

# Metoda doboru elementów układu roboczego granulatora z płaską matrycą

Michał CHŁOPEK, Tomasz DZIK, Marek HRYNIEWICZ – Katedra Systemów Wytwarzania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków

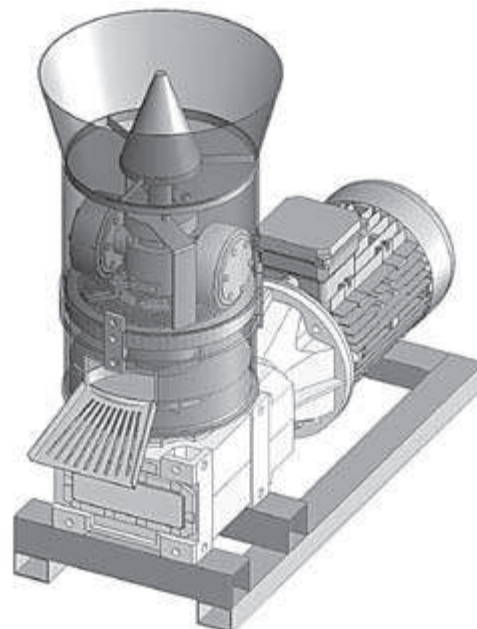
Prosimy cytować jako: CHEMIK 2012, 66, 5, 493-500

## Wprowadzenie

W Polsce rośnie zainteresowanie granulacją ciśnieniową, której efektem są produkty w postaci granulatu z biomasy oraz kompozytowych paliw stałych (zawierających kopalne paliwa stałe i biomasę). Wynika to przede wszystkim z konieczności zwiększenia udziału biomasy w paliwach, co wiąże się także z potrzebą zagospodarowania odpadów pochodzenia roślinnego. Kompozytowe paliwa stałe mogą z powodzeniem być poddawane zgazowaniu. Istnieje również zapotrzebowanie na inne produkty, np. granulaty mas ceramicznych, nawozów mineralnych oraz różnego rodzaju adsorbentów. Gabaryty oraz właściwości tych produktów wykluczają stosowanie pras stemplowych lub walcowych. Materiały wyjściowe do wytwarzania granulatu różnią się własnościami, które silnie rzutują na przebieg procesu aglomeracji. Powoduje to znaczne zróżnicowanie wymaganego stopnia zagęszczenia materiału oraz wywieranego na niego nacisku, a więc także obciążenia elementów układu roboczego. Do granulacji ciśnieniowej stosuje się: granulatory z matrycą pierścieniową (PMP), matrycą płaską (GMP) oraz konstrukcje łączące zalety granulatorów PMP i pras walcowych, w których scala się przede wszystkim materiały pochodzenia mineralnego oraz odpady poprodukcyjne [1, 2, 4, 5]. Granulator GMP jest rozwiązaniem posiadającym duże możliwości rozwojowe. Z własnych doświadczeń wynika, że o prawidłowym działaniu granulatora GMP decydują: geometria rolek, geometria gniazd formujących, ich sposób rozmieszczenia w matrycy i stan powierzchni po obróbce, kinetyka układu roboczego oraz własności mechaniczne tworzyw konstrukcyjnych, z których wykonane są jego elementy. Stanowi to przedmiot badań, które prowadzone są w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH. Celem ich jest opracowanie podstaw konstrukcji granulatora GMP. W artykule przedstawiono fragment prac, który dotyczy określania kąta chwytu oraz doboru materiałowych i geometrycznych cech konstrukcyjnych elementów roboczych granulatora GMP

