

**Tomasz Bień**

*Biko-Serwis Sp. z o.o., Nowiny*

## **ALTERNATYWNE TECHNOLOGIE WYTWARZANIA PRODUKTÓW NA BAZIE UPS, PROJEKTOWANE Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII DEM**

Projektowanie urządzeń do materiałów sypkich opiera się do dziś głównie na doświadczeniu ludzi oraz wieloletnich testach. Przewidzenie zachowania się materiałów sproszkowanych jest o tyle trudne, że należy rozpatrywać je zarówno w stanie fluidyzacji jak i sypkim, kiedy wykazują cechy wspólne dla płynów i ciał stałych. Z tego względu utrudnione jest modelowanie przepływów materiałów sypkich, szczególnie jeśli doda się do tego takie cechy, jak kleistość, elektrostatyka czy wpływ wycierania. Próby wprowadzenia przybliżeń syntetycznych w formie równań w programach CAE (jak Ansys czy Fluent) najczęściej nie sprawdzały się w praktyce. Konieczne było ujęcie analityczne, w którym analizowany jest wpływ każdej cząstki na inną, biorącą udział w badaniu, a także na każdą zewnętrzną geometrię.

Podstawową metodą badawczą w projekcie jest analiza elementów dyskretnych **DEM (Discrete Elements Method)**, opracowana w 1971 i od 1979 używana do analizy mechaniki materiałów sypkich. Ze względu na duże wymagania mocy obliczeniowej dopiero od ok. 10 lat jest stosowana szerzej. W dużym uproszczeniu analizie podlega ruch oraz siły działające na każdą cząstkę w określonej częstotliwości. Symulacja obejmuje często setki tysięcy cząstek o różnym kształcie i właściwościach.

**BIKO-SERWIS** jest prawdopodobnie jedyną polską firmą wykorzystującą badania DEM do analizy zachowania się materiałów sypkich.

Optymalne wykorzystanie materiałów UPS wymaga z kolei indywidualnego podejścia do budowania instalacji je przerabiających. Wielość zastosowań, mieszanek i form produktów końcowych powoduje, że urządzenia procesowe powinny pełnić wiele funkcji, zapewniając możliwość produkcji różnych produktów końcowych. W tym celu niezastąpione jest modelowanie z wykorzystaniem metody DEM, która analitycznie obrazuje

zachowanie się milionów cząstek o różnych właściwościach w ruchomej geometrii 3D.

Wykorzystanie metody DEM, wspartej modelowaniem przepływów CFD, zapewnia optymalizację procesów materiałów sypkich. Dzięki dostosowaniu parametrów pracy do potrzeb osiągane zostaje znaczne ograniczenie zużytej energii, zwiększenie wydajności i poprawa jakości produktów końcowych. Modelowanie daje możliwość przejścia z porcjowej na ciągłą pracę systemów dozowania, mieszania, otaczania i innych procesów, jakimi są poddane uboczne produkty spalania.



*Przykłady cząstek wykorzystywanych w procesie symulacji*

## 1. METODOLOGIA BADAŃ

Metodologia badań obejmuje kilka etapów, kluczowych dla osiągnięcia satysfakcjonującego efektu:

- opracowanie modeli 3D cząstek,
- opracowanie modeli 3D geometrii urządzeń procesowych i ich części,
- opisanie parametrów cząstek: wielkości, sprężystości, adhezji, tarcia, gęstości usypowej, oporów obrotu,
- opisanie parametrów ruchu,
- przeprowadzenie symulacji,
- postprocesing: przygotowanie animacji, analiza danych i wykresów podstawowych parametrów.

Rodzaje cząstek:

- kuliste i budowane na bazie sfer,
- wielościenne,
- płaskie,
- nieregularne.

Badania DEM pozwalają na uzyskanie dla każdej części procesu informacji o następujących parametrach:

- prędkość liniowa i obrotowa cząstek,
- siła i moce,
- intensywność uderzeń,
- intensywność wycierania,
- naprężenia statyczne,
- masa i ilość cząstek (skuteczność mieszania),
- kierunek i prędkość powietrza.

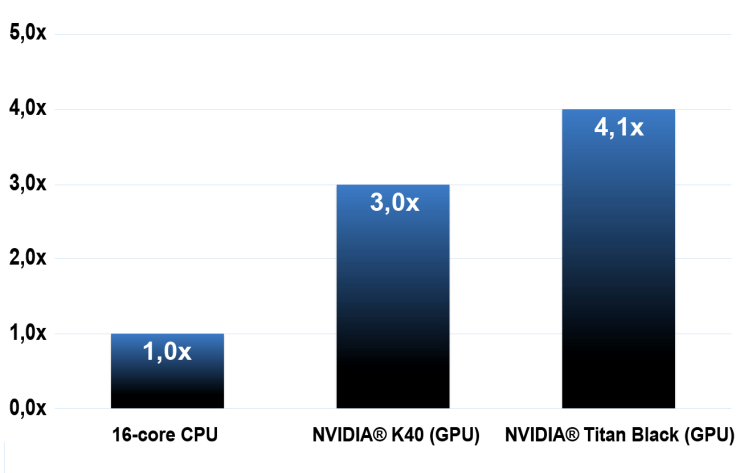
Symulacja jest przeprowadzana bez siatki, w każdym kroku czasowym badana jest suma sił działająca na każdą z cząstek i geometrię oraz generowany ruch, pozycja cząstki i siły wynikowe zgodnie z modelem kontaktowym kodu wykorzystującym jako bazę model linearno-sprężysty, nieliniowy Hertza-Mindlina i model z tłumieniem wiskotycznym.

$$\Delta \bar{V} = \int \frac{\sum \bar{F}_{net}}{m} dt; \bar{V}_{new} = \bar{V}_{old} + \Delta \bar{V}$$

$$\Delta \bar{x} = \int \bar{V}_{new} dt; \bar{x}_{new} = \bar{x}_{old} + \Delta \bar{x}$$

$$\bar{V} = \text{velocity}, \bar{x} = \text{position}, dt = \text{time step}$$

Symulacje, ze względu na wymogi obliczeniowe, są realizowane na specjalnie dostosowanych stacjach roboczych, wykorzystujących wielowątkowe procesory CPU, lub – coraz częściej – procesory graficzne GPU.



