

Andrzej BOCHAT, Marcin ZASTEMPOWSKI

e-mail: bochat@utp.edu.pl

Zakład Maszyn Roboczych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Problematyka doboru cech i parametrów konstrukcyjnych rozdrabniacza bijakowego ze względu na jego charakterystyki użytkowe

Wprowadzenie

Rozdrabnianie ziaren zbóż jest jedną z głównych operacji technologicznych realizowanych w przemyśle rolno-spożywczym i w gospodarstwach rolniczych. Spośród wielu typów rozdrabniaczy, tj.: śrutowników tarczowych, śrutowników walcowych, gniotowników oraz rozdrabniaczy bijakowych najszerze zastosowanie, ze względu na efektywność rozdrabniania, znalazły rozdrabniacze bijakowe [Kapur i in., 1990; Dmیتrewski, 1992; Obidziński i Hejft, 2000; Opielak, 2000; Bochat i Wesółowski, 2009; 2010; Wesółowski i Bochat, 2010].

Istniejące obecnie rozwiązania konstrukcyjne rozdrabniaczy bijakowych charakteryzują się jednak dużą energochłonnością rozdrabniania, w rezultacie czego do ich napędu niezbędne jest stosowanie układów napędowych o dużych mocach [Magdalinović, 1989; Dmیتrewski, 1992; Sweco, 2005; Polnet, 2008; Testmer, 2008; Munson Machinery, 2010].

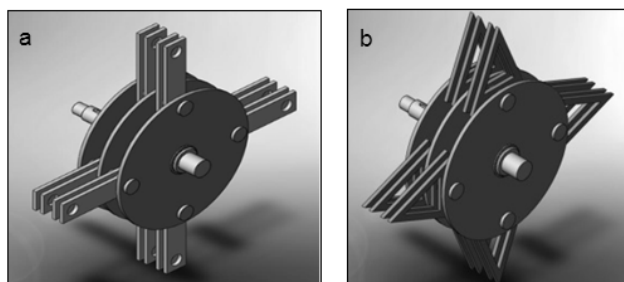
Dotychczas prowadzone badania miały nad rozdrabniaczami bijakowymi miały na celu minimalizowanie nakładów energetycznych na realizację procesu rozdrabniania, przy jednoczesnym zachowaniu dużej wydajności rozdrabniacza [Chwiej, 1986; Obidziński i Hejft, 2000; Opielak, 2000; Opielak i Komsta, 2000; Kościcki, 2001; Flizikowski, 2005; Bochat i Wesółowski, 2009; 2010; Wesółowski i Bochat, 2010; Maneklal Global Exports, 2010;]. Fundamentem do uzyskania innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy bijakowych jest udoskonalenie istniejących już konstrukcji lub opracowanie zupełnie nowej konstrukcji oraz poszukiwanie optymalnych parametrów ich pracy.

W związku z tym jako cel pracy przyjęto, przeprowadzenie badań doświadczalnych rozdrabniacza bijakowego, który został wyposażony w tradycyjną oraz nową konstrukcję wirnika z bijakami i sporządzenie jego charakterystyk użytkowych.

Istota tradycyjnej i nowej konstrukcji wirnika rozdrabniacza bijakowego

Zasadniczymi elementami typowego rozdrabniacza bijakowego są wirnik z wahliwie bądź sztywno zamocowanymi bijakami, sito rozdrabniacza, płyta lub płyty rozdrabniające oraz konstrukcja nośna z układem napędowym. Wadą i niedogodnością znanych, tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy bijakowych jest ich mała wydajność w stosunku do zużycia energii [Kapur i in., 1990; Bochat i Wesółowski, 2009]. Zdeterminowane jest to przede wszystkim konstrukcją wirnika, gdzie bijaki mają kształt płytek prostokątnych. W efekcie tego pod wpływem uderzeń bijaków, cząstki materiału zaczynają poruszać się po torach zbliżonych do okręgu. Tworzą one cienką warstwę wirującą po obwodzie wewnętrznym komory rozdrabniania, co powoduje, że pomimo wystarczającego nieraz stopnia rozdrobnienia materiał jeszcze dość długo krąży zanim przejdzie przez otwory w sitach. Na rys. 1a przedstawiono tradycyjny wirnik rozdrabniacza bijakowego w widoku izometrycznym.

