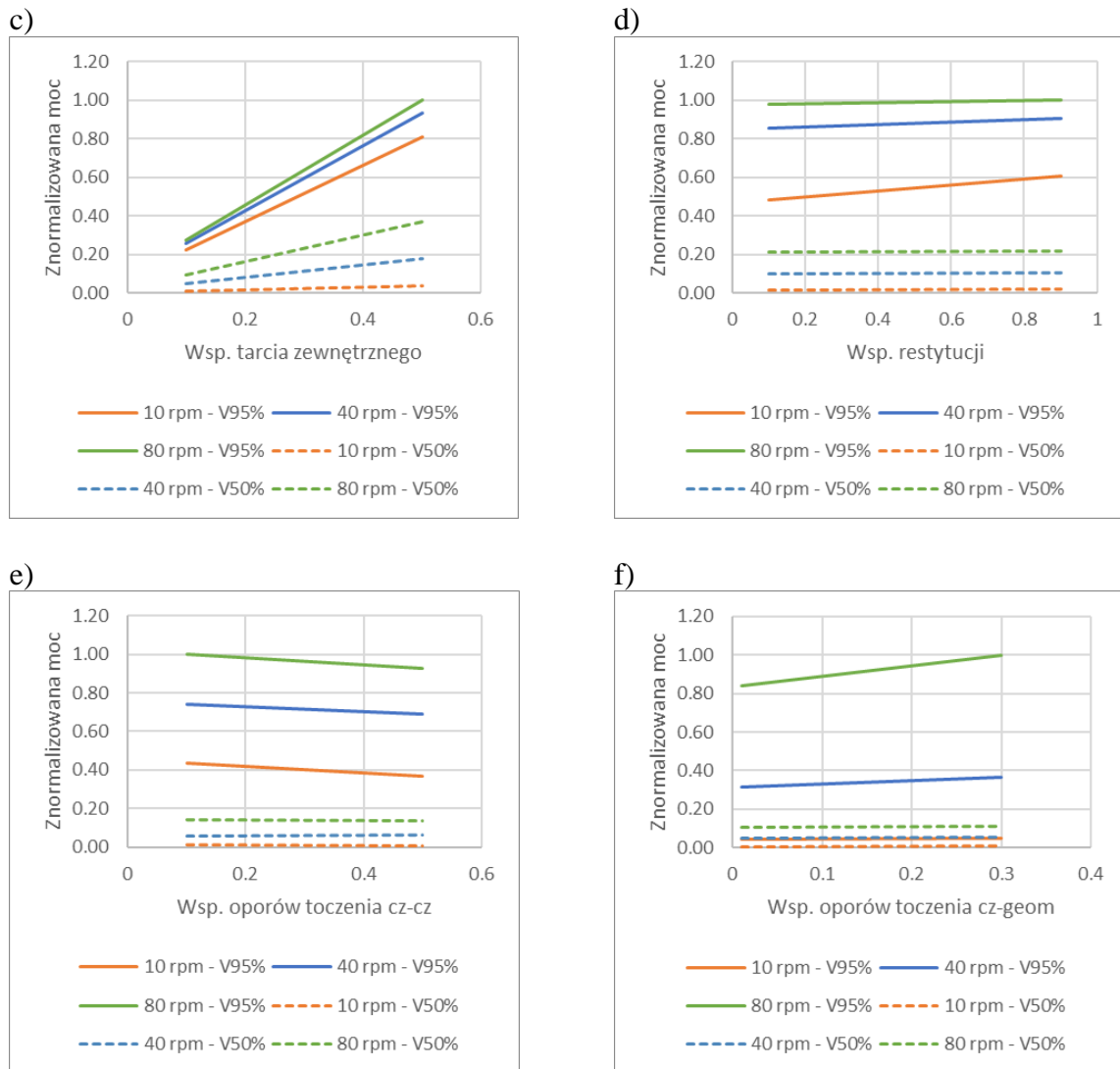


Rys. 3. Wpływ parametrów modelu DEM na wyniki wydajności masowej przenośnika ślimakowego.

