

Tomasz DZIK, Marek HRYNIEWICZ

e-mail: tdzik@agh.edu.pl

Katedra Systemów Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Badania nacisku bocznego w procesie ciśnieniowej aglomeracji materiałów ziarnistych

Wstęp

Współczesne technologie wytwarzania w procesach scalania produktów o zaplanowanych właściwościach w większości przypadków realizowane są poprzez ciśnieniową granulację. Przykładem ich mogą być wyroby przemysłu farmaceutycznego (tabletki o zaplanowanym uwalnianiu substancji czynnej), nawozy sztuczne o określonym czasie działania, części maszyn np. łożyska ślizgowe o określonej wytrzymałości i porowatości struktury. Innym przykładem są kompozytowe paliwa stałe wytwarzane dla celów spalania lub zgazowania, od których wymaga się by posiadały odpowiednią wytrzymałość mechaniczną, odporność na zawilgocenie, kaloryczność, trwałość w ogniu oraz określoną szybkość spalania.

Tego typu produkty otrzymuje się z wytworzonych wcześniej składników w postaci proszków o rozmiarach od mikrometrów do milimetrów, które scala się pod wpływem sił zewnętrznych. Nadawanie postaci końcowej produktom odbywa się przy pomocy brykietarek, pras różnej konstrukcji oraz granulatorów. We wszystkich tych maszynach następuje zagęszczanie materiału powodujące wzrost jego gęstości oraz spadek porowatości. Proces ten odbywa się w matrycach zamkniętych, otwartych i półotwartych. Wiadomo, że jego mechanizm polega na wzajemnym przemieszczaniu się ziaren w kierunku działania nacisku, a także w płaszczyźnie do niego prostopadłej.

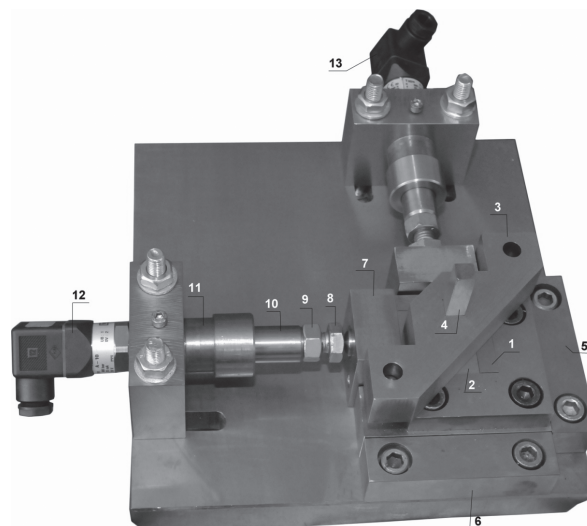
Rozwój teorii ciśnieniowej aglomeracji materiałów drobnoziarnistych wymaga dokładniejszego poznania zjawisk jakie występują między innymi na powierzchni kontaktu narzędzia i materiału. W szczególności dotyczy to tarcia zewnętrznego oraz bocznego nacisku, które w trakcie przebiegu procesów zagęszczania i scalania ulegają zmianie. Istotne znaczenie ma także określenie pracy jednostkowej zapewniającej wymaganą zmianę gęstości aglomeratu. Uzyskanie wiedzy na temat jakościowego i ilościowego charakteru zmienności tych wielkości umożliwi konkretyzację istniejących modeli matematycznych procesu scalania. Pozwoli to na ich praktyczne zastosowanie w celu doboru korzystnych geometrycznych cech konstrukcyjnych układów roboczych maszyn, a także do oceny podatności materiału drobnoziarnistego na scalanie [Hryniewicz, 1997].

Zmienność nacisku bocznego w procesie zagęszczania i scalania określonych materiałów była przedmiotem badań prowadzonych w różnych ośrodkach. Przykład stanowią prace eksperymentalne dotyczące składników leków [Takeuchi i in., 2004], kompozytów proszków [Sridhar i Fleck, 2000] oraz pasz i trocin drzewnych [Obidziński i Hejft, 2012; Holm i in., 2007; Adapa i in. 2009].