## Charakterystyka granulatora z płaską matrycą

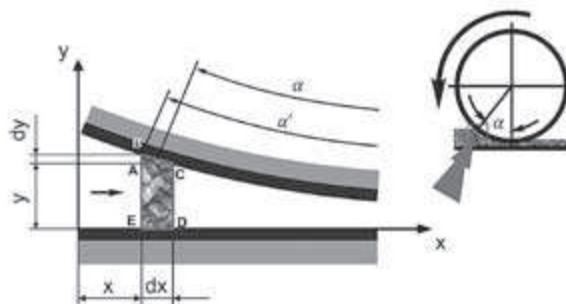
Przykład granulatora z płaską matrycą pokazano na Rysunku 1. Jego układ roboczy składa się z tarczy, w której wykonane są odpowiednio wyprofilowane otwory oraz dwóch rolek zagęszczających materiał. Wymienione elementy wraz z obudową tworzą komorę formowania granul. Matryca jest nieruchoma i może być podparta po stronie zewnętrznej oraz wewnętrznej. W komorze znajduje się głowica, do której zamocowane są na łożyskach rolki zagęszczające. Do jej napędu służy motoreduktor. Zasilanie granulatora odbywa się z góry poprzez swobodny zasyp materiału. Nacisk wywierany na klin materiału znajdujący się między rolką i matrycą powoduje wytłaczanie granul przez otwory matrycy. Znane są także inne rozwiązania konstrukcyjne takiego granulatora [2, 3], w których napędzana jest tylko matryca lub równocześnie matryca i rolki. Zależy to od wielkości prasy, rodzaju matrycy i własności granulowanego materiału. Głowica wraz z rolkami stanowi jeden zespół konstrukcyjny. W najnowszych rozwiązaniach odległość rolek od matrycy regulowana jest w sposób automatyczny, a ich liczba dochodzi do pięciu. Wartość prędkości obwodowej rolki zawiera się w granicach 1,6-3 m/s.



Rys. 1. Przykład granulatora z płaską matrycą

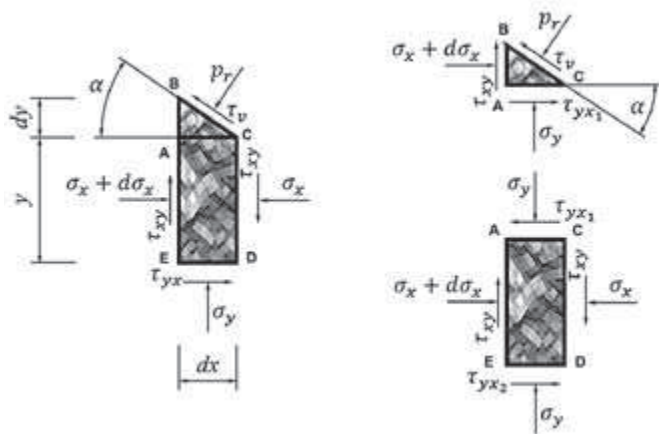
## Wyznaczanie kąta chwytu w układzie roboczym granulatora

Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że brakuje odpowiedniej metody wyznaczania kąta chwytu w układzie roboczym granulatora. Stanowiło to inspirację do przeprowadzenia rozważań mających na celu rozwiązanie tego problemu. Założono, że zagęszczenie materiału w układzie płaska matryca-rolka (Rys. 2) może nastąpić po spełnieniu warunku chwytu. Ze względu na trudności matematycznego opisu zjawisk towarzyszących procesowi zagęszczania i konsolidowania materiału, do rozważań przyjęto elementarny wycinek jego objętości, w którym krzywoliniową powierzchnię kontaktu z rolką zastąpiono powierzchnią płaską. Założono również, że niezbędnym warunkiem dla prawidłowego przebiegu procesu zagęszczania jest wyeliminowanie wewnętrznych poślizgów materiału, jakie mogą wystąpić w obrębie strefy zagęszczania. Uwagę skoncentrowano na jej początku, a więc w miejscu, gdzie powierzchnia robocza rolki wchodzi w kontakt z materiałem. Rozkład naprężeń występujących na powierzchniach elementarnego wycinka objętości przedstawiono na Rysunku 3.



Rys. 2. Schemat układu zagęszczania materiału w prasie z płaską matrycą

Określono jego przekrój krytyczny AC, w którym może nastąpić ścięcie materiału. Dzieli on elementarny wycinek objętości na 2 części (Rys. 3).



Rys. 3. Naprężenia działające na powierzchniach elementarnego wycinka materiału

W przeprowadzonych rozważaniach przyjęto następujące oznaczenia:

- $\alpha'$  – kąt chwytu
- $\alpha$  – kąt nachylenia zastępczej powierzchni paskiej do poziomu
- $\mu$  – współczynnik tarcia zewnętrznego
- $\xi$  – współczynnik tarcia wewnętrznego
- $\sigma_x$  – naprężenie normalne działające w kierunku osi x
- $\sigma_y$  – naprężenie normalne działające w kierunku osi y
- $\tau_v$  – naprężenie styczne występujące na powierzchni kontaktu materiału z rolką
- $\tau_{yx1}$  – naprężenie styczne działające w kierunku osi x, w przekroju zagęszczanego materiału
- $\tau_{yx2}$  – naprężenie styczne działające w kierunku osi x na powierzchni styku materiału z matrycą
- $p_r$  – nacisk jednostkowy wywierany przez rolkę zagęszczającą.