Rysunek 3 przedstawia wpływ poszczególnych parametrów modelu DEM na wyniki wydajności masowej przenośnika ślimakowego. Na rysunku 3a przedstawiono wpływ rozmiaru cząstki DEM na wyniki symulacji. Zaobserwować można, że wraz ze wzrostem promienia cząstki użytej w analizie DEM spada wydajność w całym zakresie rozpatrywanych prędkości obrotowych. Trend ten jest szczególnie zauważalny dla pełnego stopnia napełniania koryta. W przypadku 50% poziomu napełniania spadek wydajności jest mniejszy. Wzrost współczynnika tarcia wewnętrznego materiału sypkiego powodował wzrost wydajności przenośnika w przypadku pełnego poziomu napełnienia koryta dla wszystkich prędkości obrotowych wału. W przypadku częściowego stopnia napełnienia, wyniki symulacji są w nieznacznym stopniu zależne od wartości współczynnika tarcia wewnętrznego, co zostało przedstawione na rysunku 3b. Z kolei wzrost współczynnika tarcia zewnętrznego materiału, powodował znaczący spadek wydajności w całym zakresie prędkości obrotowych, szczególnie gdy koryto było w pełni wypełnione materiałem sypkim, co pokazano na wykresie 3c. Rysunki 3d-f dostarczają informacji na temat wpływu wartości współczynnika restytucji oraz współczynników oporów toczenia na wyniki symulacji określające wydajność masową przenośnika ślimakowego. W powyższych wykresów wynika, że współczynniki te marginalnie wpływają na wyniki analizy DEM.

Rysunek 4 przedstawia wpływ parametrów modelu DEM na wyniki mocy potrzebnej do przetransportowania materiału sypkiego w przenośniku ślimakowym.



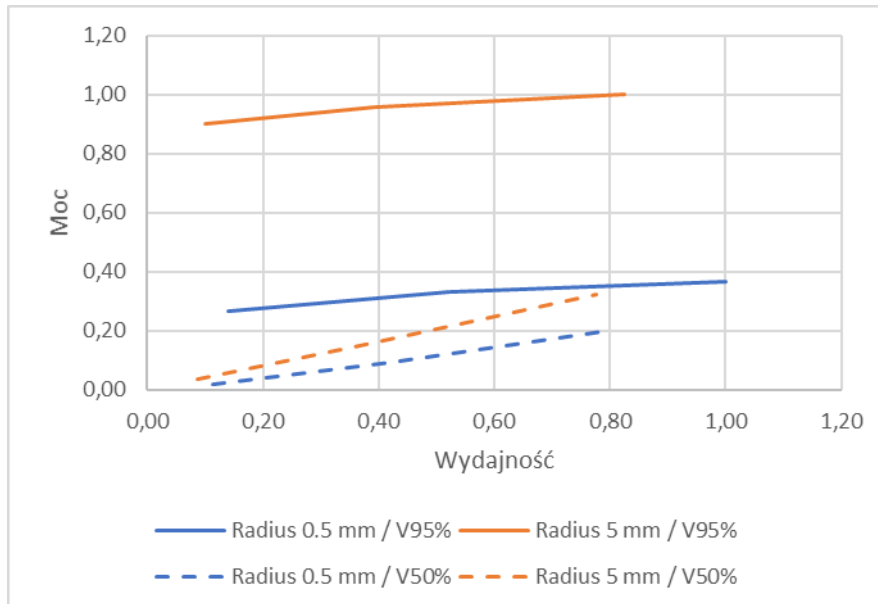


Rys. 4. Wpływ parametrów modelu DEM na wyniki zapotrzebowania mocy przez przenośnik ślimakowy.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wzrost rozmiaru cząstki DEM powodował wzrost zapotrzebowania na moc, w szczególności dla pełnego stopnia napełnienia koryta, co przedstawia rysunek 4a. Podobny efekt zaobserwować można w przypadku wzrostu współczynnika tarcia wewnętrznej. Dla pełnego stopnia napełnienia koryta im niższa była zadana prędkość obrotowa wału ślimaka, tym mniejszy był wzrost mocy spowodowany wzrostem wartości wsp. tarcia. Dla 50% stopnia napełnienia wzrost wartości wsp. tarcia miał nieznaczny wpływ na zmianę mocy, co pokazano na wykresie 4b. W przypadku wzrostu wartości wsp. tarcia zewnętrznego znacząco zwiększyło się zapotrzebowanie na moc niezbędną do przetransportowania materiału, szczególnie dla 95% stopnia napełnienia koryta. W przypadku 50% wypełnienia wzrost wartości współczynnika tarcia powodował mniej intensywny wzrost mocy, zwłaszcza dla niższych prędkości obrotowych, co zaprezentowano na rysunku 4c. Wartość współczynnika restytucji miał praktycznie marginalny wpływ na wyniki symulacji określające zapotrzebowanie na moc, co ilustruje wykres 4d. Jedynie w przypadku prędkości obrotowej równej 10 rpm oraz 95% stopnia napełnienia, można było zaobserwować wzrost zapotrzebowania na moc ze wzrostem współczynnika restytucji. Wzrost współczynnika oporów toczenia pomiędzy cząstkami DEM wykazał niewielki spadek zapotrzebowania na moc, co przedstawiono na wykresie 4e. W przypadku współczynnika