Na podstawie analizy publikowanych wyników opracowano koncepcję stanowiska laboratoryjnego i własną metodykę badań zakładając, że będą one prowadzone dla materiałów o zróżnicowanych właściwościach.

Stanowisko badawcze i sposób prowadzenia badań

Na rys. 1 przedstawiono konstrukcję stanowiska do wyznaczania współczynnika nacisku bocznego zdefiniowanego jako iloraz wartości nacisku bocznego i wartości nacisku normalnego. Składa się ono z elementów realizujących nacisk normalny – 1÷4, części – 5, 6 zapewniających osiowość stempla – 4, przesuwnych elementów matrycy – 1, 2, układu podparcia – 7, 8, 10, 11 oraz układu pomiarowego – 12, 13. Śruba – 7 i nakrętka – 8 służą do wywarcia nacisku wstępnego na elementy ruchome matrycy – 1, 2 i do jego regulacji. Poddawany badaniom mate-



Rys. 1. Stanowisko do wyznaczania współczynnika nacisku bocznego. 1, 2 – części matrycy ruchomej, 3 – matryca wstępna, 4 – stempel, 5 – prowadnica prawa, 6 – prowadnica lewa, 7 – łożysko wzdłużne, 8 – śruba regulacyjna, 9 – nakrętka blokująca, 10 – tłok cylindra, 11 – cylinder, 12, 13 – elektroniczne przetworniki ciśnienia

riał umieszczony jest w prostokątnej komorze o rozmiarze 10×10 mm. Do otworu zasypywana jest próbka materiału o masie zapewniającej uzyskanie jej wysokości około 10 mm przy określonej wartości normalnego nacisku jednostkowego. Stanowisko pozwala na obciążanie próbek naciskiem w zakresie 5 do 400 N/mm².

Nie wywołują one jednak przesunięcia elementów ruchomych matrycy – 1, 2. Ewentualny ich ruch w dwóch kierunkach prostopadłych do kierunku działania nacisku normalnego eliminowany jest przez układ podparcia, w którym zastosowano siłowniki hydrauliczne. Takie rozwiązanie zapewnia odpowiednią sztywność układu i umożliwi dokładny pomiar sił równoważących nacisk boczny. Budowa matrycy pozwala na wyznaczenie rozkładu nacisków w trzech kierunkach wzajemnie do siebie prostopadłych, odzwierciedlających trójosiowy stan naprężeń w scalanym materiale ziarnistym. Przemieszczenie stempla jest rejestrowane z dokładnością do 0,01 mm. Wartość siły nacisku stempla jest mierzona z dokładnością 2% przy nacisku 5 N/mm² i 0,2% w górnym zakresie pomiarowym. Na podstawie wyników pomiarów określa się zmienność współczynnika bocznego nacisku w funkcji wartości nacisku normalnego oraz charakterystykę zagęszczania w układach: nacisk normalny [N/cm²] – gęstość [g/cm³] oraz nacisk normalny [N/cm²] – objętość masowa [cm³/g]. Na podstawie wyników badań stwierdzono że funkcja wykładnicza (1) w wystarczającym stopniu przybliża rzeczywistą sytuację fizyczną w odniesieniu do zależności nacisku normalnego od objętości masowej aglomeratu.

$$\sigma_n = ae^{bv} \quad (1)$$

gdzie:

a, b – współczynniki równania regresji,
 v – objętość masowa aglomeratu [m³/kg].

Praca jednostkowa [J/g] wyliczana jest jako całka oznaczona z równania

$$A = \int_{v_p}^{v_k} ae^{bv} d(v) + C \quad (2)$$

gdzie:

vp – objętość masowa początkowa,

vk – objętość masowa końcowa,

C – stała całkowania.

