

Energochłonność procesu granulowania mieszanek paszowych

Streszczenie

Energochłonność granulowania, jak i jakość otrzymanego produktu, są ściśle związane z parametrami techniczno-technologicznymi realizacji procesu. W niniejszej pracy oba zagadnienia potraktowano łącznie, jednakże ze szczególnym zwróceniem uwagi na aspekty techniczne, takie jak parametry konstrukcyjne rolek i matrycy granulatora oraz wilgotność i wielkość cząstek materiału. Przedstawiono przykład doboru optymalnych wartości parametrów techniczno-technologicznych procesu granulowania dla zadanych warunków jego realizacji.

Słowa kluczowe: granulowanie, mieszanki paszowe, energochłonność

Energy consumption of the feed mixtures granulation process

Summary

The energy consumption of granulation as well as the quality of the product obtained are closely related to the technical and technological parameters of the process. In this work, both issues were treated together, however, with particular attention to technical aspects such as humidity and particle size of the material, construction parameters of the rolls and the granulator's matrix. The paper presents examples of selection of optimal values of technical and technological parameters of the granulation process for given conditions of its implementation.

Key words: granulation, compound feed, energy consumption

D – średnica granulatu, [mm]	S_s – wielkość szczeliny, [mm]
L – długość otworów matrycy, [mm]	R_{R1} – średnica rolki, [mm]
N – zapotrzebowanie na moc, [kW]	U – wilgotność mieszanki, [%]
N_i – minimalna energochłonność jednostkowa, [kWh·kg ⁻¹]	β – kąt wejścia do otworu, [°]
P – współczynnik prześwitu matrycy, [-]	ρ – gęstość granulatu, [kg·m ⁻³]

Wprowadzenie

Analiza wpływu parametrów techniczno-technologiczno-eksploatacyjnych (materiałowo- procesowo- aparaturowych) na przebieg procesu zagęszczania (granulowania) materiałów roślinnych i jakość produktu

Na przebieg procesu ciśnieniowej aglomeracji materiałów roślinnych (granulowanie, brykietowanie) ma wpływ szereg czynników, które można podzielić na następujące grupy (Czaban, 2000; Demianiuk, 2001; Grochowicz, 1996; Hejft, 2002; Obidziński, 2005):

- czynniki chemiczno-biologiczne (skład chemiczny zagęszczanego materiału, budowa biologiczna cząstek),
- czynniki materiałowe – związane z przygotowaniem materiału do procesu zagęszczania (wilgotność materiału, temperatura materiału, skład granulometryczny cząstek zagęszczanego materiału).

- czynniki aparaturowe – konstrukcyjne (średnica matrycy, średnica i liczba rolek zagęszczających, średnica, długość i stan powierzchni otworów w matrycy, wielkość szczeliny między matrycą a rolką, itp.),
- czynniki procesowe – związane z przebiegiem procesu zagęszczania (naciski zagęszczające, natężenie przepływu zagęszczanego materiału, prędkość zagęszczania, temperatura procesu, kondycjonowanie).

Wpływ czynników biologiczno-chemicznych, parametrów materiałowych, procesowych i aparaturowych schematycznie przedstawiono w tabelach 1-4 (Obidziński, 2005).

Strzałki w tabeli oznaczają wzrost lub spadek: gęstości produktu, wytrzymałości kinetycznej, wydajności procesu i energochłonności procesu spowodowany wzrostem wartości kolejnych parametrów.