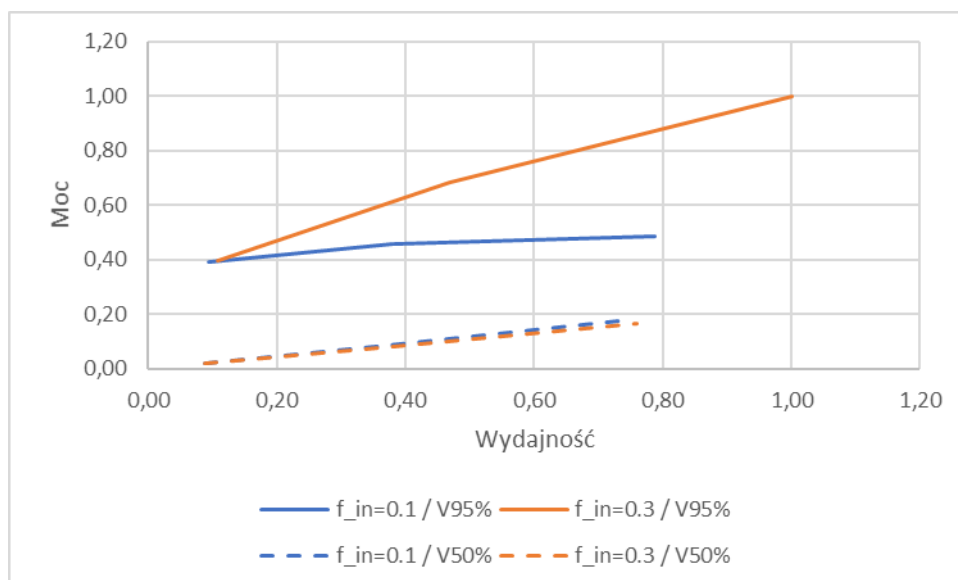
oporów toczenia zdefiniowanego pomiędzy cząstkami DEM, a powierzchnią komponentów przenośnika, jego wzrost powodował nieznaczny wzrost mocy, co pokazano na rysunku 4f.

Na rysunkach 5-7 przedstawiono wpływ parametrów modelu DEM takich jak rozmiar cząstki, współczynniki tarcia wewnętrzne i zewnętrzne na wyniki charakterystyk eksploatacyjnych przenośnika ślimakowego.



Rys. 5. Wpływ rozmiaru cząstki DEM na charakterystykę eksploatacyjną przenośnika ślimakowego.

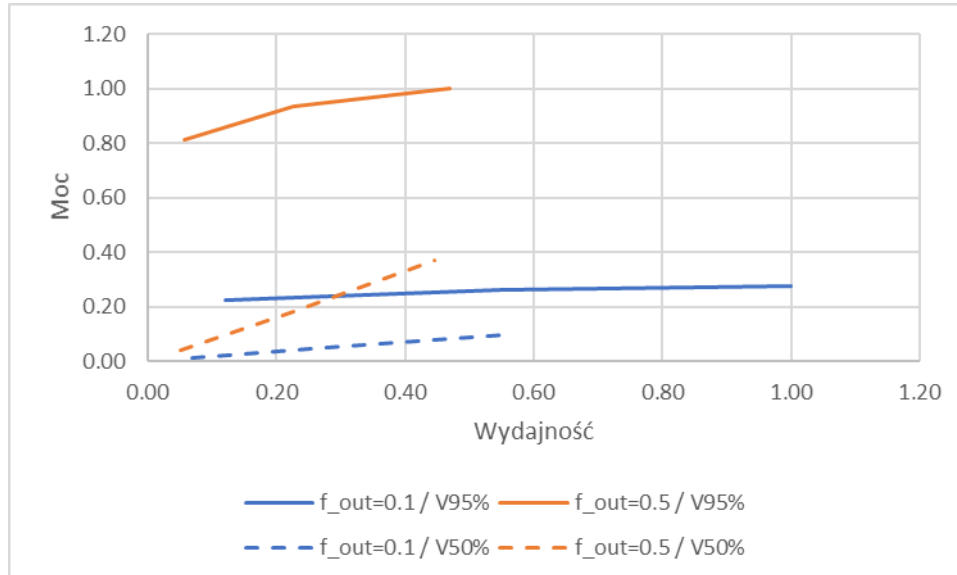
Na rysunku 5 przedstawiono wpływ rozmiaru cząstki DEM na charakterystykę eksploatacyjną przenośnika ślimakowego. Zaobserwować można istotny wpływ promienia cząstki DEM na wyniki determinujące parametry pracy przenośnika. Dla większych promieni uzyskano większe moce potrzebne do przetransportowania materiału z tą samą wydajnością. Efekt ten jest szczególnie widoczny dla pełnego stopnia napełniania koryta.