*Porównanie wydajności procesorów używanych przy symulacjach DEM*

### **Przykładowe zastosowanie badań DEM:**

- wydajności przenośników i wymagania co do mocy, zastosowanych materiałów i ruchu,
- homogenizacja i mieszanie przy zastosowaniu różnych rozwiązań,
- poprawa efektywności pracy kruszarek i młynów,
- badania wibracji i przesiewów,
- przeciwdziałanie wycieraniu się elementów urządzeń i przesypów.

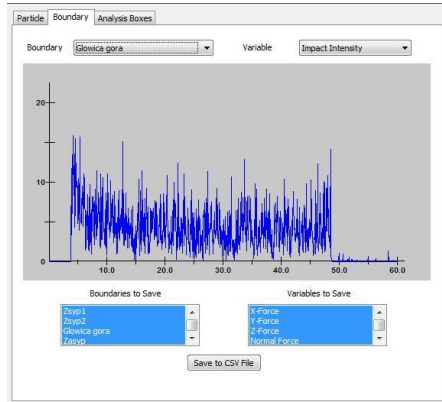
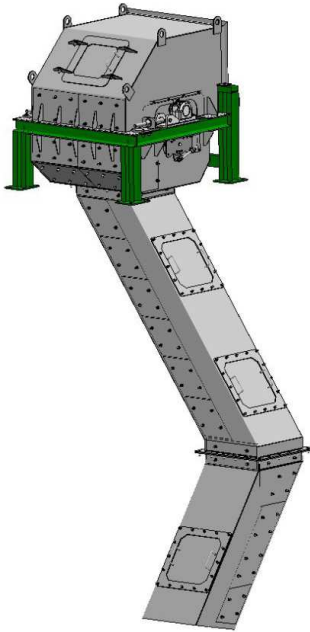
### **Analizowane materiały:**

- kruszywa, żwiry, skały,
- cement, wapno, gips, mączki, pyły,
- zboża, kukurydza,
- biomasa (zrębki, trociny),
- paliwa alternatywne (przetworzone odpady),
- granulaty.

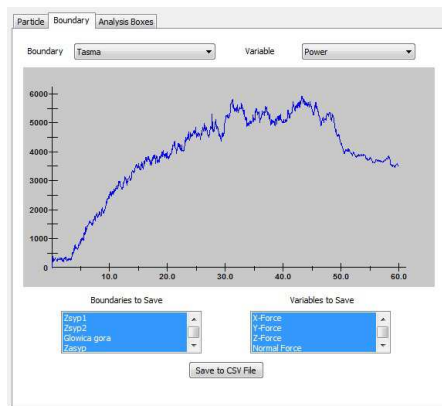
## 2. PRACE BADAWCZE – MODERNIZACJE I ROZWÓJ PRODUKTÓW

Zdiagnozowane problemy do analizy:

- a) kształt głowic przesypowych i zsyków. Badana jest intensywność wycierania elementów geometrii, powierzchnie najbardziej narażone na wycieranie i miejsca, gdzie powinny być zastosowane grubsze wykładki trudnościeralne. Sprawdzane jest ryzyko zapychania się głowicy i zsyków, określany optymalny kąt zsyków.



*Intensywność uderzeń w płytę głowicy*

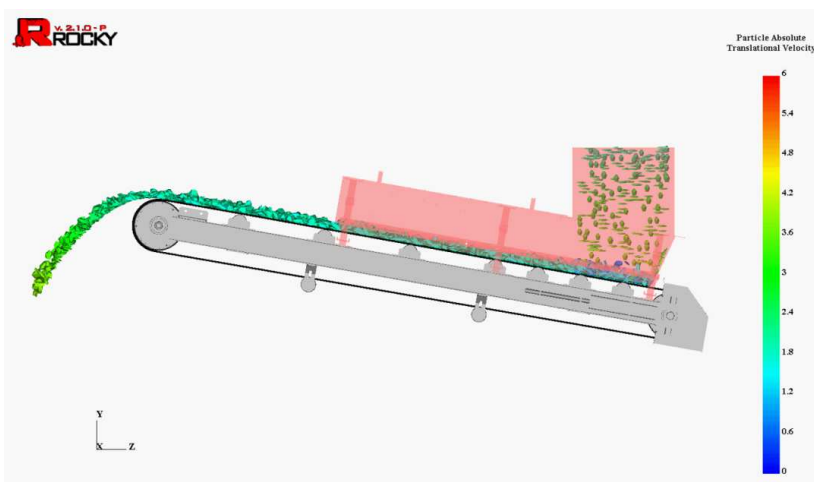


*Siła w taśmie*

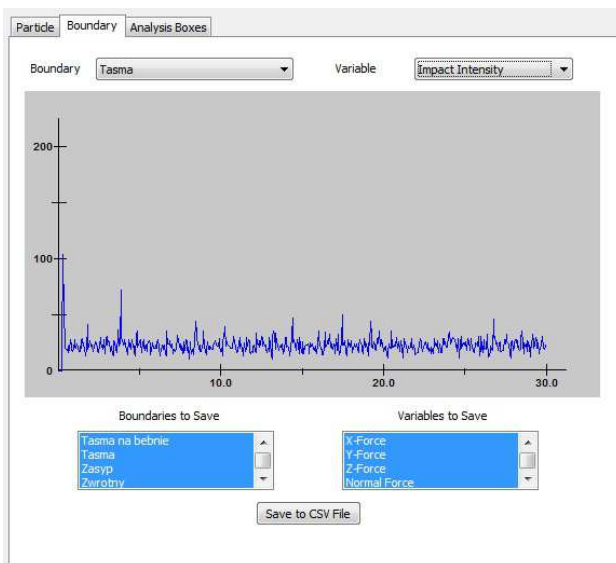
- b) modernizacja przenośników i podawaczy taśmowych. W ramach badania przeprowadzono symulacje zachowania się krótkich przenośników taśmowych (podawaczy) ze względu na różne kąty pracy, materiał i wydajność. Celem badania było dobranie najkorzystniejszego rozwiązania oraz materiału ograniczającego wpływ dynamicznych uderzeń.

