

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

## WPLYW ZAWARTOŚCI WŁÓKNA NA PROCES GRANULOWANIA MATERIAŁÓW PASZOWYCH

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu zawartości włókna w materiale paszowym na parametry procesu granulowania prowadzonego z wykorzystaniem kondycjonowania parowego oraz z dodatkiem wody. Materiał badawczy stanowiła mieszanina pszenicy z lucerną o zawartości włókna od 2,74 do 18,34%. W czasie granulowania rejestrowano charakterystykę zużycia pary i ciepła oraz mocy elektrycznej, na podstawie czego określono energochłonność procesu. Stwierdzono, iż zużycie pary i ciepła zwiększa się wprost proporcjonalnie do wzrostu udziału włókna w mieszance poddawanej granulowaniu. Jednocześnie zaobserwowano, iż średnie różnice wilgotności materiału po kondycjonowaniu parowym (pomiędzy minimalną a maksymalną zawartością włókna) wynoszą 2,65%. Wykazano, że ze wzrostem zawartości włókna w materiale zwiększa się energochłonność jednostkowa prasowania; średnio od 150 do 335 kJ·kg<sup>-1</sup> dla kondycjonowania parowego i od 210 do 500 kJ·kg<sup>-1</sup> dla kondycjonowania z dodatkiem wody. Natomiast ze względu na energochłonność całkowitą granulowania, mniejsze wartości uzyskano w przypadku stosowania metody granulowania z wykorzystaniem kondycjonowania z dodatkiem wody (średnio o 25%).

**Słowa kluczowe:** granulowanie, kondycjonowanie, zużycie pary, włókno paszowe

### Wykaz symboli i oznaczeń

- $E_c$  – jednostkowe nakłady energii cieplnej, kJ·kg<sup>-1</sup>  
 $E_g$  – jednostkowe całkowite nakłady energii granulowania (cieplna + elektryczna), kJ·kg<sup>-1</sup>  
 $E_p$  – jednostkowe nakłady energii prasowania, kJ·kg<sup>-1</sup>  
 $r$  – 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, %  
 $Z_p$  – jednostkowe zapotrzebowanie na parę podczas kondycjonowania,  $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$   
 $Z_l$  – zawartość lucerny w mieszaninie, %  
 $\alpha_i$  – przyjęty poziom istotności

## Wprowadzenie

Zmiany zachodzące obecnie w recepturach mieszanek paszowych charakteryzują się między innymi wzrostem wykorzystania surowców bogatych w białko, ale zawierających znaczne ilości włókna. Granulowanie takich materiałów związane jest z ponoszeniem wysokich nakładów energetycznych [Laskowski 1989; Smallman 1996]. MacMahon i Payne [1991] podają, że im więcej włókna zawiera mieszanka paszowa, tym trudniej jest dodać do niej parę. W konsekwencji zbyt duży dodatek pary powoduje, że granulaty mają tendencję do rozszerzania się i pękania. Jednocześnie zmniejsza się wydajność granuladora oraz wzrasta zużycie matrycy. Według Friedrich'a i Robohm'a [1981] wzrost zawartości włókna (na przykładzie mieszaniny soja-słonecznik) z 6% do 22% powoduje zwiększenie energochłonności procesu o 30%.

Ustalenie optymalnych warunków prowadzenia procesu granulowania, w odniesieniu do właściwości fizykochemicznych przerabianych surowców, pozwala istotnie zniwelować powyższe niedogodności. Stąd też celem prezentowanej pracy było określenie wpływu zawartości włókna w materiale paszowym na parametry procesu granulowania prowadzonego z wykorzystaniem kondycjonowania parowego oraz z dodatkiem wody.