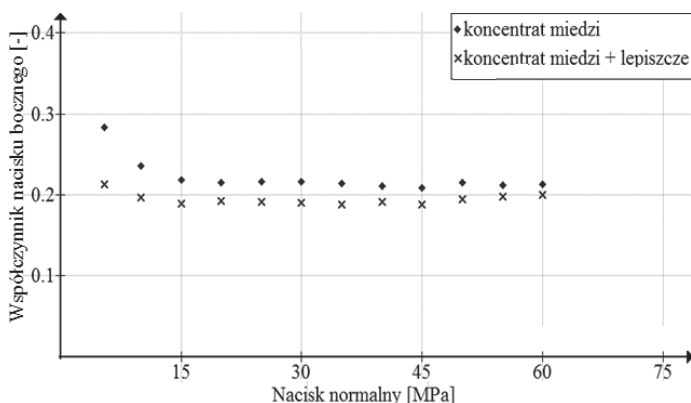
Stałą całkowania oblicza się z warunku początkowego przyjmując, że z chwilą rozpoczęcia procesu granulacji, wartość pracy początkowej jest równa zero. Dla tak sformułowanego założenia stała C wyliczana jest z równania

$$C = \frac{a}{b} e^{bvp} \quad (3)$$

Wyniki badań i ich omówienie

Badania prowadzono na surowcach o szerokim spektrum zastosowań. Wybrane wyniki przedstawiono w postaci zależności współczynnika nacisku bocznego w funkcji wartości nacisku normalnego dla próbek: koncentrat miedzi, koncentrat miedzi z lepiszczem, dwa rodzaje bentonitu z oznaczeniem 1070 i 1067, il z oznaczeniem 1022, węgiel koksujący < 2 mm, pucolana wypalona < 1 mm, popiół z *Elektrowni Siersza* < 0,5 mm, wióry mosiądzu plastycznego < 2 mm. Badano także zmienność współczynnika bocznego nacisku dla dwóch rodzajów biomasy roślinnej stanowiących trociny sosnowe < 3 mm oraz rozdrobioną mieszankę słomy zbóż < 3 mm. Próbki biomasy pobrano z zakładów produkujących granulat z trocin drewnianych oraz słomy zbożowej. Przyjęto, że maksymalna wartość wywieranego jednostkowego nacisku normalnego będzie dwukrotnie większa w porównaniu z naciskami uzyskiwanymi w maszynach stosowanych do produkcji granulatu. Ponieważ zalecana wilgotność biomasy wynosi od 8 do 14% badania przeprowadzono na próbkach o wilgotnościach 6% oraz 17%.

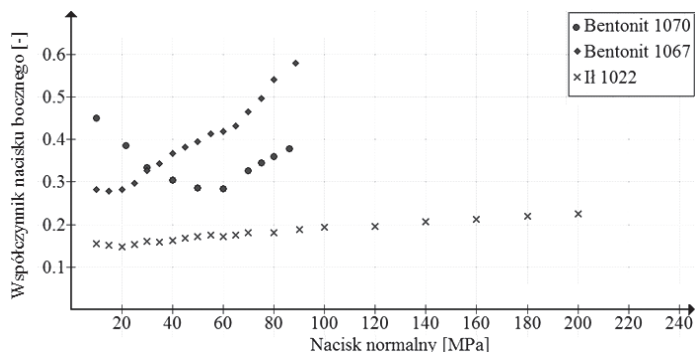
Analizując wyniki badań stwierdzono, że zmiana współczynnika nacisku bocznego w funkcji nacisku normalnego odzwierciedla poszczególne etapy procesu zęszczania materiału ziarnistego. Na podstawie wiedzy literaturowej oraz własnych doświadczeń wiadomo, że występują w nim 2 fazy. Pierwszą z nich cechuje osiągnięcie dużych stopni zęszczenia materiału przy stosunkowo niewielkich naciskach. W czasie jej przebiegu następuje intensywne zbliżanie ziaren do siebie. Dalsze zęszczanie materiału wymaga znacznego zwiększenia nacisku przy niewielkim przyroście gęstości. Jest to charakterystyczne dla drugiej fazy procesu, w której zmienia się charakter ośrodka z sypkiego na konsolidowany. Kończy się ona uzyskaniem materiału o strukturze quasi ciągłej posiadającego określone właściwości. Może on posiadać cechy ciała sprężystego (popiół z *Elektrowni Siersza* – Rys. 4, koncentrat miedzi – Rys. 2), sprężysto plastycznego (wióry mosiądzu – Rys. 4) oraz quasi plastycznego (bentonit 1067 – Rys. 3, pucolana wypalona – Rys. 4).



