

Ryszard Kulig, Janusz Laskowski
Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego
Akademia Rolnicza w Lublinie

WPLYW ZAWARTOŚCI TŁUSZCZU NA PROCES GRANULOWANIA MATERIAŁÓW PASZOWYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem zawartości tłuszczu w materiale paszowym na przebieg procesu granulowania, prowadzonego metodą „na gorąco” i „na zimno”. Badaniom poddano mieszaninę pszenicy z rzepakim o zawartości tłuszczu od 1,92 do 20,8%. W czasie granulowania rejestrowano charakterystykę zużycia pary i ciepła oraz mocy elektrycznej, na podstawie czego określono energochłonność procesu. Stwierdzono prostoliniowe zależności pomiędzy zużyciem pary i ciepła ($r=0,98$) oraz przyrostem wilgotności materiału po obróbce hydrotermicznej ($r=0,97$) a wzrostem udziału tłuszczu w mieszaninie. Wykazano, że ze zwiększaniem zawartości tłuszczu w materiale zmniejsza się energochłonność jednostkowa prasowania; średnio od 151 do 59 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ dla kondycjonowania parowego i od 280 do 105 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ dla kondycjonowania z dodatkiem wody. Natomiast ze względu na energochłonność całkowitą granulowania, mniejsze wartości uzyskano w przypadku stosowania metody granulowania „na zimno” (średnio o 25%).

Słowa kluczowe: granulowanie, kondycjonowanie, tłuszcz paszowy

Wykaz symboli i oznaczeń

- E – ilość energii cieplnej zużytej podczas kondycjonowania, kJ
- E_c – jednostkowe nakłady energii cieplnej, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
- E_p – jednostkowe nakłady energii prasowania, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
- m_g – masa wyprodukowanego granulatu, kg
- m_s – masa śruty wychodzącej z kondycjonera, kg
- P – pobór mocy, kW
- P_p – ciśnienie pary, kPa
- r – współczynnik korelacji liniowej Pearsona
- R^2 – współczynnik determinacji

- T_k – temperatura materiału po kondycjonowaniu parowym, °C
 T_g – temperatura granulatu, °C
 W_s – wilgotność materiału po kondycjonowaniu z dodatkiem wody, %
 W_k – wilgotność materiału po kondycjonowaniu parowym, %
 Z – ilość pary zużytej podczas kondycjonowania, kg
 Z_p – jednostkowe zapotrzebowanie na parę podczas kondycjonowania, kg·t⁻¹
 Z_r – zawartość rzepaku w mieszaninie, %
 α_i – przyjęty poziom istotności
 t – czas pomiaru, s

Wprowadzenie

Pasze granulowane powinny charakteryzować się wysoką zawartością energii, co można uzyskać poprzez znaczne ich natłuszczenie. Wzrost udziału surowców tłuszczowych w mieszance poddawanej granulowaniu, z jednej strony zwiększa wydajność granuladora, a z drugiej wpływa niekorzystnie na jakość gotowego produktu [Laskowski 1989]. Według MacMahon'a i in. [1991] proces wytlaczania jest utrudniony, jeżeli zawartość tłuszczu w materiale paszowym jest mniejsza niż 1%. Niemniej jednak autorzy ci podkreślają, że zbyt duży udział tego składnika w mieszance powoduje otrzymywanie granulki miękkich i mało spoistych. Szczególnie działanie destrukcyjne wykazuje tłuszcz dodawany do mieszanki w formie ciekłej. Pokrycie cząstek materiału tłuszczem w postaci „filmu” utrudnia absorpcję ciepła i wilgoci podczas kondycjonowania. Również Smallman [1996] podaje, że surowce zawierające znaczne ilości tłuszczu należą do materiałów mało podatnych na kondycjonowanie. Lisowa i in. [1976] przyczynę takiego stanu rzeczy upatrują w higroskopijności danego surowca, która zależy przede wszystkim od jego struktury molekularnej tj. zawartości ciał krystalicznych i bezpostaciowych. W związku z tym, tłuszcze zawarte w produktach rolniczych (jako ciała bezpostaciowe) nie mają właściwości higroskopijnych i podczas zwilżania nie wiążą wody oraz nie pęcznią. W konsekwencji sytuacja taka prowadzi do wzrostu zużycia pary i ciepła w procesie kondycjonowania, co wynika również ze zwiększania się wartości ciepła właściwego materiału w miarę wzrostu udziału zawartego w nim tłuszczu. Mając na uwadze powyższe, celem prezentowanej pracy było określenie wpływu zawartości tłuszczu w materiale paszowym na parametry procesu granulowania prowadzonego metodą „na gorąco” i „na zimno”.