Tab. 1. Wpływ czynników biologiczno-chemicznych na jakość granulatu oraz przebieg procesu

Tab. 1. The influence of biological and chemical factors on the quality of granulate and the course of the process

Wpływ na parametr; Impact on the parameter	Gęstość produktu; Product density	Wytrzymałość kinetyczna; Kinetic durability	Wydajność procesu; Process performance	Energochłonność procesu; Process energy consumption
Zawartość skrobi; Strach content	↑	↑	↑	↓
Zawartość tłuszczu; Fat content	↓	↓	↑	↓
Zawartość białka; Protein content	↑	↑	↑	↓
Zawartość włókna; Fiber content	↑	↑	↓	↑

Tab. 2. Wpływ parametrów materiałowych na jakość granulatu oraz przebieg procesu

Tab. 2. The influence of material parameters on the quality of granules and the course of the process

Wpływ na parametr; Impact on the parameter	Gęstość produktu; Product density	Wytrzymałość kinetyczna; Kinetic durability	Wydajność procesu; Process performance	Energochłonność procesu; Process energy consumption
Wilgotność surowca; Humidity of the raw material	↓	↓	↑	↓
Temperatura surowca; Temperature of the raw material	↑	↑	↑	↓
Skład granulometryczny (średnica cząstki); Granulometric composition (particle diameter)	↓	↓	↓	↑
Gęstość materiału; Density of the material	↑	↑	↑	↓

Tab. 3. Wpływ parametrów aparaturowych (konstrukcyjnych) na jakość granulatu oraz przebieg procesu

Tab. 3. The impact of apparatus (construction) parameters on the quality of the granulate and the course of the process

Wpływ na parametr; Impact on the parameter	Gęstość produktu; Product density	Wytrzymałość kinetyczna; Kinetic durability	Wydajność procesu; Process performance	Energochłonność procesu; Process energy consumption
Średnica matrycy; Diameter of the matrix	↓	↓	↑	↑
Średnica rolek; Diameter of rolls	↓	↓	↑	↑
Liczba rolek; Number of rolls	↓	↓	↑	↑
Wielkość szczeliny między rolką a matrycą; The size of the gap between the roll and a matrix	↑	↑	↑	↑
Długość otworów w matrycy; The length of the holes in the matrix	↑	↑	↓	↑
Średnica otworów w matrycy; Diameter of holes in the matrix	↓	↓	↑	↓
Współczynnik prześwietu matrycy; Coefficient clearance of the matrix	↓	↓	↑	↓
Powierzchnia w obszarze wejścia materiału w otwór matrycy; Surface in the material entry area in the die opening	↑	↑	↓	↑

Tab. 4. Wpływ parametrów procesowych na jakość granulatu oraz przebieg procesu

Tab. 4. The influence of process parameters on the quality of the granulate and the course of the process

Wpływ na parametr; Impact on the parameter	Gęstość produktu; Product density	Wytrzymałość kinetyczna; Kinetic durability	Wydajność procesu; Process performance	Energochłonność procesu; Process energy consumption
Naciski zagęszczające; Thickening pressures;	↑	↑		↑
Kondycjonowanie; Conditioning;	↑	↑	↑	↓
Natężenie przepływu surowca; Raw material flow rate;	↓	↓		↑
Prędkość procesu (prędkość obrotowa układu roboczego); Process speed (rotational speed of the working system);	↓	↓	↑	↑

Cel badań

Celem pracy jest przedstawienie wpływu parametrów techniczno-technologicznych realizacji procesu granulowania na jego energochłonność oraz dobór optymalnych wartości parametrów techniczno-technologicznych procesu granulowania, dla zadanych warunków jego realizacji.

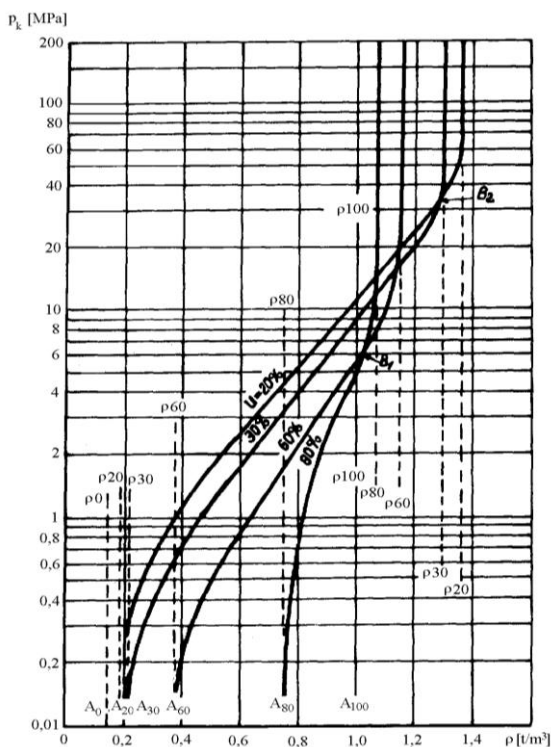
Granulowanie i brykietowanie – charakterystyka parametrów techniczno-technologicznych