Istota nowej konstrukcji polega na tym, że zespół roboczy rozdrabniacza stanowi wirnik tarczowy osadzony na wale do którego przymocowane są wahliwie bijaki. Bijaki mają kształt płytek w postaci wycinka kołowego o kącie rozwarcia co najmniej 35°, zaś otwór mocujący bijaka leży na osi symetrii wycinka kołowego w pobliżu jego podstawy łukowej. Taka konstrukcja wirnika rozdrabniacza bijakowego spowoduje, że cząstki rozdrabnianego materiału, uderzone przez bijaki, nie poruszają się po torze kołowym



Rys. 1. Widok izometryczny wirnika rozdrabniacza bijakowego: a - tradycyjne rozwiązanie konstrukcyjne wirnika ($\alpha = 0^\circ$) b - nowe rozwiązanie konstrukcyjne wirnika z bijakami w kształcie wycinka kołowego ($\alpha = 45^\circ$)

i nie tworzą pierścienia wirującego, lecz poruszają się w przybliżeniu promieniowo w stosunku do sit i natychmiast uderzają o nie. Powoduje to szybsze przechodzenie materiału przez otwory w sitach. Na rys. 1b przedstawiono nową konstrukcję wirnika rozdrabniacza bijakowego w widoku izometrycznym. Przedstawione nowe rozwiązanie konstrukcyjne wirnika rozdrabniacza bijakowego jest przedmiotem patentu [Bochat i Bogusz, 1998].

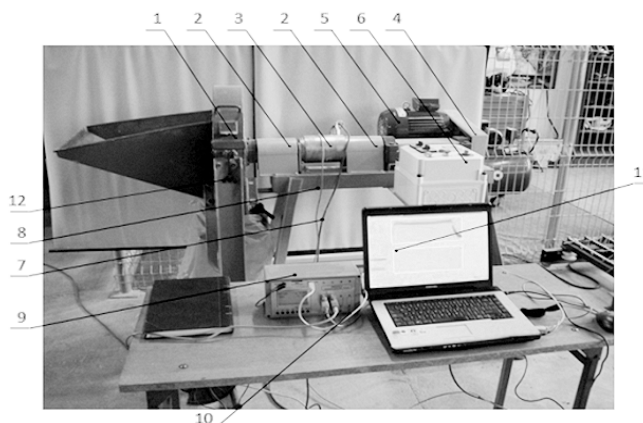
Badania doświadczalne

Materiały

Rozdrabniano ziarna pszenżyta (pszenżyto ozime *Krakowiak*) o wilgotności względnej 11,69%. Materiał ten został wybrany do badań ze względu na powszechność upraw oraz przeznaczenie na cele paszowe.

Stanowisko badawcze

Do realizacji badań zaprojektowano i zbudowano stanowisko, którego widok przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego [opracowanie własne]: 1 - zmodyfikowany rozdrabniacz bijakowy typu WIR RB-1.3, 2 - sprzęgło kłowe elastyczne *Poly-Norm*, 3 - momentomierz z obrotomierzem typu MIR 20, 4 - przekładnia pasowa, 5 - silnik elektryczny 7 kW, 380 V, 6 - skrzynka sterownicza wraz z przetwornikiem częstotliwości *Lenze SMD*, 7 - przewód transmisyjny momentu obrotowego, 8 - przewód transmisyjny prędkości obrotowej, 9 - miernik dwukanałowy MW2006-4, 10 - przewód transmisyjny typu USB, 11 - system komputerowy z programem do rejestracji danych PP203 oraz autorskim programem obliczeniowym RB01, 12- konstrukcja wsporcza

Obiektem badań doświadczalnych był zmodyfikowany rozdrabniacz bijakowy typu WIR RB-1.3, wyposażony podczas badań w tradycyjny zespół roboczy bądź nowe prototypowe konstrukcje wirnika.