Rozważono warunki równowagi 2 części elementarnego wycinka materiału. Uwzględniono również związki wynikające z zależności występujących pomiędzy wartościami niektórych wielkości, otrzymując w ten sposób układ równań (1.1):

$$\begin{aligned}
 (\sigma_x + d\sigma_x)dy + \tau_{yx1}dx - \tau_v \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha - p_r \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha &= 0 \\
 \sigma_y dx + \tau_{xy}dy + \tau_v \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha - p_r \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha &= 0 \\
 (\sigma_x + d\sigma_x)y - \tau_{xy} + \tau_{yx2}dx - \tau_{yx1}dx &= 0 \\
 p_r \cdot \mu &= \tau_v \\
 \sigma_y \cdot \xi &= \tau_{yx2} \\
 \sigma_y - \sigma_x &= 2p_r \\
 \tau_{xy} &= \tau_{yx1}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Rozwiązując układ równań (1.1) uzyskano zależność (1.2) pozwalającą na obliczenie wartości naprężenia stycznego działającego w przekroju AC:

$$\tau_{yx1} = \frac{p_r \mu \left( 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right) + \left( 2p_r + \frac{p_r \xi}{y} (dx - \mu dy) \right) \frac{dy}{dx}}{1 - \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 + \frac{dx + \xi dy}{y} \cdot \frac{dy}{dx}} \tag{1.2}$$

Skomplikowana postać zależności (1.2) ogranicza możliwości jej praktycznego zastosowania. Dlatego dokonano uproszczenia rzeczywistej sytuacji fizycznej przyjmując, że:

$$\sigma_y = p_r \tag{1.3}$$

Uproszczenie (1.3) nie będzie przyczyną istotnych błędów, ponieważ z własnych doświadczeń wiadomo, że kąt przyjmuje małą wartość. Podstawiając (1.3) do (1.2) i pomijając człony o nieskończenie małych wartościach otrzymano równanie (1.4):

$$\tau_{yx1} = p_r \left( \mu + 2 \frac{dy}{dx} \right) \tag{1.4}$$

Naprężenie ścinające powinno być mniejsze, a w granicznym przypadku równe wytrzymałości na ścinanie aglomerowanego materiału:

$$\tau_{yx1} \leq \tau_f \tag{1.5}$$

Ponieważ  $\alpha$  jest nieznacznie większe od  $\alpha'$  można przyjąć, że:

$$\tan \alpha' = \frac{dy}{dx} \tag{1.6}$$

po podstawieniu (1.5) oraz (1.6) do (1.4) otrzymano nierówność (1.7):

$$\tan \alpha' \leq \frac{1}{2} \left( \frac{k_t}{p_r} - \mu \right) \tag{1.7}$$

Stosunek naprężeń tnących do nacisku stanowi współczynnik tarcia wewnętrznego, co uwzględniono w nierówności (1.7) otrzymując jej postać (1.8):

$$\tan \alpha' \leq \frac{1}{2} (\xi - \mu) \tag{1.8}$$

Zatem:

$$\alpha' \leq \arctan \left( \frac{1}{2} (\xi - \mu) \right) \tag{1.9}$$

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że można na drodze teoretycznej określić kąt chwytu w układzie roboczym granuladora, jeżeli znane są współczynniki tarcia wewnętrznego oraz zewnętrznego.