## Metodyka i przebieg badań

Materiał badawczy stanowiły: śruta z pszenicy odmiany *Emika* (o zawartości 2,74% włókna) i mączka z lucerny odmiany *Derby* (o zawartości 23,55 % włókna) oraz ich mieszaniny o zawartości lucerny od 25 do 75% (co 25%). Dla tak zestawionych mieszanin, udział zawartego w nich włókna wynosił odpowiednio: 7,93; 13,14 i 18,34%. Surowce rozdrabniano w rozdrabniaczu bijakowym H-950 zaopatrzonego w sito o wymiarach otworów  $\phi$  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 i kondycjonowania z dodatkiem wody. W pierwszym przypadku badane surowce przed prasowaniem doprowadzono do pięciu poziomów temperatury: 50, 60, 70, 80 i 90°C z dokładnością do ±0,5°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 dowilżanie materiału zimną wodą do wilgotności 14, 16, 18, 20 i 22% z dokładnością do ± 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 ±0,5°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.

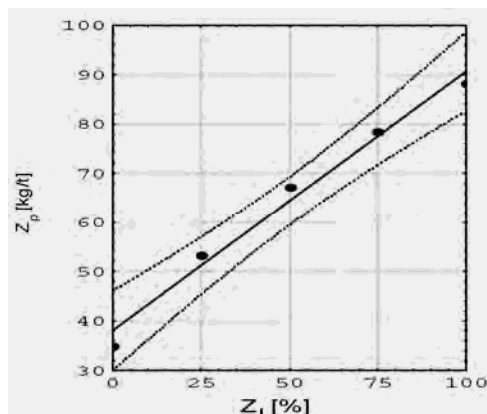
Analizę zależności pomiędzy zawartością włókna w mieszaninie i warunkami procesu kondycjonowania a parametrami procesu granulowania wykonano przy wykorzystaniu procedur statystycznych zawartych w programie STATISICA, przyjmując za każdym razem poziom istotności  $\alpha_i = 0,05$ . Przy wyborze postaci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

## Wyniki badań

Wyniki pomiarów zużycia pary i ciepła w zależności od zawartości lucerny w mieszaninie poddawanej kondycjonowaniu hydrotermicznemu zobrazowano na rys. 1 i 2. Stwierdzono, iż wartość tych parametrów zwiększa się wprost proporcjonalnie do wzrostu udziału włókna w mieszaninie poddawanej granulowaniu. Średnie wartości zużycia pary wahają się w granicach od 35,1 do 88,2 kg·t<sup>-1</sup>, a zużycia ciepła od 91,6 do 268,3 kJ·kg<sup>-1</sup>. Uzyskane zależności opisano w postaci równań regresji wielokrotnej następującej postaci:

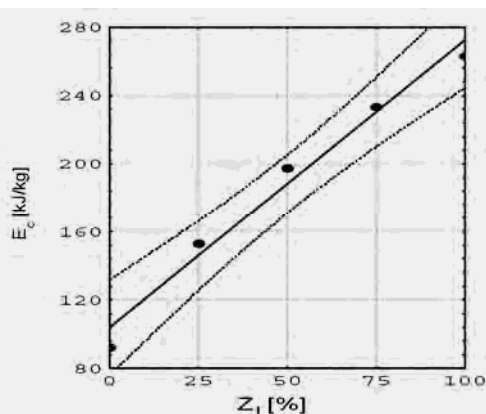
$$Z_p = 0,7572Z_l + 0,0304T_k^2 - 2,178T_k - 0,05P_p + 46,79; R^2=0,928 \quad (1)$$

$$E_c = 2,49Z_l + 0,1705T_k^2 - 16,847T_k - 0,0201P_p + 58,57; R^2 = 0,902 \quad (2)$$



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

Fig. 1. Dependence of steam consumption ( $Z_p$ ) from the content of alfalfa mixed with wheat ( $Z_l$ ) (average values for 5 conditioning temperature values and 5 steam pressure values)