### Dane wejściowe:

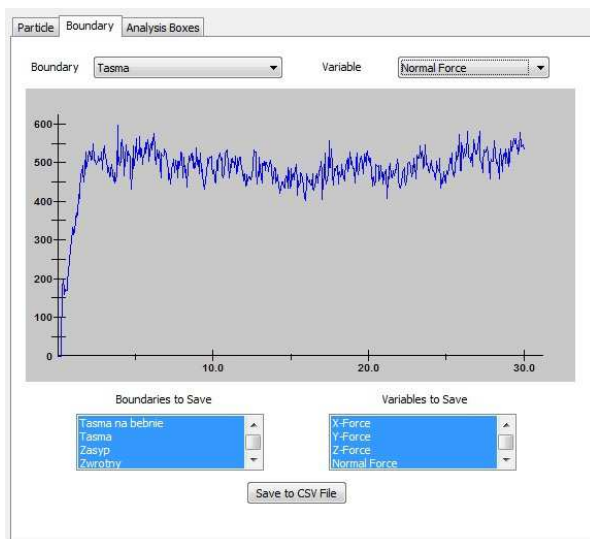
- Materiał: kruszywo dolomitowe o frakcji 20-30 mm (30%) i 40-50 mm (70%). W symulacji 30 tys. cząstek 10-bocznych, bez adhezji.
- Gęstość usypowa materiału:  $1,8 \text{ t/m}^3$ .
- Szerokość przenośnika:  $B = 500 \text{ mm}$ .
- Prędkość taśmy:  $v = 2 \text{ m/s}$ .
- Kąt pracy przenośnika:  $10^\circ$ .
- Wydajność: 100t/h.



## Analiza wyników:



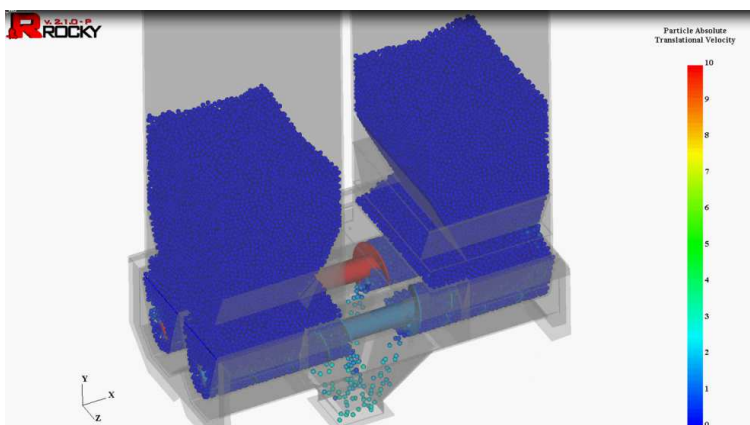
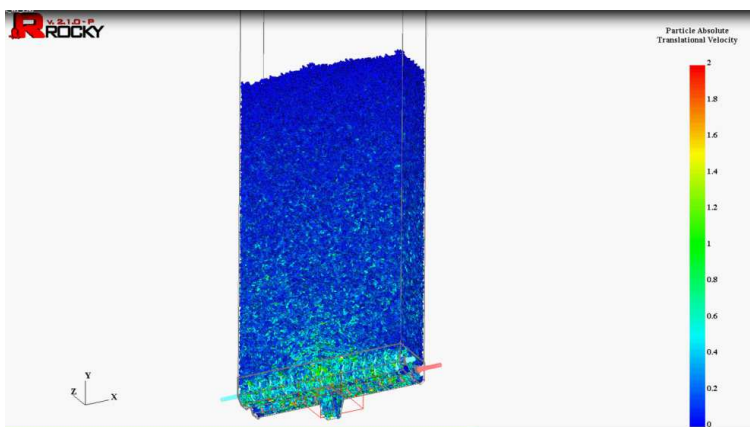
*Intensywność uderzeń w taśmie*



*Siła normalna w taśmie*

c) badanie przenośników ślimakowych

W ramach badania przeprowadzono symulacje różnych rozwiązań przenośników ślimakowych. Skupiono się zwłaszcza na ślimakach wybierających. Celem badania było dobranie najkorzystniejszych rozwiązań kształtu, wypełnienia materiałem, skoku i średnic piór w celu osiągnięcia zadanej wydajności i trwałości urządzenia. Badano zapotrzebowanie na moc na wale. Sprawdzano także warunki kontroli przepływu przenośnikiem ślimakowym.

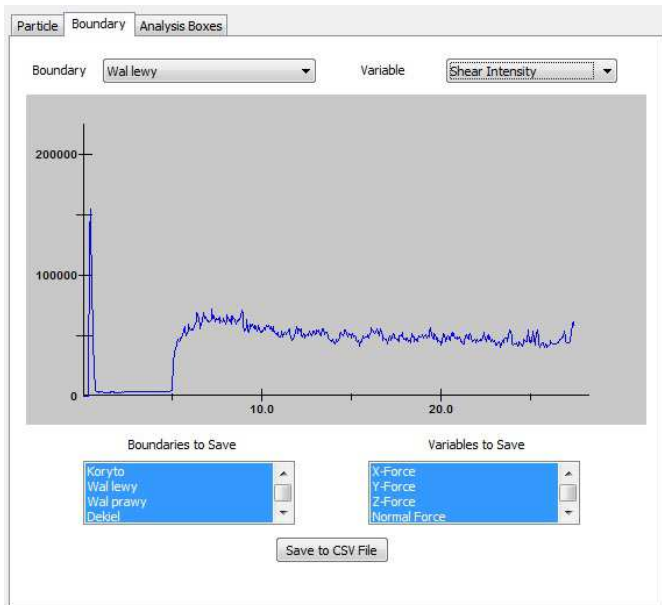




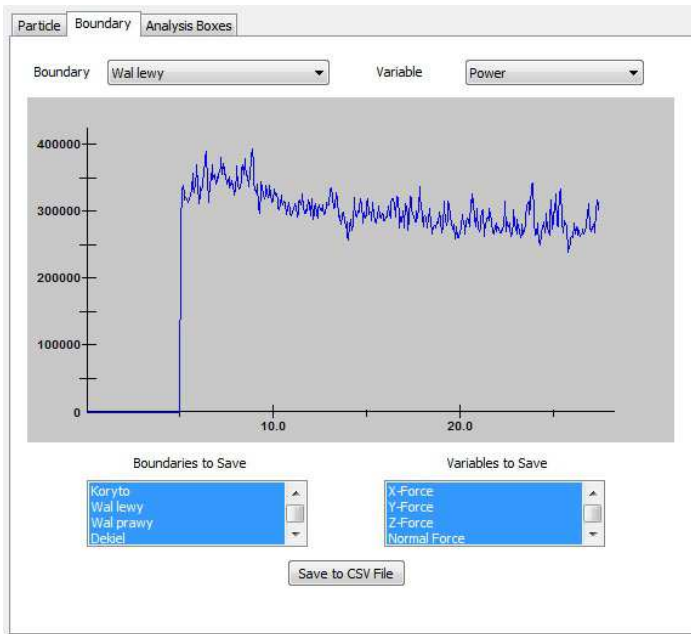
## Analiza wyników:

Dane wejściowe:

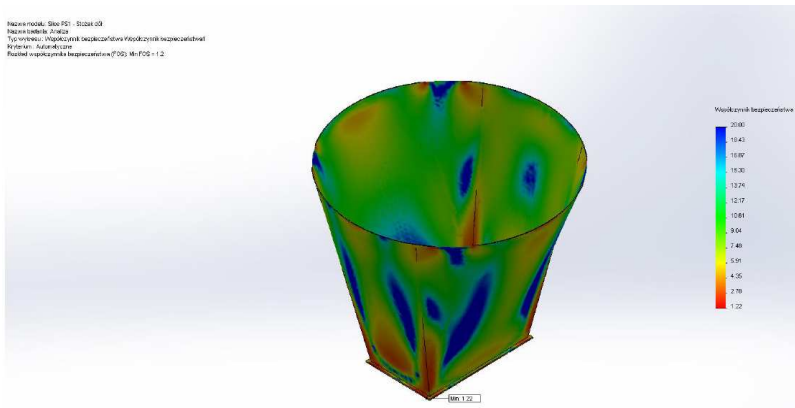
- Materiał: frakcja 0.5–0.8 mm. W symulacji 151 tys. cząstek 10-bocznych, adhezja włączona (wsp. 0.5).
- Gęstość usypowa materiału:  $1,2 \text{ t/m}^3$ .
- Średnica przenośnika:  $\text{Ø}500 \text{ mm}$ .
- Prędkość obrotowa:  $n = 60 \text{ obr/min}$ .
- Zakładana wydajność przenośnika:  $100 \text{ t/h}$ .
- Wysokość słupa wypełnionego zbiornika:  $7 \text{ m}$ .
- Wyniki: po przełożeniu 24:1 dobór mocy motoreduktora na poziomie  $18.5 \text{ kW}$



*Intensywność wycierania wał lewy*



*Moc na wale lewym*



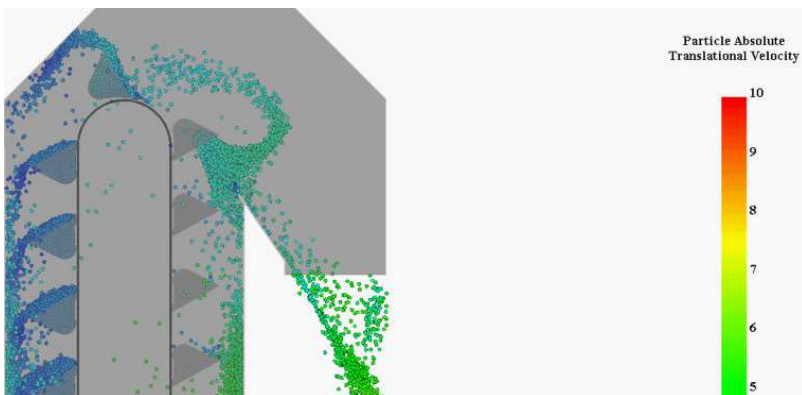
*Analiza MES zbiorników masowych z udziałem sił pochodzących od ślimaków wybierających*

d) modernizację elewatorów kubełkowych

W ramach jednego z zadań badawczych przeprowadzono szereg symulacji w celu usprawnienia pracy odśrodkowego elewatora kubełkowego.

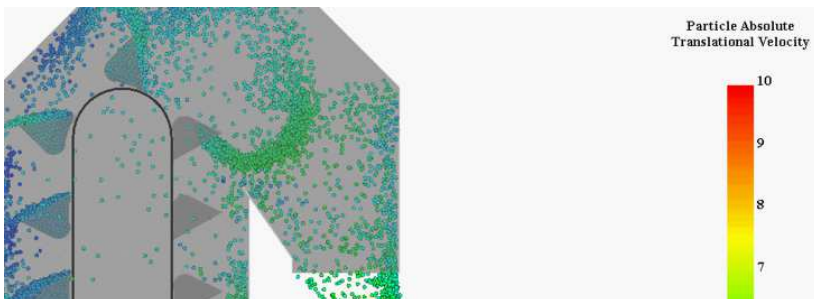
### Diagnoza sytuacji:

- Wysoka strata powrotu (udział materiału zawracanego do szybu): ok. 30 %;
- Duże zapotrzebowanie na moc przy wybieraniu.

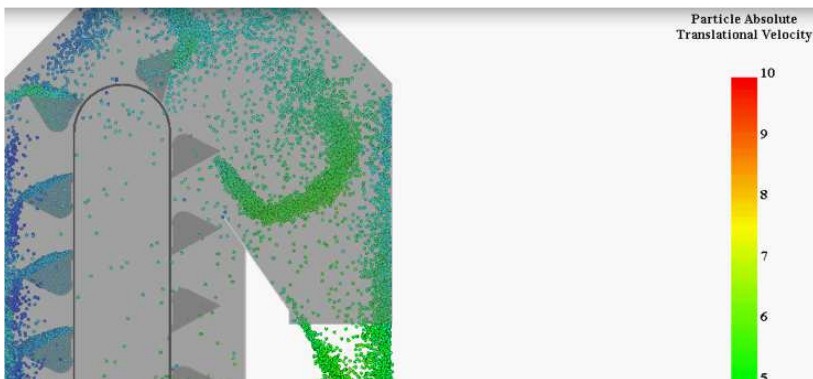


### Rozwiązania alternatywne:

- zwiększenie prędkości do 1.55 m/s – strata powrotu ok. 20%

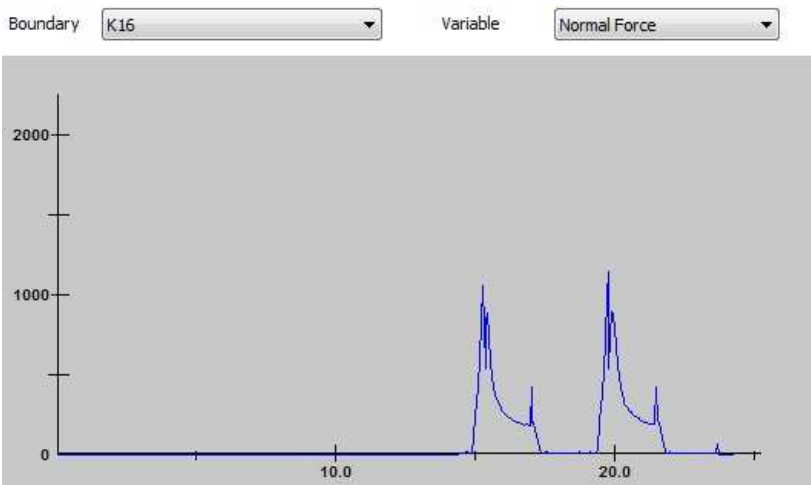


- zagęszczenie kubełków i obniżenie punktu wylotu z głowicy – strata powrotu ok. 3%

