

WPLYW WILGOTNOŚCI NA PROCES ROZDRABNIANIA KUKURYDZY PASTEWNEJ

Sławomir Gawłowski, Janusz Laskowski

Katedra Eksploatacji Maszyn Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Przyrodniczy
ul. Doświadczalna 44, 20-280 Lublin; e-mail: sigi2@op.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę wpływu wilgotności na proces rozdrabniania kukurydzy pastewnej. Badanie przeprowadzone zostało na laboratoryjnym rozdrabniaczu bijakowym, stosując zmienne prędkość 5000-7000 obr·min⁻¹. Poddana badaniom kukurydza doprowadzona została do siedmiu poziomów wilgotności od 8 do 20%. Przeprowadzono analizę wyników badań, która wykazała istotne zależności pomiędzy wilgotnością a energochłonnością rozdrabniania. Analiza wariancji wykazała istotne różnice dla poszczególnych poziomów wilgotności. Powiązania badanych cech z wilgotnością ziarna opisane zostały równaniami regresji.

Słowa kluczowe: kukurydza, rozdrabnianie, wilgotność, prędkość bijakowa.

WYKAZ OZNACZEŃ

E_{roz} - energia na rozdrabnianie próbki ziarna [J],
 E_r - jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie [$J \cdot g^{-1}$],
 m_r - masa rozdrabnianej próbki [g],
 E_f - wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie [$J \cdot m^{-2}$],
 S_n - nowowytworzona powierzchnia powstała podczas rozdrabniania [m^2],
 d_m - średni wymiar cząstki [mm],
 h_i - średnia wartość przedziału klasowego [mm],
 P_i - ilość cząstek zatrzymanych na danym sicie [%],
 n - ilość zastosowanych sit,
 ρ - gęstość materiału [$kg \cdot m^{-3}$],
 w_z - wilgotność ziarna [%].

WPROWADZENIE

Rozdrabnianie ziarna w technice inżynierskiej jest jednym z najważniejszych i najczęściej stosowanych procesów. Właściwy jego przebieg warunkuje uzyskanie półproduktów lub produktów o oczekiwanej wymiarze cząstek ułatwiających przebieg wymiany energii, masy i ciepła - czy też zapewniających najlepsze efekty żywieniowe.

W procesie rozdrabniania zużywa się znaczne ilości energii na zmianę wymiaru cząstek, przy czym nie jest to zależność liniowa i najczęściej opisuje się ją równaniem wykładniczym [Laskowski i in. 2005]. Jakość otrzymanego produktu zależna jest w głównej mierze od podatności materiału na rozdrobnienie, będącej najczęściej powiązaniem stopnia rozdrobnienia z energochłonnością procesu [Bieliński 1990]. Wartość tego procesu zależy od parametrów konstrukcyjnych rozdrabniacza, sposobu prowadzenia procesu oraz cech fizycznych nasion. Jednak najważniejszym czynnikiem wpływającym na proces rozdrabniania, jest zawartość wody. [Rawa T. 1987; Kowalik, Opielak 2002; Dziki 2007], szczególnie przy wykorzystaniu rozdrabniaczy bijakowych.

Duża różnorodność właściwości surowców, wysoka energochłonność procesu rozdrabniania są głównymi przesłankami znacznego zainteresowania ośrodków badawczych przebiegiem tego procesu. W badaniach własnych podjęto próbę oceny wpływu twardości i wilgotności ziarna oraz takich parametrów konstrukcyjnych jak wymiar otworów sita i obroty wirnika na efektywność procesu rozdrabniania

METODYKA BADAŃ

Badania procesu rozdrabniania zostały zrealizowane na laboratoryjnym rozdrabniaczu bijakowym POLYMIX-Micro-Hammermill MFC. Urządzenie współpracowało bezpośrednio z komputerowym układem pomiarowym mocy czynnej prądu jednofazowego. Obszerna charakterystyka stanowiska pomiarowego przedstawiona została w opracowaniu Laskowskiego i Łysiaka [1997].

Materiał badawczy stanowiła kukurydza pastewna z firmy „Danko” hodowla Roślin Sp.z o.o.. Ziarna doprowadzone zostały do wilgotności 8; 10; 12; 14;16;18 i 20% ($\pm 0,2\%$) zgodnie z Polską Normą (PN-91/A-74010) i zostały rozdrobnione przy zastosowaniu sita o wymiarze oczek 2mm, i pięciu poziomach prędkości obrotowej wirnika tj. 5000; 5500; 6000, 6500 i 7000obr·min⁻¹. Pomiar wykonano w pięciu powtórzeniach dla każdej prędkości i wilgotności ziarna.