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

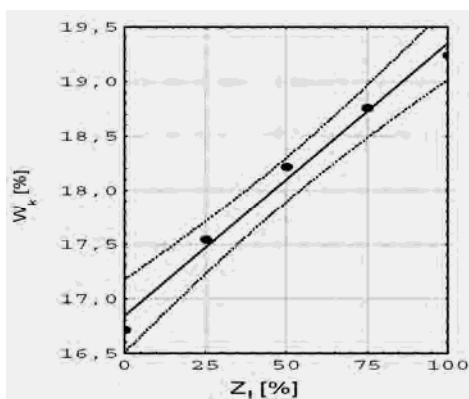
Fig. 2. Dependence of unit heat energy ( $E_c$ ) from the content of alfalfa mixed with wheat ( $Z_l$ ) (average values for 5 conditioning temperature values and 5 steam pressure values)

Wyniki badań dotyczące wpływu zawartości lucerny na wilgotność materiału po kondycjonowaniu parowym przedstawiono na rys. 3. Na podstawie otrzymanych wyników należy stwierdzić istnienie bardzo wysokiej, dodatniej korelacji pomiędzy tymi parametrami ( $r=0,977$ ). Średnie różnice wilgotności materiału po kondycjonowaniu - pomiędzy minimalną a maksymalną zawartością włókna w mieszaninie - wynoszą 2,65%. Równanie regresji wielokrotnej opisujące przedstawioną zależność przyjmuje następującą postać:

$$W_k = 0,025 Z_l + 0,1096 T_k - 0,0025 P_p + 9,92; R^2 = 0,978 \quad (3)$$

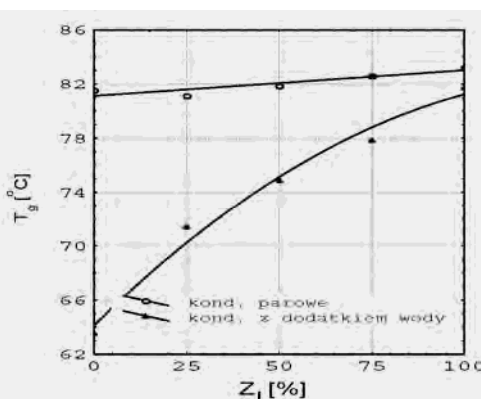
Zależność temperatury granulatu po wyjściu z matrycy od warunków granulowania i udziału lucerny w mieszaninie zobrazowano na rys. 4. Uzyskane dane wskazują, iż w przypadku kondycjonowania parowego - mimo wzrostu udziału lucerny w mieszaninie - średnia wartość temperatury granulatu zmienia się w niewielkim zakresie, wynoszącym jedynie 3°C. Wynika to zapewne z faktu zwiększania się wilgotności materiału po obróbce hydrotermicznej, zachodzącego wraz ze wzrostem zawartości lucerny w mieszaninie. W konsekwencji średni przyrost tempera-

tury, powstający na skutek tarcia materiału o ścianki matrycy, wynosi 12°C. Natomiast w metodzie granulowania z wykorzystaniem dodatku wody, wzrost średniej wartości temperatury granulatu pod wpływem zwiększania zawartości lucerny w mieszaninie jest znacząco wyższy i wynosi 18°C.



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

Fig. 3. Dependence of humidity of the material after conditioning ( $W_k$ ) from the content of alfalfa mixed with wheat ( $Z_l$ ) (average values for 5 conditioning temperatures and 5 steam pressure values)



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

Fig. 4. Dependence of the pellets temperature after leaving the mould ( $T_g$ ) from the content of alfalfa mixed with wheat ( $Z_l$ ) (average values for steam conditioning and for conditioning with addition of water)

Z kolei średni przyrost temperatury, związany z oddziaływaniem ciernym w matrycy, wynosi aż 54°C. Równania regresji wielokrotnej opisujące analizowane zależności zestawiono poniżej:

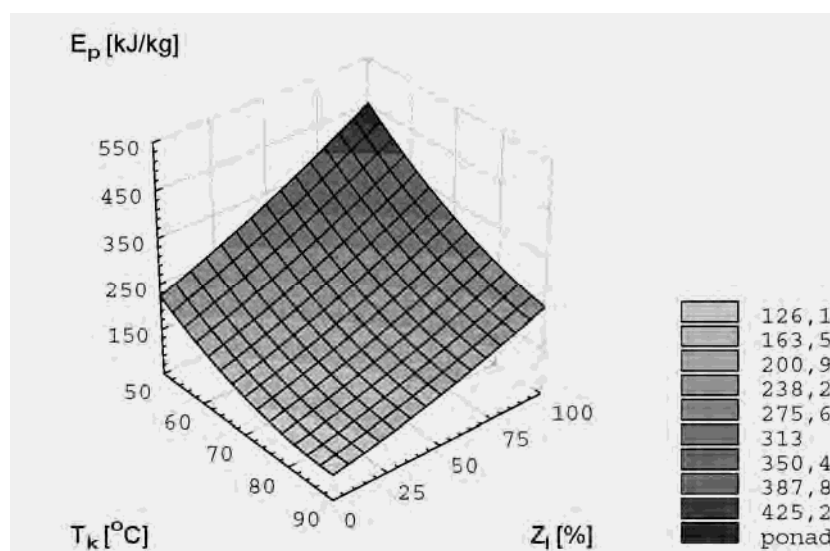
granulowanie z wykorzystaniem kondycjonowania parowego

$$T_g = 0,1002Z_l - 0,0021T_k^2 + 0,5347T_k + 0,0087P_p + 52,21; R^2 = 0,961 \quad (4)$$

granulowanie z wykorzystaniem kondycjonowania z dodatkiem wody

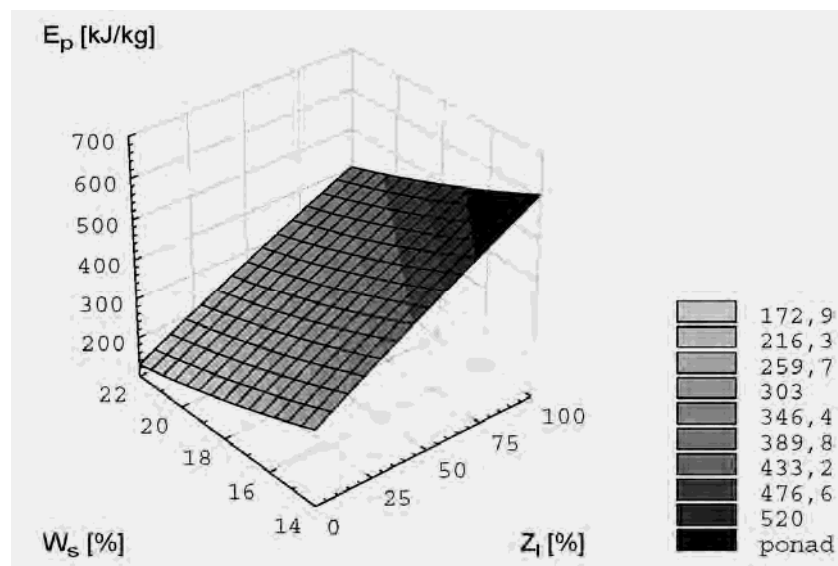
$$T_g = -0,001Z_l^2 + 0,269Z_l - 2,83W_s + 115,11; R^2 = 0,975 \quad (5)$$

