

Wpłynęło 28.07.2017 r.  
Zrecenzowano 18.09.2017 r.  
Zaakceptowano 25.09.2017 r.

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

# Analiza wpływu modyfikacji konstrukcji zespołu roboczego młyna walcowego na wybrane parametry procesu rozdrabniania

**Weronika KRUSZELNICKA**<sup>ABCDEF</sup>  
**Adam MROZIŃSKI**<sup>ABCDEF</sup>

*Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Zakład Systemów Technicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej*

**Do cytowania For citation:** Kruszelnicka W., Mroziński A. 2017. Analiza wpływu modyfikacji konstrukcji zespołu roboczego młyna walcowego na wybrane parametry procesu rozdrabniania. *Problemy Inżynierii Rolniczej. Z. 3 (97) s. 49–71.*

## Streszczenie

W pracy analizowano wzajemne relacje: ruchu, stanu cząstek rozdrabnianych ziaren ryżu, przemieszczenia i rozdrabniania w młynie walcowo- płytowym. Za cel pracy postawiono analizę i ocenę warunków technicznych procesu użytkowania młyna walcowego o nowej konstrukcji (nWk) zespołu roboczego walców stosowanego w przemyśle chemicznym i spożywczym za pomocą użytkowych, granulometrycznych wskaźników jakości produktu. Zbadano, jaki wpływ na wskaźniki efektywności, tj.: stopień rozdrobnienia, energochłonność i wydajność, ma modyfikacja zespołu roboczego polegająca na wprowadzeniu płyty pionowej między współpracujące walce. Wykazano, że wzajemne relacje ruchu i stanu cząstek oraz wartości wskaźników rozdrabniania zależą m.in. od warunków tarcia, zderzeń, cięcia i nowych cech konstrukcyjnych młyna.

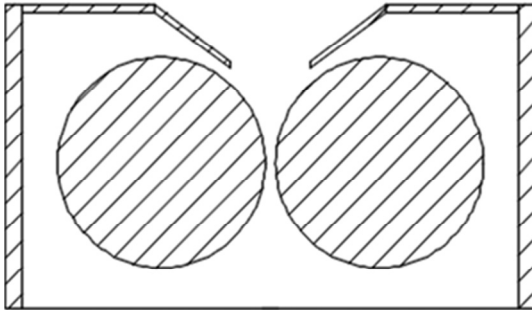
**Słowa kluczowe:** rozdrabnianie ryżu, młyn walcowy, wskaźniki efektywności, modyfikacja zespołu walcowego

## Wstęp

Proces rozdrabniania, dezintegracji struktury przestrzennej materiałów w celu pozyskania produktów o zmniejszonych, ujednoczonych wymiarach uważany jest za jedno z podstawowych działań przetwórczych materiałów do ich dalszego wykorzystania na cele energetyczne, żywieniowe czy farmaceutyczne. W wielu przypadkach rozdrabnianie stanowi pierwszy, podstawowy, niezbędny etap przygotowania materiału, np. dla poprawy jego jakości [KRUSZELNICKA i in. 2016; KRUSZELNICKA, MADEJ 2016; PATEL i in. 2008].

Powszechność procesów rozdrabniania materiałów ziarnistych oraz związana z tym innowacyjność rozwiązań konstrukcyjnych młynów skutkują ciągłymi poszukiwaniami doskonalszych sposobów i modeli rozdrabniania, zwłaszcza opracowywaniem optymalnych, najbardziej efektywnych, warunków technicznych [CHŁOPEK i in. 2014; FLIZIKOWSKI 2002; FLIZIKOWSKI, BIELIŃSKI 2013; FLIZIKOWSKI i in. 2015; KOWALCZYK-JUŚKO i in. 2015; KOWALIK i in. 2013; MACKO 2013; TOMPOROWSKI 2011; 2012; TOMPOROWSKI, FLIZIKOWSKI 2013; TOMPOROWSKI, OPIELAK 2012].

W tradycyjnych rozdrabniaczach walcowych zespół roboczy składa się ze współpracujących walców rozdrabniających (rys. 1) [KRUSZELNICKA i in. 2016]. W nowej koncepcji rozdrabniacza walcowego między współpracujące walce o gładkiej lub profilowanej powierzchni (np. rowki) wprowadzono płytę o odpowiedniej powierzchni – gładkiej lub profilowanej (rys. 2). Takie rozwiązanie umożliwia rozdrabnianie materiałów uziarnionych pochodzenia organicznego (ziarno zbóż) lub mineralnego (kru-szywo).



*Rys. 1. Schemat podstawowej konstrukcji rozdrabniacza walcowego z dwoma obracającymi się przeciwnie walcami (przekrój)*

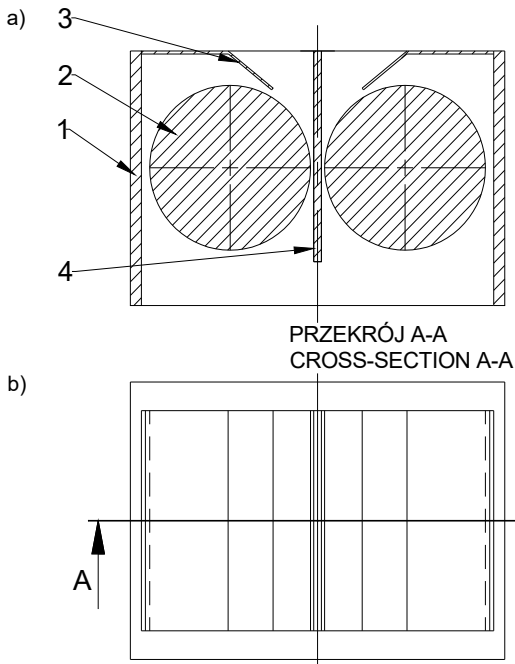
*Fig. 1. Scheme of the basic structure of a roller mill with two rotating counter-rotating rolls (cross-section)*

*Źródło: opracowanie własne.  
Source: own elaboration.*

Celem badań była analiza i ocena warunków technicznych nowego sposobu mielenia materiałów uziarnionych między obracającymi się walcami i płytą nieruchomą wprowadzoną w szczelinę międzywalcową zespołu roboczego walców za pomocą użytkowych, granulometrycznych wskaźników jakości produktu rozdrabniania.

Do osiągnięcia celu sformułowano niżej wymienione problemy badawcze.

1. Czy zastosowanie nowej konstrukcji elementów roboczych: walec – płyta, spowoduje zmniejszenie jednostkowego zużycia energii oraz zwiększenie wydajności – w porównaniu z rozwiązaniem tradycyjnym?
2. Jakie wartości cech geometrycznych walców i płyty, w warunkach zadanej ich odległości od obwiedni walców i powierzchni płyty, zapewniają najmniejsze jednostkowe zużycie energii oraz największą wydajność procesu rozdrabniania?
3. Jakie wartości parametrów pracy młyna walcowo-płytkowego zapewniają najmniejsze jednostkowe zużycie energii na rozdrabnianie oraz największą wydajność procesu?
4. Czy zastosowanie nowej konstrukcji zespołu walec obrotowy – płyta stała wpłynie na granulometrię produktu mielenia, w porównaniu z rozwiązaniem dwuwalcowym?



Rys. 2. Zespół roboczy młyna walcowego z płytą pionową: a) przekrój pionowy, b) rzut z góry; 1 = obudowa, 2 = walce mielące obrotowe, 3 = wlot wsadu zasilającego, 4 = płyta pionowa (przegroda) nieruchoma

Fig. 2. Roller mill working unit with vertical plate: a) vertical section, b) top view; 1 = housing, 2 = rotary grinding rolls, 3 = feed inlet, 4 = vertical plate

Źródło: opracowanie własne.  
Source: own elaboration.

## Nowa idea i konstrukcja młyna

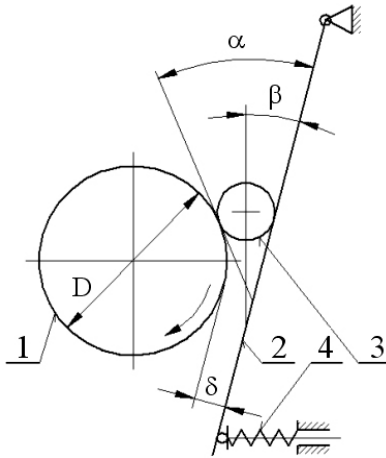
Wprowadzona między walce robocze płyta może być ustawiona skośnie do pionu, odchylając się o kąt  $\beta$ . Schemat położenia płyty odchylonej o kąt  $\beta$  przedstawiono na rysunku 3., a schemat zespołu roboczego z płytą w pozycji pionowej na rysunku 4. Umieszczona płyta może mieć możliwość regulacji szczeliny przez przesuwne lub wahliwe zamocowanie. W obu przypadkach materiał wsadowy doprowadzany jest od góry do przestrzeni roboczej.

Aby uzyskać produkt lepszej jakości (stopniu rozdrobnienia), można wykorzystać układy rozdrabniania kilkustopniowego, kilkietapowego [ARMSTRONG i in. 2007; BOCHAT i in. 2015; FLIZIKOWSKI i in. 2016; HOFFMAN i in. 2010; POPIEL 2011]. Współpracujące walce mogą współpracować we wzajemnym skośnym lub pionowym położeniu, a płyty robocze sprzęgnięte są obrotowo, aby umożliwić regulację szczeliny.