### Dobór cech konstrukcyjnych elementów roboczych granuladora

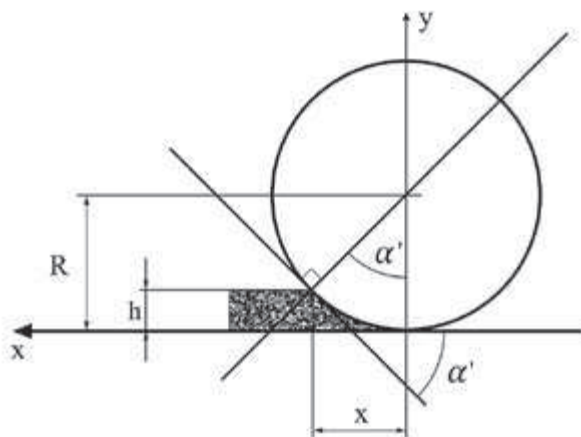
Matryce wykonywane są ze stali stopowych typu: X46Cr13, 20MnCr5, 18NiCrMo5. W przypadku stosowania stali X46Cr13 hartuje się je próżniowo i odpuszcza do twardości 53-55 HRC na powierzchni i w rdzeniu. Matryce ze stali 20MnCr5 i 18NiCrMo5, wykonuje się inaczej. Poddaje się je nawęglaniu i hartowaniu do twardości 60-62 HRC na głębokość 0,8-1,2 mm. Matryce wykonane z tych stali wykazują większą trwałość podczas granulowania surowców o twardości powyżej 65 HB. Istotną rolę odgrywa także stan powierzchni roboczej matrycy [6]. Dobór matrycy wymaga znajomości właściwości zagęszczanego materiału oraz produktu końcowego.

Rolki najczęściej wykonuje się ze stali stopowych, np. NCI 1LV. Poddawane są one hartowaniu na wskroś do twardości 5860 HRC. Średnia trwałość rolek wynosi ok. 500 godzin. Prowadzone są prace nad doбором tworzyw konstrukcyjnych umożliwiających dwukrotne zwiększenie trwałości rolek. Duże znaczenie ma także kształt powierzchni roboczej rolek [7].

Granulatory przemysłowe wyposażane są w matryce o średnicach 175-250 mm. Powierzchnia perforowana matryc wynosi 6005900 cm<sup>2</sup>, a wskaźnik prześwitu osiąga wartości z przedziału 0,380,60. Na-

tomiaś wskaźnik zainstalowanej mocy do powierzchni perforowanej matrycy zawiera się w granicach 2067 W/cm<sup>2</sup>. Rolki dociskowe posiadają średnice 175450 mm i szerokości 70190 mm.

W doborze geometrycznych cech konstrukcyjnych elementów roboczych granulatora ważne jest określenie minimalnego promienia rolki zagęszczającej. Można tego dokonać na drodze teoretycznej. W tym celu przeprowadzono stosowne rozważania zakładając, że występujące siły tarcia uniemożliwiają poślizg rolki względem materiału oraz materiału względem matrycy.



Rys. 4. Schemat układu zagęszczania płaska matryca - rolka wraz z przyjętymi oznaczeniami

Uwzględniając związki geometryczne w układzie zagęszczania płaska matryca-rolka (Rys. 4) oraz zależność (1.6) otrzymano układ równań (2.1):

$$\begin{cases} x^2 + (y - R)^2 = R^2 \\ \frac{dy}{dx} = \tan \alpha' \end{cases} \quad (2.1)$$

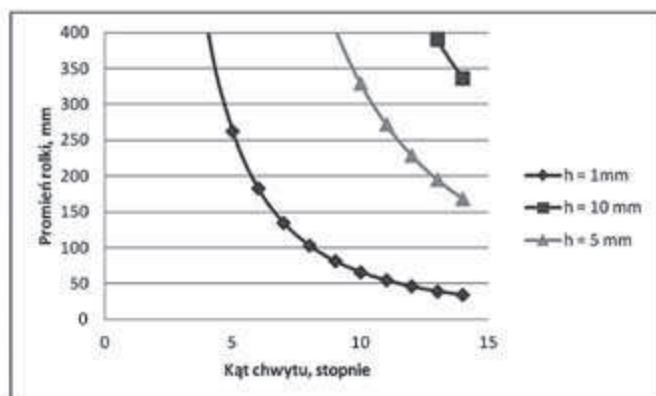
Przekształcając układ równań (2.1) uzyskano równanie kwadratowe (2.2):

$$(\tan \alpha')^2 R^2 - 2h((\tan \alpha')^2 + 1)R + ((\tan \alpha')^2 + 1)h^2 = 0 \quad (2.2)$$