Rys. 6. Wpływ wartości wsp. tarcia wewnętrznego materiału na charakterystykę eksploatacyjną przenośnika ślimakowego.

Rysunek 6 przedstawia z kolei wpływ wartości współczynnika tarcia wewnętrznego materiału na charakterystykę eksploatacyjną przenośnika ślimakowego. Badania symulacyjne

wykazały, że dla pełnego stopnia napełnienia koryta, wartość współczynnika tarcia zewnętrznego mocno determinuje parametry pracy przenośnika. Zaobserwowano także, że dla większej wartości wsp. tarcia wewnętrznego, uzyskuje się wyższe moce potrzebne do przetransportowania materiału w przenośniku z tą samą wydajnością. W przypadku 50% stopnia napełnienia wpływ wartości współczynnika tarcia wewnętrznego był nieznaczny.

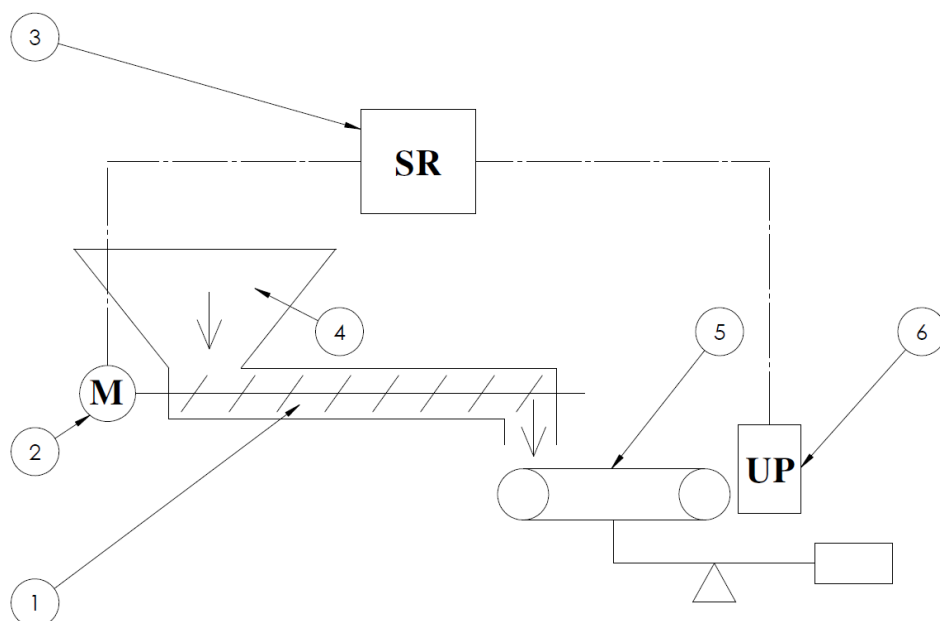


Rys. 7. Wpływ wartości wsp. tarcia zewnętrznego materiału na charakterystykę eksploatacyjną przenośnika ślimakowego.

Wartość współczynnika tarcia zewnętrznego znacząco wpływa na wyniki charakterystyk eksploatacyjnych przenośnika ślimakowego, co zostało przedstawione na rysunku nr 7. Wzrost wsp. tarcia zewnętrznego z poziomu 0,1 do 0,5 powodował istotny wzrost mocy dla tych samych wydajności masowych przenośnika, zarówno dla stopnia napełnienia koryta wynoszącego 50%, jak i stopnia napełnienia wynoszącego 95%.

4. Badania laboratoryjne i symulacyjne parametrów eksploatacyjnych przenośnika ślimakowego.

Ze względu na znaczący wpływ niektórych parametrów wejściowych modelu DEM na wyniki symulacji, przeprowadzono pilotażowe badania transportu materiału sypkiego w przenośniku ślimakowym. Na rysunku 8 przedstawiono zagregowany schemat stanowiska badawczego.