## Kinematyka i dynamika nowej konstrukcji rozdrabniającej

W opisie dynamiki ruchu cząstek i walców w przestrzeni roboczej konieczne jest uwzględnienie kinematyki ruchu elementów i nadawy oraz występujących między nimi sił tarcia występujących na odpowiednich powierzchniach. W zależności od sposobu zasilania nadawą zespołu rozdrabniającego można wyróżnić dwa przypadki ruchu cząstek:

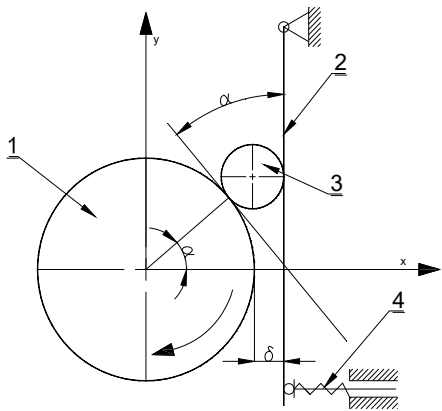
- I – zasilanie wsadem z zadaną prędkością początkową,
- II – zasilanie wsadem bez prędkości początkowej.



Rys. 3. Rozwiązanie konstrukcyjne zespołu rozdrabniacza walcowo-płytkowego z płytą skośną odchyloną o kąt  $\beta$ ; 1 = walec rozdrabniający, 2 = skośna płyta, 3 = materiał mielony, 4 = mechanizm regulacji odchylenia płyty,  $D$  = średnica walca,  $\alpha$  = kąt między tworzącą walca a płytą,  $\delta$  = szczelina między płytą a walcem

Fig. 3. Structural design of a roller-plate mill unit with an inclined plate inclined by an angle  $\beta$ ; 1 = shredding roller, 2 = sloping plate, 3 = milled material, 4 = plate deflection mechanism,  $D$  = roller diameter,  $\alpha$  = the angle between the roller and the plate,  $\delta$  = the gap between the plate and the roller

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.



Rys. 4. Zespół rozdrabniający z płytą pionową, 1 = walec rozdrabniający, 2 = pionowa płyta, 3 = materiał mielony, 4 = mechanizm regulacji odchylenia płyty,  $\alpha$  = kąt między tworzącą walca a płytą,  $\delta$  = szczelina między płytą a walcem

Fig. 4. Grinding unit with vertical plate, 1 = shredding roller, 2 = sloping plate, 3 = milled material, 4 = plate deflection mechanism,  $\alpha$  = the angle between the roller and the plate,  $\delta$  = the gap between the plate and the roller

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

W obu przypadkach zasilania przestrzeni roboczej rozdrabniacza (I i II) występuje jednakowa relacja między wartością współczynnika tarcia a ruchem powierzchni roboczej, polegająca na tym, że gdy na jednej powierzchni roboczej (walca lub płyty) występuje tarcie spoczynkowe, to na drugiej powierzchni roboczej występuje tarcie ruchowe.

Różna prędkość każdej powierzchni roboczej względem cząstek nadawy oraz odpowiednio zmienny współczynnik tarcia zwiększają stopień i efektywność rozdrabniania.

Współczynnik  $\mu$  tarcia powierzchni o siebie (np. cząstki nadawy i walca) wyraża ogólna zależność:

$$\mu = \operatorname{tg} \rho \quad (1)$$

gdzie:

$\mu$  = współczynnik tarcia [-];

$\rho$  = tzw. kąt tarcia [rad].

Współczynnik tarcia swą maksymalną wartość przyjmuje w przypadku tarcia spoczynkowego, kiedy kąt tarcia  $\rho$  osiąga wartość odpowiadającą tzw. kątowi samohamowności. Relację między wartością współczynników tarcia ruchowego  $\mu_k$  i tarcia spoczynkowego  $\mu_s$  opisuje przybliżona zależność (2).

$$\mu_k = a\mu_s \quad (2)$$

gdzie:

$a$  = parametr określający stosunek współczynników tarcia: kinetycznego i statycznego; na ogół:  $a = 0,3-0,8$ ;

$\mu_k$  = współczynnik tarcia kinetycznego [-];

$\mu_s$  = współczynnik tarcia statycznego [-].

W przestrzeni roboczej rozdrabniacza z płytą pionową działają siły (zgodnie z rys. 5):

- $P$  = siła zgniatania (reakcji) nadawy [N], odpowiednio  $P_p$  = siła reakcji zgniatania nadawy na powierzchni płyty [N],  $P_w$  = siła reakcji zgniatania nadawy na powierzchni walca w postaci wektorowej określana zależnością (3), w postaci skalarnej zależnością (4):

$$\vec{P}_w = \vec{P}_{wx} + \vec{P}_{wy} \quad (3)$$

$$P_w = \sqrt{P_{wx}^2 + P_{wy}^2} \quad (4)$$

gdzie:

$P_{wx}$  = składowa siły reakcji  $P_w$  wzdłuż osi  $x$  [N];

$P_{wy}$  = składowa siły reakcji  $P_w$  wzdłuż osi  $y$  [N].

- $T$  = siła tarcia nadawy o powierzchnię roboczą [N], odpowiednio  $T_p$  = siła tarcia nadawy o powierzchnię płyty [N],  $T_w$  = siła tarcia nadawy o powierzchnię walca [N], opisana równaniem:

$$T_w = \mu_w P_w = \sqrt{T_{wx}^2 + T_{wy}^2} \quad (5)$$

gdzie:

$\mu_w$  = współczynnik tarcia cząstek nadawy o powierzchnię roboczą walca [-];

$T_{wx}$  = składowa siły tarcia  $T_w$  wzdłuż osi  $x$  [N];

$T_{wy}$  = składowa siły tarcia  $T_w$  wzdłuż osi  $y$  [N].

- $G$  = siła ciężkości cząstki nadawy [N].
- $C$  = siła parcia cząstek nadawy na płytę [N], zgodnie z równaniem:

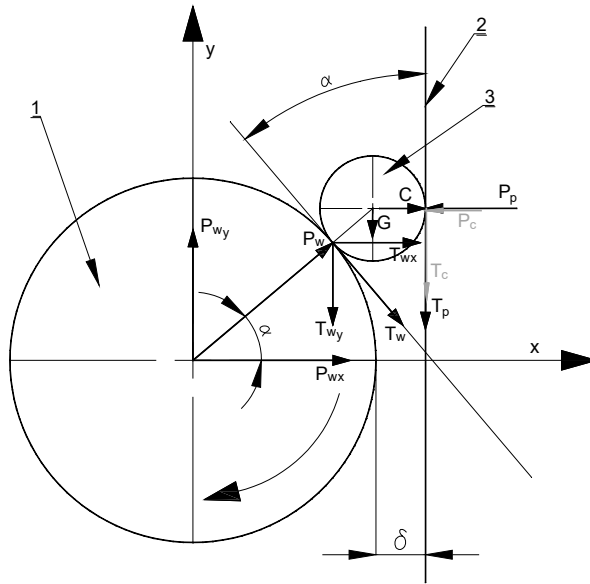
$$C = pf_p \quad (6)$$

gdzie:

$p$  = ciśnienie statyczne powstałe w wyniku spiętrzenia strugi cząstek nadawy [Pa];

$f_p$  = powierzchnia jednostkowa płyty [ $m^2$ ].

Z zależności dotyczących ogólnej równowagi sił dla przypadku z rysunku 5. z uwzględnieniem siły parcia wynika zależność (7). Nie biorąc jej pod uwagę, otrzymuje się zależność (8).



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 5. Rozkład sił w zespole rozdrabniającym z płytą pionową: 1 = walec rozdrabniający, 2 = pionowa płyta, 3 = materiał mielony,  $\alpha$  = kąt między tworzącą walca a płytą,  $\delta$  = szczelina między płytą a walcem,  $P_w$  = siła reakcji nadawy na powierzchnię walca,  $P_p$  = siła reakcji nadawy na płytę roboczą,  $P_{wx}$ ,  $P_{wy}$  = składowe siły reakcji na powierzchnię walca,  $G$  = siła ciężkości cząstki nadawy,  $T_p$  = siła tarcia nadawy o powierzchnię płyty,  $T_w$  = siła tarcia nadawy o powierzchnię roboczą walca,  $T_{wx}$ ,  $T_{wy}$  = składowe siły tarcia nadawy o powierzchnię roboczą walca

Fig. 5. Distribution of forces in the comminution unit with the vertical plate: 1 = grinding roller, 2 = vertical plate, 3 = milled material,  $\alpha$  = angle between the forming roller and the plate,  $\delta$  = gap between the plate and the roller,  $P_w$  = reaction force of the feed to the surface of the roller,  $P_p$  = force of the feed reaction on the working plate,  $P_{wx}$ ,  $P_{wy}$  = forces of reaction on the surface of the roller,  $G$  = gravitation force of feed grains,  $T_p$  = force of rolling friction on the working surface of the plate,  $T_w$  = force of rolling friction on the working surface of the roller,  $T_{wx}$ ,  $T_{wy}$  = components of the friction force of the feed on the working surface of the roller

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{G} + \vec{C} = 0 \quad (7)$$

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{G} = 0 \quad (8)$$

Uwzględniając działanie sił na oba elementy robocze (walec i płytę), można wyznaczyć zależności:

– dla sił działających na płytę z uwzględnieniem siły parcia:

$$P_w + P_c + T_w + T_c + G = 0 \quad (9)$$

gdzie:

$P_c$  = siła wypadkowa siły parcia  $C$  i siły reakcji zgniatania nadawy  $P_p$  na powierzchni płyty [N].

$$P_c = P_p + C \quad (10)$$

gdzie:

$T_c$  = siła tarcia wywołana wypadkową siłą  $P_c$  [N].

$$T_c = \mu_p P_c \quad (11)$$

gdzie:

$\mu_p$  = współczynnik tarcia cząstek nadawy o powierzchnię roboczą płyty [-];

- dla sił działających na płytę bez uwzględnienia siły parcia:

$$P_w + P_p + T_w + T_p + G = 0 \quad (12)$$

Szczegółową analizę ruchu przeprowadzono w odniesieniu do pionowego położenia płyty względem walców rozdrabniających.