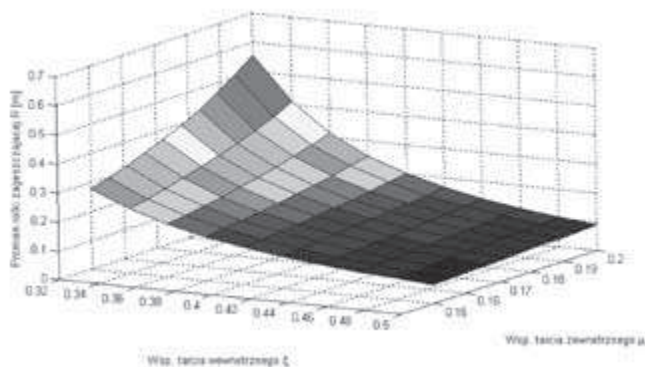
Równanie (2.2) ma dwa pierwiastki rzeczywiste:

$$R_{1,2} = \frac{h \left( ((\tan \alpha')^2 + 1) \pm \sqrt{(\tan \alpha')^2 + 1} \right)}{(\tan \alpha')^2} \quad (2.3)$$

Z warunków konstrukcyjnych odrzucono jedno rozwiązanie, dla którego  $R \approx 0$ . Natomiast drugie rozwiązanie wykorzystano do określenia zależności promienia rolki zagęszczającej od kąta chwytu oraz grubości warstwy zagęszczanego materiału, którą przedstawiono na Rysunku 5.



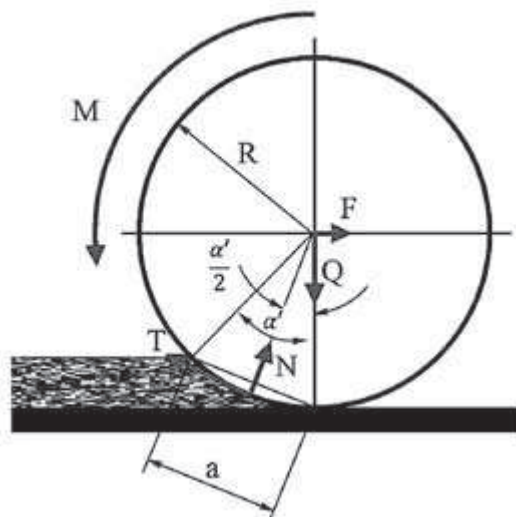
Rys. 5. Zależność promienia rolki zagęszczającej od kąta chwytu oraz wysokości warstwy materiału w punkcie chwytu



Rys. 6. Przykładowa zależność promienia rolki dla współczynników tarcia zewnętrznego i wewnętrznego dla wysokości nadawy równej 1 mm

Korzystając z nierówności (1.8) oraz równania (2.3) dokonano obliczeń minimalnego promienia rolki w zależności od współczynników tarcia zewnętrznego i wewnętrznego. Otrzymane wyniki przedstawiono na Rysunku 6. Na podstawie ich analizy stwierdzono, że im większa jest różnica między współczynnikami tarcia, tym mniejszą średnicę może posiadać rolka. Wiąże się to jednak z obniżeniem wydajności granulatora.

W przypadku nadawy, która wykazuje znacznie większą wartość współczynnika tarcia wewnętrznego niż zewnętrznego, zaleca się profilowanie powierzchni roboczej rolki [7]. Wydajność granulatora zależy od kąta chwytu i wynikającej z niego wysokości warstwy zagęszczanego materiału oraz od szerokości rolki. Zwiększenie szerokości rolki powoduje wzrost zużycia ściernego elementów roboczych, co zmniejsza trwałość eksploatacyjną układu. Korzystne jest zatem stosowanie wąskich rolek o promieniu większym niż wyznaczony minimalny. Umożliwia to zwiększenie wysokości warstwy nadawy wciąganej przez rolkę.



Rys. 7. Układ sił działających na rolkę zagęszczającą w ruchu ustalonym

Istotny problem stanowi określenie momentu siły tarcia występującego na powierzchni kontaktu rolki z materiałem. Przyjmując oznaczenia przedstawione na Rysunku 7, wartość siły nacisku N materiału na rolkę wyrażono zależnością (2.4).

$$N = p_{r, sr} \cdot a \cdot b \quad (2.4)$$

gdzie:

$p_{r, sr}$  – średnia wartość nacisku na powierzchni kontaktu rolki z materiałem

$a$  – długość cięciwy odpowiadającej łukowi chwytu

$b$  – szerokość rolki.