Dla rozdrobnionych próbek ziarna określono skład granulometryczny młewa zgodnie z Polską Normą (PN-89/R-64798) co pozwoliło określić średni wymiar cząstki według wzoru (Brenland i in. 1997):

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^n h_i P_i}{100}. \quad (1)$$

Jednostkowe nakłady energii rozdrabniania E_r wyznaczono ze wzoru:

$$E_r = \frac{E_{roz}}{m_r}, \quad (2)$$

a wskaźnik podatności na rozdrabnianie E_f został wyznaczony jako iloraz energii pobranej podczas rozdrabniania i nowej powierzchni powstałej na skutek rozdrobnienia (Posner 1991):

$$E_f = \frac{E_{roz}}{S_n}. \quad (3)$$

Nowo wytworzona powierzchnia S_n która powstała podczas rozdrabniania wyznaczona została wzorem:

$$S_n = \frac{6m_r}{\rho d_m}, \quad (4)$$

gdzie: $\rho = 1300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ jest gęstością materiału.

WYNIKI BADAŃ

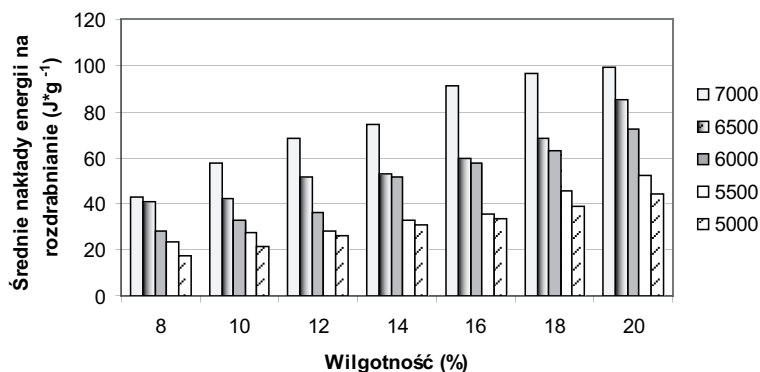
Wyniki badań poddano analizie statystycznej wykorzystując do obliczeń program STATISTICA. Otrzymane wyniki wykazały że główny czynnik tj. wilgotność wpływa istotnie na badane parametry procesu rozdrabniania ziarna kukurydzy pastewnej. Za pomocą testu Tukey'a przeprowadzono szczegółowe porównania przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz określono zależności w postaci równań regresji. W przyjętym zakresie badań określono wartości średnie, błędy i odchylenia standardowe. Dla badanych prędkości bijakowych (5000, 5500, 6000, 6500 i 7000obr/min) obliczono także wskaźnik podatności na rozdrabnianie. W tab. 1 ÷ 3 zostały przedstawione wyniki analizy wariancji natomiast w tab. 4 równania regresji.

Wartości jednostkowe energii rozdrabniania zawierały się w przedziale od $17,19\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ przy najmniejszej prędkości obrotowej bijaków do $99,18\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ dla największej prędkości. Przeprowadzona analiza wyników pozwoliła stwierdzić że wraz ze wzrostem wilgotności oraz wzrostem prędkości bijaków, zwiększa się jednostkowe zużycie energii na rozdrabnianie.

Jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie dla poszczególnych poziomów wilgotności ziarna, przy zastosowaniu różnych prędkości rozdrabniania zostały przedstawione w postaci wykresy na rys. 1. Natomiast zależności jakie uzyskano z analizy regresji zostały zestawione z tab. 5.

Tabela 1. Analiza wariancji dla jednostkowych nakładów energii na rozdrabnianie E_r
Table 1. Variance analysis for specific grinding energy E_r

Składniki analizy wariancji	Prędkość bijaków	SS · 10 ³	df	MS · 10 ³	F · 10 ³	p
Wyraz wolny - Intercept	7000	200,6	1	200,6	27,67	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		13,57	6	200,6	0,312	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,203	28	0,072		
Wyraz wolny - Intercept	6500	113,2	1	113,2	23,73	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		7,431	6	1,238	0,259	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,133	28	0,048		
Wyraz wolny - Intercept	6000	83,46	1	83,46	22,37	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		8,326	6	1,387	0,372	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,104	28	0,037		
Wyraz wolny - Intercept	5500	42,97	1	42,97	10,74	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		3,259	6	0,543	0,135	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,111	28	0,040		
Wyraz wolny - Intercept	5000	32,30	1	32,30	8,512	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		2,773	6	0,462	0,121	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,106	28	0,037		