Metodyka i przebieg badań

Do badań wykorzystano śrutę z pszenicy odmiany *Emika* (o zawartości 1,92% tłuszczu) oraz mieszaniny pszenicy z rzepakiem (odmiana *Lirajet*) o zawartości

rzepaku od 10 do 50% (co 10%). Dla tak zestawionych mieszanin, udział zawartego w nich tłuszczu wynosił odpowiednio: 5,48; 9,31; 13,13; 16,97 i 20,8%. Surowce śrutowano w rozdrabniaczu bijakowym H-950 zaopatrzonym w sito o wymiarach otworów ϕ 3mm. Po rozdrobnieniu materiał badawczy doprowadzano do stałej wilgotności 14%.

Całość badań przeprowadzono na stanowisku pomiarowym wyposażonym w wytwornicę pary typ LW 69, kondycjoner łopatkowy, granulator firmy Amandus Kahl typ L-175 (matryca o średnicy otworów 4mm i grubości 20mm) oraz komputerowe układy pomiaru zużycia pary, ciepła i energii elektrycznej. Szczegółowy opis wyposażenia stanowiska wraz z metodyką określania zużycia pary, ciepła i nakładów energii elektrycznej przedstawiono w następujących pracach: [Kulig i in. 1999], [Kulig i Laskowski 2002]. Proces granulowania prowadzono z zastosowaniem kondycjonowania parowego (granulowanie „na gorąco”) i kondycjonowania z dodatkiem wody (granulowanie „na zimno”). W pierwszym przypadku badane surowce przed prasowaniem doprowadzano do pięciu poziomów temperatury: 50, 60, 70, 80 i 90°C z dokładnością do $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Wymaganą temperaturę materiału uzyskiwano poprzez obróbkę parą wodną o pięciu wartościach ciśnienia; 200, 250, 300, 350, i 400 kPa. W drugiej metodzie przed prasowaniem stosowano dowlżanie materiału zimną wodą do wilgotności 14, 16, 18, 20 i 22% z dokładnością do $\pm 0,25\%$. Badania wilgotności materiału po kondycjonowaniu parowym przeprowadzono metodą suszarkową zgodnie z PN-93/A-74012. Temperaturę granulatu mierzono przy pomocy termometru laboratoryjnego z dokładnością do $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Otrzymany produkt bezpośrednio po wyjściu z zespołu prasującego pobierano do naczynia z izolacją cieplną, w którym umieszczano termometr. Jako wynik przyjmowano wartość średnią z trzech oznaczeń. Jednostkowe zapotrzebowanie na parę w procesie kondycjonowania określono obliczając iloraz ilości zużytej pary oraz masy śruty, otrzymanych w jednakowym przedziale czasu według wzoru:

$$Z_p = \frac{Z}{m_s} * 1000 \quad [\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}] \quad (1)$$

Jednostkowe nakłady energii cieplnej w procesie kondycjonowania obliczono z ilorazu ilości zużytego ciepła oraz masy śruty wychodzącej z kondycjonera, otrzymanych w jednakowym przedziale czasu według wzoru:

$$E_c = \frac{E}{m_s} \quad [\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

W celu określenia energochłonności jednostkowej prasowania (energia elektryczna) wyznaczano wartość pracy wykonanej przez granulator w tym samym

przedziale czasowym, w którym badano wydajność prasy. Energochłonność obliczono według wzoru:

$$E_p = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{m_g} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3)$$

Energochłonność całkowitą granulowania wyznaczono jako sumę jednostkowych nakładów energii cieplnej i energii prasowania (elektrycznej) według wzoru:

$$E_g = E_c + E_p \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4)$$

Analizę zależności pomiędzy zawartością tłuszczu w mieszaninie i warunkami procesu kondycjonowania a parametrami procesu granulowania wykonano przy wykorzystaniu procedur statystycznych zawartych w programie STATISICA, przyjmując za każdym razem poziom istotności $\alpha_i = 0,05$. Przy wyborze postaci równań stosowano metodę regresji krokowej wstecznej. Istotność współczynników równania regresji badano testem t-Studenta. Natomiast adekwatność modelu sprawdzano stosując test Fishera.