Zakładając, że  $\mu$  określa współczynnik tarcia zewnętrznego pary ciernej rolka materiał wartość siły tarcia wynosi:

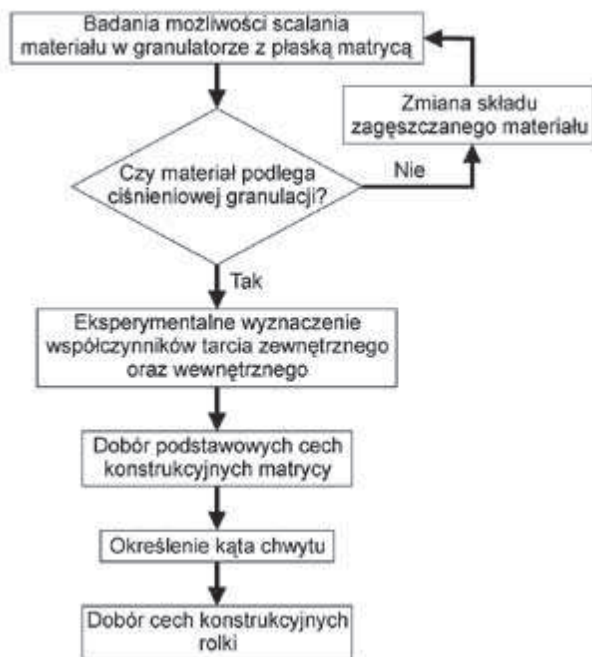
$$T = p_{r\dot{r}} \cdot a \cdot b \cdot \mu \quad (2.5)$$

Zależność (2.5) jest słuszna dla gładkiej powierzchni roboczej rolki. Zwiększenie współczynnika tarcia zewnętrznego uzyskuje się w wyniku jej profilowania. W takim przypadku należy posługiwać się zastępczym współczynnikiem tarcia zewnętrznego  $\mu_z$ . Moment siły tarcia zewnętrznego można z dostatecznym przybliżeniem określić z zależności (2.6):

$$M_T = p_{r\dot{r}} \cdot a \cdot b \cdot \mu_z \cdot R \quad (2.6)$$

Należy podkreślić, że wartość nacisku wywieranego przez rolkę na materiał posiada charakter wynikowy. Określenie średniej jego wartości stanowi osobny problem. Będzie on przedmiotem kolejnych badań i dociekań teoretycznych, w których uwzględni się także zagadnienie wyznaczania zastępczego współczynnika tarcia zewnętrznego  $\mu_z$ .

Rozwinięcie teorii umożliwiło opracowanie metody doboru elementów układu roboczego granuladora, którą przedstawiono na Rysunku 8. W metodzie wyróżniono 5 etapów. Pierwszy z nich, to ocena możliwości scalania określonego materiału w granulatorze z płaską matrycą, którą dokonuje się na podstawie wyników badań laboratoryjnych. W przypadku uzyskania pozytywnych rezultatów realizuje się etap drugi, polegający na wyznaczeniu w sposób eksperymentalny współczynników tarcia zewnętrznego oraz wewnętrznego.



Rys. 8. Procedura doboru cech konstrukcyjnych elementów roboczych granuladora z płaską matrycą

W trzecim etapie dokonuje się doboru podstawowych geometrycznych oraz materiałowych cech konstrukcyjnych matrycy. Natomiast w pozostałych dwóch etapach określa się kąt chwytu, a następnie doбира się cechy konstrukcyjne rolki. Należy zaznaczyć, że w przypadku negatywnej oceny możliwości granulowania materiału powinno się podjąć próbę zmiany jego własności, a następnie powtórzyć badania na granulatorze laboratoryjnym.