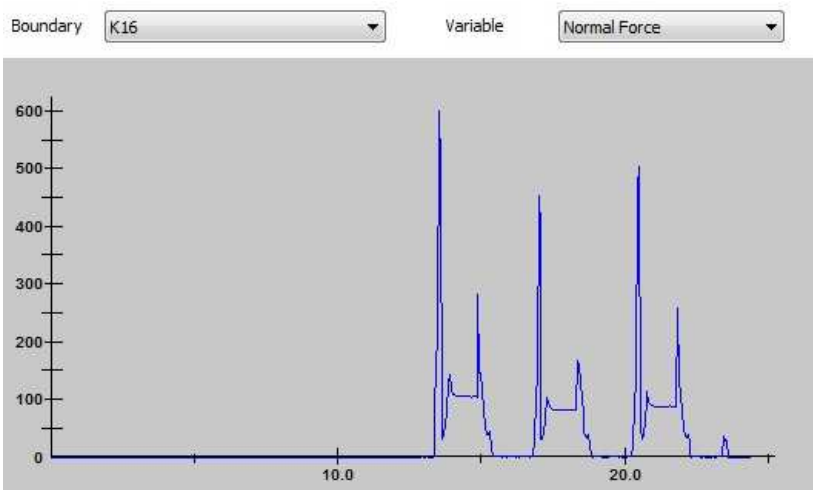


### Różnice w mocy na wale napędowym:

- wybieranie ze stopy



– zasyp na kubetki

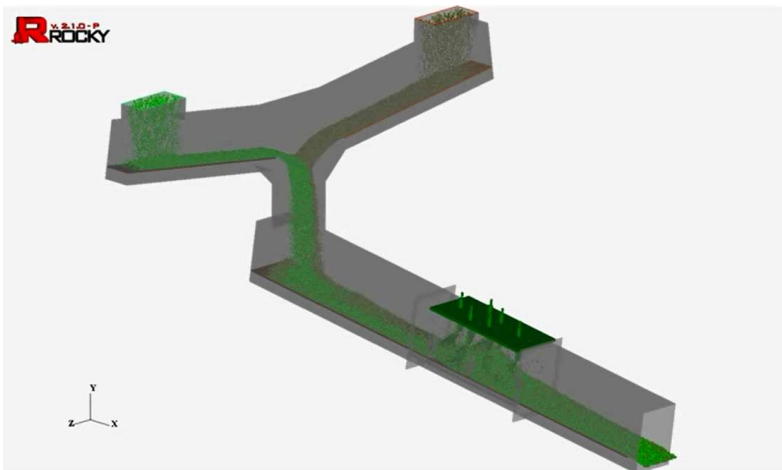


### 3. PRACE NAD NOWYMI ROZWIĄZANIAMI

Dzięki nowemu podejściu do projektowania urządzeń dla materiałów UPS powstały energooszczędne urządzenia i technologie obejmujące procesy mieszania i granulacji.

#### a) mieszalnik fluidalny BKFM

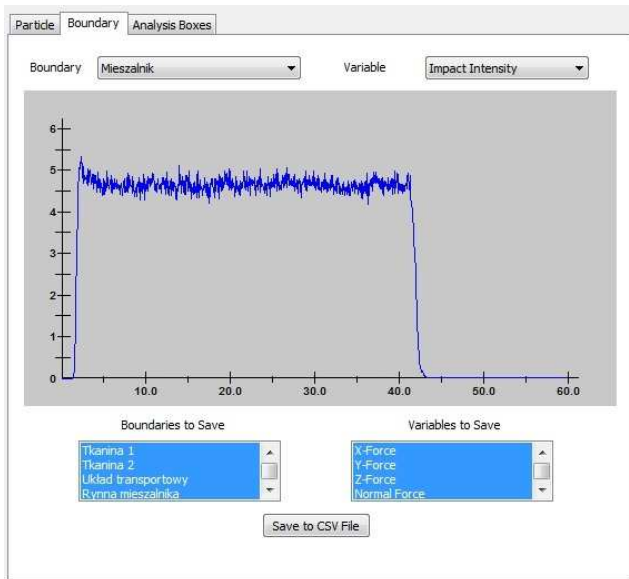
Jest to urządzenie do ciągłego mieszania drobnych, suchych materiałów sypkich, pozbawione całkowicie elementów ruchomych, o ekstremalnie niskich kosztach pracy i utrzymania. Bardzo dobrze się sprawdza przy materiałach zdolnych do fluidyzacji, o podobnych cechach fizycznych – produkcji mieszanek na bazie popiołów, cementów, mielonego żużla, mączek



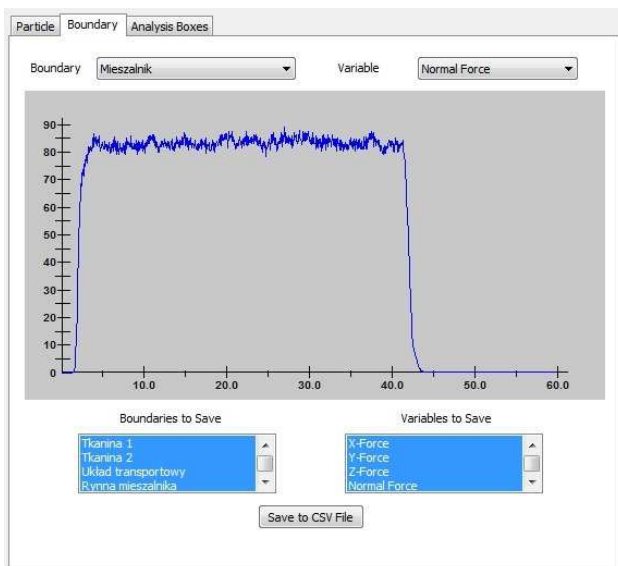
Dane wejściowe:

- czas symulacji:  $t = 60$  s, ilość cząstek: 930130 szt.
- rodzaje cząstek: "Cement" (cząstki sferyczne); opór toczenia = 0; współczynniki  $LF=100000$  N/m<sup>2</sup>; gęstość: 1400kg/m<sup>3</sup>; nadawa: 30 t/h.  
"Popiół" (cząstki sferyczne); opór toczenia = 0; współczynniki  $LF=100000$  N/m<sup>2</sup>; gęstość: 1100kg/m<sup>3</sup>; nadawa: 30 t/h.
- wydajność układu: 60 t/h

Badano innowacyjny mieszalnik bez elementów ruchomych, w którym materiał wprawiany jest w stan fluidalny i wielokrotnie rozbijana jest jego struga przy pomocy specjalnych kształtek. Przeprowadzone badania były podstawą do zgłoszenia patentowego.



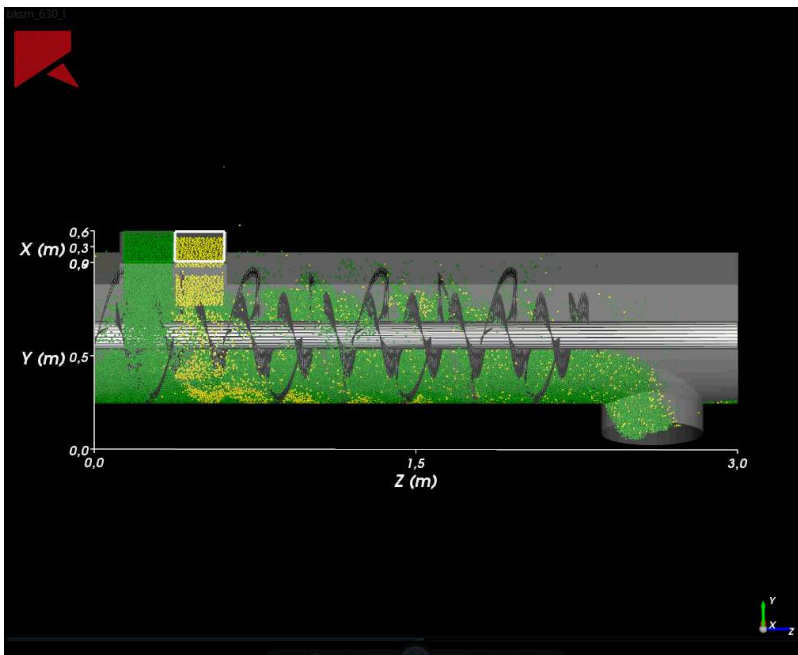
*Wyniki analizy - intensywność uderzeń*



*Siła normalna:*

## b) jednowałowy mieszalnik ślimakowy BKSM

Dzięki specjalnie dobranym kształtom wzajemnie się przenikających spiral została osiągnięta dużo wyższa wydajność mieszania niż przy klasycznych mieszarkach dwuwwałowych. Mieszalnik ten jest niezastąpiony przy ciągłym blendingu materiałów o różnych gęstościach czy wielkościach cząstki.



Dane wejściowe – materiał:

Pozostałość na sicie	63 $\mu$ m	90 $\mu$ m	125 $\mu$ m	200 $\mu$ m	250 $\mu$ m
A	-	0,6%	-	0,05%	-
B	15%	5%	2%	-	0.05%



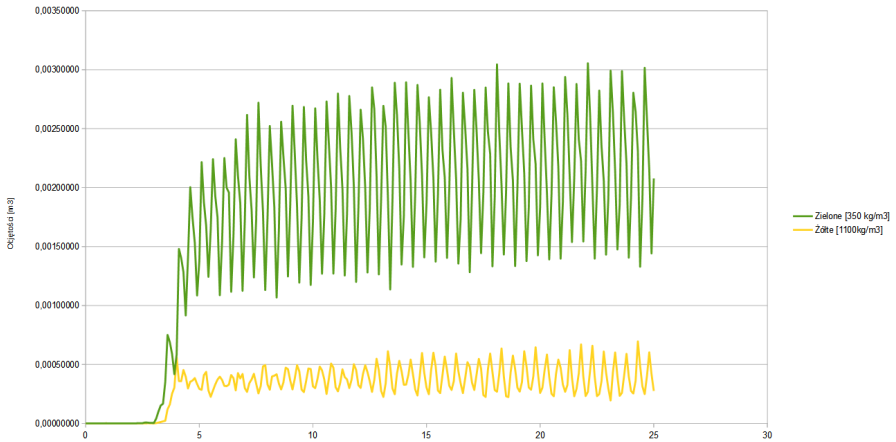
Gęstość:

Density	kg/m <sup>3</sup>
A	350
B	1100

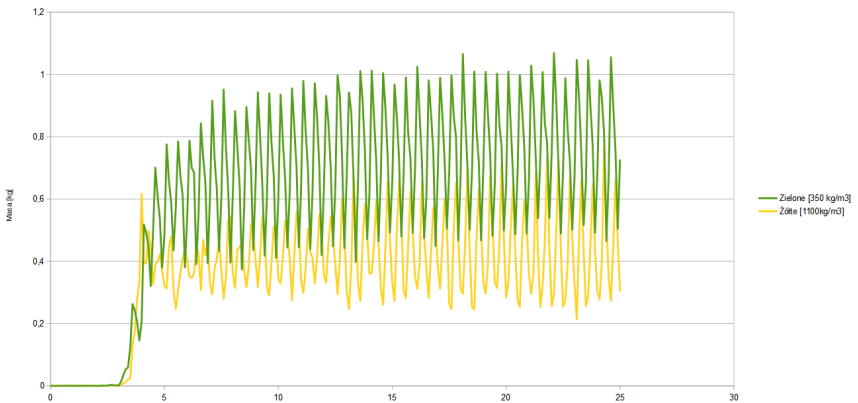
Receptury mieszania:

	A (t/h)	B (t/h)
65/35	29	16
75/22	34	11
85/15	38	7

Analiza wyników – wykres relacji objętościowej dla receptury:



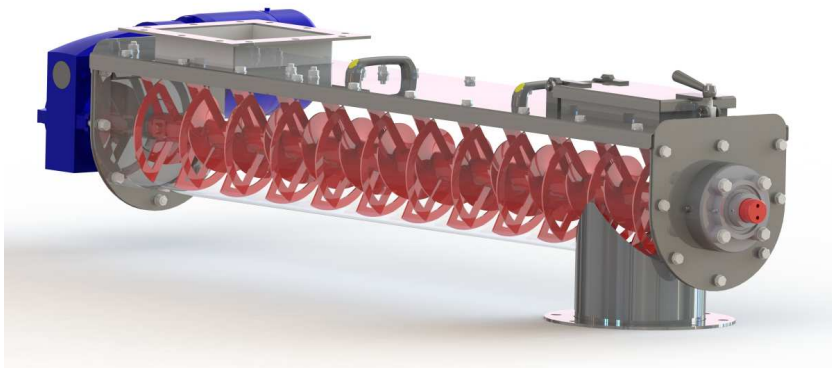
Analiza wyników – wykres relacji objętościowej dla receptury:



Analiza wyników – szczegółowa tabela homogenizacji

Time [s]	Mass of green particles 350 kg/m <sup>3</sup> [kg]	Mass of yellow particles 1100 kg/m <sup>3</sup> [kg]	Volume of green particles [m <sup>3</sup> ]	Volume of yellow particles [m <sup>3</sup> ]	Mixing ratio received	
1	0	0	0	0		
2	0	0	0	0		
3	0,01	0	0,00003	0	0,82	0,18
4	1,34	1,6	0,00384	0,00146	0,46	0,54
5	4,98	3,95	0,01423	0,00359	0,56	0,44
6	6,02	3,72	0,01721	0,00338	0,62	0,38
7	6,35	3,92	0,01814	0,00356	0,62	0,38
8	6,67	3,98	0,01906	0,00362	0,63	0,37
9	6,71	4,15	0,01916	0,00378	0,62	0,38
10	6,82	4,13	0,01949	0,00375	0,62	0,38
11	7,01	4,28	0,02004	0,00389	0,62	0,38
12	7,15	4,17	0,02042	0,00379	0,63	0,37
13	7,33	4,3	0,02095	0,00391	0,63	0,37
14	7,32	4,32	0,02092	0,00393	0,63	0,37
15	7,52	4,34	0,02149	0,00395	0,63	0,37
16	7,44	4,47	0,02125	0,00407	0,62	0,38
17	7,45	4,4	0,02129	0,004	0,63	0,37
18	7,57	4,33	0,02164	0,00394	0,64	0,36
19	7,54	4,34	0,02154	0,00395	0,63	0,37
20	7,5	4,44	0,02144	0,00404	0,63	0,37
21	7,5	4,38	0,02142	0,00398	0,63	0,37
22	7,86	4,23	0,02247	0,00385	0,65	0,35
23	7,57	4,35	0,02163	0,00395	0,64	0,36
24	7,77	4,17	0,02219	0,00379	0,65	0,35
25	7,79	4,46	0,02227	0,00406	0,64	0,36

Urządzenie powstałe na bazie badań – mieszalnik ślimakowy BKSM:



### c) mobilna stacja produkcji kompozytów na bazie UPS Flumix

Kompletny zakład produkujący kompozyty na bazie UPS, składający się z urządzeń zabudowanych w zestaw standaryzowanych kontenerów, łatwych do montażu i relokacji. Zbiorniki magazynowe są zabudowane na dachu górnego poziomu kontenera, odbiór materiału jest możliwy wprost do samochodu odbiorcy. Przygotowane są warianty stacji dla 8 – 15 materiałów źródłowych kompozytów.



Koncepcja bazuje na nowy podejściu do produkcji mieszanek:

- odpad UPS staje się produktem,
- indywidualne mieszanki są dobierane w czasie rzeczywistym,
- produkcja jest realizowana w miejscu odbioru lub w miejscu wytwarzania głównej części składu,
- instalacja jest mobilna, nie wymaga budynku i można ją szybko przenieść w inne miejsce,
- zastosowane rozwiązania zapewniają wysoką jakość produktu (dozowanie i homogenizacja).

Korzyści rozwiązania:

**1. Niski koszt produkcji.** Ze względu na wykorzystanie mieszalnika fluidalnego koszt energii elektrycznej tego kluczowego urządzenia spada nawet 20-krotnie.

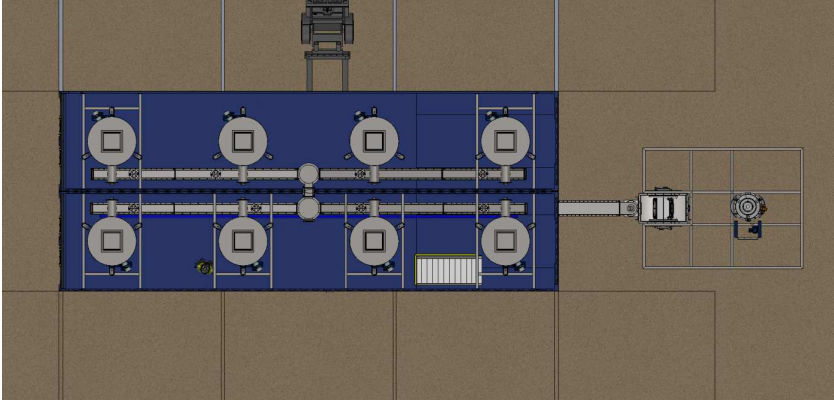
**2. Mobilność.** Instalację można przenieść w inne miejsce w ciągu jednego dnia. Całość urządzeń może się znajdować na stałe w dwóch łatwych do transportu standardowych kontenerach.

**3. Bez budynków.** Dzięki technologii FLUMIX niepotrzebne stają się budynki produkcyjne. Ograniczone do minimum są też procedury administracyjne związane z uruchomieniem instalacji.