Wyniki pomiarów energochłonności prasowania materiału zilustrowano na rys. 5 i 6. Dane te wskazują, że ze wzrostem zawartości włókna w materiale zwiększa się energochłonność jednostkowa prasowania; średnio od 150 do 335  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  dla kondycjonowania parowego i od 210 do 500  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  dla kondycjonowania z dodatkiem wody. Jak wynika z rys. 5 i 6, w celu minimalizacji energochłonności (przy zwiększającym się udziale lucerny w mieszaninie) należy za każdym razem podnosić temperaturę lub wilgotność materiału po kondycjonowaniu. Przykładowo, prasowanie mieszaniny o zawartości lucerny 25%, której wilgotność po kondycjonowaniu z dodatkiem wody wynosi 14%, wiąże się z ponoszeniem nakładów energetycznych na poziomie 300  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Natomiast w przypadku 50% zawartości lucerny taką samą energochłonność można uzyskać po podniesieniu wilgotności materiału przed prasowaniem do wartości 22%.



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

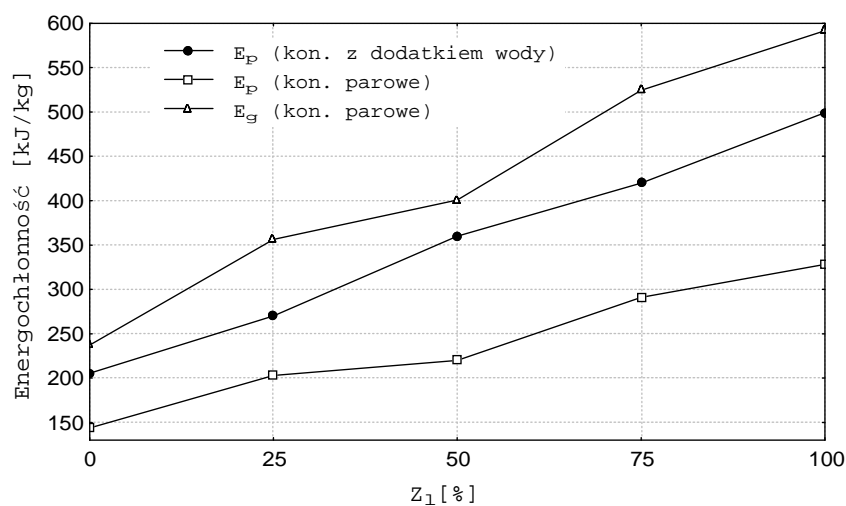
Fig. 5. Dependence of unit energy expense for compression ( $E_p$ ) from the content of alfalfa mixed with wheat ( $Z_l$ ) and conditioning temperature ( $T_k$ ) (average values for 5 steam pressure values)



Rys.6. Zależność jednostkowych nakładów energii prasowania ( $E_p$ ) od zawartości lucerny w mieszaninie z pszenicą ( $Z_l$ ) i wilgotności materiału ( $W_s$ ) (granulowanie z wykorzystaniem kondycjonowania z dodatkiem wody)

Fig. 6. Dependence of unit energy expense for compression ( $E_p$ ) from the content of alfalfa mixed with wheat ( $Z_l$ ) and the material humidity ( $W_s$ ) (granulating with conditioning with addition of water)

Porównanie różnych metod granulowania w aspekcie energochłonności całkowitej procesu przedstawiono na rys. 7. Szczególnie zauważalna jest rola jaką pełni obróbka hydrotermiczna w redukcji jednostkowych nakładów energii prasowania. Średnie różnice w wartościach tego parametru, wynikające z zastosowanej metody granulowania, wynoszą około 27%. Z kolei zwiększenie zawartości lucerny w mieszaninie powoduje szybki wzrost energochłonności procesu. W przypadku granulowania z wykorzystaniem pary jej 50% dodatek powoduje zwiększenie energii prasowania średnio o ponad 47%, a w przypadku granulowania z dodatkiem wody ponad 66%. Natomiast ze względu na energochłonność całkowitą granulowania, mniejsze wartości uzyskano w przypadku stosowania metody granulowania z dodatkiem wody (średnio o 25%). Poniżej zestawiono równania regresji wielokrotnej opisujące wpływ zawartości lucerny w mieszaninie z pszenicą na energochłonność procesu.