Publikacje obejmujące ciśnieniową aglomerację materiałów roślinnych dotyczą w większości zagadnień technologicznych (jak np. wpływu właściwości fizykochemicznych zagęszczanego materiału na przebieg procesu) (Obidziński i in., 2017a, 2017b, 2018). W znacznie mniejszym stopniu poru-

szane są zagadnienia techniczne, zwłaszcza związane z konstrukcją urządzeń granulująco-brykietujących. Biorąc pod uwagę, że zarówno energochłonność ciśnieniowej aglomeracji jak i jakość otrzymanego produktu są ściśle związane z parametrami techniczno-technologicznymi realizacji procesu (Hejft i Obidziński, 2012), w niniejszej pracy oba zagadnienia potraktowano łącznie, jednakże ze szczególnym zwróceniem uwagi na aspekty techniczne. Przeglądu stanu wiedzy dotyczącego ciśnieniowej aglomeracji dokonano w oparciu o wybrane rezultaty badań, mając na uwadze, że większość badaczy przedstawiła w swoich publikacjach analizę odnośnie granulowania i brykietowania.

Według Obidzińskiego i Hejfta (2013) wzrost wilgotności mieszanki z 13,38% do 29,58% spowodował spadek zapotrzebowania na moc o około 56%. Jednocześnie, zwiększenie wilgotności aglomerowanych materiałów spowodowało spadek wytrzymałości kinetycznej granulatu oznaczonej metodą Holmena o ok. 60% (z 98,6 do 38,81%). Gęstość granulatu spadła natomiast o ponad 56% (z wartości 1162,27 do 656,61 kg/m³).

Według Busse (1966), który jako jeden z pierwszych badał wpływ wilgotności materiału na proces, podczas aglomeracji materiału roślinnego można wydzielić dwa zakresy: pierwszy, gdy naciski zagęszczające wynoszą 7-40 MPa (gęstość do około 1000 ÷ 1300 kg·m⁻³), w którym wzrost wilgotności powoduje (przy tych samych naciskach zagęszczających) wzrost gęstości powstającego granulatu; drugi, gdy naciski wynoszą powyżej 40 MPa (granulowanie, brykietowanie), gdzie wzrost wilgotności powoduje spadek gęstości aglomeratu (Rys. 1). Według Jakovleva (1987) wzrost temperatury brykietowanej poekstrakcyjnej śruty bawełnianej z 313 K do 353 K powoduje spadek jednostkowej energochłonności procesu z 9,2 J·kg⁻¹ do 5,8 J·kg⁻¹ (dla nacisków zagęszczających 100 MPa i wilgotności 8,5%). Potwierdzają to badania przeprowadzone przez Obidzińskiego (2011), który aglomerując odpady tytoniowe stwierdza, że w zakresie temperatur od 40 do 100°C najkorzystniejsze warunki, ze względu na energochłonność procesu, występują w temperaturze 70°C. Jak podaje Grochowicz i in. (2004) w przypadku zagęszczania śruty hubinowej niższe wartości energii zagęszczania są charakterystyczne dla śruty o większym stopniu rozdrobnienia. Według Kluga (1976) zwiększenie zawartości cietej słomy w mieszance paszowej (objętościowej) z 25% do 75% powoduje wzrost zapotrzebowania na moc o około 30 kW.



