

Dr hab. Dariusz DZIKI
 Prof. dr hab. Janusz LASKOWSKI
 Mgr Beata BIERNACKA

Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ENERGOCHŁONNOŚĆ UDAROWEGO ROZDRABNIANIA ZIARNA ZBÓŻ[®]

Celem pracy zaprezentowanej w artykule było określenie energochłonności procesu udarowego rozdrabniania ziarna zbóż. Próbkę ziarna pszenicy, jęczmienia i żyta o wilgotności 12% poddano dekohezji wykorzystując laboratoryjny rozdrabniacz bijakowy wyposażony w wymienne sito. Stwierdzono, że dla wszystkich badanych surowców zmniejszenie średnicy otworów sita powodowało nieliniowy wzrost energochłonności jednostkowej rozdrabniania. Średnie wartości tego parametru zawierały się w przedziale od 54,9 kJ·kg⁻¹ (sito 3,0 mm) do 179,1 kJ·kg⁻¹ (sito 1,0 mm). Zależność energii jednostkowej rozdrabniania od średniego wymiaru cząstki śruty była nieliniowa i dla wszystkich badanych surowców opisano ją wspólnym równaniem regresji o postaci funkcji potęgowej. Wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie oraz stała proporcjonalności zawierały się w zależności od gatunku, odmiany zboża oraz od średnicy otworów sita, odpowiednio od 7,0 do 12,0 kJ·m⁻² oraz od 75 do 147 kJ·kg⁻¹·mm^{0,5}.

WSTĘP

Ziarno zbóż jest podstawowym surowcem spożywczym, jak i paszowym. Ze względu na małą zawartość wody oraz dużą koncentrację składników odżywczych, które są cennym źródłem białka, substancji mineralnych i witamin z grupy B, odgrywa znaczącą rolę w wielu branżach przemysłu spożywczego.

Podstawowym procesem w przetwórstwie roślinnych materiałów ziarnistych jest rozdrabnianie. Na wynik końcowy tego procesu wpływa wiele czynników zależnych zarówno od właściwości materiału, jak i sposobu dekohezji. Do opisu rozdrabniania stosowanych jest szereg wskaźników, które można ogólnie podzielić na ilościowe, jakościowe i energochłonności. Znajomość tych wskaźników pełni nie tylko funkcję poznawczą, ale jest również niezbędna do optymalizacji rozdrabniania. Proces ten zaliczany jest do jednych z bardziej energochłonnych, dlatego też podstawową rolę w jego charakterystyce mają wskaźniki energochłonności [2]. Jednym z najczęściej określanych parametrów jest energochłonność jednostkowa rozdrabniania [16, 18]. Wyznaczane są również inne wskaźniki, uwzględniające dodatkowo stopień rozdrobnienia, takie jak wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie [14], czy np. stała Bonda, Kicka, Rittingera oraz wskaźnik rozdrabniania Sokołowskiego [17].

Podatność na rozdrabnianie ziarna zbóż zależy w głównej mierze od cech mechanicznych bielma [14] i okrywy [6]. Ziarno o wyższej twardości bielma wymaga większych nakładów energii na rozdrabnianie [4, 7]. Zaznaczyć należy, że nawet dla tej samej odmiany, ale uprawianej w różnych warunkach podatność na rozdrabnianie może być inna [1]. Dodatkowo materiały biologiczne są nieustannie niestabilne czasowo i zmieniają swoje właściwości podczas przechowywania. Zmiany te wywołane są głównie przez adsorpcję i desorpcję wody z otoczenia, co również oddziałuje na proces rozdrabniania.

Rozdrabnianie udarowe znajduje w przetwórstwie zbóż szerokie zastosowanie, zarówno w przemyśle paszowym jak i spożywczym. W przemyśle spożywczym może być wykorzystywane do wspomaganie procesu przemiału [8], produkcji mąki razowej [15], czy słodu browarnianego [12].

Celem artykułu jest prezentacja wyznaczenia wskaźników energochłonności udarowego rozdrabniania ziarna pszenicy, żyta i jęczmienia.