Rys. 8. Zagregowany schemat stanowiska badawczego.

Stanowisko składało się z następujących podzespołów:

- 1 – badany przenośnik ślimakowy,
- 2 – M napęd przenośnika, składający się z motoreduktora walcowego o mocy silnika 4 kW, prędkość obrotowa wału ślimaka regulowana za pomocą przetwornicy częstotliwości,
- 3 – SR system rejestracji wyników, oparty o sterownik FBs 60MCR2,
- 4 – zasobnik materiału o objętości 4 m³,
- 5 – waga przenośnikowa taśmowa WMTP B-650,
- 6 – UP układ pomiarowy wagi, wydajność maksymalna $Q_{\max} = 10 \text{ Mg/h}$, dokładność wskazań 0,5 % (od 5 do 100 % Q_{\max}), klasa dokładności wagi 1 (od 5 % do 100 % Q_{\max}).

Celem tych badań było wyznaczenie wydajności oraz zapotrzebowania na moc rzeczywistego przenośnika pracującego w warunkach przemysłowych. Otrzymane wyniki laboratoryjne, posłużyły do weryfikacji poprawności przyjętych parametrów wejściowych modelu obliczeniowego DEM oraz do wyznaczenia charakterystyk eksploatacyjnych urządzenia. W tym celu badaniom poddano przenośnik ślimakowy transportujący mączkę wapienną. Wymiary badanego urządzenia to: długość całkowita przenośnika – 4000 mm, średnica zewnętrzna piór ślimaka 160 mm, średnica wału 70 mm, skok piór ślimaka 75 mm. Badania były przeprowadzane w zakresie prędkości obrotowych od 20 do 70 obr/min. W tabeli 1 przedstawiono skalibrowane parametry modelu materiałowego mączki wapiennej użyte w symulacji DEM.

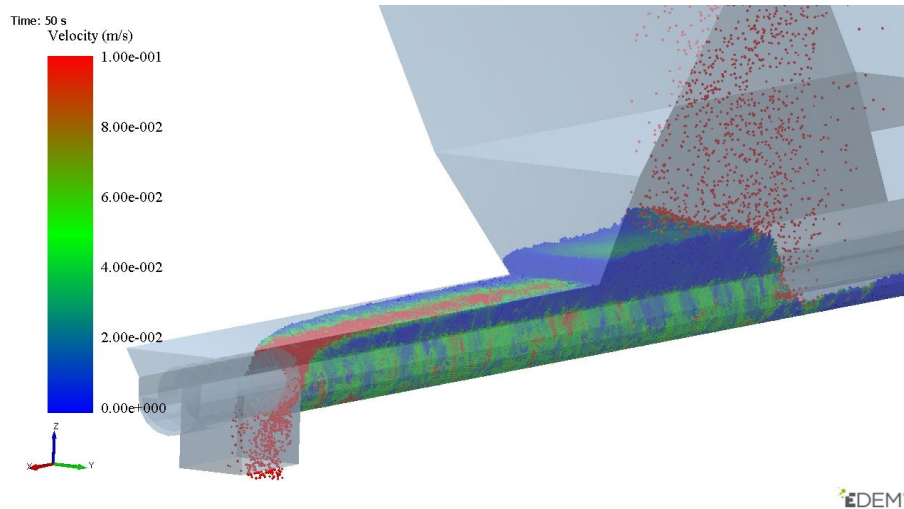
Tabela 1. Własności fizyczne oraz sklibrowane parametry DEM mączki wapiennej.

Własności fizyczne				Skalibrowane parametry DEM			
Kąt naturalnego usypu [°]	Wsp. tarcia zew.	Gęstość nasypowa [kg/m ³]	Rozmiar ziarna [µm]	Wsp. tarcia wew.	Wsp. tarcia zew.	Gęstość cząstki DEM [kg/m ³]	Promień cząstki DEM [mm]
36.4	0.44	1170	1-20	0.24	0.44	1980	3

Parametry DEM zostały skalibrowane na podstawie wyników badań laboratoryjnych określających własności fizyczne mączki wapiennej według metodologii przedstawionej w