Wyniki badań

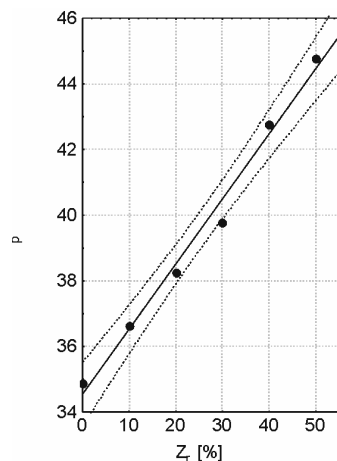
Wyniki badań zużycia pary i ciepła w zależności od zawartości rzepaku w mieszaninie poddawanej granulowaniu przedstawiono na rys. 1 i 2. Uzyskane dane wskazują, iż wzrost udziału rzepaku powoduje zwiększenie się parametrów Z_p (średnio od 34,8 do 45 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$) i E_c (średnio od 92,8 do 117,3 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). W obydwu przypadkach uzyskano bardzo wysokie wartości współczynników korelacji liniowej; $r=0,98$. W wyniku przeprowadzonej analizy regresji wielokrotnej ustalono modele równań, opisujące wpływ zawartości rzepaku w mieszaninie oraz warunków kondycjonowania parowego na zużycie pary i ciepła następującej postaci:

$$Z_p = 0,1983Z_r + 0,0157T_k^2 - 1,09T_k - 0,0246P_p + 38,65; R^2 = 0,978 \quad (5)$$

$$E_c = 0,4813 Z_r + 0,0343 T_k^2 - 1,90 T_k - 0,0366 P_p + 61,29; R^2 = 0,971 \quad (6)$$

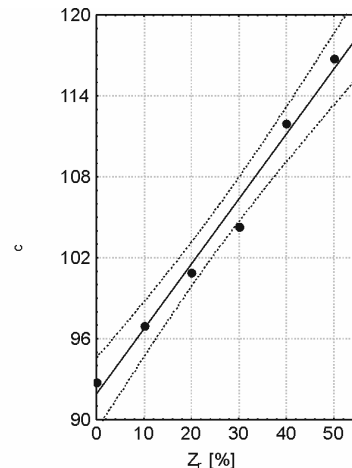
Wyniki badań dotyczące wpływu zawartości rzepaku na wilgotność materiału po kondycjonowaniu parowym przedstawiono na rys. 3. Dane te wskazują jednoznacznie, iż wartość tego parametru wynika bezpośrednio z wielkości zużycia pary w procesie. Zależność tę potwierdza istnienie bardzo wysokiej, dodatniej korelacji pomiędzy tymi parametrami ($r=0,97$). Równanie regresji wielokrotnej opisujące przedstawioną zależność przyjmuje następującą postać:

$$W_k = 0,1496 Z_r + 0,0829 T_k - 0,0025 P_p + 11,66; R^2 = 0,968 \quad (7)$$



Rys. 1. Zależność zużycia pary (Z_p) od zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą (Z_r) (średnie wartości dla 5 temperatur kondycjonowania i 5 ciśnień pary)

Fig. 1. Dependence of steam consumption (Z_p) from rape content in the mixture with wheat (Z_r) (mean values for 5 conditioning temperatures and 5 steam pressures)



Rys. 2. Zależność jednostkowych nakładów energii cieplnej (E_c) od zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą (Z_r) (średnie wartości dla 5 temperatur kondycjonowania i 5 ciśnień pary)

Fig. 2. Dependence unit heat energy demand (E_c) from rape content in the mixture with wheat (Z_r) (mean values for 5 conditioning temperatures and 5 steam pressures)