MATERIAŁY I METODY

Materiał badawczy stanowiło ziarno dwóch odmian pszenicy zwyczajnej (Emika i Trend), jęczmienia (Antek) oraz żyta (Ursus). Próbkę pochodziły z pól doświadczalnych Ośrodka Doradztwa Rolniczego w Końskowoli, ze zbiorów z 2008 roku. Ziarno o wilgotności 12%, rozdrabniano za pomocą rozdrabniacza bijakowego typu POLYMIX-Micro-Hammermill MFC, według metodyki przedstawionej przez Laskowskiego i Łysiaka [1997]. Urządzenie współpracowało z układem do pomiaru i rejestracji mocy prądu. Rozdrabniacz wyposażony był w wymienne sito. Zastosowano sito o średnicy oczek wynoszącej (mm): 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 i 3,0. Następnie wyznaczono skład granulometryczny śruty przy zastosowaniu odsiewacza Thyr 2 wyposażonego w odpowiedni zestaw sit. Na podstawie uzyskanych przesiewów obliczono średni wymiar cząstek śruty:

$$d_{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{i=u} h_i P_i}{100}, \quad (1)$$

gdzie:

h_i - średnia wartość przedziału klasowego, P_i - udział procentowy danej klasy, u - liczba zastosowanych sit.

Stosując specjalistyczne oprogramowanie wyznaczono energochłonność jednostkową rozdrabniania oraz wskaźnik podatności na rozdrabnianie (iloraz energii rozdrabniania do powierzchni cząstek po rozdrobnieniu). Pole powierzchni cząstek wyznaczano z wyrażenia podanego przez Nguyena i innych [13], przyjmując założenie, że są one sferyczne i korzystając ze wzoru:

$$S_c = \frac{6}{\rho} \sum_{i=1}^{i=u} \frac{\mu_i}{h_i}, \quad (2)$$

gdzie:

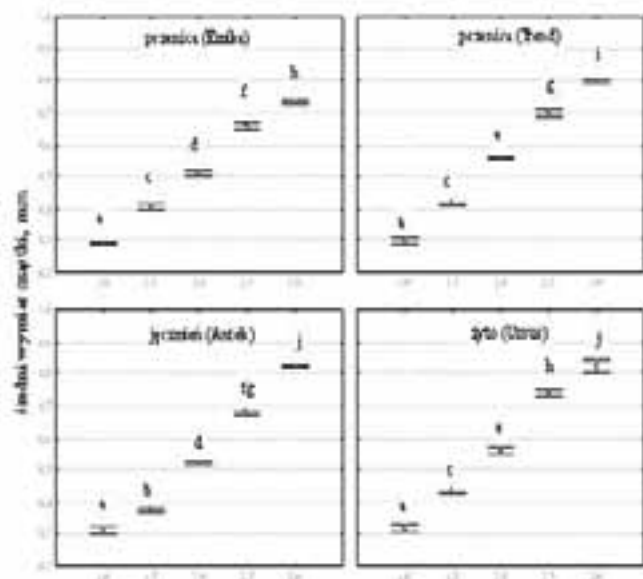
μ_i - udział masowy cząstek danej klasy, zaś ρ - gęstość cząstek; do obliczeń przyjęto średnią wielkość tabelaryczną równą 1300 kg·m⁻³ [9].

Obliczono również wskaźnik rozdrabniania (stała proporcjonalności) na podstawie teorii rozdrabniania Sokołowskiego [17]. Stanowisko badawcze szczegółowo opisano w opracowaniu Laskowskiego i Łysiaka [10]. Natomiast sposób wyznaczenia powyższych wskaźników został przedstawiony w pracach [2, 3].

Pomiary przeprowadzono w dziesięciu powtórzeniach dla każdego surowca i przy każdym z zastosowanych sit rozdrabniacza. Analiza statystyczna wyników badań objęła określenie wartości średnich, wyznaczono 95% przedziały ufności oraz przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji, a następnie określono istotność różnic między średnimi. Obliczenia statystyczne wykonano przy wykorzystaniu programu Statistica 6.0 PL firmy SatSoft. Wszystkie analizy wykonano przyjmując poziom istotności $\alpha = 0,05$.

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Rozpatrując uzyskane wyniki stwierdzono, że w przypadku wszystkich badanych próbek ziarna zwiększenie średnicy otworów sita w rozdrabniaczu powodowało liniowy wzrost średniego wymiaru cząstek śruty (d) (rys. 1).