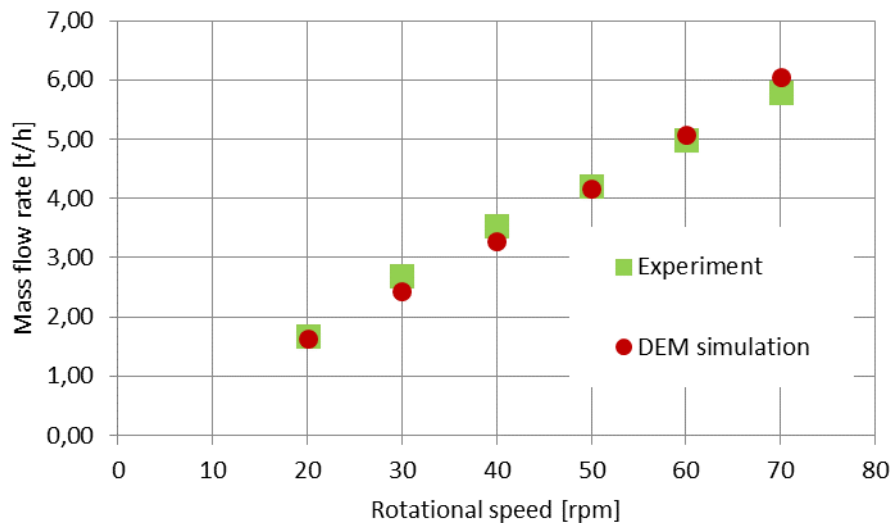
pracy [9]. W celu skrócenia czasu obliczeń przyjęto jednakowy rozmiar cząstek DEM o średnicy 3 mm.

Na rysunku 9 przedstawiono fragment symulacji DEM z zaznaczonym rozkładem prędkości materiału wewnątrz koryta przenośnika w trakcie transportu mączki wapiennej.



Rys. 9. Rozkład prędkości materiału wewnątrz koryta przenośnika ślimakowego.

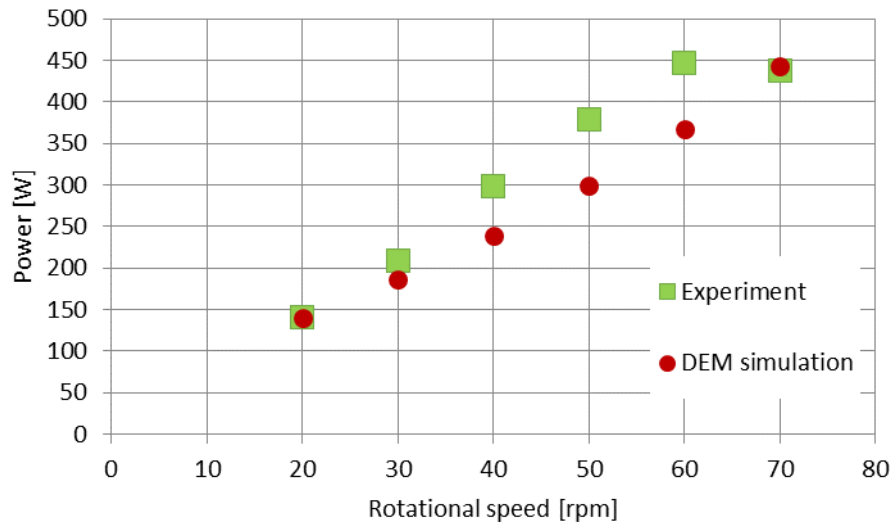
Na rysunku 10 przedstawiono wyniki badań wydajności masowej w funkcji prędkości obrotowej dla rzeczywistego przenośnika ślimakowego oraz symulacji DEM.



Rys. 10. Wyniki badań laboratoryjnych i symulacyjnych wydajności masowej przenośnika ślimakowego w funkcji prędkości obrotowej.

Wyniki symulacji wydajności masowej wykazują dużą zgodność z wynikami uzyskanymi w trakcie pomiarów na rzeczywistym przenośniku ślimakowym. Rozbieżność wyników laboratoryjnych w stosunku do badań symulacyjnych była mniejsza niż 1%.