### Przypadek I – zasilanie wsadem z zadaną prędkością początkową

Nadawa podawana jest w przestrzeń roboczą rozdrabniacza z wydajnością odpowiadającą wydajności rozdrabniania oraz z prędkością wstępną cząstek równą prędkości obwodowej walca roboczego. Odpowiednią prędkość rozdrabnianym cząstkom można nadać np. przez grawitacyjny spadek z określonej wysokości. W takim przypadku cząstki nie przemieszczają się względem powierzchni walca – są w spoczynku. Między powierzchnią walca a cząstkami nadawy zachodzi zatem tarcie spoczynkowe (statyczne) ze stosowną wartością współczynnika tarcia statycznego ( $\mu_s$ ).

Cząstki nadawy przemieszczają się względem powierzchni roboczej płyty z zadaną (spadkiem) prędkością. Między powierzchnią płyty a cząstkami nadawy zachodzi zatem tarcie ruchowe (kinematyczne) z odpowiednią wartością współczynnika tarcia kinematycznego ( $\mu_k$ ).

Rozdrabniacz jest zasilany nadawą z zadaną jej spadkiem grawitacyjnym prędkością wstępną  $v_n$ . Prędkość nadawy w przypadku ogólnym ustawienia skośnego płyty (rys. 6a) można wyrazić przez składowe (dalej dolne indeksy oznaczają: „w” dotyczy walca, zaś „p” dotyczy płyty), jako:

$$V_n = V_{ps} + V_{pn} \quad (13)$$

gdzie:

$v_n$  = prędkość wstępna nadawy [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

$v_{ps}$  = prędkość wzdłuż powierzchni płyty (prędkość styczna) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ];

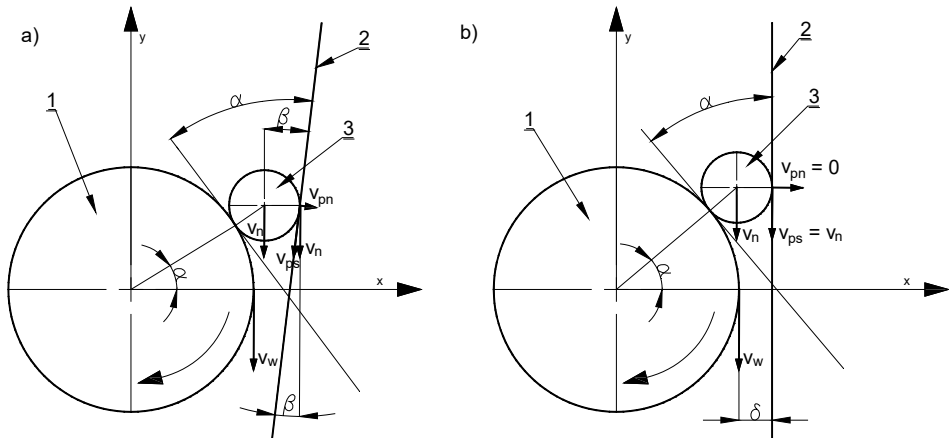
$v_{pn}$  = prędkość prostopadła do powierzchni płyty (prędkość normalna) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Prędkość nadawy, a ściślej jej składowa styczna, jest zsynchronizowana z prędkością obwodową walca  $v_w$  według zależności:

$$V_{ps} = V_{pn} \quad (14)$$

Składowa styczna prędkości nadawy jest określona zależnością:

$$v_{ps} = v_n \text{ctg}\beta \quad (15)$$



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 6. Rozkład prędkości w zespole rozdrabniającym: a) z płytą zamocowaną ukośnie, b) z płytą pionową; 1 = walec rozdrabniający, 2 = płyta, 3 = materiał mielony,  $\alpha$  = kąt między tworzącą walca a płytą,  $\delta$  = szczelina między płytą a walcem,  $\beta$  = kąt pochylenia płyty,  $v_w$  = prędkość obwodowa walca,  $v_n$  = prędkość nadawy,  $v_{pn}$  = prędkość prostopadła do powierzchni płyty,  $v_{ps}$  = prędkość styczna do powierzchni płyty

Fig. 6. Speed distribution in the grinding unit: a) with the plate fixed diagonally, b) with the vertical plate; 1 = grinding roller, 2 = plate, 3 = milled material,  $\alpha$  = angle between the forming roller and the plate,  $\delta$  = gap between the plate and the roller,  $\beta$  = tilt angle of the plate,  $v_w$  = peripheral speed of the roller,  $v_n$  = feed speed,  $v_{pn}$  = velocity perpendicular to the surface of the plate,  $v_{ps}$  = velocity tangent to the plate surface

Ze względu na występowanie tarcia rzeczywista prędkość  $v_p$  cząstek nadawy będzie:

$$v_p < v_{ps} \quad \text{lub} \quad v_p \approx v_{ps} \quad (16)$$

Składowa normalna prędkości nadawy określona jest zależnością:

$$v_{pn} = v_n \operatorname{tg} \beta \quad (17)$$

Składowa normalna powoduje powstanie ciśnienia (parcia) na powierzchni płyty na skutek spiętrzenia strumienia nadawy (wyhamowanie prędkości). Ciśnienie to można wyznaczyć w funkcji ciśnienia kinematycznego strumienia nadawy w formie:

$$p = \frac{\gamma}{2g} v_{pn}^2 \quad (18)$$

gdzie:

$\gamma$  = ciężar właściwy cząstek nadawy [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ];

$g$  = przyspieszenie ziemskie [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ];

$p$  = ciśnienie statyczne [Pa].

W przypadku konfiguracji rozdrabniacza z płytą pionową, tj.  $\beta = 0$  (rys. 6b), zachodzą zależności  $v_n = v_{ps} = v_w$ ,  $v_{pn} = 0$  i  $p = 0$ . W dalszej części przedstawiono zależności opisujące dynamikę i wciąganie cząstek w przestrzeń roboczą rozdrabniacza z płytą pionową (rys. 5).



Z ogólnego warunku równowagi sił względem osi x dla konfiguracji geometrycznej pionowego położenia płyty (rys. 5) wynika:

$$P_p = P_{wx} + T_{wx} \quad (19)$$

Po podstawieniu do równania (19) zależności (20) i (21)

$$P_{wx} = P_w \cos \alpha \quad (20)$$

$$T_{wx} = T_w \sin \alpha = \mu_w P_w \sin \alpha \quad (21)$$

otrzymuje się formułę (26). Wykorzystując zależność (22):

$$\mu_w P_w \cos \alpha + \mu_p P_p + G \geq P_w \sin \alpha + P_p \quad (22)$$

oraz uwzględniając w niej zależność (26), można określić warunek (27).

$$\mu_{ws} = \mu_{ps} = \mu_s \quad (23)$$

$$\mu_s = \operatorname{tg} \rho \geq \frac{P_w \sin \alpha + P_c - G}{P_w \cos \alpha + a P_c} \quad (24)$$

$$\rho \geq \operatorname{arctg} \left[ \frac{P_w \sin \alpha + P_c - G}{P_w \cos \alpha + a P_c} \right] \quad (25)$$

$$P_p = P_w \cos \alpha + \mu_w P_w \sin \alpha \quad (26)$$

$$\mu_w P_w \cos \alpha + \mu_p (P_w \cos \alpha + \mu_w P_w \sin \alpha) + G \geq P_w \sin \alpha \quad (27)$$

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\mu_w + \mu_p + \frac{G}{P_w} \frac{1}{\cos \alpha}}{1 - \mu_p \mu_w} \quad (28)$$

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\mu_w + \mu_p + \frac{G}{P_w}}{1 - \mu_p \mu_w} \quad (29)$$

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\mu_w + \mu_p}{1 - \mu_p \mu_w} \quad (30)$$

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\mu_s (1 + a)}{1 - a \mu_s^2} \quad (31)$$

gdzie:

$\mu_{ws}$  = współczynnik tarcia statycznego na powierzchni walca [-];

$\mu_{ps}$  = współczynnik tarcia statycznego na powierzchni płyty [-];

$\mu_s$  = współczynnik tarcia statycznego [-];

$\rho$  = kąt tarcia [rad];

$P_w$  = siła reakcji zginięcia nadawy walca [N];

$\alpha$  = kąt między tworzącą walca a płytą [rad];

$P_c$  = siła wypadkowa siły parcia C i siły reakcji zginięcia nadawy  $P_p$  na powierzchni płyty [N];

$P_p$  = siła reakcji zginięcia nadawy dla płyty [N];  
 $G$  = ciężar cząstek nadawy [N];  
 $\mu_{ps}$  = współczynnik tarcia na powierzchni płyty [-];  
 $\mu_{ws}$  = współczynnik tarcia na powierzchni walca [-].

Po odpowiednich przekształceniach otrzymuje się zależność (28). Przyjmując, że dla małych wartości kąta  $\alpha$  (zwykle  $<15^\circ$ )  $\cos \alpha \approx 1$ , otrzymuje się z zależności (28) formułę (29). Innym szczególnym przypadkiem jest pominięcie w zależności (29) ciężaru cząstki nadawy, co jest uzasadnione jej niewielkimi wymiarami w warunkach dużego stopnia rozdrobnienia, zatem kąt ten można obliczyć z zależności (30).