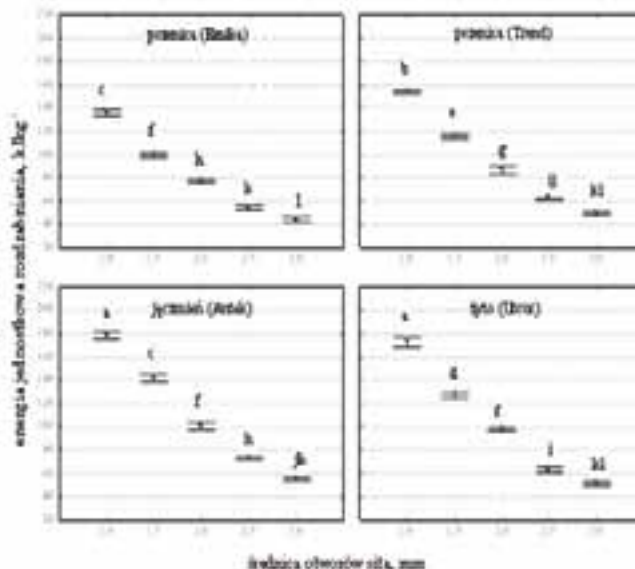
Rys. 1. Zależności między średnicą otworów sita w rozdrabniaczu a średnim wymiarem cząstek śruty; a-j grupy jednorodne.

Współczynniki korelacji Pearsona były wysokie oraz statystycznie istotne ($p < 0,05$) i we wszystkich przypadkach przekroczyły wartość 0,99. Natomiast rodzaj rozdrabnianego surowca miał niewielki wpływ na ten parametr i zawierał się on średnio od 0,29 mm (pszenica odmiany Emika - sito 1,0 mm) do 0,8 mm (żyto i jęczmień - sito 3,0 mm). Zależność między średnicą otworów sita (D) w rozdrabniaczu a d dla wszystkich badanych odmian opisano liniowym równaniem regresji postaci:

$$d = 3,86 D - 0,113, \quad R^2 = 0,974 \quad (3)$$

Wielkość rozdrobnionych cząstek ma istotne znaczenie w wielu procesach przetwórczych. Na cechę tę poza rodzajem zastosowanego rozdrabniacza oraz parametrami jego pracy wpływają właściwości rozdrabnianych materiałów. W przypadku roślinnych surowców ziarnistych istotnym czynnikiem

są właściwości wytrzymałościowe, które zależą nie tylko od gatunku czy odmiany ziarna, ale również od jego wilgotności. Wzrost wilgotności powoduje zwiększenie wielkości cząstek po rozdrobnieniu, szczególnie jeśli do dekohezji wykorzystane zostaną rozdrabniacze walcowe [5].



Rys. 2. Zależności między średnicą otworów sita w rozdrabniaczu a energochłonnością jednostkową rozdrabniania, a-l – grupy jednorodne.

Wyniki energii jednostkowej rozdrabniania (E_r) badanych odmian ziarna zbóż przedstawiono na rys 2. Najwyższe wartości tego parametru uzyskano dla ziarna jęczmienia i zawierały się one w przedziale od 54,9 kJ·kg⁻¹ (sito 3,0 mm) do 179,1 kJ·kg⁻¹ (sito 1,0 mm). Najniższe wartości E_r stwierdzono w przypadku pszenicy odmiany Emika (średnio od 44,3 do 136,0 kJ·kg⁻¹, odpowiednio przy sicie 3,0 i 1,0 mm). Wzrost średnicy otworów sita w rozdrabniaczu z 1,0 do 3,0 mm powodował u wszystkich badanych odmian około trzykrotny, nieliniowy spadek energii jednostkowej rozdrabniania. Zależność między E_r a średnicą otworów sita (d_s) dla wszystkich badanych surowców opisano wspólnym równaniem regresji o postaci funkcji wykładniczej:

$$E_r = 291,02e^{-0,5968d_s}, \quad R^2 = 0,936 \quad (4)$$

Zależność energii jednostkowej rozdrabniania (E_r) od średniego wymiaru cząstki śruty (d) była również nieliniowa i dla wszystkich badanych prób opisano ją równaniem regresji o postaci funkcji potęgowej (rys. 3):

$$E_r = 40,539d^{-1,18}, \quad R^2 = 0,8957 \quad (5)$$

Podobny charakter zależności między tymi parametrami uzyskali Laskowski i inni [11] dla różnych roślinnych materiałów ziarnistych.