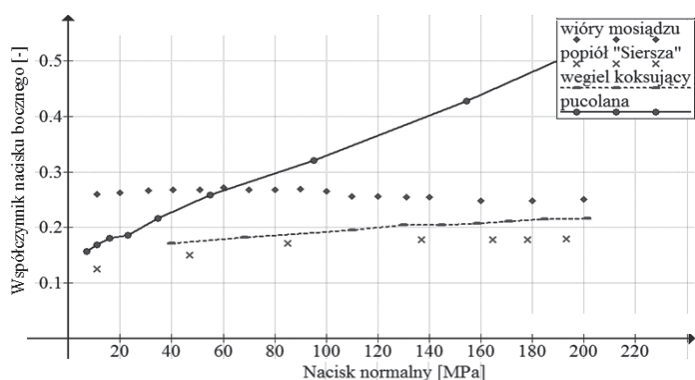
Rys. 2. Zmienność współczynnika nacisku bocznego w procesie zęszczania koncentratu miedzi

Stabilizacja wartości współczynnika bocznego nacisku oznacza, że zęszczony materiał ma cechy ciała sprężystego. Natomiast ciągły wzrost tego współczynnika świadczy o quasi plastycznym charakterze materiału. Może on wynikać z jego właściwości fizycznych czego przy-

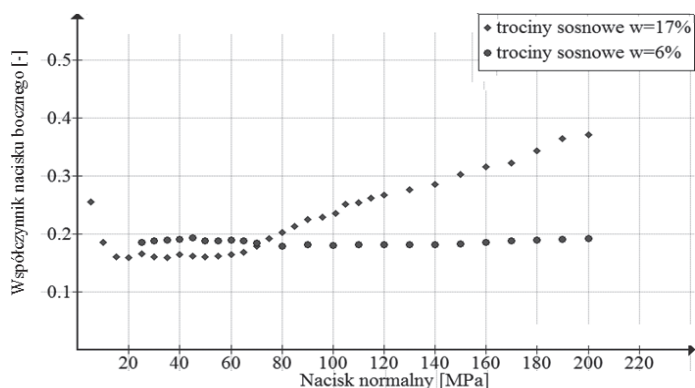
kładem są bentonity (Rys. 3) lub być skutkiem oddziaływania wyciśniętej z niego cieczy jak to ma miejsce w przypadku trocin sosnowych o wilgotności 17% (Rys. 5).



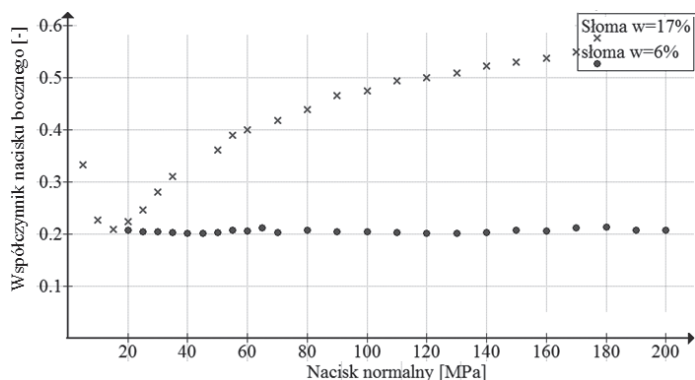
Rys. 3. Zmienność współczynnika nacisku bocznego w procesie zęszczania bentonitów oraz ilu



Rys. 4. Zmienność współczynnika nacisku bocznego w procesie zęszczania wybranych materiałów



Rys. 5. Zmienność współczynnika nacisku bocznego w procesie zęszczania trocin sosnowych