Po uwzględnieniu założeń dla zależności (23) oraz przyjęciu zależności (2), otrzymuje się (31). Wyrażenia (30) i (31) można otrzymać bezpośrednio z zależności (24) po uwzględnieniu formuły (26). Graniczną wartość kąta  $\alpha$ , określającego możliwość uchwytu cząstki nadawy w przestrzeń roboczą, oblicza się następująco:

– dla zależności (28):

$$\alpha \geq \arctg \left( \frac{\mu_w + \mu_p}{1 - a\mu_s^2} \right) \quad (32)$$

– dla zależności (31):

$$\alpha = \arctg \left[ \frac{(1 + a)\mu_s}{1 - a\mu_s^2} \right] \quad (33)$$

## Przypadek II – zasilanie wsadem bez prędkości początkowej

Nadawa podawana jest w przestrzeń roboczą rozdrabniacza bez zadanej prędkości wstępnej; cząstki nadawy względem powierzchni roboczej płyty są w spoczynku, natomiast powierzchnia robocza walca porusza się względem cząstek nadawy z określoną obrotami prędkością obwodową. Między powierzchnią roboczą płyty a cząstkami nadawy zachodzi tarcie spoczynkowe z wartością współczynnika tarcia statycznego ( $\mu_s$ ). Między powierzchnią roboczą walca a cząstkami nadawy zachodzi tarcie ruchowe z wartością współczynnika kinematycznego ( $\mu_k$ ).

Dla konfiguracji geometrycznej, gdy nadawie nie zadano prędkości wstępnej zasilania:

$$v_n = 0 \quad (34)$$

na powierzchni płyty roboczej nie występują składowe prędkości:

$$v_{ps} = 0 \text{ oraz } v_{pn} = 0 \quad (35)$$

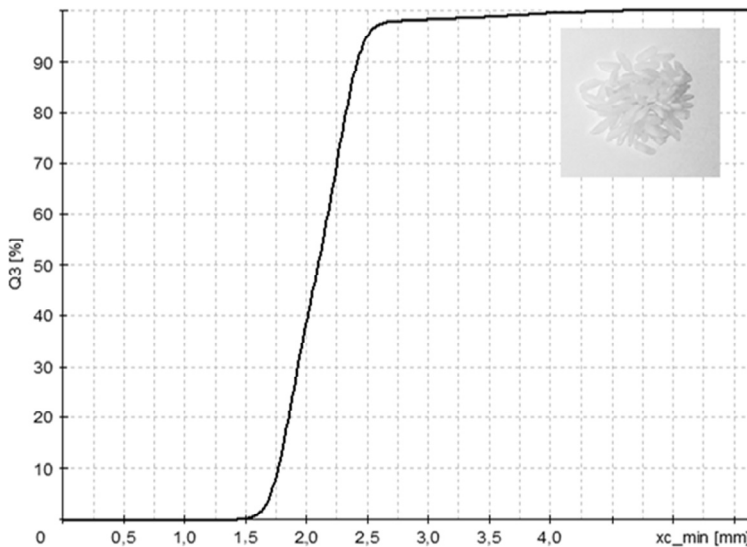
Na powierzchni roboczej walca występuje tylko jego prędkość obwodowa  $v_w$ :

$$v_w - v_{ps} \neq 0 \text{ lub } v_w - v_n \neq 0 \quad (36)$$

W tym przypadku z zależności (22) po uwzględnieniu (26) otrzymuje się takie same zależności, jak dla przypadku I, tj.: (30), (31), (32), (33).

## Metody badań

Analizę procesu rozdrabniania przeprowadzono dla ziaren ryżu o znanym rozkładzie granulometrycznym (rys. 7), dla których  $D_{80} = 2,20$  mm. Ryż, jako roślina o największej powierzchni uprawowej, jest wykorzystywany i przetwarzany w przemyśle spożywczym. Ziarna ryżu rozdrabnia się w celu uzyskania produktów ryżowych, takich jak: płatki ryżowe, mąka ryżowa itp. Z uwagi na powszechność rozdrabniania ziaren ryżu badania przeprowadzono właśnie dla tych ziaren. Ponadto ziarna ryżu dostępne w sprzedaży charakteryzują się małą wilgotnością, pozbawione są okrywy nasiennej i podczas ich rozdrabniania nie zachodzą czynniki zakłócające proces, np. aglomeracja cząstek, adhezja cząstek rozdrobnionych do powierzchni roboczych walca i płyty, co zapewnia powtarzalność prób.



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 7. Dystrybuanta rozkładu wielkości ziaren ryżu (nadawy), Q3 = skumulowana zawartość cząstek [%], xc\_min = wymiar cząstek [mm]

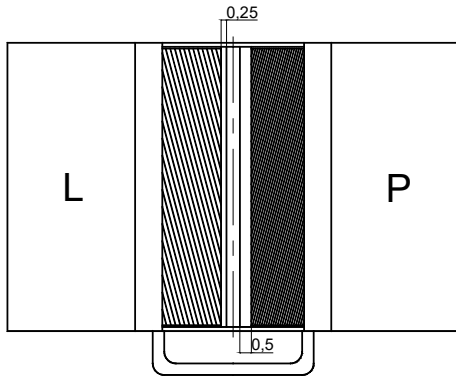
Fig. 7. Rice grain size distribution (feed), Q3 = cumulated share of particle [%], xc\_min = particle size [mm]

Widok zespołu rozdrabniającego wraz z oznaczeniami komór rozdrabniania przedstawiono na rysunku 8. Rozdrabnianie odbywało się w warunkach zmiennej szczeliny: komora lewa (L), komora prawa (P), obie komory (L + P) między płytą a walcami oraz zmienną prędkością obrotową walców  $n$  i zmienną prędkością liniową obwiedni walca  $v$  (tab. 1).

Badania obejmowały wyznaczenie następujących wskaźników oceny efektywności procesu rozdrabniania:

– wydajność masowa rozdrabniania  $W$  [ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ]:

$$W = f(n, s, l, \Phi, t) \quad (37)$$



Rys. 8. Walcowy zespół rozdrabniający (widok z góry) wraz z oznaczeniami wydzielonych komór; L = lewa komora, P = prawa komora

Fig. 8. Grinding roller unit (top view) together with the markings of the separated chambers; L = left chamber, P = right chamber

Źródło: opracowanie własne.  
Source: own elaboration.

- jednostkowe zużycie energii  $E_j$  [ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ]:

$$E_j = \frac{P_{sr}}{W} = \frac{P_{sr}}{W} = f(P, r, n, s, \Phi, t) \quad (38)$$

- zapotrzebowanie na moc  $P_{sr}$  [W]:

$$P_{sr} = f(P, r, n, s, \Phi, t) \quad (39)$$

- energochłonność procesu  $E$  [kWh]

oraz charakterystyki oceny jakości rozdrobnienia, tj. 80-procentowy stopień rozdrobnienia:

$$i_{80} = \frac{D_{80}}{d_{80}} \quad (40)$$

gdzie:

$D_{80}$  = wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren nadawy [mm];

$d_{80}$  = wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% ziaren produktu rozdrabniania [mm];

$n$  = prędkość obrotowa walców [ $\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ];

$r$  = średnica walca [mm];

$s$  = szczelina między walcem a płytą [mm];

$\Phi$  = obszar dopuszczalny cech konstrukcyjnych młyna [-];

$l$  = długość walca [mm];

$t$  = czas mielenia [s];

$P$  = moc chwilowa [W].

Stopień rozdrobnienia  $i_{80}$  wyznaczono na podstawie analizy granulometrycznej i uzyskanych krzywych składu ziarnowego nadawy i produktu, odczytując 80-procentowy udział ziaren. Analizę składu ziarnowego przeprowadzono w Laboratorium Badań Rozdrabniania – WIM UTP w Bydgoszczy na urządzeniu CAMSIZER firmy Retsch z wykorzystaniem metody cyfrowego przetwarzania obrazu.

Tabela 1. Warunki procesu rozdrabniania  
 Table 1. Grinding process conditions

Parametr Parameters	Jednostka Unit	Lewa strona (L) Left side (L)	Prawa strona (P) Right side (R)	L + P
Wymiar szczeliny <i>a</i> Gap dimension <i>a</i>	mm	0,25	0,50	0,75
Powierzchnia przekroju <i>A</i> Cross-sectional area <i>A</i>	mm <sup>2</sup>	30	60	90
Masa wsadu <i>m</i> Batch mass <i>m</i>	g	100	100	100
Średnica walców <i>d</i> Roller diameter <i>d</i>	mm	100	100	100
Średnica zastępcza nadawy $D_{80}$ Feed diameter $D_{80}$	mm	2,2	2,2	2,2
Prędkość obrotowa walców <i>n</i> Rollers rotational speed <i>n</i>	obr. · min <sup>-1</sup> rpm · min <sup>-1</sup>	1 800	2 200	2 200
Prędkość kątowna walców $\omega$ Rollers angular velocity $\omega$	rad · s <sup>-1</sup>	188,496	230,383	230,383
Prędkość liniowa obwiedni walca <i>v</i> Roller envelope linear velocity <i>v</i>	m · s <sup>-1</sup>	9,425	11,519	11,519
		1 800	2 200	2 200
		188,496	230,383	230,383
		9,425	11,519	11,519
		1 800	2 200	2 200
		188,496	230,383	230,383
		9,425	11,519	11,519
		1 800	2 200	2 200
		188,496	230,383	230,383
		9,425	11,519	11,519

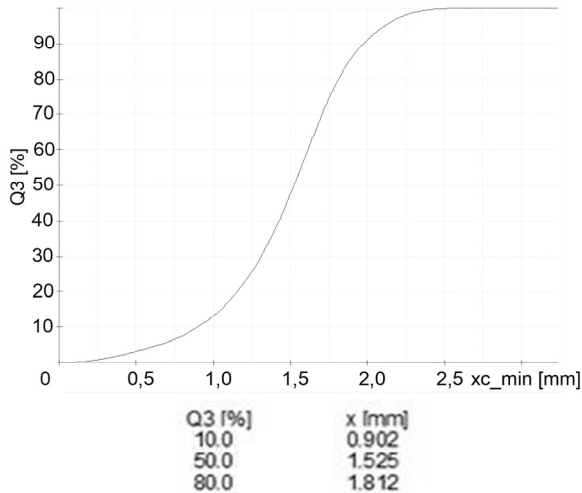
Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Powyższe charakterystyki są podstawą analizy, oceny i inteligentnego rozwoju konstrukcji oraz procesu mielenia według nowej koncepcji młyna walcowo-płytowego.