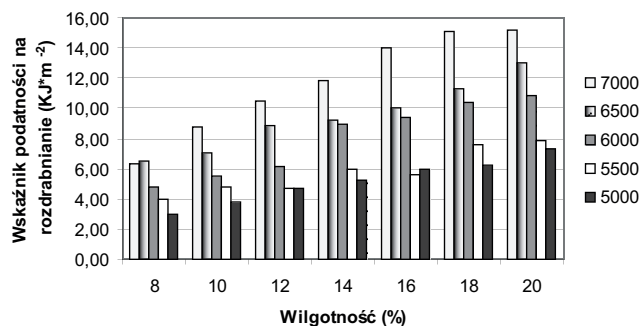
Rys. 1. Jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie E_g dla poszczególnych wilgotności ziarna
 Fig. 1. Specific grinding energy E_g for each moisture content

Przeprowadzone jednowymiarowe testy istotności variancji dla wskaźnika podatności ziarna na rozdrabnianie pozwoliły stwierdzić że występują istotne różnice w badanym parametrze przy różnej wilgotności ziarna i prędkości bijaków (tab.2).

Tabela 2. Analiza variancji dla wskaźnika podatności ziarna na rozdrabnianie E_g
 Table 2. Ariance analysis for energy utilisation index E_g

Składniki analizy variancji	Prędkość bijaków	SS · 10 ²	df	MS · 10 ²	F · 10 ²	p
Wyraz wolny - Intercept	7000	47,73	1	47,73	43,97	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		3,281	6	0,546	0,503	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,303	28	0,010		
Wyraz wolny - Intercept	6500	30,77	1	30,77	45,17	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		1,597	6	0,266	0,390	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,190	28	0,006		
Wyraz wolny - Intercept	6000	22,60	1	22,60	48,51	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		1,829	6	0,304	0,654	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,13	28	0,004		
Wyraz wolny - Intercept	5500	20,44	1	20,44	47,66	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		1,045	6	0,174	0,150	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,324	28	0,115		
Wyraz wolny - Intercept	5000	9,456	1	9,456	25,82	0,00
Wilgotność - Moisture kontent		0,680	6	0,113	0,309	0,00
Błąd standardowy - Standard error		0,102	28	0,003		

Największe wartości wskaźnika podatności otrzymano przy 20% wilgotności dla każdej prędkości, gdzie wartość wahała się w granicach od $7,35 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ przy najmniejszej prędkości obrotowej do $15,20 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ dla najwyższej prędkości badanej. Na rys. 2 przedstawione zostały zależności pomiędzy wskaźnikiem podatności, a wilgotnością dla pięciu wartości prędkości obrotowych. Wyniki analizy regresji przedstawione zostały w tab. 4.



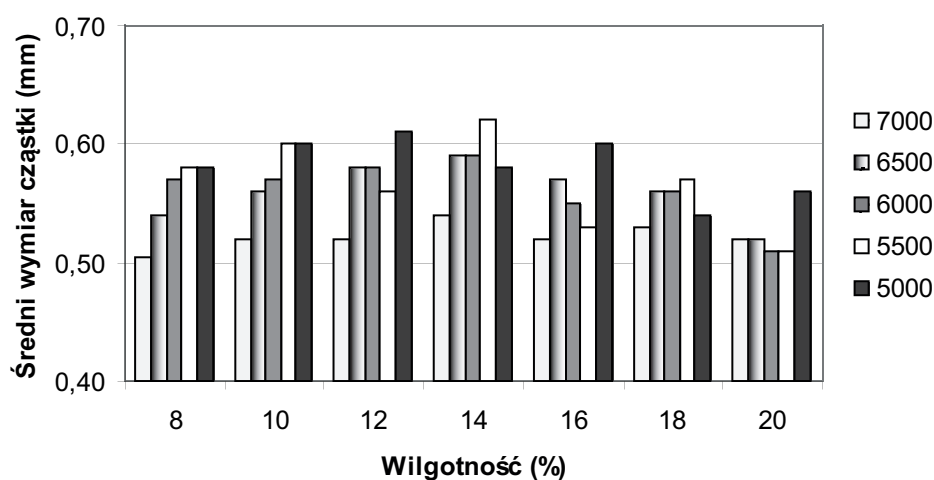
Rys. 2. Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie E_f dla poszczególnych wilgotności ziarna
 Fig. 2. Energy utilization index E_f for each moisture content