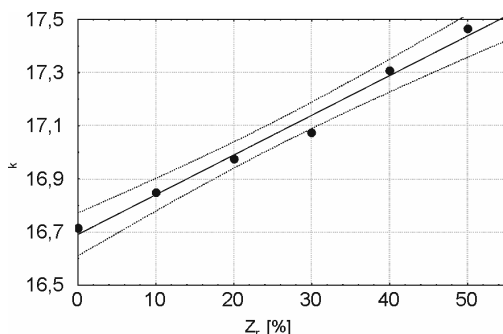
Zależność temperatury granulatu po wyjściu z matrycy od warunków granulowania i zawartości rzepaku w mieszaninie przedstawiono na rys. 4. Otrzymane wyniki pozwalają wnioskować, iż granulowanie „na zimno” jest bardziej wrażliwe na zwiększanie udziału w mieszaninie rzepaku, o czym świadczą nieproporcjonalne spadki wartości parametru T_g . Równania regresji wielokrotnej opisujące analizowane zależności zestawiono poniżej:

granulowanie „na gorąco”

$$T_g = -0,4385Z_r - 0,0076T_k^2 + 1,6268T_k + 0,0401P_p + 5,1; R^2 = 0,936 \quad (8)$$

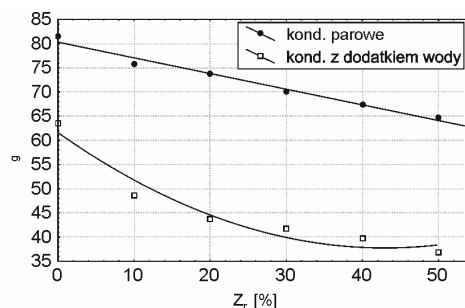
granulowanie „na zimno”

$$T_g = 0,0129Z_r^2 - 1,1101Z_r + 0,2512W_s^2 - 11,65 W_s + 187,93; R^2 = 0,945 \quad (9)$$



Rys. 3. Zależność wilgotności materiału po kondycjonowaniu (W_k) od zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą (Z_r) (średnie wartości dla 5 temperatur kondycjonowania i 5 ciśnień pary)

Fig. 3. Dependence of feed moisture content (W_k) from rape content in the mixture with wheat (Z_r) (mean values for 5 conditioning temperatures and 5 steam pressures)

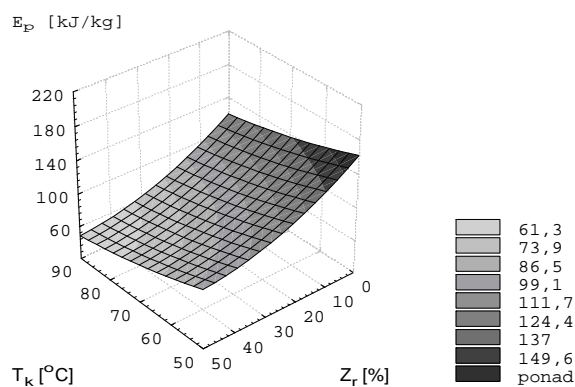


Rys. 4. Zależność temperatury granulatu po wyjściu z matrycy (T_g) od zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą (Z_r) (średnie wartości dla kondycjonowania parowego oraz z dodatkiem wody)

Fig. 4. Dependence of granulate temperature after leaving matrix (T_g) from rape content in the mixture with wheat (Z_r) (mean values of steam conditioning and water assisted conditioning)

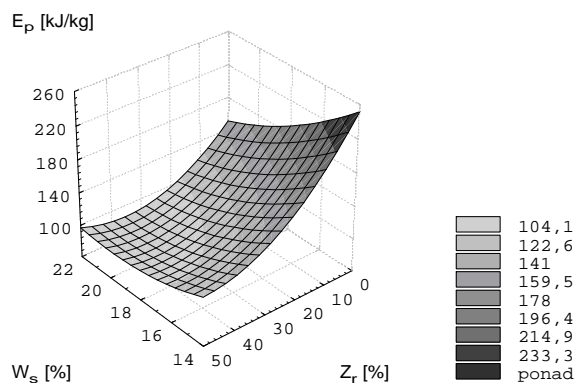
Wyniki pomiarów energochłonności prasowania materiału zobrazowano na rys. 5 i 6. Jak wynika z rys. 5 przy zwiększającym się udziale rzepaku w mieszaninie, w celu osiągnięcia założonego poziomu energochłonności można znacznie zredukować wysokość temperatury kondycjonowania. Przykładowo, osiągnięcie energochłonności prasowania na poziomie $110,64 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ wymaga w przypadku 10% zawartości rzepaku stosowania temperatury 90°C , zaś w przypadku 30% zawartości rzepaku wystarczającą okazuje się temperatura 50°C .