Rys. 1. Przebiegi zmian zagęszczeń przy różnej wilgotności materiału (na podstawie teoretycznych rozważań); liczby przy literach A i symbolach p, oznaczają wilgotności (Busse, 1966)

Fig. 1. The course of changes in densities at different moisture content (based on theoretical considerations); numbers at letters A and symbols p are humidity

Proces ciśnieniowej aglomeracji materiałów pochodzenia roślinnego (granulowanie, brykietowanie) najczęściej jest realizowany w praktyce w układach roboczych:

- pierścieniowa lub płaska matryca – rolki zagęszczające,
- komora zamknięta lub otwarta – tłok zagęszczający,
- komora otwarta – ślimak zagęszczający,

z których pierwszy system stanowi najliczniejszą grupę maszyn. Wzrost średnicy matrycy (matryca pierścieniowa) powoduje spadek jednostkowej energochłonności procesu (Hejft, 2002). Średnice wewnętrzne matryc pierścieniowych wynoszą od 180 mm (granulatory laboratoryjne) i od 300 mm (granulatory przemysłowe) do około 1000 mm, przy szerokości bieżni roboczej odpowiednio od 28 mm do 320 mm. Średnice matryc płaskich wynoszą od około 300 mm do 1500 mm, przy szerokości bieżni roboczej od około 30 ÷ 50 mm do 200 mm (Hejft, 2002). Wzrost średnicy rolki powoduje wzrost wydajności oraz spadek jednostkowej energochłonności procesu. Wzrost liczby rolek powoduje zwiększenie wydajności i energochłonności oraz spadek jednostkowej energochłonności urządzenia i wytrzymałości granulatu. Według danych firmy Bühler (katalogi firm), wzrost średnicy rolek z 240 mm do 320 mm powoduje wzrost wydajności o około 3 t·h⁻¹ oraz spadek jednostkowej energochłonności procesu o około 3 kWh·t⁻¹. Natomiast, zastąpienie dwóch rolek o średnicy 440 mm trzema o średnicy 380 mm (według firmy Bühler, w granulatorze z matrycą pierścieniową o średnicy wewnętrznej 900 mm) powoduje spadek wytrzymałości aglomeratu (granulatu) o około 12%, wzrost energochłonności procesu o około 20% oraz spadek energochłonności jednostkowej urządzenia o około 20%. Wzrost wartości szczeliny wpływa na zwiększenie energochłonności procesu oraz wytrzymałości kinetycznej aglomeratu.

Jak podaje Obidziński i Hejft (2012b) zwiększenie szczeliny roboczej pomiędzy matrycą a rolką granulatora z wartości 0,4 mm do 0,8 mm powodowało niewielki wzrost gęstości granulatu. Wzrost ten był związany ze zwiększeniem grubości pasma utworzonego pomiędzy rolką a matrycą, a tym samym wzrostem wartości siły wypadkowej pod rolką zagęszczającą. Zatem wzrost odległości pomiędzy matrycą a rolką zagęszczającą powoduje wzrost energochłonności procesu, odniesionej do jednostkowej powierzchni roboczej matrycy. Wzrost wartości współczynnika prześwietlenia matrycy wpływa na:

- spadek gęstości i wytrzymałości kinetycznej aglomeratu,
- spadek wartości nacisków zagęszczających,
- spadek jednostkowej energochłonności (Hejft, 2002).

Jak podaje Obidziński i Hejft (2012b) zwiększenie długości otworów w matrycy wydłuża czas przebywania aglomerowanego materiału w otworach matrycy, a tym samym wydłuża się czas oddziaływania temperatury na elementarne porcje mieszanki. Następuje wtedy powstanie trwalszych wiązań w otrzymanym granulacie, zwiększa się gęstość granulatu, a tym samym i współczynnik wytrzymałości kinetycznej granulatu. Dłuższy czas przebywania mieszanki w otworze istotnie wpływa na energochłonność procesu granulowania przy czym dwukrotny wzrost długości otworów w matrycy (wg. Friedrich 1978) wpływa na półtora-krotny wzrost energochłonności procesu. Wraz ze zwiększeniem stosunku średnicy otworów matrycy do ich długości

otrzymany granulaty wykazuje niższą wytrzymałość kinetyczną oraz gęstość fizyczną (Hejft, 2002).