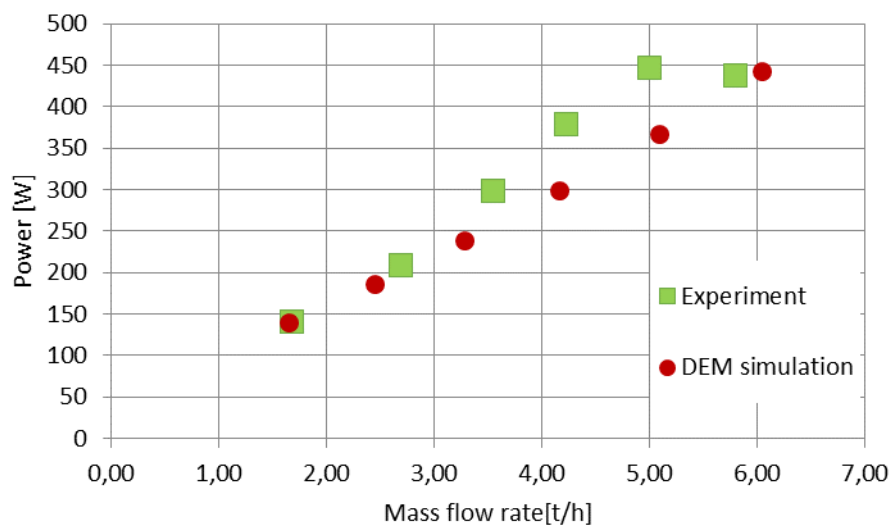
Na rysunku 11 przedstawiono analogiczne wyniki zapotrzebowania przenośnika na moc w funkcji prędkości obrotowej wału.



Rys. 11. Wyniki badań laboratoryjnych i symulacyjnych zapotrzebowania na moc przenośnika ślimakowego.

Symulacje DEM zaniżyły wyniki zapotrzebowani na moc badanego przenośnika ślimakowego. Opierając się na wynikach czułości modelu DEM, w pierwszej kolejności należałoby zwiększyć współczynnik tarcia zewnętrznego, aczkolwiek przewiduje się, że jego wzrost wywoła spadek wydajności masowej.

Rysunek 12 przedstawia rzeczywistą i symulacyjną charakterystykę pracy przenośnika ślimakowego.



Rys. 12. Eksperymentalna i rzeczywista charakterystyka eksploatacyjna przenośnika ślimakowego.

Wyniki symulacji dają zgodne rezultaty w aspekcie uzyskanej charakterystyki eksploatacyjnej przenośnika. Dla wydajności do około 3 ton na godzinę wyniki eksperymentalne i symulacyjne są ze sobą zbieżne. Dla wyższych wydajności symulacje zaniżają wyniki w odniesieniu do rzeczywistości.

5. Wnioski

Analiza wpływu wartości parametrów wejściowych modelu DEM określiła, które z nich i w jakim stopniu wpływają na wyniki symulacji transportu materiału sypkiego w przenośniku ślimakowym w aspekcie wyznaczania parametrów eksploatacyjnych urządzenia. Jak wykazały badania symulacyjne, kluczowe parametry modelu materiałowego determinujące wyniki symulacji numerycznych to: rozmiar cząstki DEM, wartość współczynnika tarcia wewnętrznego oraz zewnętrznego. Zaobserwowano także, że im wyższy stopień napełnienia koryta tym wyniki symulacji są bardziej podatne na wartości parametrów wejściowych. Dlatego też bardzo istotne jest to, aby powyższe własności materiału sypkiego zostały dokładnie zidentyfikowane w testach laboratoryjnych, tak aby na ich podstawie przeprowadzić kalibrację modelu materiałowego DEM. Dysponując poprawnie zdefiniowanym modelem materiałowym, można przystąpić do wykonywania symulacji transportu materiału w przenośniku ślimakowym w celu wyznaczenia charakterystyk eksploatacyjnych urządzenia. W przypadku gdy parametry modelu zostaną założone w arbitralny sposób, symulacje DEM mogą dostarczyć fałszywe wyniki wydajności masowej i zapotrzebowania na moc. Jak wykazały badania symulacyjne, charakterystyki pracy przenośnika mogą się znacząco różnić w zależności od przyjętych parametrów wejściowych modelu. W rezultacie konstrukcja przenośnika ślimakowego może być znacznie przewymiarowana lub niedoszacowana. Przez to, aby osiągnąć wymaganą wydajność, urządzenie będzie musiało pracować w zakresie skrajnie niskich lub skrajnie wysokich obrotów wału ślimaka. Również, niewłaściwie dobrany napęd będzie pracował poza nominalnym zakresem charakterystyki mocy. Jak wykazały badania symulacyjne transportu mączki wapiennej w przenośniku ślimakowym, dysponując poprawnie zdefiniowanym modelem DEM, można osiągnąć dużą zgodność wyników analizy numerycznej z wynikami laboratoryjnymi określającymi wydajność masową oraz zapotrzebowanie na moc przenośnika. Wyniki analizy DEM nie tylko pozwalają na określenie charakterystyk pracy urządzenia, ale również dostarczają informacji na temat zachowania się materiału w czasie transportu przenośnikiem ślimakowym. Wykorzystując symulacje DEM możliwe jest przeprowadzenie optymalizacji procesu transportu materiału sypkiego w przenośniku ślimakowym. Odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych urządzenia pozwala zrealizować zadanie transportowe z wymaganą wydajnością przy zapewnieniu ograniczenia zużycia energii, wykorzystania materiałów konstrukcyjnych oraz zużycia ściernego piór ślimaka. Możliwe też będzie odpowiednie ukształtowanie zasypu i strefy podawania materiału do rynny przenośnika. Metodologia projektowania wykorzystująca symulacje numeryczne DEM może być skutecznym narzędziem we wspomaganiu procesu konstruowania urządzeń spełniających określone wymagania eksploatacyjne.