Rys. 7. Wpływ zawartości lucerny w mieszaninie z pszenicą ( $Z_1$ ) i warunków kondycjonowania na jednostkowe nakłady energii prasowania ( $E_p$ ) i całkowite jednostkowe nakłady granulowania ( $E_g$ )

Fig. 7. Impact of the content of alfalfa mixed with wheat ( $Z_1$ ) and conditioning conditions on unit energy expenses for compression ( $E_p$ ) and total unit expenses for granulating ( $E_g$ )

#### granulowanie z wykorzystaniem kondycjonowania parowego

$$E_p = 0,005Z_1^2 - 2,94Z_1 + 0,078T_k^2 - 13,92T_k - 0,023Z_1T_k + 724,34; R^2=0,983 \quad (6)$$

$$E_g = 0,528Z_1 + 0,248T_k^2 - 34,29T_k + 0,047Z_1T_k + 1370,22; R^2=0,985 \quad (7)$$

#### granulowanie z wykorzystaniem kondycjonowania z dodatkiem wody

$$E_p = 4,164Z_1 + 0,694T_k^2 - 45,24T_k - 0,052Z_1T_k + 788,34; R^2 = 0,981 \quad (8)$$

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można przedstawić następujące wnioski:

1. Zużycie pary i ciepła zwiększa się wprost proporcjonalnie do wzrostu udziału włókna w mieszaninie poddawanej granulowaniu.
2. Dla każdego ze stosowanych ciśnień pary wodnej i temperatury materiału po obróbce hydrotermicznej, stwierdzono liniową zależność pomiędzy zawartością



- lucerny w mieszaninie a jej wilgotnością po kondycjonowaniu, przy czym przyrosty wilgotności maleją wraz ze zwiększaniem się ciśnienia pary.
3. Jednostkowe nakłady energii prasowania rosną wraz ze zwiększaniem się udziału lucerny w mieszaninie. Zastosowanie metody parowej powoduje redukcję wartości tego parametru (średnio o 27%) w stosunku do metody z dodatkiem wody.
  4. Wykazano, iż w przypadku kondycjonowania parowego mieszanin o wzrastającym udziale włókna, energochłonność całkowita procesu jest średnio o 25% wyższa od metody kondycjonowania z dodatkiem wody.

### **Bibliografia**

Friedrich W., Robohm K.F. 1981. Pressfähigkeit von Komponenten und Mischungen. Teil I: Wirkung von Getreide – Messtechnik und Auswertung. Teil II: Wirkung von Ölmühlennachprodukten. Teil III: Wirkung von Komponenten mit vorherrschenden Inhaltsstoffen. Kraftfutter, 64: 158-168; 434-444; 564-569.

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

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.

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,.

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

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

## **IMPACT OF FIBRE CONTENT ON THE PROCESS OF GRANULATION OF FEED MATERIALS**

### **Summary**

The study the results of research on the impact of fibre content in feed material on the parameters of the granulation process done by using steam conditioning and with addition of water. The test material was a mixture of wheat and alfalfa with fibre content from 2.74 to 18.34%. During the granulation, the characteristics of steam, heat and electrical power consumption were recorded, based on which the process energy consumption was determined. It was found that steam and heat consumption increases in proportion to the increase of fibre share in the mixture undergoing granulation. It was also observed that the average difference of humidity of the material after steam conditioning (between the minimum and maximum fibre content) is 2.65%. It was established that together with the increase of fibre content in the material the unit energy consumption for compression increases; on the average from 150 to 335 kJ·kg<sup>-1</sup> for steam conditioning and from 210 to 500 kJ·kg<sup>-1</sup> for conditioning with addition of water. As far as of total energy consumption for granulation is concerned, lower values were obtained in case of using the granulation method with conditioning with addition of water (on the average by 25%).

**Key words:** granulation, conditioning, steam consumption, feeding fibre