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej można zauważyć istotne różnice jakie wystąpiły przy wartościach średniego wymiaru cząstki d_m (tab. 3). Podczas przeprowadzonego badania analizy średniego wymiaru cząstek zaobserwowano że wraz ze wzrostem wilgotności ziarna od 8 do 14% rośnie wartość parametru. Natomiast dalszy wzrost wilgotności od 16 do 20% powodował spadek średniego wymiaru cząstki niezależnie od stosowanej prędkości bijakowej. Wartości średniego wymiaru cząstek zostały przedstawione na rys. 3. W tab. 4 zawarte zostały równania regresji w postaci zależności średniego wymiaru cząstki od wilgotności.

Tabela 3. Analiza wariancji dla średniego wymiaru cząstki d_m
 Table 3. Variance analysis for mean particle size d_m

Składniki analizy wariancji	Prędkość bijaków	SS · 10 ⁻³	df	MS · 10 ⁻³	F · 10 ³	p
Wyraz wolny - Intercept	7000	0,009	1	0,009	42,06	0,000
Wilgotność - Moisture kontent		0,000	6	0,000	0,002	0,027
Błąd standardowy - Standard error		0,000	28	0,000		
Wyraz wolny - Intercept	6500	0,011	1	0,011	43,90	0,000
Wilgotność - Moisture kontent		0,000	6	0,000	0,011	0,000
Błąd standardowy - Standard error		0,000	28	0,000		
Wyraz wolny - Intercept	6000	0,011	1	0,011	44,12	0,000
Wilgotność - Moisture kontent		0,000	6	0,000	0,013	0,000
Błąd standardowy - Standard error		0,000	28	0,000		

Wyraz wolny - Intercept	5500	0,017	1	0,017	30,80	0,000
Wilgotność - Moisture content		0,003	6	0,000	0,087	0,526
Błąd standardowy - Standard error		0,015	28	0,001		
Wyraz wolny - Intercept	5000	0,012	1	0,012	47,32	0,000
Wilgotność - Moisture content		0,000	6	0,000	0,012	0,000
Błąd standardowy - Standard error		0,000	28	0,000		



Rys. 3. Średni wymiar cząstki d_m dla poszczególnych wilgotności ziarna
Fig. 3. Mean particle size d_m for each moisture content

Tabela 4. Zestawienie równań regresji i wartości współczynnika determinacji określających zależności pomiędzy właściwościami fizycznymi i parametrami procesu rozdrabniania kukurydzy a wilgotnością
Table 4. Equations and determination coefficients expressing the relationships between physical properties, grinding features of maize and moisture content

Badana cecha Determined characteristic	Prędkość bijkaków	Równanie - Equation	R ²
Jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie E_r ($J \cdot g^{-1}$) Specific grinding energy E_r ($J \cdot g^{-1}$)	7000	$E_r = -0,199w_z^2 + 1041w_z - 27,87$	0,97
Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie E_f ($J \cdot m^{-1}$) Energy utilisation index E_f ($J \cdot m^{-1}$)		$E_f = 0,748w_z + 1,204$	0,87
Średni wymiar cząstki d_m (mm)		$d_m = -0,039w_z^2 + 1,109w_z - 7,252$	0,99

Jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie E_r ($J \cdot g^{-1}$) Specific grinding energy E_r ($J \cdot g^{-1}$)	6500	$E_r = 0,295w_z^2 - 4,848w_z - 62,02$	0,95
Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie E_f ($J \cdot m^{-1}$) Energy utilisation index E_f ($J \cdot m^{-1}$)		$E_f = 0,018w_z^2 + 5,412$	0,87
Średni wymiar cząstki d_m (mm)		$d_m = -0,002 \cdot 10^{-3}w_z^2 + 0,041 \cdot 10^{-3}w_z + 0,304 \cdot 10^{-3}$	0,68
Jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie E_r ($J \cdot g^{-1}$) Specific grinding energy E_r ($J \cdot g^{-1}$)	6000	$E_r = 3,803w_z - 4,416$	0,96
Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie E_f ($J \cdot m^{-1}$) Energy utilisation index E_f ($J \cdot m^{-1}$)		$E_f = 0,554w_z + 0,273$	0,87
Średni wymiar cząstki d_m (mm)		$d_m = -0,001 \cdot 10^{-3}w_z^2 + 0,025 \cdot 10^{-3}w_z + 0,431 \cdot 10^{-3}$	0,61
Jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie E_r ($J \cdot g^{-1}$) Specific grinding energy E_r ($J \cdot g^{-1}$)	5500	$E_r = 0,167w_z^2 - 2,354w_z + 32,54$	0,95
Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie E_f ($J \cdot m^{-1}$) Energy utilisation index E_f ($J \cdot m^{-1}$)		$E_f = 0,011w_z^2 + 3,397$	0,78
Średni wymiar cząstki d_m (mm)		$d_m = -0,0001 \cdot 10^{-3}w_z^2 + 0,610 \cdot 10^{-3}$	0,49
Jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie E_r ($J \cdot g^{-1}$) Specific grinding energy E_r ($J \cdot g^{-1}$)	5000	$E_r = 2,221w_z - 0,725$	0,95
Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie E_f ($J \cdot m^{-1}$) Energy utilisation index E_f ($J \cdot m^{-1}$)		$E_f = 0,344w_z + 0,381$	0,84
Średni wymiar cząstki d_m (mm)		$d_m = -0,0001 \cdot 10^{-3}w_z^2 + 0,609 \cdot 10^{-3}$	0,29