Wyznaczone charakterystyki opisano zależnościami funkcyjnymi w zależności od powierzchni przekroju szczeliny, dla których otrzymano duże wartości współczynnika determinacji  $R^2$ .

## Wyniki i ich dyskusja

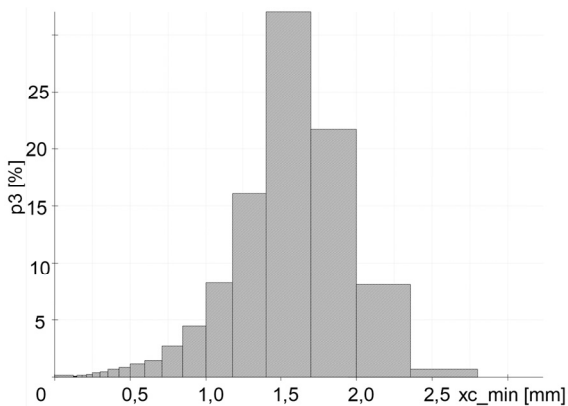
Badania obejmowały wyznaczenie wskaźników oceny rozdrabniania ryżu na młynie walcowym o nowej konstrukcji zespołu rozdrabniającego. Uzyskane wskaźniki porównano ze wskaźnikami procesu rozdrabniania z użyciem zespołu rozdrabniającego o tradycyjnej konstrukcji (bez pionowej płyty). Granulometryczną analizę produktu rozdrabniania w zespole rozdrabniającym o tradycyjnej konstrukcji dla  $n = 1800$  obr. $\cdot$ min<sup>-1</sup> przedstawiono na rysunkach 9. i 10.



Rys. 9. Dystrybuanta rozkładu wielkości cząstek ryżu po rozdrobnieniu w walcowym zespole rozdrabniającym bez przegrody; Q3, xc\_min jak na rys. 7

Fig. 9. Distribution of particle size of rice after grinding in a roller grinding unit without partition, Q3, xc\_min as in Fig. 7

Źródło: wyniki własne. Source: own study.



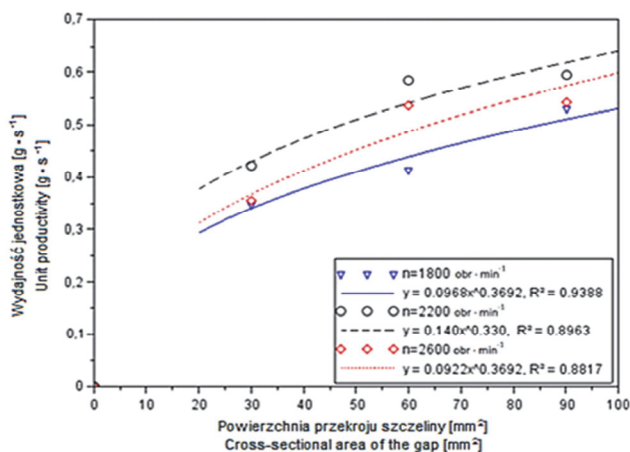
Rys. 10. Udział procentowy poszczególnych frakcji ryżu rozdrobnionego w walcowym zespole rozdrabniającym bez przegrody; p3 = zawartość cząstek [%], xc\_min jak na rys. 7

Fig. 10. Percentage share of individual fractions of grinded rice in a rolling mill without partition; p3 = share of particle [%], xc\_min as in Fig. 7

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

W odniesieniu do rozdrabniania za pomocą zespołu rozdrabniającego w postaci walec – płyta zaobserwowano tendencje wzrostu wydajności i energochłonności oraz zmniejszania się stopnia rozdrobnienia wraz ze wzrostem prędkości obrotowej walców, podobnie jak w przypadku pras ciśnieniowych i młynów walcowych bez płyty w szczelinie międzywalcowej wspomnianych w literaturze [FLIZIKOWSKI i in. 2015; SARAMAK 2011].

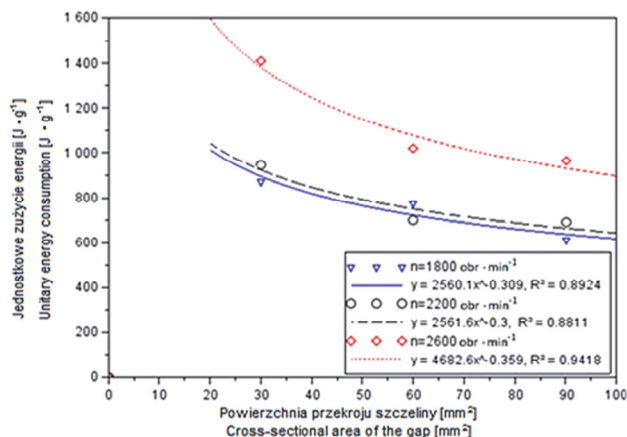
Zasadniczo potwierdzono obserwowane w procesach rozdrabniania ruchomy walec – ze stałą płytą wszystkie prawidłowości występujące w warunkach ruchomych walców: wzrost wydajności w funkcji rosnących prędkości (obrotowej, kątowej i liniowej) – rysunek 11. Dynamika wzrostu wydajności okazała się natomiast większa od przyrostów zapotrzebowania na moc, dlatego jednostkowe zużycie energii przejawia tendencje spadkowe w funkcji rosnących prędkości, np. obrotowej (rys. 12).



Rys. 11. Wydajność jednostkowa masowa [ $g \cdot s^{-1}$ ] w funkcji powierzchni przekroju szczeliny roboczej [ $mm^2$ ] w warunkach różnej prędkości obrotowej  $n$ ;  $R^2$  = współczynnik determinacji

Fig. 11. Mass production capacity [ $g \cdot s^{-1}$ ] as a function of the cross-sectional area of the working gap [ $mm^2$ ] under various rotational speeds  $n$ ;  $R^2$  = determination coefficient

Źródło: wyniki własne.  
Source: own study.



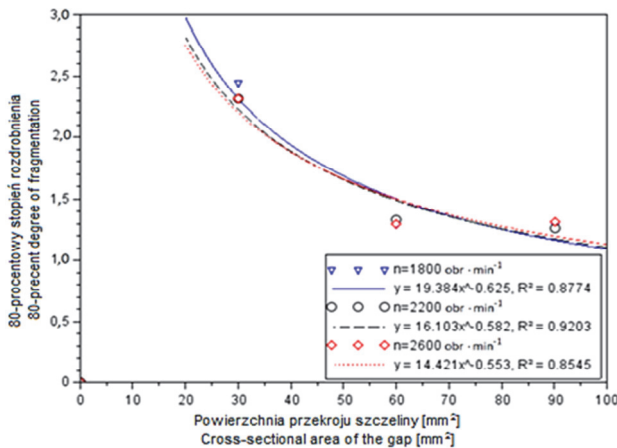
Rys. 12. Jednostkowe zużycie energii [ $J \cdot g^{-1}$ ] w funkcji powierzchni przekroju szczeliny roboczej w warunkach różnej prędkości obrotowej  $n$ ;  $R^2$  = współczynnik determinacji

Fig. 12. Unit energy consumption [ $J \cdot g^{-1}$ ] as a function of the cross-sectional area of the working gap [ $mm^2$ ] under various rotational speeds  $n$ ;  $R^2$  = determination coefficient

Źródło: wyniki własne.  
Source: own study.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki umożliwiają sformułowanie twierdzącej odpowiedzi na postawiony pierwszy problem badawczy, tj. że zastosowanie nowej konstrukcji zespołu rozdrabniającego w postaci walców i umieszczonej między nimi płyty powoduje wzrost wydajności i zmniejszanie się jednostkowego zużycia energii. Stopień rozdrobnienia (80-procentowy) wykazuje istotne zmniejszenie wartości w funkcji rosnącej szczeliny między walcem a płytą stałą. Zaobserwowane zmniejszanie się stopnia rozdrobnienia (uzyskiwane większe wymiary produktu) wraz ze zwiększaniem się szczeliny między powierzchnią walca i płyty jest zgodne z wynikami badań wpływu szczeliny międzywalcowej na wymiary produktu rozdrabniania za pomocą pras walcowych przedstawionych w pracy SARAMAKA i NAZIEMCA [2011].

Najkorzystniejszą dynamikę przyrostu stopnia rozdrobnienia uzyskiwano w warunkach najmniejszej szczeliny (0,25 mm) i powierzchni przekroju zasilania przestrzeni roboczej (30 mm<sup>2</sup>) – rysunek 13.



Rys. 13. Stopień rozdrobnienia  $i_{80}$  w funkcji powierzchni przekroju szczeliny roboczej w warunkach różnej prędkości obrotowej  $n$ ;  $R^2$  = współczynnik determinacji

Fig. 13. Fragmentation degree  $i_{80}$  as a function of the cross-sectional area of the working gap [mm<sup>2</sup>] under various rotational speeds  $n$ ;  $R^2$  = determination coefficient

Źródło: wyniki własne.  
Source: own study.