Określenie optymalnych parametrów techniczno-technologicznych granulowania i brykietowania w urządzeniu z układem roboczym „matryca płaska-rolki zagęszczające”

Większość publikacji zawiera wycinkowe wyniki badań wpływu pojedynczych parametrów techniczno - technologicznych na przebieg procesu ciśnieniowej aglomeracji (granulowanie, brykietowanie). W celu określenia optymalnych parametrów uniwersalnych urządzeń granulująco-brykietujących o niewielkiej wydajności w Katedrze Inżynierii Rolno-Spożywczej i Kształtowania Środowiska, Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska (obecna nazwa) Politechniki Białostockiej wykonano kompleksowe badania granulowania i brykietowania pasz (DK- dla drobiu, T2-trzody chlewnej, suszu z traw, pasza z udziałem cietej słomy). Wyniki obszernych badań przedstawiono w monografii (Hejft, 2002).

Tab. 5. Parametry techniczno-technologiczne ciśnieniowej aglomeracji w uniwersalnym urządzeniu granulująco-brykietującym

Tab. 5. Technical and technological parameters of a pressure agglomeration in a universal granulating and briquetting machine

Mieszanka-DK; Mix-DK	
Średnica granulatu; The diameter of the granulate;	$D = 4 \text{ mm}$
Gęstość granulatu; Granulate density	$r = 1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Wydajność procesu; Process efficiency;	$Q = 250 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$
Minimalna energochłonność jednostkowa przy następujących parametrach: The minimum unit energy consumption with the following parameters:	$N_i = 0,03216 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$
- wilgotność mieszanki humidity of the mixture	$U = 13,3\%$
- współczynnik prześwietlenia matrycy; matrix clearance factor	$P = 0,39 (39\%)$
- długość otworów w matrycy length of holes in the matrix	$L = 21,6 \text{ mm}$
- kąt wejścia do otworu entry angle to the hole	$b = 0^\circ$
- wielkość szczeliny the size of the gap	$s = 0,5 \text{ mm}$
- średnica rolki, roll diameter,	$R_{R1} = 250 \text{ mm}$
- grubość matrycy matrix thickness	$L_c = 21,6 \text{ mm}$
- liczba otworów w matrycy number of holes in the matrix	$I = 2218$
- powierzchnia robocza matrycy; matrix working surface	$F_c = 714,71 \text{ cm}^2$
- zapotrzebowanie na moc; power demand	$N = 8,04 \text{ kW}$

Przykładowe zależności wpływu niżej wymienionych parametrów na gęstość granulatu oraz energochłonność procesu granulowania dla mieszanki paszowej DK przedstawiono w równaniach (1), (2), (3).

$$N = 26,75 - 0,383U - 0,204P + 0,27L + 0,033\beta + 1,475S_s - 0,043R_{R1} \quad (1)$$

$$N_i = (98,1 - 1,07U - 0,46P + 0,61L + 0,18\beta + 3,5S_s - 0,19R_{R1}) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$\rho = 1467,5 - 14,8U - 7,81P + 9,5L + 0,74\beta \quad (3)$$

Wprowadzając układ równań do programu komputerowego możliwe jest określenie optymalnych parametrów przebiegu procesu granulowania (brykietowania) przy zadanej gęstości aglomeratu oraz minimalnej energochłonności jednostkowej w układzie roboczym granulatora. Przykładowe wyniki przedstawiono w tabeli 5 (Hejft, 2002).

Podsumowanie

Wzrost wilgotności materiału powoduje spadek gęstości granulatu i energochłonności jednostkowej procesu.

Zwiększenie wielkości cząstek materiału powoduje spadek gęstości granulatu i spadek energochłonności jednostkowej procesu.

Większa średnica rolki zagęszczającej powoduje spadek jednostkowej energochłonności procesu.