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników można przedstawić następujące wnioski:

1. Wraz ze wzrostem wilgotności ziarna kukurydzy następuje spadek średniego wymiaru cząstki śruty, przy czym największy przy wilgotności ziarna powyżej 14%.
2. Zwiększanie prędkości obrotowej bijaków powodowało uzyskiwanie śruty o drobniejszej granulacji.
3. Wraz ze wzrostem wilgotności ziarna kukurydzy zwiększa się energochłonność procesu rozdrabniania. Dla skrajnych badanych wilgotności (8 i 20%) wzrost ten wyniósł 100%.
4. Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie zwiększał się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej bijaków. Zależność ta wystąpiła dla każdego z rozpatrywanych poziomów zawartości wody w ziarnie kukurydzy

5. Przeprowadzone badania wykazały, że wilgotność ziarna kukurydzy w znacznie większym stopniu wpływa na proces udarowego rozdrabniania aniżeli zmiana prędkości obrotowej bijaków.

PIŚMIENNICTWO

- Branland G., Feli I., Leblanc A., Koenig J., Bodet C., Mariot D., Mahaut B.**, 1997. La dureté des blés sélectionnés en France evolution et consequences. *Industries des Céréales*, Nr 101, 5-10
- Bieliński M.** 1990. Rozdrabnianie tworzyw wtórnych w warunkach ciecicia quasi i technologicznego. OWSIMP, Częstochowa
- Dziki D.** 2007. Ocena energochłonności rozdrabniania ziarna pszenicy poddanego uprzednio zgniataniu. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 8(96) Kraków. s. 51-58.
- Kowalik K., Opielak M.** 2002. Badanie wpływu wilgotności i rodzaju ziarna zbóż na jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Nr 10(4). Warszawa. s. 51-55.
- Laskowski J., Łysiak G., Skonecki S.** 2005. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Part II. Material properties for grinding and agglomeration. Institute of Agrophysics PAS, Lublin. s. 29-30.
- Laskowski J., Łysiak G.** 1997. Stanowisko do badań procesu rozdrabniania surowców biologicznych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego* Nr. 1/2. s. 55-58.
- PN-91/A-74010.** Ziarno zbóż i przetwory zbożowe. Oznaczanie wilgotności (rutynowa metoda odwoławcza).
- (PN-89/R-64798).** Pasze. Oznaczenie rozdrobnienia.
- Posner E. S.**, 1991. Wheat and flour ash as a measurement of millability. *Cereal Food World*, 36(8), 626-629
- Rawa T.** 1987. Efektywność dwukrotnego rozdrabniania pszenicy bijakowym zespołem roboczym. *Acta Academiae Agricult. Tech. Olsteniensis*. Z. 311. s. 113-120.

INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT ON THE GRINDING PROCESS OF FODDER CORN

Summary. The aim of the study was to analyze the influence of moisture content on the grinding process of fodder corn. The research was made using a laboratory hammer-mill at the velocity in the range of 5000-7000 rpm⁻¹. Samples of corn kernels were conditioned to seven moisture levels from 8 to 20%. During research the grinding parameters were evaluated. Significant relations were established between the moisture content and grinding energy. The analysis of variance showed that the grinding parameters were statistically significantly different for various kernel moisture content levels. The influence of kernel moisture on the analyzed parameters was described in the form of regression equations.

Key words: corn, grinding, moisture, hammer velocity.