Zastosowanie nowej konstrukcji elementów roboczych: walec – płyta powoduje zmniejszenie jednostkowego zużycia energii do  $E_j = 611,700 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  (rozdrabnianie przez dwa walce po obu stronach nieruchomej płyty obracające się z prędkością  $n = 1800 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ ) oraz zwiększenie wydajności do  $W = 0,595 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  (rozdrabnianie przez dwa walce po obu stronach nieruchomej płyty obracające się z prędkością  $n = 2200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ ) – w porównaniu z rozwiązaniem tradycyjnym (dwa walce bez płyty), odpowiednio:  $E_j = 884,325 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $W = 0,423 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  (tab. 2). Odległości sumaryczne między walcami i płytą ( $L + P$ ) = 0,75 mm, jako wartości cech geometrycznych relacji walców i płyty, zapewniają najmniejsze jednostkowe zużycie energii  $E_j = 611,700 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  oraz największą wydajność procesu rozdrabniania  $W = 0,595 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ , co jest odpowiedzią na drugi sformułowany problem badawczy.

W celu rozwiązania czwartego problemu badawczego wykonano analizę granulometryczną produktów rozdrabniania dla każdego z przypadków wymiaru szczeliny i prędkości obrotowej walców. Porównując granulometryczne wskaźniki jakości produktu rozdrabniania rozwiązania z pionową płytą i rozwiązania tradycyjnego bez płyty, stwierdzono – rozwiązując tym samym postawiony problem badawczy – że rozwiązanie z płytą pionową umożliwia uzyskanie produktu o większym stopniu roz-



Tabela 2. Charakterystyki efektywności procesu rozdrabniania z przegrodą w różnych kombinacjach i zmiennymi prędkościami (obrotową, kątową i liniową)

Table 2. Efficiency characteristics of the grinding process with a partition in various combinations and variable speeds (rotational, angular and linear)

Wskaźnik Indicator	Jednostka Measurement unit	Rozdrabnianie Grinding								
		komora prawa (P) right chamber (P)			komora lewa (L) left chamber (L)			obie komory (L + P) both chambers (L+P)		
$n$	obr. $\text{min}^{-1}$ $\text{rpm} \cdot \text{min}^{-1}$	1 800	2 200	2 600	1 800	2 200	2 600	1 800	2 200	2 600
$t$	s	242	171	187	288	237	282	189	168	185
$W$	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	0,413	0,585	0,535	0,347	0,422	0,355	0,529	0,595	0,541
$P_{sr}$	W	0,323	0,408	0,545	0,303	0,399	0,501	0,324	0,412	0,522
$E$	kWh	0,022	0,019	0,028	0,024	0,026	0,039	0,017	0,019	0,027
$E_j$	$\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$	774,5	698,1	1 019,3	874,0	946,2	1 412,1	611,7	692,8	966,5
$d_{80}$	mm	1,70	1,65	1,70	0,90	0,95	0,95	1,72	1,75	1,68
$i_{80}$		1,294	1,333	1,294	2,444	2,316	2,316	1,279	1,257	1,310

Objaśnienia:  $n$  = prędkość obrotowa walców;  $t$  = czas mielenia;  $W$  = wydajność;  $P_{sr}$  = średnie zapotrzebowanie na moc;  $E$  = energochłonność;  $E_j$  = jednostkowe zapotrzebowanie na energię;  $d_{80}$  = średnica zastępcza produktu rozdrabniania;  $i_{80}$  = 80-procentowy stopień rozdrobnienia.

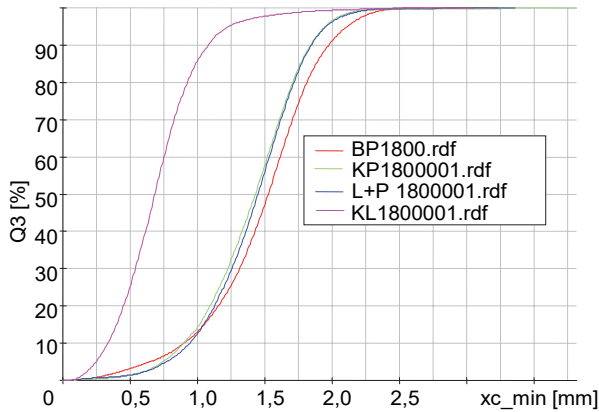
Explanations:  $n$  = rollers rotational speed;  $t$  = grinding time;  $W$  = productivity;  $P_{sr}$  = average power demand;  $E$  = energy consumption;  $E_j$  = unit energy demand;  $d_{80}$  = diameter of grinding product;  $i_{80}$  = 80% fragmentation degree.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

drobnienia niż rozwiązanie tradycyjne z zachowaniem takich samych parametrów rozdrabniania, tj. prędkości obrotowej walców rozdrabniających (rys. 14, 15). W przypadku rozdrabniania w komorze lewej (L), prawej (P) oraz obu (L + P) z prędkością walców równą 1800 obr.  $\text{min}^{-1}$  uzyskano mniejsze wymiary ziaren niż podczas rozdrabniania zespołem rozdrabniającym bez przegrody.

W celu rozwiązania trzeciego problemu porównano wyniki jednostkowego zużycia energii i wydajności w odniesieniu do każdego z przypadków prędkości obrotowej i wielkości szczeliny między walcami a płytą. Odpowiadając na postawiony problem, stwierdzono, że dwa walce obracające się z prędkością  $n = 1800$  obr.  $\text{min}^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty zapewniają najmniejsze jednostkowe zużycie energii do rozdrabniania ( $E_j = 611,700 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ) oraz dwa walce obracające się z prędkością  $n = 2200$  obr.  $\text{min}^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty zapewniają największą wydajność procesu ( $W = 0,595 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ), gdy stopień rozdrobnienia zawiera się w przedziale  $1,257 < i_{80} < 1,310$ .

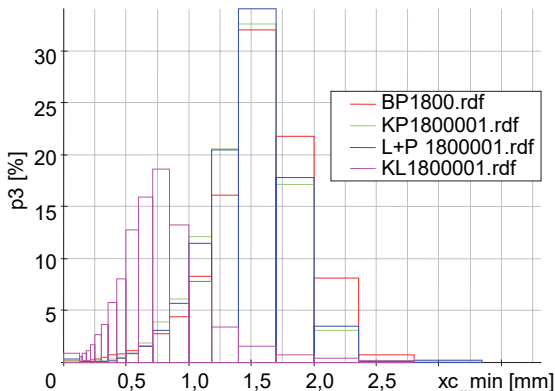
Zastosowanie nowej konstrukcji elementów roboczych: walec–płyta powoduje zmianę składu granulometrycznego produktu mielenia z zawierającego się w przedziale stopnia rozdrobnienia  $1,342 < i_{80} < 1,531$  w przypadku z rozwiązaniem dwuwalcowym na  $2,316 < i_{80} < 2,444$  w przypadku dwóch walców obracających się z prędkością ( $1800 < n > 2600$ ) obr.  $\text{min}^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty. Porównując rozdrobnienie wsadu przez komorę lewą (L), prawą (P) i obie (L + P), zaobserwowano, że produkt o najlepszej jakości – największym 80% stopniu rozdrobnienia  $i_{80}$  – uzyskano w przypadku rozdrabniania przez komorę lewą (L), tj. w warunkach najmniejszego przekroju szczeliny (rys. 16–21).



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 14. Dystrybuanty rozkładu wielkości cząstek ryżu po rozdrobnieniu w walcowym zespole rozdrabniającym bez przegrody oraz z przegrodą, gdy  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; BP 1800 = rozdrabnianie przez zespół walcowy bez przegrody; KP 1800 = rozdrabnianie przez komorę z prawej strony (P) z  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KP 2200 = rozdrabnianie przez komorę z prawej strony (P) z  $n = 2200 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KP 2600 = rozdrabnianie przez komorę z prawej strony (P) z  $n = 2600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KL 1800 = rozdrabnianie przez komorę z lewej strony (L) z  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KL 2200 = rozdrabnianie przez komorę z lewej strony (L) z  $n = 2200 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KL 2600 = rozdrabnianie przez komorę z lewej strony (L) z  $n = 2600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; L + P 1800 = rozdrabnianie przez obie komory (L + P) z  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; L + P 2200 = rozdrabnianie przez obie komory (L + P) z  $n = 2200 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; L + P 2600 = rozdrabnianie przez obie komory (L + P) z  $n = 2600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Q3,  $x_{c\_min}$  jak na rys. 7

Fig. 14. Distributions of particle size of rice after grinding in a roller mill without partition and with partition, when  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; BP 1800 = grinding in roller unit without partition; KP 1800 = grinding in right chamber (P) with  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KP 2200 = grinding in right chamber (P) with  $n = 2200 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KP 2600 = grinding in right chamber (P) with  $n = 2600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KL 1800 = grinding in left chamber (L) with  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KL 2200 = grinding in left chamber (L) with  $n = 2200 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; KL 2600 = grinding in left chamber (L) with  $n = 2600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; L + P 1800 = grinding in both chambers (L + P) with  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; L + P 2200 = grinding in both chambers (L + P) with  $n = 2200 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; L + P 2600 = grinding in both chambers (L + P) with  $n = 2600 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; Q3,  $x_{c\_min}$  as in Fig. 7