W przypadku granulowania „na zimno” analogiczną rolę do temperatury obróbki hydrotermicznej pełni wilgotność materiału, co obrazuje rys. 6. W tym przypadku minimalny poziom jednostkowych nakładów energii prasowania (średnio $105 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) osiągany jest po przekroczeniu zawartości rzepaku w mieszaninie na poziomie 20%, przy jednoczesnej wilgotności materiału niemiejszej niż 18%.



Rys. 5. Zależność jednostkowych nakładów energii prasowania (E_p) od zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą (Z_r) i temperatury kondycjonowania (T_k) (wartości średnie dla 5 ciśnień pary)

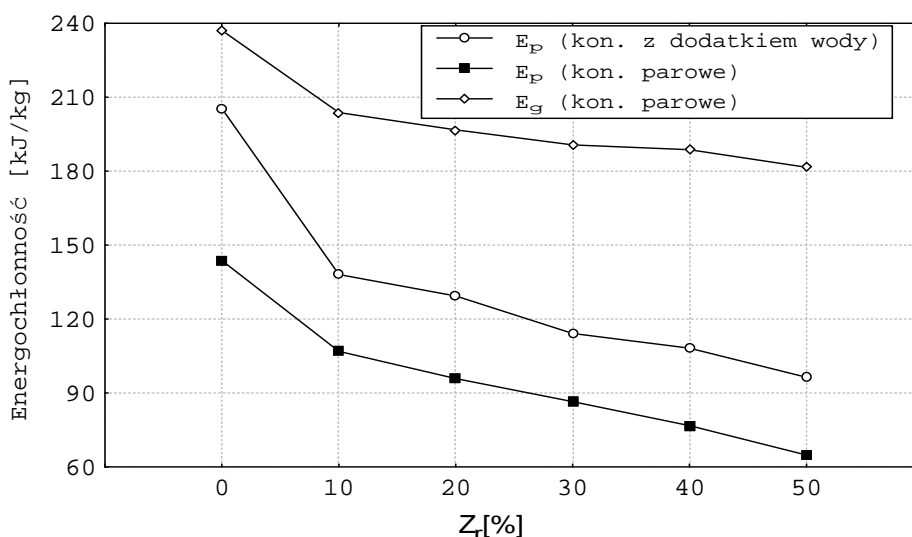
Fig. 5. Dependence unit heat pressing energy demand (E_p) from rape content in the mixture with wheat (Z_r) and conditioning temperature (mean values for 5 conditioning temperatures and 5 steam pressures)



Rys. 6. Zależność jednostkowych nakładów energii prasowania (E_p) od zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą (Z_r) i wilgotności materiału (W_s) (granulowanie „na zimno”)

Fig. 6. Dependence of unit pressing energy demand (E_p) from rape content in the mixture with wheat (Z_r) and moisture content of feed material (W_s) (“cold” granulation)

Porównanie różnych metod granulowania mieszanin pszenicy z rzepakiem w aspekcie energochłonności całkowitej procesu przedstawiono na rys. 7. Wyniki te wskazują, iż wzrost dodatku rzepaku powoduje gwałtowny spadek energochłonności procesu. W przypadku obydwu metod granulowania jego 50% dodatek powoduje redukcję energii prasowania średnio o ponad 52%. Natomiast różnice w energochłonności prasowania wynikające z zastosowanej metody granulowania pozostają na stałym poziomie (średnio 25%) - niezależnie od wzrastającego udziału rzepaku w mieszaninie. Z kolei, ze względu na energochłonność całkowitą procesu, korzystniejszą jest metoda granulowania „na zimno”. W tym przypadku energochłonność całkowita granulowania jest średnio o 26% niższa niż w metodzie parowej i różnica ta pogłębia się w miarę wzrostu zawartości rzepaku w mieszaninie.