Dalsze prace eksperymentalne i symulacyjne skupiać się będą na badaniach przenośników ślimakowych o zróżnicowanych wymiarach konstrukcyjnych, tj. o różnych skokach piór oraz średnicach zewnętrznych ślimaka transportujących materiały suche, oraz kohezyjne o zróżnicowanym uziarnieniu.

Literatura

1. Barrios G K P, Mde Carvalho R, Kwade A, Tavares L M. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling. *Powder Technology* 2013; 248: 84–93.
2. Bortolamasi M, Fottner J. Design and sizing of screw feeders. *Partec 2001 International Congress for Particle Technology Germany 2001*; 69: 27–29.
3. Chudzik A, Warda B. Fatigue life prediction of a radial cylindrical roller bearing subjected to a combined load using FEM. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2020; 22 (2): 212–220, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.2.4>.
4. Coetzee C J. Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology* 2017; 310: 104–142.
5. Coetzee C J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. *Powder Technology* 2016; 297: 50–70.
6. Grima A P, Wypych P W. Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle-structure interactions under impact conditions. *Powder Technology* 2011; 212: 198–209.
7. Horabik J, Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems engineering* 2016; 147: 206–225.
8. Höhner D, Wirtz S, Scherer V. A study on the influence of particle shape on the mechanical interactions of granular media in a hopper using the Discrete Element Method. *Powder Technology* 2015; 278: 286–305.
9. Karwat B, Machnik R, Niedźwiedzki J, Nogaj M, Rubacha P, Stańczyk E. Calibration of bulk material model in discrete element method on example of perlite D18-DN. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2019; 21(2): 351–357.
10. Kretz D, Callau-Monje S, Hitschler M, Hien A, Raedle M, Hesser J. Discrete element method (DEM) simulation and validation of a screw feeder system. *Powder Technology* 2016; 287: 131–138.
11. McBride W, Cleary P W. An investigation and optimization of the ‘OLDS’ elevator using Discrete Element Modeling. *Powder Technology* 2009; 193: 216–234.
12. Mitura A, Gawryluk J, Teter A. Numerical and experimental studies on the rotating rotor with three active composite blades. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (4): 571–579, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.4.11>

13. Owen P J, Cleary P W. Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology* 2009; 193: 274–288.
14. Oreficea L, Khinast J G. DEM study of granular transport in partially filled horizontal screw conveyors. *Powder Technology* 2017; 305: 347-356.
15. Roberts A W. Design and performance criteria for screw conveyors in bulk solids operation. *Bulk Solids Handling* November 2002; 22(6): 436-444.
16. Shigeto Y, Sakai M, Matsusaka S. Development of a Large Scale Discrete Element Modeling for Fine Particle Conveying. CHEMECA Sydney 2011.
17. Walker P, Doroszk B, Król R. Analysis of ore flow through longitudinal belt conveyor transfer point. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2020; 22 (3): 536–543, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.3.17>.
18. Wang Y, Li T, Muzzio F J, Glasser B J. Predicting feeder performance based on material flow properties. *Powder Technology* 2017; 308: 135–148.
19. Wang S, Li H, Tian R, Wang R, Wang X, Sun Q, Fan J. A review of granular flow in screw feeders and conveyors. *Powder Technology* 2020, 308: 369-281.
20. Wiącek J, Molenda M, Horabik J, Ooi Jin Y. Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling. *Powder Technology* 2012; 217: 435–442.
21. Wodołażski A. Modelling of slurry hydrodynamics with two-blade impeller in tank reactor. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(4): 533-536.
22. WHAT IS DEM Theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM) 2018. <https://www.altair.com/resource/what-is-the-discrete-element-method-dem> (odwiedzono 13.08.2020)