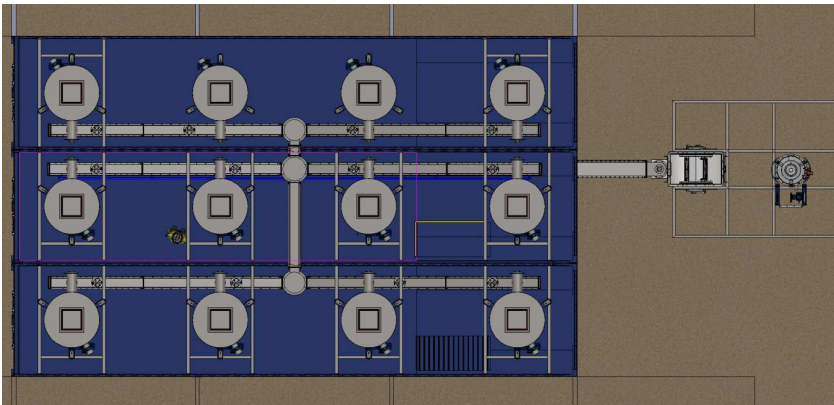
**4. Wysoka jakość produktu końcowego.** Ma na to wpływ dokładne dozowanie, skuteczne mieszanie i dodatkowe rozdrabnianie w celu eliminacji zbryleń.

**5. Produkcja w czasie rzeczywistym.** Silosy produktu końcowego stają się zbędne, kiedy mieszanki są wytwarzane w sposób ciągły i z dużą wydajnością. Produkt końcowy bezpośrednio po wytworzeniu jest ładowany w takim przypadku do cysterny odbiorcy.

Stacja 8 silosów:



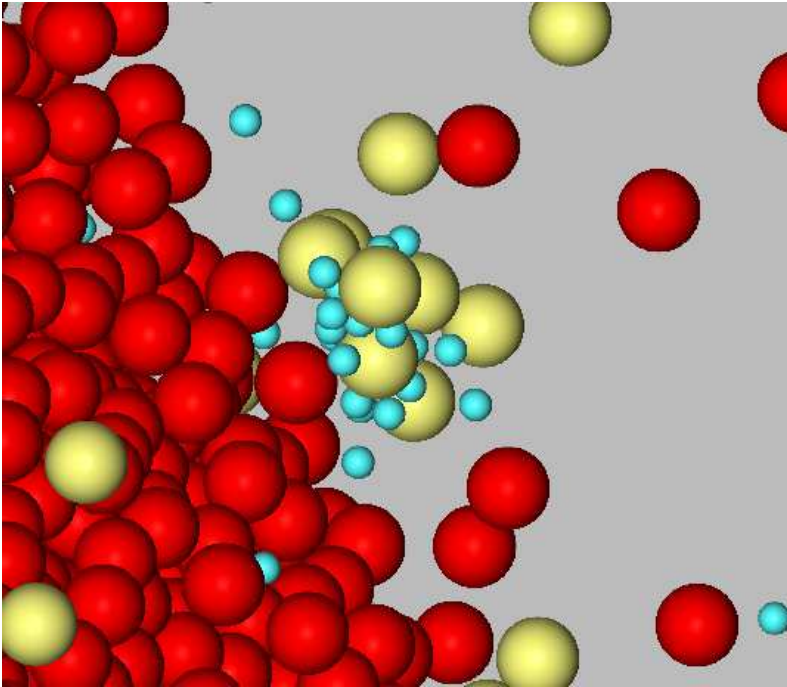
Stacja 12 silosów:



**d) granulator wibracyjno-fluidalny z funkcją otaczania**

Granulator, w którym proces zwilżania i suszenia następuje jednocześnie, dzięki czemu minimalizowane są koszty ostatecznej suszarki. Materiał, przepływając przez rynnę wibracyjną w stanie fluidalnym, jest zarodkowany, granulowany, a w ostatniej fazie może być otaczany dodatkowymi substratami.

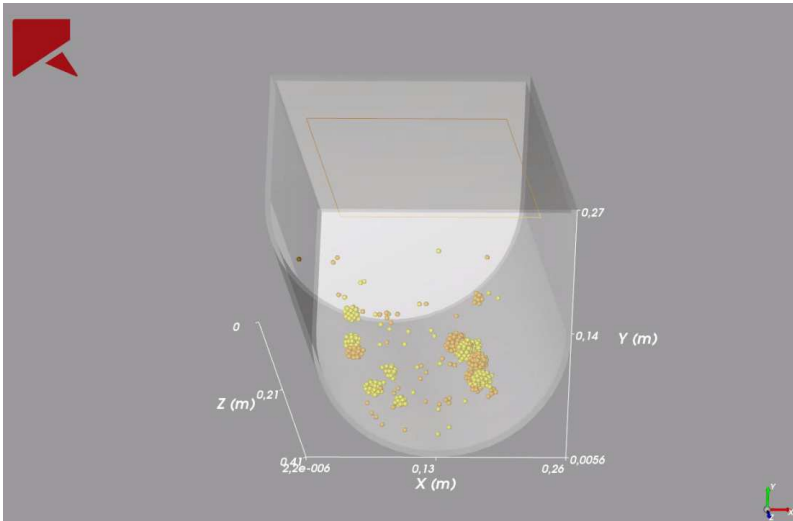
Granulator bazuje na pierwszych w Polsce badaniach DEM oraz DEM+DFD procesu aglomeracji.



Badania są prowadzone na podstawie symulacji porównawczych wspólnie z Akademią Górniczo-Hutniczą. Założenia obejmują przede wszystkim prace nad definicją parametrów cząstek:

- tarcie statyczne,
- tarcie dynamiczne,
- średnica cząstek,
- siła adhezji/kohezji: stała w określonej odległości między cząstkami lub proporcjonalnie się zmieniająca w zależności od odległości,
- ponieważ w procesie granulacji stopień zwilżenia (adhezji) jest zmienny, należy zdefiniować wiele cząstek o różnych właściwościach.

Badane były granulatory bębnowe, talerzowe, wibracyjne oraz – jako rozwiązanie docelowe – wibrofluidalne.



Wnioski, jakie uzyskano w wyniku tego zadania badawczego:

- istotny wpływ dla wyników ma sztywność kontaktowa cząstek, współczynniki tarcia wewnętrznego i zewnętrznego cząstek,
- najważniejszy parametr: wartości sił adhezji/kohezji oraz dystansu, w którym te siły działają,
- dla części kodów istotne jest występowanie tła oznaczającego suche cząstki,
- **cechy wspólne dla kodów Rocky, PFC, LS-Dyna: podobieństwa w wynikach i zachowaniu się cząstek.**

Na podstawie wyników badań trwają prace doświadczalne nad docelowym granulatorem:

