

Dr inż. Krzysztof KORPYSZ  
 Dr inż. Henryk ROSZKOWSKI  
 Dr hab. inż. Janusz WOJDALSKI prof. nadzw. SGGW  
 Wydział Inżynierii Produkcji, SGGW w Warszawie

## ENERGETYCZNE ASPEKTY PROCESU GNIECENIA ZIARNA JĘCZMIENIA®

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki laboratoryjnych badań energochłonności procesu rozdrabniania poprzez gniecenie ziarna jęczmienia odmiany KORU. Wyniki dotyczące wydajności procesu gniecenia jak i jednostkowego zużycia energii przedstawiono dla sześciu różnych średnic walców i prędkości obwodowej walców w zakresie od 2 m/s do 9 m/s. Jednostkowe zużycie energii przy gnieceniu jęczmienia zależy od wartości parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych gniotownika i wynosi ok. 10 kJ/kg. Otrzymane wyniki badań poszerzają wiedzę będącą podstawą rozwoju techniki w zakresie rozdrabniania ziarna zbóż w tym zwłaszcza jęczmienia.

**Słowa kluczowe:** energochłonność, rozdrabnianie, gniecenie, ziarno jęczmienia.

**Wykaz oznaczeń:**

- Q – wydajność gniotownika [kg/h],
- v – prędkość obwodowa walców gniotownika [m/s],
- W<sub>A</sub> – agregatowy wskaźnik jednostkowego zużycia energii elektrycznej [kJ/kg].

przygotowania pasz dla zwierząt poprzez wykorzystywanie energooszczędnych maszyn. Do urządzeń rozdrabniających ziarno zboża o mniejszej jednostkowej energochłonności należą śrutowniki tarczowe i śrutowniki walcowe (tabela 1.).

**Tabela 1.** Jednostkowe zużycie energii na rozdrabnianie ziarna w urządzeniach rozdrabniających [12]

| Rodzaj urządzenia rozdrabniającego         | Jednostkowe zużycie energii |    |        |      |
|--|-----------------------------|----|--------|------|
|  | MJ/Mg                       |    | kWh/Mg |      |
| Śrutownik walcowy                          | 18                          | 22 | 5,0    | 6,1  |
| Śrutownik tarczowy z tarczami ceramicznymi | 34                          | 50 | 9,4    | 13,9 |
| Śrutownik tarczowy z tarczami metalowymi   | 40                          |    | 11,1   |      |
| Śrutownik kombinowany walcowo-tarczowy     | 36                          |    | 10,0   |      |
| Rozdrabniacz bijakowy                      | 58                          | 62 | 16,1   | 17,2 |

### WPROWADZENIE

Jęczmień jest zbożem o wszechstronnym zastosowaniu w żywieniu człowieka jak również w produkcji pasz, co dokumentuje literatura [3, 4, 6, 9, 12, 13]. Rozdrabnianie ziarna zbóż, niezbędne z technologicznego punktu widzenia, należy do mechanicznych operacji o wysokiej energochłonności [2, 4, 13, 14, 15, 16].

W procesie produkcji pasz treściwych na rozdrabnianie ziarna przypada około 70% energii zużywanej w całym procesie technologicznym [1]. Całkowite zużycie energii na rozdrabnianie ziarna zbóż w skali kraju sięga setek GJ rocznie. W gospodarstwach rolnych do rozdrabniania ziarna na paszę używane są różnorodne urządzenia w tym rozdrabniacze bijakowe, śrutowniki walcowe, rozdrabniacze uniwersalne oraz gniotowniki.

W przemyśle paszowym w Polsce i paszarniach gospodarstw rodzinnych dominują rozdrabniacze bijakowe [7, 8]. Można je uznać za podstawowe urządzenia do rozdrabniania ziarna na paszę. Powszechne stosowanie rozdrabniaczy bijakowych do przygotowania śruty zbożowej wynika z ich uniwersalności, dużej wydajności w stosunku do masy maszyny, prostej budowy, łatwej obsługi i regulacji oraz możliwości automatyzowania pracy przy dużej niezawodności. Do najistotniejszych wad należy wysoka energochłonność procesu rozdrabniania sięgająca 60 kJ/kg [1, 7, 8, 12] oraz stosunkowo niska jakość produktów rozdrabniania. Śruta zbożowa z rozdrabniacza bijakowego charakteryzuje się zróżnicowanym składem granulometrycznym, w którym udział części pylistych waha się w granicach (15% - 25%) [8, 11].

W sytuacji wzrostu cen nośników energii, jej oszczędzanie staje się nieuchronną koniecznością. Z tego względu, uzasadnionym jest racjonalne użytkowanie energii także w procesach

Dla gniotowników walcowych agregatowy wskaźnik jednostkowego zużycia energii wynosi od 4 kJ/kg do 18 kJ/kg [5, 7, 8], czyli kilkakrotnie mniej w stosunku do rozdrabniaczy bijakowych.

Śruta uzyskiwana w gniotownikach walcowych charakteryzuje się znacznie korzystniejszym składem granulometrycznym w porównaniu z śrutą uzyskiwaną w rozdrabniaczach bijakowych, co ma związek ze strawnością paszy. W tabeli 2 przedstawiono przykładowe wyniki wartości współczynników strawności składników ziarna zbóż na przykładzie pszenicy. W literaturze nie odnaleziono analogicznych wyników badań dla jęczmienia.

**Tabela 2.** Wartość współczynników strawności składników pszenicy [11]

| Składniki paszy   | Sposób przygotowania śruty |           |               |
|-------------------|----------------------------|-----------|---------------|
|                   | Śrutowanie                 | Gniecenie | Rozdrabnianie |
| Sucha masa        | 81,1                       | 84,1      | 82,1          |
| Białko            | 82,0                       | 85,0      | 84,0          |
| Włókno            | 20,0                       | 33,7      | 29,1          |
| Energia całkowita | 81,2                       | 84,9      | 83,4          |

Śruta pochodząca z gniotownika walcowego zawiera stosunkowo mało części pylistych (poniżej 10%). Wyniki badań potwierdzają wysoką strawność śruty gniecionej w żywieniu zwierząt [11].

Pomimo niskiej energochłonności procesu gniecenia i korzystnego składu granulometrycznego śruty, gniotowniki znalazły dotychczas ograniczone zastosowania praktyczne w procesach technologicznych przygotowania ziarna na potrzeby żywieniowe.

Korzystny skład granulometryczny śruty zbożowej był bezpośrednim czynnikiem przeprowadzenia badań nad energochłonnością procesu gniecenia ziarna jęczmienia. Za podstawowy cel badań przyjęto określenie wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych gniotownika na energochłonność procesu gniecenia wyrażoną wartością agregatowego wskaźnika jednostkowego zużycia energii elektrycznej. Agregatowy wskaźnik jednostkowego zużycia energii elektrycznej silnika napędzającego jest definiowany jako zużycie energii (w kJ) na jednostkę masy przerobionego surowca [12].

## STANOWISKO POMIAROWE

Do zrealizowania tak sformułowanego celu badań, wykorzystano metodę eksperymentalną na stanowisku badawczym. Wykorzystane do badań laboratoryjne stanowisko pomiarowe składało się z gniotownika o specjalnej budowie umożliwiającej zmianę parametrów konstrukcyjnych, zespołu napędowego i aparatury pomiarowej.

Gniotownik laboratoryjny umożliwił mocowanie na stałym ramie walców o różnych średnicach. Zastosowano walec odlewane kokilowo o oszlifowanej powierzchni roboczej, długość czynna walców 200 mm. Walec aktywny (napędzany) zamocowany stabilnie do ramy, otrzymuje napęd od silnika elektrycznego, walec pasywny, zamontowany uchylnie otrzymuje napęd z walca aktywnego za pośrednictwem przekładni zębatej o przełożeniu 1. Sprężyny zapewniają odpowiedni docisk walca uchylnego do walca zamocowanego stabilnie na ramie. Czopy walców osadzone w oprawach z łożyskami wahliwymi. Wolnoobrotowy trójfazowy silnik elektryczny klatkowy SG-160L zasilany poprzez tyrystorową przetwornicę częstotliwości TPC-26 umożliwiał bezstopniową regulację prędkości obrotowej w zakresie od minimalnej do 800 obr/min. Sprężyny śrubowe dociskające walce umożliwiają regulację siły docisku. Konstrukcja układu dociskającego walce pozwalała ponadto na bezstopniową regulację wielkości szczeliny roboczej. W trakcie pracy powierzchnie robocze walców były oczyszczane przy pomocy skrobaków nożowych o zmiennej sile nacisku do powierzchni walców. Gniotownik zaopatrzone w kosz zasypowy o objętości ok. 80 kg ziarna. Do regulacji wydajności zastosowano dozownik szczelinowy.

W laboratoryjnym stanowisku badawczym istniała możliwość regulowania wielu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w szerokim zakresie, w tym:

- średnicy walców w zakresie od 100 mm do 600 mm (wyniki badań zaprezentowano dla walców o średnicy 150, 190, 250, 350 i 400 mm),
- prędkości obwodowej walców do 16 m/s,
- maksymalnej siły docisku walców 16 kN,
- sposobu napędu walców (jeden lub oba walce napędzane),
- ustawialnego strumienia dopływu ziarna o natężeniu do 1000 kg/h.

Stanowisko badawcze wyposażono w aparaturę do pomiaru: momentu obrotowego, prędkości obrotowej, przepustowości

oraz jakości śruty. Należy zaznaczyć, że z literatury znane są inne stanowiska do badań energochłonności rozdrabniania ziarna zbóż [10, 14, 17].

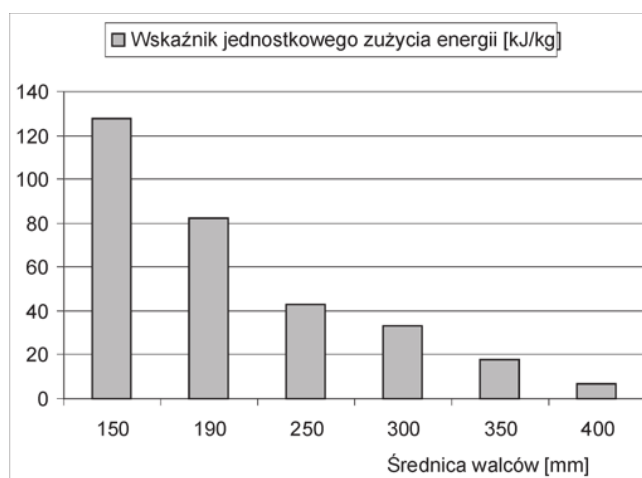
## METODYKA BADAŃ I WYNIKI

Badania procesu gniecenia przeprowadzono dla jęczmienia odmiany KORU o stałej wilgotności 11,0%. Dla każdej pary walców przeprowadzono pomiar prędkości obrotowej i momentu, przy nastawionym natężeniu zasilania ziarnem. Wydajność gniotownika w ustalonych warunkach pracy określano poprzez pomiar masy śruty w stałym czasie. Mierzone wielkości pozwalały na obliczanie zużycia energii brutto przy różnych wartościach parametrów konstrukcyjnych. Energię netto zużywaną na gniecenie obliczano, odejmując energię biegu jałowego (praca bez obciążenia) od energii brutto.

Eksperymenty zrealizowano w laboratorium Zakładu Mechanizacji Produkcji Zwierzęcej WIP SGGW w Warszawie. Stwierdzono, że średnica i prędkość obrotowa walców wpływały istotnie na przebieg procesu gniecenia i jednostkowe zużycie energii.

W opisanym eksperymencie stosowano gładkie, szlifowane żeliwne walce i stałą szczelinę roboczą wynoszącą 0,5 mm. Stwierdzono, że w przypadku walców o średnicach 150 i 190 mm proces gniecenia przebiega z niewielką wydajnością. Główną przyczyną tego było zjawisko wypychania ziaren ze szczeliny roboczej. Sprawne wciąganie ziaren w szczelinę roboczą zespołu gniotącego zależy od wielu czynników w tym między innymi od współczynnika tarcia pomiędzy ziarnem a powierzchnią walców oraz od relacji pomiędzy charakterystycznym wymiarem ziarna a średnicą walców. Jeżeli walce słabo „chwytają” ziarno, zmniejsza się istotnie wydajność gniecenia do wartości w zakresie 20 kg/h - 30 kg/h (1,0- 1,5 kg/h na cm długości czynnej walców). Uzyskane wyniki wskazują na nieprzydatność walców gładkich o średnicach 150 mm i 190 mm do wykorzystania w praktycznych rozwiązaniach konstrukcyjnych gniotowników do rozdrabniania ziarna jęczmienia.

Gniotownik wyposażony w walce o średnicy 250 mm stwarzał wyraźnie lepsze warunki przebiegu procesu gniecenia, co



**Rys. 1.** Wartości wskaźników jednostkowego zużycia energii ( $W_A$ ) podczas gniecenia jęczmienia w zależności od średnicy walców  $D$ . (wilgotność ziarna 11,0%, prędkość obwodowa walców 8 m/s, szczelina robocza 0,5 mm).

wyrażało się wzrostem wydajności procesu sięgającej wartości na poziomie od 80 do 160 kg/h (4 - 8 kg/h/ i na cm długości walców).

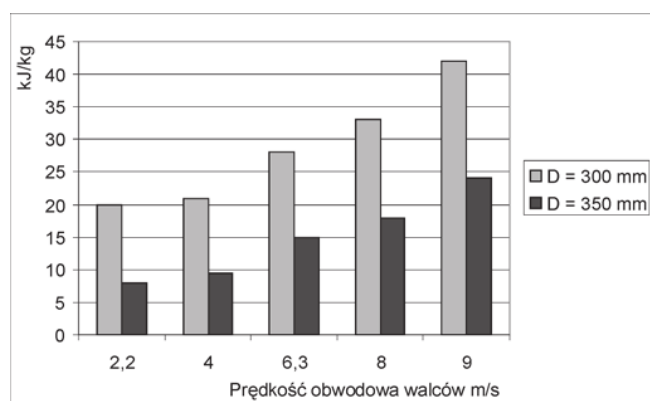
Efektom opisanych zjawisk są stosunkowo wysokie wartości jednostkowego zużycia energii (rys. 1.) wynoszące dla walców o mniejszych średnicach od 40 do 130 kJ/kg, czyli więcej niż dla rozdrabniaczy bijakowych (ok. 50 kJ/kg) [4, 13].

Badania laboratoryjne dowiodły, że gładkie walce o średnicach 300, 350 i 400 mm zapewniają płynny proces chwytnia ziaren jęczmienia do szczeliny roboczej. Wydajność maksymalna gniotownika osiągała wartości w zakresie 500 - 800 kg/h (25 - 40 kg/h i na cm długości walców). Dla tych średnic walców, jednostkowe zużycie energii kształtowało się na poziomie 5 - 10 kJ/kg.

Uzyskane w badaniach laboratoryjnych jednostkowe zużycie energii na rozdrabnianie ziarna jęczmienia w gniotowniku walcowym o średnicach walców 300 mm i większych osiągnęło wartość wielokrotnie mniejszą w porównaniu do energochłonności rozdrabniaczy bijakowych. Uzyskane wyniki wykazują zgodność z danymi opublikowanymi w literaturze [5, 7].

Ocena składu granulometrycznego śruty gniecionej wykazała wyjątkowo niską zawartość frakcji pylistych (tj. cząstek śruty o wymiarach mniejszych od 0,5 mm) - wynosiła ona ok. 5% dla różnych parametrów pracy gniotownika. Skład granulometryczny gniecionej śruty zbożowej, o niewielkim udziale frakcji pylistej, potwierdza wysoką jednorodność i dobrą przydatność (jakość) w żywieniu zwierząt.

Badania energochłonności procesu gniecenia ziarna wykazały tendencję wzrostu jednostkowego zużycia energii wraz ze wzrostem prędkości obwodowej walców (rys. 2).



**Rys. 2.** Wpływ prędkości obwodowej walców  $v$  na wartość wskaźnika jednostkowego zużycia energii elektrycznej dla następujących warunków: wydajność gniotownika  $Q = 300$  kg/h, szczelina robocza - 0,5 mm, średnica walców - 300 mm i 350 mm.

Zjawisko to zaobserwowano dla wszystkich średnic walców. Przykładowo dla walców o średnicach 300 i 350 mm wzrost prędkości obwodowej z 2 do 9 m/s powodował zwiększenie energochłonności o ponad 100%. Zależność ilustrująca wpływ prędkości obwodowej walców przy stałej wydajności procesu i stałej wielkości szczeliny roboczej, na wartość wskaźnika zużycia energii opisano równaniami regresji.

Dla walców o średnicy 300 mm równanie ma postać:

$$W_A = 24,93 - 3,75v + 0,62 v^2; \quad R = 0,9929$$

Dla walców o średnicy 350 mm ma postać:

$$W_A = 6,64 - 0,51 v + 0,26 v^2; \quad R = 0,9940$$

Równania określają jednostkowe zużycie energii w procesie gniecenia ziarna jęczmienia o wilgotności 11% i prędkości obwodowej walców w zakresie od 2 m/s do 9 m/s.

Należy jednak zaznaczyć, że zwiększenie prędkości obwodowej walców umożliwia uzyskanie wyższej wydajności gniotownika. Praktycznie stosowane prędkości obwodowe walców gniotownika są kompromisem pomiędzy zmniejszeniem energochłonności a koniecznością uzyskania odpowiedniej wydajności procesu i wynoszą od 5 m/s do 8 m/s.

## PODSUMOWANIE

Badania na stanowisku laboratoryjnym energochłonności procesu gniecenia ziarna jęczmienia o wilgotności 11% wykazały, że gładkie walce gniotownika powinny mieć średnicę nie mniejszą od 300 mm. Jednostkowe zużycie energii przy gnieceniu jęczmienia wyniosło przeciętnie ok. 10 kJ/kg i było czterokrotnie niższe niż uzyskiwane w rozdrabniaczach bijakowych.

W innych badaniach procesu gniecenia jęczmienia odmiany Rudzik [15], jednostkowe zużycie energii wynosiło ok. 16 kJ/kg, osiągając wartość najwyższą rzędu 18 kJ/kg przy wilgotności 15 - 16%.

Maksymalna wydajności procesu gniecenia w urządzeniu z walcami gładkimi sięgała rzędu 25 - 40 kg/h na 1 cm długości czynnej walca. Śruta gnieciona zawierała tylko ok. 5% części pylistych, czyli znacznie mniej niż śruta z rozdrabniacza bijakowego. Przedstawione wyniki badań dotyczące wpływu istotnych parametrów konstrukcyjnych i ich interpretacja mogą być przydatne w praktyce. Otrzymane wyniki badań wskazują na dokonujący się postęp w dziedzinie poszukiwania energooszczędnych metod rozdrabniania ziarna jęczmienia.

Przeprowadzone badania na stanowisku laboratoryjnym prowadzą do następujących wniosków:

- Energochłonność procesu gniecenia ziarna jęczmienia zależy od średnicy walców i zmniejsza się z jej wzrostem.
- Dla walców o średnicy 150 mm, 190 mm i 250 mm energochłonność rozdrabniania ziarna jęczmienia jest porównywalna lub wyższa niż w rozdrabniaczu bijakowym.
- Energochłonność procesu gniecenia ziarna jęczmienia walcami o średnicy powyżej 300 mm zawiera się w zakresie 5 do 10 kJ/kg.
- Wydajność procesu gniecenia ziarna walcami o średnicy 300 mm, 350 mm i 400 mm jest wielokrotnie wyższa w porównaniu do osiąganego dla walców średnicy 250 mm, 190 mm i 150 mm.
- W gniotownikach przeznaczonych do gniecenia ziarna jęczmienia wskazane jest stosować walce o średnicy 300 mm lub większej.

## LITERATURA

- [1] Barbicki A.P., Sporychin W.W., Iszkov W.I.: Rezervy povyszenia effektivnosti molotkovykh drobilok. *Technika w Selsk. Choz.* 9, 1979.
- [2] Dzikowski D., Laskowski J.: Wpływ cech ziarna żyta na proces rozdrabniania. *Inżynieria Rolnicza*, 5(60), 2004, s. 101 – 108.
- [3] Dzikowski D., Laskowski J.: Influence of Selected Factors on Wheat Grinding Energy Requirements, TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture, vol. V, 2005, p. 56 – 64.
- [4] Flizikowski J., Bieliński K., Bieliński M.: Podwyższenie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniacza nasion zbóż na paszę, Wyd. ART - OPO 1994, Bydgoszcz.
- [5] Hülsenberger Versuchsbericht: Kalberaufzuchtfutterquetschen oder mahlen, 1983. Schaumann Verlag. Pinnberg.
- [6] Kiryluk J., Kawka A., Klockiewicz-Kamińska E., Anioła J.: Charakterystyka wybranych odmian jęczmienia jako surowca do produkcji kasz i innych produktów spożywczych. *Przegląd Zbożowo-Młynarski* 3, 1998, 29-30.
- [7] Korpysz K., Roszkowski H.: Analiza możliwości poprawy składu granulometrycznego śruty, *Postępy Nauk Rolniczych*, 6, 1985, 61 - 66.
- [8] Korpysz K., Roszkowski H.: Gneczenie – energooszczędna metoda przygotowania śruty. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, 3, 1992.
- [9] Kulig R., Laskowski J.: Effects of Conditioning Methods on Energy Consumption During Pelleting, TEKA Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. Tom VI. Lublin, 2006, p. 67 – 74.
- [10] Laskowski J., Łysiak G.: Stanowisko do badań procesu rozdrabniania surowców biologicznych, *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*. 1-2, 1997, 55 – 58.
- [11] Lawrence T.L.J.: High level cereal diets for the growing finishing pig. II, *Journal of Agricultural Science*, 1967, 59, 2.
- [12] Neryng A., Wojdalski J., Budny J., Krasowski E.: Energia i woda w przemyśle rolnospożywczym, Wybrane zagadnienia, WNT, 1990, Warszawa.
- [13] Opielak M.: Rozdrabnianie materiałów w przemyśle rolnospożywczym. Lublin (nakładem własnym Autora), 1995.
- [14] Opielak M.: Rozdrabnianie materiałów w przemyśle rolnospożywczym. Część II. Badania wpływu konstrukcji rozdrabniacza i cech materiału rozdrabnianego na jakość i energochłonność procesu. Politechnika Lubelska, 1996.
- [15] Romański L., Niemiec A.: Analiza wpływu ułożenia ziarna w szczelinie roboczej gniotownika na energię rozdrabniania, *Inżynieria Rolnicza*, 5 2000,(16), 215-220.
- [16] Romański L., Niemiec A.: Badania wpływu wilgotności ziarna wybranych gatunków zbóż na energię rozdrabniania w gniotowniku modelowym, *Inżynieria Rolnicza*, 9 (20), 2000, 255 – 259.
- [17] Romański L.: Nowa metoda badania energochłonności dynamicznego zgniatania ziarna pomiędzy walcami, *Inżynieria Rolnicza*, 8, 2003, (50), 359 – 365.

### ENERGETIC ASPECTS OF BARLEY GRAIN CRUSHING PROCESS

#### SUMMARY

*There have been presented the performance and results of laboratory analysis of grinding process energy consumption by crushing of KORU variety barley grain. The results concerning the productivity of crushing process and unit energy consumption has been presented for different roll diameters and rolls tangential velocity in the scope from 2 m/s to 9 m/s. The unit energy consumption during barley crushing depends on the crusher structural and operational parameters and is about 10 kJ/kg. The results obtained can be considered as a progress in relation to the existing knowledge about cereals grain, in particular barley grain.*

**Key words:** energy consumption, grinding, crushing, barley grain.