Analizując wskaźnik podatności ziarna na rozdrabnianie (E_p) stwierdzono nieco inny charakter zależności między tym wskaźnikiem a wielkością otworów sita w rozdrabniaczu, niż w przypadku energochłonności jednostkowej rozdrabniania. Zwiększenie średnicy otworów sita z 1,0 do 2,0 mm w przypadku pszenicy i żyta nie miało istotnego wpływu na ten wskaźnik, zaś w odniesieniu do jęczmienia powodowało nieznaczny jego spadek. Natomiast przy sitach o wielkości

oczek 2,5 i 3,0 mm obserwowano wyraźny spadek E_f u wszystkich badanych prób. Wartości tego wskaźnika zawierały się w przedziale $7,0 \text{ kJm}^{-2}$ (pszenica odmiany Emika, sito 3,0 mm) do $12,0 \text{ kJm}^{-2}$ (jęczmień, sito 1,0 mm). Wzrost średnicy otworów sita w rozdrabniaczu z 1,0 do 3,0 mm powodował, w zależności od odmiany od 1,2 do 1,3-krotny spadek E_f . Parametr ten istotnie i dodatnio koreluje z właściwościami wytrzymałościowymi ziarna, a w szczególności z wytrzymałością na ścinanie [3].

Wskaźnik rozdrabniania Sokołowskiego (K_s) przedstawiono na rys. 5. Parametr ten, podobnie jak energochłonność jednostkowa rozdrabniania zmniejszał się wraz ze wzrostem średnicy otworów sita w rozdrabniaczu – średnio dla wszystkich odmian od 131 do $92 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{mm}^{0,5}$. Najmniejsze wartości tego parametru, przy każdym z zastosowanych sit w rozdrabniaczu uzyskiwano dla ziarna pszenicy odmiany Emika i zawierały się one w przedziale od 107 do $75 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{mm}^{0,5}$. Najwyższe wartości K_s otrzymano w przypadku ziarna jęczmienia i żyta – średnio od 101 do $147 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{mm}^{0,5}$. Wzrost średnicy otworów sita w rozdrabniaczu z 1,0 do 3,0 mm powodował u badanych surowców około 1,5 spadek K_s , czyli dwukrotnie mniejszy niż w przypadku energii jednostkowej rozdrabniania.

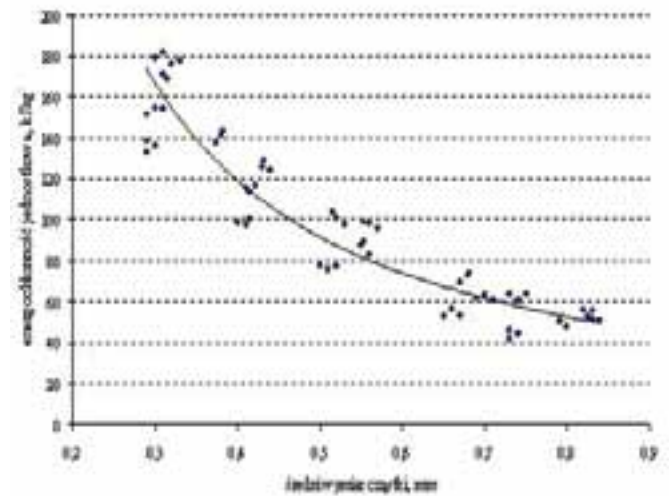
Zmiany K_s w zależności od średnicy otworów sita (D) w rozdrabniaczu opisano równaniem liniowym postaci:

$$K_s = -19,61D + 151,90; R2 = -0,701 \quad (6)$$

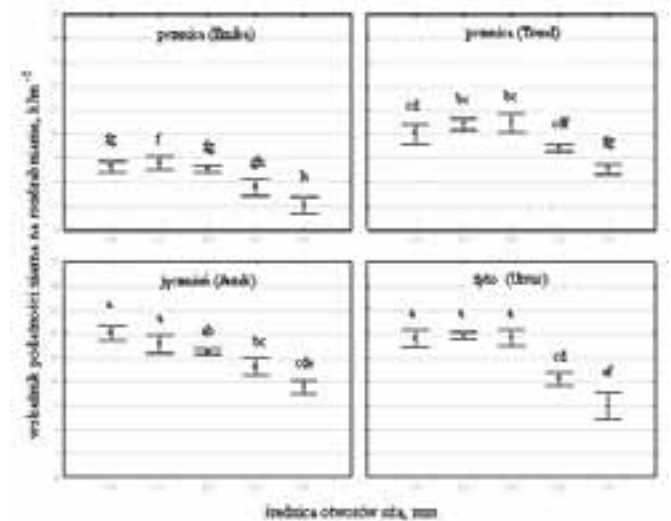
Różnice we wskaźnikach energochłonności rozdrabniania pomiędzy poszczególnymi odmianami wynikają z ich odmiennej wytrzymałości na działanie sił niszczących. Przy tej samej wielkości otworów sita w rozdrabniaczu największe wartości określanych wskaźników energochłonności rozdrabniania uzyskiwano zawsze dla ziarna jęczmienia. Ziarniaki jęczmienia w porównaniu do pozostałych materiałów zawierały plewkę, która jest materiałem trudno rozdrabniającym się, stąd też najprawdopodobniej wystąpiły najwyższe nakłady energii na rozdrabnianie tego surowca.

PODSUMOWANIE

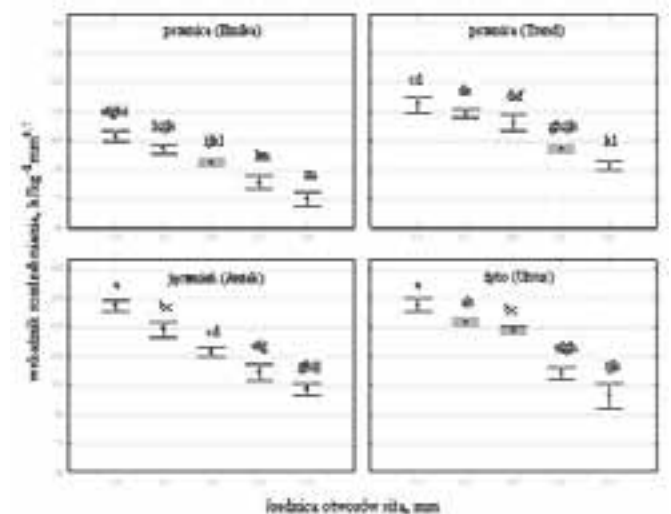
Przeprowadzone badania wykazały różny charakter zależności między średnicą otworów sita, a wyznaczonymi wskaźnikami charakteryzującymi proces rozdrabniania. Zwiększenie średnicy otworów sita w przedziale 1,0-3,0 mm powodowało liniowy wzrost średniego wymiaru cząstki śruty (średnio od 0,29 do 0,80 mm) i wprost proporcjonalny spadek wskaźnika rozdrabniania Sokołowskiego (średnio od 147 do $75 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{mm}^{0,5}$). Natomiast charakter zależności między wielkością otworów sita a energochłonnością jednostkową rozdrabniania i wskaźnikiem podatności ziarna na rozdrabnianie był nieliniowy (spadek energii jednostkowej rozdrabniania średnio od 179 do $55 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, zaś wskaźnika podatności ziarna na rozdrabnianie 12,0 do $7,0 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Przeprowadzone badania wykazały, że do charakterystyki procesu rozdrabniania nie wystarczy jedynie wyznaczenie energochłonności jednostkowej. Potrzebne są również wskaźniki, które uwzględniają stopień rozdrobnienia materiału. Pozwalają one na pełniejszy opis procesu dekohezji. Szczególnie wskaźnik Sokołowskiego może znaleźć zastosowanie praktyczne do wyznaczenia stałych materiałowych, charakteryzujących podatność surowców na rozdrabnianie.



Rys. 3. Zależność między średnim wymiarem cząstek śruty a energochłonnością jednostkową rozdrabniania.



Rys. 4. Zależności między średnicą otworów sita w rozdrabniaczu a wskaźnikiem podatności ziarna na rozdrabnianie, a-h – grupy jednorodne.