### Podsumowanie

Zalety konstrukcyjne granulatorów z płaską matrycą oraz możliwości rozszerzenia obszaru ich stosowania stanowiły inspirację do podjęcia badań nad doskonaleniem ich konstrukcji. Niektóre wyniki prac, dotyczące w szczególności określania kąta chwytu oraz do-

boru średnicy rolki w zależności od własności granulowanego materiału, przedstawiono w niniejszym artykule. Stanowiły one podstawę do sformułowania założeń, a następnie opracowania projektu krajowego granuladora. Jego prototyp poddawany jest badaniom eksploatacyjnym. Prace eksperymentalne są kontynuowane i mają na celu określenie korzystnego rozmieszczenia otworów w matrycy, doboru ich geometrii oraz współczynnika prześwietu w zależności od własności granulowanego materiału. Przewiduje się, że wyniki badań przyczynią się także do opracowania technologii wytwarzania kompozytowych paliw stałych dla potrzeb ich zgazowania oraz w celu przystosowania do spalania w gospodarstwach domowych.

Artykuł opracowano w wyniku realizacji projektu Coal Gas – KIC, umowa nr 7.7.130.7006.

### Literatura

1. Dzik T., Mięso R.: *Granulatory do produkcji biopaliwa stałego z drewna*. Kraków: Problemy Inżynierii Mechanicznej i Robotyki 2004, **23**, 35-42.
2. Hejft R.: *Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych*. ITE, Radom 2002.
3. Hejft R.: *Granulacja ciśnieniowa – analiza układu roboczego z płaską matrycą*. Inżynieria Rolnicza 2006, **7**, 209-214.
4. Grochowicz J.: *Technologia produkcji mieszanek paszowych*. PWRiL, Warszawa 1996.
5. Obidziński S.: *Wpływ czasu docierania matrycy pierścieniowej na obciążenia w układzie roboczym granuladora w procesie granulowania pasz*. Inżynieria Rolnicza 2006, **7**, 343-349.
6. Obidziński S., Hejft R.: *Wpływ parametrów aparaturowo-procesowych na wartości nacisków zagęszczających w procesie granulowania pasz*. Inżynieria Rolnicza 2007, **5**, 313-319.
7. Zawisłak K.: *Wpływ kształtu powierzchni rolek wytłaczających na trwałość granulatu*. Inżynieria Rolnicza 2006, **7**, 475-483.

Mgr inż. Michał CHŁOPERK – Absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki (2009) oraz Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki (2012) Akademii Górniczo-Hutniczej. Obecnie jest doktorantem na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Zainteresowania naukowe: konstrukcja i eksploatacja maszyn i urządzeń, systemy sterowania i regulacji. Autor lub współautor 7 publikacji w prasie naukowo technicznej oraz 2 zgłoszeń patentowych, 8 referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych. E-mail: mchlopek@agh.edu.pl, tel.: (12) 617-31-20

Dr inż. Tomasz DZIK – Absolwent Wydziału Maszyn Górniczych i Hutniczych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (1974). Doktorat na Wydziale Maszyn Górniczych i Hutniczych (1984). Był wyróżniony za badania nagrodą Ministra Szkolnictwa Wyższego i Techniki. Obecnie pracuje w Katedrze Systemów Wytwarzania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Zainteresowania naukowe: procesy mechaniczne w inżynierii wytwarzania w szczególności rozdrabnianie, aglomeracja, suszenie. Jest współautorem 2 monografii i autorem rozdziałów w 4 monografiach, 37 artykułów w prasie naukowo technicznej i autorem lub współautorem 27 referatów i posterów na konferencjach krajowych i zagranicznych, twórcą 11 przyznanych patentów, oraz 14 ekspertyz. E-mail: tomdzik@imr.agh.edu.pl, tel.: (12) 617-31-20

Dr hab. inż. Marek HRYNIEWICZ, prof. AGH – Profesor nadzwyczajny Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Kierownik Katedry Systemów Wytwarzania. Autor 3 monografii, 148 publikacji naukowych oraz 19 patentów, a także 113 prac badawczych, w tym 7 projektów KBN. Jego zainteresowania naukowe związane są głównie z konstrukcją i eksploatacją maszyn i urządzeń technologicznych, a w szczególności tych, które służą do scalania materiałów sypkich oraz zagospodarowania odpadów poprodukcyjnych. Prowadzi także prace z zakresu mechaniki ośrodka zagęszczanego związane z modelowaniem matematycznym procesów zagęszczania i scalania materiałów pylistych oraz drobnoziarnistych. E-mail: mhryniew@agh.edu.pl, tel.: (12) 617-31-02