Rys. 7. Wpływ zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą i warunków kondycjonowania na jednostkowe nakłady energii prasowania (E_p) i całkowite jednostkowe nakłady energii prasowania (E_g)

Fig. 7. Effect of rape content in the mixture with wheat and conditioning properties on the unit pressing energy demand (E_p) and total unit energy demand for granulation (E_g)

Poniżej przedstawiono równania regresji wielokrotnej opisujące wpływ zawartości rzepaku w mieszaninie z pszenicą na energochłonność procesu.

granulowanie „na gorąco”

$$E_p = 0,023Z_r^2 - 2,57Z_r + 0,109T_k^2 - 2,59T_k + 264,51; R^2 = 0,991 \quad (10)$$

$$E_g = 0,027Z_r^2 - 5,702Z_r + 0,045T_k^2 - 5,67T_k + 0,049Z_rT_k + 460,34; R^2 = 0,992 \quad (11)$$

granulowanie „na zimno”

$$E_p = 0,052Z_r^2 - 7,97Z_r + 0,719T_k^2 - 38,55T_k + 0,196 Z_rT_k + 650,73; R^2 = 0,991 \quad (12)$$

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

1. Zużycie pary i ciepła zwiększa się wprost proporcjonalnie do wzrostu udziału tłuszczu w mieszance poddawanej granulowaniu.
2. Dla każdego ze stosowanych ciśnień pary wodnej i temperatury materiału po obróbce hydrotermicznej, stwierdzono liniową zależność pomiędzy zawartością tłuszczu w mieszaninie a jej wilgotnością po kondycjonowaniu, przy czym przyrosty wilgotności maleją wraz ze zwiększaniem się ciśnienia pary.
3. Jednostkowe nakłady energii prasowania maleją wraz ze zwiększaniem się udziału rzepaku w mieszaninie. Zastosowanie metody parowej powoduje redukcję wartości tego parametru (średnio o 25%) w stosunku do metody z dodatkiem wody.
4. Wykazano, iż w przypadku kondycjonowania parowego mieszanin o wzrastającym udziale tłuszczu, energochłonność całkowita procesu jest średnio o 50% wyższa od metody kondycjonowania z dodatkiem wody.

Bibliografia

Kulig R., Laskowski J., Skonecki S. 1999. Wykorzystanie komputera w badaniach procesu granulowania na prasie firmy Kahl typ 14-175. VI Krajowa Konferencja „Komputerowe Wspomaganie Badań Naukowych”, s. 397-400.

Kulig R., Laskowski J. 2002. Pomiary zużycia pary wodnej w procesie kondycjonowania surowców i mieszanek paszowych, *Inżynieria Rolnicza*, 4 (24): 134-141.

Laskowski J. 1989. *Studia nad procesem granulowania mieszanek paszowych*, Praca habilitacyjna, Wydawnictwo AR, Lublin.

MacMahon M.J., Payne J.D. 1991. The Pelleting Handbook, Borregaard Lignotech, Sarpsborg Norway.

Lisowa H., Haman J., Lis T. 1976. Właściwości cieplne ciał kapilarno-porowatych i metody ich pomiaru, Problemy Agrofizyki, WPAN.

Smallman C. 1996. Maximising Conditioning Potential, Feed Milling International, 190 (11): 16-19.

PN-93/A-74012 – Ziarno zbóż i przetwory zbożowe. Oznaczanie wilgotności.

EFFECT OF FAT CONTENT ON GRANULATION OF FEEDS

Summary

The paper presents the outcome of investigation of the effect of fat content in feeds on the process of granulation by the “hot” and “cold” method. Mixture of wheat and rape of fat content between 1.92% and 20.8% was examined. During granulating, the characteristics of steam, heat and electric power consumption were observed, which allowed to establish energy demand of that process. Straight line dependencies were found between steam and heat consumption ($r=0.98$), the increment of material moisture content after hydrodynamic treatment ($r=0.97$) and the increase of fat content in the mixture. It has been found, that as the fat content in the feed increases, the unit energy consumption for pressing decreases, on average from 151 to 59 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ for steam conditioning and between 280 do 105 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ for water assisted conditioning. Lower values in terms of total granulation energy demand, however, were achieved in case of using the “cold” granulation method (25% on average).

Key words: granulation, conditioning, fat content of feed