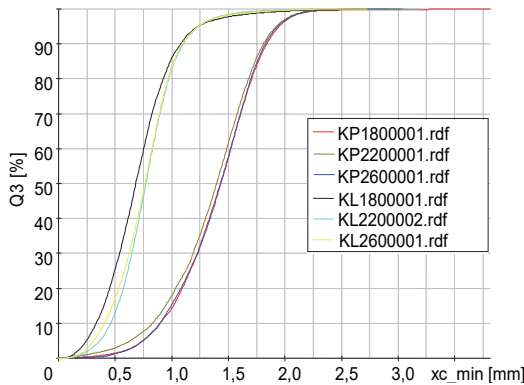


Rys. 15. Udział procentowy poszczególnych frakcji ryżu rozdrobnionego w walcowym zespole rozdrabniającym bez przegrody oraz z przegrodą, gdy  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; p3 jak na rys. 10; pozostałe objaśnienia, jak na rys. 14

Fig. 15. Percentage share of individual fractions of grinded rice in a rolling mill without partition and with partition, when  $n = 1800 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ ; p3 as in Fig. 10; other explanations as in Fig. 14

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

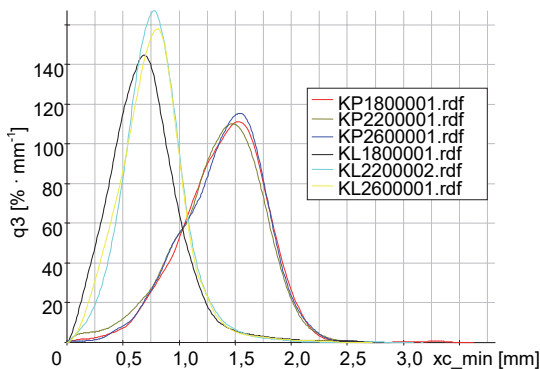
Największą zgodność wyników pomiarów z modelem wydajności jednostkowej ( $R^2 = 93,88\%$ ) uzyskano w przypadku funkcji potęgowej, opisującej związek z prędkością obrotową walców  $1800 \text{ obr.} \cdot \text{min}^{-1}$  (tab. 3). Z kolei największą zgodność wyników pomiarów z modelem jednostkowego zużycia energii ( $R^2 = 94,18\%$ ) uzyskano w przypadku funkcji potęgowej, opisującej związek z prędkością obrotową walców  $2600 \text{ obr.} \cdot \text{min}^{-1}$ . W ocenie zgodności wyników pomiarów z modelem 80-procentowego stopnia rozdrobnienia najlepsze dopasowanie ( $R^2 = 92,03\%$ ) uzyskano w przypadku funkcji potęgowej, opisującej związek z prędkością obrotową walców  $2200 \text{ obr.} \cdot \text{min}^{-1}$ .



Rys. 16. Dystrybuanty wymiarów produktu rozdrabniania ryżu w warunkach obracających się walców i stałej płyty w komorze lewej (L) oraz prawej (P); objaśnienia, jak na rys. 14

Fig. 16. Size distribution of the rice grinding product under the conditions of rotating rolls and solid plate in the left (L) and right chamber (P); explanations as in Fig. 14

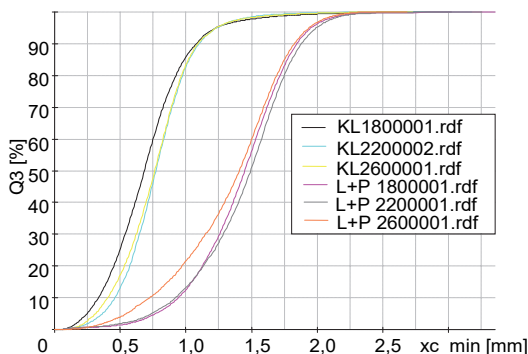
Źródło: wyniki własne. Source: own study.



Rys. 17. Rozkłady wymiarów produktu rozdrabniania ryżu w warunkach obracających się walców i stałej płyty w komorze lewej (L) oraz prawej (P);  $q_3$  = względna częstotliwość występowania cząstek o danym wymiarze  $[\% \cdot \text{mm}^{-1}]$ ; pozostałe objaśnienia, jak na rys. 14

Fig. 17. Distribution of rice grinding product dimensions under conditions of rotating rolls and solid plate in the left (L) and right chamber (P);  $q_3$  = relative frequency  $[\% \cdot \text{mm}^{-1}]$ , other explanations as in Fig. 14

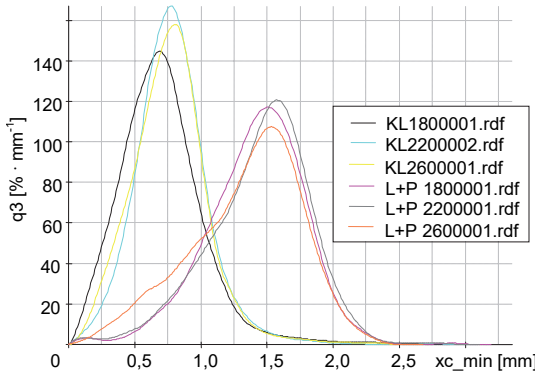
Źródło: wyniki własne. Source: own study.



Rys. 18. Dystrybuanty wymiarów produktu rozdrabniania ryżu w warunkach obracających się walców i stałej płyty w komorze lewej (L) i obu komorach (L + P); objaśnienia, jak na rys. 14

Fig. 18. Size distribution of the rice grinding product under the conditions of rotating rolls and solid plate in the left (L) and both chambers (L + P); explanations as in Fig. 14

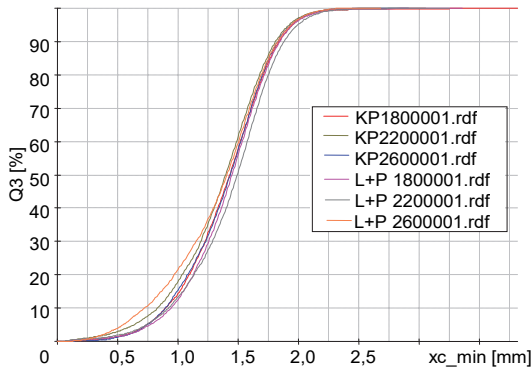
Źródło: wyniki własne. Source: own study.



Rys. 19. Rozkłady wymiarów produktu rozdrabniania ryżu w warunkach obracających się walców i stałej płyty w komorze lewej (L) i obu komorach (L + P); q3 jak na rys. 17, pozostałe objaśnienia, jak na rys. 14

Fig. 19. Distribution of rice grinding product dimensions under conditions of rotating rolls and solid plate in the left (L) and both chambers (L + P); q3 as in Fig. 17, other explanations as in Fig. 14

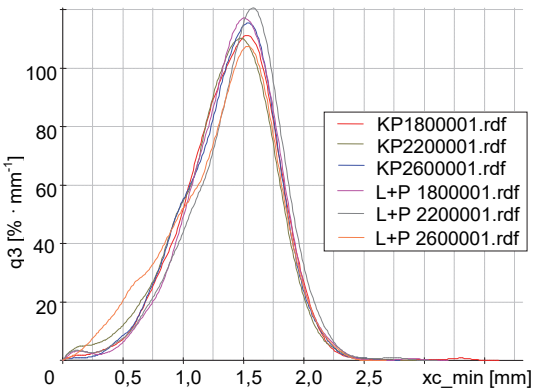
Źródło: wyniki własne. Source: own study.



Rys. 20. Dystrybuanty wymiarów produktu rozdrabniania ryżu w warunkach obracających się walców i stałej płyty w komorze prawej (P) i obu komorach (L + P); objaśnienia, jak na rys. 14

Fig. 20. Size distribution of the rice grinding product under the conditions of rotating rolls and solid plate in the right (P) and both chambers (L + P); explanations as in Fig. 14

Źródło: wyniki własne. Source: own study.



Rys. 21. Rozkłady wymiarów produktu rozdrabniania ryżu w warunkach obracających się walców i stałej płyty w komorze prawej (P) i obu komorach (L+P); q3 jak na rys. 17; pozostałe objaśnienia, jak na rys. 14

Fig. 21. Distribution of rice grinding product dimensions under conditions of rotating rolls and solid plate in the right (P) and both chambers (L + P); q3 as in Fig. 17; other explanations as in Fig. 14

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych można wnioskować, że postać konstrukcyjna zespołu analizowanego młyna walcowo-płytkowego, prędkość obwodowa punktów skrawających na obwodni walców oraz szczelina między walcami i płytą gładką (o małej chropowatości) mają istotny wpływ na wskaźniki oceny procesu rozdrabniania: wydajność, jednostkowe zużycie energii i zawartość frakcji drobnej w produktach rozdrabniania.

Tabela 3. Zależności funkcyjne wskaźników oceny z największą zgodnością z wynikami pomiarów

Table 3. Functional dependencies of the assessment indicators with the highest consistency with the measurement results

Parametr Parameter	Równanie Equation	Współczynnik determinacji $R^2$ Determination coefficient $R^2$
Wydajność jednostkowa (1800 obr. $\cdot$ min $^{-1}$ ) Unit productivity (1800 rpm $\cdot$ min $^{-1}$ )	$y = 0,0969x^{0,3692}$	0,9388
Jednostkowe zużycie energii (2600 obr. $\cdot$ min $^{-1}$ ) Unit energy consumption (2600 rpm $\cdot$ min $^{-1}$ )	$y = 4682,6x^{-0,359}$	0,9418
80% stopień rozdrobnienia (2200 obr. $\cdot$ min $^{-1}$ ) 80% fragmentation degree (2200 rpm $\cdot$ min $^{-1}$ )	$y = 16,103x^{-0,582}$	0,9203

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Cechy geometryczne zespołu walcowego ze stałą płytą pionową, szczególnie rozmiar szczeliny wpływają na wskaźniki oceny procesu rozdrabniania. Najmniejszą wydajność w przypadku każdej z prędkości obrotowych uzyskano, gdy wymiar szczeliny  $a = 0,25$  mm. W przypadku prędkości obrotowej  $n = 1800$  obr. $\cdot$ min $^{-1}$  największą wydajność zaobserwowano, gdy  $a = 0,75$  mm, prędkości obrotowej  $n = 2200$  obr. $\cdot$ min $^{-1}$  i  $n = 2600$  obr. $\cdot$ min $^{-1}$  największą wydajność uzyskano, gdy  $a = 0,5$  mm. Największe jednostkowe zużycie energii odnotowano dla  $a = 0,25$  mm w odniesieniu do każdej prędkości obrotowej rozdrabniania. Dla tego wymiaru szczeliny między walcem i stałą płytą stopień rozdrobnienia ryżu był największy w każdym przypadku prędkości obrotowej.