Rys. 6. Zmienność współczynnika nacisku bocznego w procesie zęszczania słomy

Przykłady zastosowania wyników badań

Przykładem procesu, w którym mogą być wykorzystane wyniki badań, jest produkcja granulatu opałowego zwanego potocznie peletem. Może on być produkowany poprzez aglomerację ciśnieniową realizowaną w prasie z układem zagęszczania składającym się z matrycy płaskiej z otwartymi komorami i rolek zagęszczających. Rozwiązanie takie cechuje prosta budowa układu roboczego, duża wydajność, ciągłość procesu, oraz szerokie możliwości regulacji parametrów pracy granuladora. Zakładaną gęstość produktu uzyskuje się wtedy, gdy siła przetłaczania na wysokości matrycy zapewni odpowiednią wartość nacisku koniecznego dla jej osiągnięcia. Opór ten pochodzi od siły tarcia zewnętrznego występującego na powierzchni kontaktu przepychanych porcji materiału i komór. Dla matrycy o otworze stożkowym dodatkowo występuje składowa siły wynikająca z pochylenia jej ściany. Wartość siły oporu opisuje równanie:

$$F = p_{bsr} A_b \left(\mu_z + tg \frac{\beta}{2} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- p_{bsr} – średnia wartość nacisku bocznego, [MN/m²],
- A_b – powierzchnia boczna komory matrycy, na którą działa nacisk boczny, [m²],
- μ_z – współczynnik tarcia zewnętrznego,
- β – kąt pochylenia otworu, [°].

Zmiennosc nacisku bocznego jak i współczynnika tarcia zewnętrznego określono w sposób eksperymentalny. Średnią wartość nacisku bocznego obliczono z następującego równania:

$$p_{bsr} = \frac{\int_0^h p_b(h) dh}{h} \quad (5)$$

Graniczną wartość kąta pochylenia otworu stożkowego wyraża nierówność

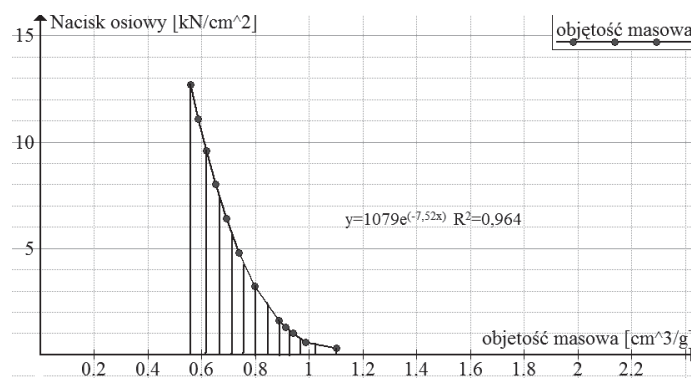
$$\beta \leq 2 \arctg \mu_z \quad (6)$$

Przeprowadzono obliczenia wymaganej wysokości otworów matrycy dla słomy mieszanej o wilgotności 17%, rozmiarze nadawy poniżej 3mm, współczynniku tarcia $\mu_z = 0,25$ i gęstości końcowej 1100 kg/m³. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że korzystna ich wysokość wynosi $h = 40$ mm dla otworu cylindrycznego o średnicy 8 mm. W przypadku otworu stożkowego o kącie pochylenia $\beta = 2^\circ$ przy zachowaniu średnicy nominalnej 8 mm wysokość $h = 35$ mm. Ulega ona zmniejszeniu do $h = 26$ mm w wyniku zwiększenia kąta pochylenia do $\beta = 8^\circ$.

Innym przykładem wykorzystania wyników badań jest weryfikacja mocy silnika prasy ślimakowej MT 240 dla przypadku brykietowania słomy o wilgotności 12%. Brykietarka produkowana jest przez jedną z firm europejskich. Charakteryzuje się ona następującymi parametrami technicznymi: wydajność prasy $Q = 240$ [kg/h], zainstalowana moc $P_{sil} = 35$ [kW], obroty ślimaka $n = 120$ [obr./s]. Na podstawie własnych doświadczeń założono, że gęstość brykietów będzie zawierała się w następującym przedziale $\rho = 1,14 \div 1,24$ [t/m³]. Korzystając z opracowanego wcześniej toku przeliczeń stwierdzono, że zapotrzebowanie mocy dla granicznych wartości gęstości wyniesie odpowiednio 22 [kW] oraz 27 [kW] [Dzik i Hryniewicz, 2008]. Zgodnie z wynikami badań eksperymentalnych obliczenia wykonano dla współczynnika nacisku bocznego $n_b = 0,3$.

Sposób określenia pracy jednostkowej w procesie zagęszczania przedstawiono na przykładzie węgla koksującego o rozmiarze ziarna poniżej 2 mm. Na rys. 7 pokazano przykład wyników pomiarów zależności objętości masowej zagęszczanego węgla od wywieranego na niego nacisku osiowego.

Korzystając z równań (2) i (3) oraz otrzymanej na podstawie wyników pomiarów szczególnej postaci równania regresji opisującego zależność nacisku osiowego i objętości masowej określono pracę jednostkową procesu. Zagęszczenie węgla koksującego od gęstości począt-



Rys. 7. Zależności objętości masowej zagęszczanego węgla od wywieranego na niego nacisku osiowego

kowej 0,62 [g/cm³] do gęstości końcowej 1,45 [g/cm³] wymaga pracy jednostkowej 6,6 [J/g]. Uzyskanie gęstości końcowej 1,7 [g/cm³] wiąże się ze wzrostem pracy jednostkowej do wartości 15,9 [J/g].

Wnioski

Zaprojektowane i wykonane według własnej koncepcji stanowisko laboratoryjne oraz przyjęta metodyka badań umożliwiają określenie na drodze eksperymentalnej zależności współczynnika bocznego nacisku od wartości nacisku normalnego, co ma znaczenie dla rozwoju teorii aglomeracji ciśnieniowej.

Znajomość jakościowego i ilościowego charakteru zmienności współczynnika bocznego nacisku umożliwiła konkretyzację istniejących modeli matematycznych procesu aglomeracji ciśnieniowej w celu dokładniejszego opisu rzeczywistej sytuacji fizycznej. Takie modele można z powodzeniem stosować w praktyce projektowej np. w celu doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych układów roboczych maszyn.

Na podstawie analizy zmienności bocznego nacisku można określić cechy zagęszczanego materiału, które mają istotne znaczenie dla oceny jego podatności na scalanie.

LITERATURA

- Adapa P., Tabil L., Schoenau G., 2009. Compression characteristics of selected ground agricultural biomass. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript 1347,11
- Dzik T., 2008. Teoretyczna i eksperymentalna analiza procesu scalania odpadów pochodzenia roślinnego – Theoretical and experimental analysis of agricultural waste briquetting process. *Chemik nauka-technika-rynek*, **61**, nr 9, 450–452
- Dzik T., 2010. Dobór cech konstrukcyjnych elementów w układzie zagęszczania peletyzatora z matrycą płaską – Defining of constructional features of compacting system elements in a flat matrix peltizer. *Przegląd Mechaniczny*, **69**, nr 10, 36–39
- Dzik T., Hryniewicz M., 2008. Dobór układu zagęszczania prasy ślimakowej do scalania odpadów z produkcji rolnej – The choice of compacting system of screw press for agricultural waste briquetting. *Chemik nauka-technika-rynek*, **61**, nr 9, 429–433
- Holm J. K., Henriksen U. B., Wand K., Husted J. E., Posselt D., 2007. Experimental verification of novel pellet model using a single pelleter unit. *Energy and Fuels*, **21**, 2446–2449. DOI: 10.1021/ef0701561
- Hryniewicz M., 1997. *Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji*. Kraków. Wyd. AGH, Kraków
- Obidziński S., Hejft R., 2012. The investigation of pressure exerted by the densifying material on the wall of the closed densification chamber. *Chemik nauka-technika-rynek*, **66**, nr 5, 457–460
- Obidziński S., Hejft R., 2012. Badania nacisków wywieranych przez zagęszczany materiał na ściankę otwartej komory zagęszczania. *Inżynieria Rolnicza*, **3**(138), 175–184
- Sridhar I., Fleck N. A., 2000. Yield Behaviour of Cold Compacted Composite Powders. *Acta Materialia*, **48**, 3341–3352
- Takeuchi H., Nagira S., Yamamoto H., Kawashima Y., 2004. Die wall pressure measurement for evaluation of compaction property of pharmaceutical materials, *International Journal of Pharmaceutics* **274**, 131–138. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2004.01.008