Wzrost wartości szczeliny pomiędzy rolką zagęszczającą a matrycą wpływa na zwiększenie energochłonności jednostkowej procesu.

Większa średnica otworów powoduje spadek energochłonności jednostkowej procesu i gęstości granulatu.

Większa sumaryczna powierzchnia pól otworów w stosunku do powierzchni roboczej matrycy wpływa na spadek zarówno energochłonności jednostkowej procesu jak gęstości granulatu.

Wzrost długości otworów w matrycy wpływa na zwiększenie energochłonności jednostkowej procesu i gęstości granulatu.

Zwiększenie powierzchni w obszarze wejścia mieszanki paszowej do otworu wpływa na wzrost energochłonności jednostkowej procesu i gęstości granulatu.

Bibliografia

- Busse. W. (1966). Das Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. *Fortschritt-Berichte, VDI-Zeitschrift, Düsseldorf* 14(1).
- Czaban. J. (2000). Ciśnieniowa aglomeracja pasz w układzie roboczym granulatora. *Praca doktorska. Politechnika Białostocka, Białystok*.
- Demianiuk. L. (2001). Brykietowanie rozdrobnionych materiałów roślinnych. *Praca doktorska. Politechnika Białostocka, Białystok*.
- Friedrich. W. (1978). Das Pelletieren von Mischfutter-Grundlagen und Einflussgrößen des Pressprozesses und Wirkung auf die Nährstoffe. *Aufbereitungs-Technik, 19(9)*, 401-406.
- Grochowicz. J., Andrejko. D., Mazur. J. (2004). Wpływ wilgotności i stopnia rozdrobnienia na energię zagęszczania i wytrzymałość brykietów łubinowych. *Motrol. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, 6*, 96-103.

- Grochowicz, J. (1996). Technologia produkcji mieszanek paszowych. Wydanie 2, PWRiL, Warszawa.
- Hejft, R. (2002). Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych, Białystok.
- Hejft, R., Obidziński, S. (2012). Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych - innowacje technologiczno-techniczne. Część 1. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57(1), 63-65.
- Jakovlev N. A. (1987) Technologiĳeskie parametry processa pressovanija ĳłopkovogo ųrota. *Piųĳevaja tehnologija*, 181(6), 43-46.
- Klug, A. (1976). Einfluss der Rezeptur auf Durchsatz und Leistungsbedarf einer Ringmatrizenpresse sowie auf die Pelletfestigkeit *Agrartechnik*, 26(11), 514-515.
- Obidziński, S. (2005). Granulowanie materiałów roślinnych w pierścieniowym układzie roboczym granulatora. Praca doktorska. Politechnika Białostocka, Białystok.
- Obidziński, S. (2011). Badania procesu zagęszczania odpadów tytoniowych. *Inżynieria Aparatury Chemicznej*, 50(1), 29-30.
- Obidziński, S., Dołżyńska, M., Bobowik, G., Bieńczyk, A. (2018). Agglomeration process of post-production tobacco waste. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 63(1), 40-45.
- Obidziński, S., Hejft R., Dołżyńska M. (2017a) Badanie procesu granulowania odpadów zbożowych. *Przemysł Chemiczny*, 96(11), 2360-2363. [doi: 10.15199/62.2017.11.28](https://doi.org/10.15199/62.2017.11.28).
- Obidziński, S., Joka M., Bieńczyk A., Jadwisieńczyk K. (2017b) Tests of the process of post-production onion waste pelleting. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 62(2), 89-92.
- Obidziński, S. Hejft, R. (2012b). Wpływ parametrów techniczno-technologicznych procesu granulowania pasz na jakość otrzymanego produktu. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57(1), 109-114.
- Obidziński, S. Hejft, R. (2013). Wpływ dodatku wycierki ziemniaczanej do otrębów pwsianych na energochłonność procesu granulowania i jakość granulatu. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 58(1), 133-138.

Roman Hejft

Politechnika Białostocka

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Inżynierii Rolno-Spożywczej i Kształtowania Środowiska,

ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

e-mail: r.hejft@pb.edu.pl