Zastosowanie w analizowanym młynie walcowym nowej postaci konstrukcyjnej zespołu roboczego złożonego z dwóch walców i płyty między nimi spowodowało zwiększenie wydajności mielenia od 13 do 32% oraz zmniejszenie zużycia jednostkowej energii do rozdrabniania od 18 do 36% w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem konstrukcyjnym zespołu dwuwalcowego – bez płyty.

Wyniki badań eksperymentalnych wykazały, że największą wydajność  $W = 0,595$  g $\cdot$ s $^{-1}$  uzyskano w przypadku rozdrabniania przez dwa walce obracające się z prędkością  $n = 2200$  obr. $\cdot$ min $^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty, a najmniejsze jednostkowe zużycie energii  $E_j = 611,700$  J $\cdot$ g $^{-1}$  wystąpiło w warunkach rozdrabniania przez dwa walce obracające się z prędkością  $n = 1800$  obr. $\cdot$ min $^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty.

Z przeprowadzonej analizy statystycznej wyników badań eksperymentalnych wynika, że dwa walce obracające się z prędkością  $n = 1800$  obr. $\cdot$ min $^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty zapewniają najmniejsze jednostkowe zużycie energii do rozdrabniania ( $E_j = 611,700$  J $\cdot$ g $^{-1}$ ), a dwa walce obracające się z prędkością  $n = 2200$  obr. $\cdot$ min $^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty zapewniają największą wydajność procesu ( $W = 0,595$  g $\cdot$ s $^{-1}$ ), gdy stopień rozdrobnienia zawiera się w przedziale  $1,257 < i_{80} < 1,310$ .

Zastosowanie nowej konstrukcji elementów roboczych walec – płyta powoduje zmianę składu granulometrycznego produktu mielenia z  $1,342 < i_{80} < 1,531$  w przypadku z rozwiązaniem dwuwalcowym na  $2,316 < i_{80} < 2,444$  w przypadku dwóch walców obracających się z prędkością ( $1800 < n = 2600$ ) obr. $\cdot$ min $^{-1}$  po obu stronach nieruchomej płyty.

## Bibliografia

ARMSTRONG J.E., LINGENFELSER L., MCKINNEY L. 2007. The effect of moisture content on determining corn hardness from grinding time, grinding energy, and near-infrared spectroscopy. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 23. No. 6 s. 793–799.

BOCHAT A., WESOŁOWSKI L., ZASTEMPOWSKI M. 2015. A comparative study of new and traditional designs of a hammer mill. *Transaction of the ASABE*. Vol. 58. No. 3 s. 585–596.

CHŁOPEK M., DZIK T., HRYNIEWICZ M. 2014. Determining the grip angle in a granulator with a flat matrix. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Vol. 16. No. 2 s. 337–340.

FLIZIKOWSKI J. 2002. Mechanical engineering of grain milling. *Acta Agrophysica*. No. 63 s. 25–37.

FLIZIKOWSKI J., BIELINSKI K. 2013. Technology and energy sources monitoring: Control, efficiency, and optimization. Hershey, PA, USA. IGI Global. ISBN 9781466626645 ss. 260.

FLIZIKOWSKI J., SADKIEWICZ J., TOMPOROWSKI A. 2015. Charakterystyki użytkowe sześciowalcowego mielenia uziarnionych surowców dla przemysłu chemicznego i spożywczego [Functional characteristics of a six-roller mill for grainy or particle materials used in chemical and food industries]. *Przemysł Chemiczny*. T. 94. Nr 1 s. 498–503.

FLIZIKOWSKI J., SZALA G., SADKIEWICZ J., KRUSZELNICKA W. 2016. Innovation and wheat corn mill process control. Part I: Theoretical basis knowledge. W: *Modeling of elements of machinery driving units*. Red. A. Idzikowski, P. Sokolski. Częstochowa. Wydaw. Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej s. 150–161.

HOFFMAN P.C., NGONYAMO-MAJEE D., SHAVER R.D. 2010. Technical note: Determination of can hardness in diverse corn gin diverse corn germplasm using near – infrared reflectance baseline shift as a measure of grinding resistance. *Journal of Dairy Science*. Vol. 93. Iss. 4 s. 1685–1689.

KOWALCZYK-JUŚKO A., KOŚCIK B., JÓŹWIAKOWSKI K., MARCZUK A., ZARAJCZYK J., KOWALCZUK J., SZMIGIELSKI M., SAGAN A. 2015. Efekty biochemicznej i termochemicznej konwersji biomasy sorga (*Sorghum bicolor* Moench.) na energię użytkową [Effects of biochemical and thermochemical conversion of sorghum biomass to usable energy]. *Przemysł Chemiczny*. T. 94. Nr 10 s. 1838–1840.

KOWALIK K., SYKUT B., MARCZAK H., OPIELAK M. 2013. A method of evaluating energy consumption of the cutting process based on the example of hard cheese. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Vol. 15. No. 3 s. 241–244.

KRUSZELNICKA W., MADEJ O. 2016. Analysis the size and shape of biomass particles after grinding with using digital image processing. *Herald of Khmelnytskyi National University*. No. 3 s. 107–114.

KRUSZELNICKA W., MADEJ O., TOMPOROWSKI A., PIASECKA I. 2016. Badanie wielowalcowego rozdrabniania minerałów [Survey of multi-roller grinding of minerals]. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*. Nr 4 s. 142–143.

MACKO M. 2013. Economic-energetic analysis of multi edge comminution of polymer recycles. *Przemysł Chemiczny*. T. 92. Nr 8 s. 1499–1502.

PATEL R., BARIA A., PATEL N.A. 2008. An overview of size reduction technologies in the field of pharmaceutical manufacturing. *Asian Journal of Pharmaceutics*. Vol. 2. No. 4 s. 216–220.

POPIEL P. 2011. Wpływ współspalania biomasy z pyłem węglowym na stratę niedopału [Influence of biomass-coal co-combustion on ignition losses]. *Prace Instytutu Elektrotechniki*. Z. 249 s. 69–80.



SARAMAK D. 2011. Uwarunkowania produkcji drobnych frakcji ziarnowych w procesach rozdrabniania w wysokociśnieniowych prasach walcowych [Determinant factors of fine particle fractions generation in high-pressure grinding rolls crushing processes]. *Górnictwo i Geoinżynieria*. R. 35. Z. 4 s. 143–151.

SARAMAK D., NAZIEMIEC Z. 2011. Efekty rozdrabniania w kruszarkach i prasach walcowych [Comminution effects in roller crushers and high-pressure grinding rolls]. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*. Vol. 132. Nr 39 s. 249–258.

TOMPOROWSKI A. 2011. Rozwój konstrukcji rozdrabniaczy biomateriałów. Cz. I: Model obiektu badań [Structure development of biological material shredders. Part I: Modeling]. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*. Nr 3 s. 75–76.

TOMPOROWSKI A. 2012. Strumień wydajności wielotarczowego rozdrabniania ziaren ryżu [Stream of efficiency of rice grains multi-disc grinding]. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Vol. 14. Nr 2 s. 150–153.

TOMPOROWSKI A., FLIZIKOWSKI J. 2013. Charakterystyki ruchowe wielotarczowego rozdrabniacza ziaren zbóż [Motion characteristics of a multi-disc grinder of biomass grain]. *Przemysł Chemiczny*. T. 92. Nr 4 s. 498–503.

TOMPOROWSKI A., OPIELAK M. 2012. Konstrukcyjne kształtowanie wydajności rozdrabniania wielootworowego [Structural features versus multi-hole grinding efficiency]. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Vol. 14. Nr 3 s. 222–227.

***Weronika Kruszelnicka, Adam Mroziński***

## **ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE ROLLER MILL WORKING ASSEMBLY DESIGN MODIFICATIONS ON SELECTED GRINDING PROCESS PARAMETERS**

### **Summary**

The paper analyzes the interrelationship: of motion, particle size of grinded rice grains, displacement, grinding in a roller-plate mill. The purpose of the work was to analyze and evaluate the technical conditions of the use of a roller mill with a new construction (nWk) of the roller working unit used in the chemical and food industry by means of useful granulometric product quality indicators. Investigated, what influence on efficiency indicators: the degree of fragmentation, energy consumption and efficiency has a modification of the work unit by inserting a vertical plate between the cooperating rollers. It has been shown that interrelation of motion, particle state and the values of grinding indicators depend, among others from friction conditions, collision, cutting, new mill construction features.

**Key words:** rice grinding, multi-roller mill, efficiency indicators, roller unit with vertical plate

#### Adres do korespondencji:

mgr inż. Weronika Kruszelnicka  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
al. S. Kaliskiego 7, 85–796 Bydgoszcz  
tel. 510 450 879; e-mail: weronika.kruszelnicka@gmail.com