Rys. 5. Zależności między średnicą otworów sita w rozdrabniaczu a stałą proporcjonalności Sokołowskiego; a-m – grupy jednorodne

LITERATURA

- [1] **DZIKI D., LASKOWSKI J. 2002.** *Wpływ nawożenia azotowego na podatność na rozdrabnianie ziarna pszenicy.* Inżynieria Rolnicza, 7(40a): 337-343.
- [2] **DZIKI D., LASKOWSKI J. 2004.** *Influence of kernel size on grinding process of wheat at respective grinding stages.* Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 1(54): 29-33.
- [3] **DZIKI D. 2008.** *Analiza wpływu wstępnego zgniatania zbóż na rozdrabnianie udarowe.* Rozprawy naukowe AR w Lublinie, z. 326:40-78.
- [4] **DZIKI D., PRZYPEK-OCHAB D. 2009.** *Ocena energochłonności rozdrabniania ziarna pszenicy zróżnicowanego pod względem twardości.* Inżynieria Rolnicza, 5(114), 61-67.
- [5] **FANG CH., CAMPBELL G.M. 2003.** *On predicting roller milling performance V: effect of moisture content on the particle size distribution from first break milling of wheat.* Journal of Cereal Science, 37:31-41.
- [6] **GREFFEUILLE V, MABILLEA F., ROUSSETC M., OURYD F.-X., ABECASSIS J., LULLIEN-PELLERINA V. 2007.** *Mechanical properties of outer layers from near-isogenic lines of common wheat differing in hardness.* Journal of Cereal Science, 45:227-235.
- [7] **HADDAD Y., MABILLE F., MERMET A., ABECASSIS J., BENET J.C. 1999.** *Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding.* Powder Technology, 105:89-94.
- [8] **JURGA R. 2009.** *Inne rozdrabniacze stosowane do ziarna i mlewa.* Przegląd Zbożowo-Młynarski, 1:39-40.
- [9] **KIRYLUK J. 1997.** *Wpływ wilgotności kaszek z grochu i bobiku na zmiany ich cech przemiałowych.* Przegląd Zbożowo-Młynarski, 4:27-29.
- [10] **LASKOWSKI J., ŁYSIAK G. 1997.** *Stanowisko do badań procesu rozdrabniania materiałów biologicznych.* Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 1/2: 55-58.
- [11] **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.: 29-30.
- [12] **MOUSIA Z., BALKIN R.C., PANDIELLA S.S., WEBB C. 2004.** *The effect of milling parameters on starch hydrolysis of milled malt in the brewing process.* Process Biochemistry, 39(12):2213-2219.
- [13] **NGUYEN A.-QU., HUSEMANN K., OETTEL W. 2002.** *Comminution behaviour of an uncon-fined particle bed.* Minerals Engineering, 15:65-74.
- [14] **PASIKATAN M. C., MILLIKEN G. A., STEELE L., SPILLMAN C.K. 2001.** *Modeling the energy requirements of first break grinding.* Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 44(6): 1737-744.
- [15] **PRABHASANKAR P., RAO P.H. 2001.** *Effect of different milling methods on chemical composition of whole wheat flour.* European Food Research Technology 213:465-469.
- [16] **ROMAŃSKI L. 2004.** *Analiza i modelowanie procesu zgniatania ziarna pszenicy.* Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Rozprawy CCXX. z. 494, 108.
- [17] **SOKOŁOWSKI M. 1996.** *Energy consumed in comminution- A New idea of a general law of comminution – New tests stand and testing results.* Recents progress en genie des procedes Vol. 10. nr. 45, 221-226.
- [18] **ZAWIŚLAK K. 2006.** *Przetwarzanie ziarna kukurydzy na cele paszowe.* Rozprawy Nauk. AR w Lublinie, z 304, 95.

THE EVALUATION OF CEREAL GRAIN ENERGY-CONSUMING DURING IMPACT GRINDING

SUMMARY

The aim of the work was to evaluate the impact grinding energy requirements of cereal grain. The samples of wheat, barley and rye (12% moisture w.b.) were ground by using laboratory hammer mill equipped with changeable screen. The results showed that decrease of diameter on screen holes caused a non-linear decrease of specific grinding energy. The average values of this parameter ranged from 54.9 kJ·kg⁻¹ (diameter of screen 3,0 mm) to 179,1 kJ·kg⁻¹ (diameter of screen 1,0 mm). The relationship between specific grinding energy and average particle size of ground material was non-linear and for all samples was described by the exponential equation. The grinding ability index and the constant of proportionality ranged from 7.0 to 12.0 kJ·m⁻² and from 75 to 147 kJ·kg⁻¹·mm 0.5, respectively.