Plan i program badań

Jako zmienne niezależne w eksperymencie przyjęto: kąt bijaków α [°], wartość szczeliny bijakowej s [mm], średnicę otworów w sitach d [mm] oraz prędkość obwodową końców bijaków v [m·s⁻¹].

Natomiast jako zmienne zależne określające efektywność procesu rozdrabniania przyjęto: wydajność rozdrabniacza W [kg·s⁻¹], jednostkowe zużycie energii E_j [kJ·kg⁻¹], udział poszczególnych frakcji w rozdrobnionym materiale X [%].

Jako czynniki stałe przyjęto wilgotność względną powietrza w [%], temperaturę powietrza t [°C]. Eksperyment został zrealizowany w stałych warunkach otoczenia, przy średniej temperaturze otoczenia 22,4°C i średniej wilgotności powietrza 45,6%.

Badania doświadczalne zaplanowano dla czterech rozwiązań konstrukcyjnych wirnika rozdrabniacza bijakowego, trzech wartości szczeliny bijakowej, dwóch wartości średnic otworów w sitach oraz pięciu wartości prędkości obwodowych końców bijaków. Wartości tych wielkości zostały przedstawione w tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie wartości zmiennych niezależnych

		Wartości zmiennych niezależnych				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Zmienne niezależne	α [°]	0	35	45	55	
	s [mm]	10	15	20		
	d [mm]	3	5			
	v [m·s ⁻¹]	38	45	52	59	66

Eksperyment zaplanowano według klasyfikacji krzyżowej czteroszybnikowej typu 4x(3x2x5), stosując 6 replikacji w próbie.

Metodyka

W celu realizacji badań eksperymentalnych w zakresie rozdrabniania pszenżyta stosowano następujące metody pomiaru:

Pomiar wilgotności i temperatury powietrza w laboratorium dokonywano za pomocą miernika HUMIPORT 10;

Pomiary wilgotności i temperatury próbek zbóż do rozdrabniania dokonywano za pomocą halogenowego analizatora wilgotności HR83;

Pomiar gęstości usypowej badanych ziaren zbóż dokonywano za pomocą gęstościomierza WGILAB-RDW-143;

Pomiar momentu obrotowego na wale wirnika oraz prędkości obrotowej wału dokonywano za pomocą momentomierza z obrotomierzem typu MIR 20, który został połączony miernikiem dwukanałowym MW2006-4;

Pomiar masy próbek ziarna przed i po rozdrobnieniu dokonywano za pomocą wagi platformowej Axis B15. W celu określenia udziału procentowego rozdrobnionych frakcji ziaren, pobrano próbki o masie 100 g dla każdej replikacji w analizowanym punkcie badawczym. Następnie wykonano analizę sitową przy użyciu wytrząsarki laboratoryjnej LPZE-0, zgodnie z normą [PN-R-64798: 1989]

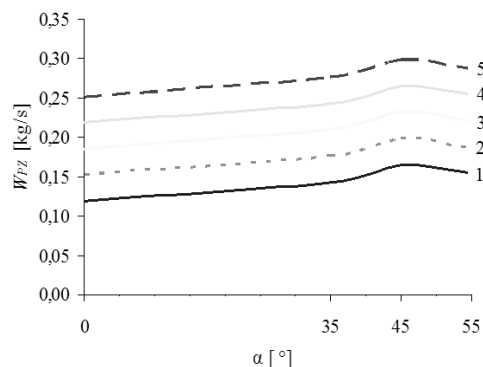
Wyniki i ich analiza

Wydajność rozdrabniacza bijakowego. W wyniku przeprowadzenia analizy regresji wielowymiarowej otrzymano następującą zależność uwzględniającą wpływ zmiennych niezależnych na wydajność rozdrabniacza bijakowego podczas rozdrabniania pszenżyta:

$$w_{pz} = -3,53 \cdot 10^{-1} - 6,21 \cdot 10^{-3} \alpha + 1,38 \cdot 10^{-2} s + 4,10 \cdot 10^{-2} d + 4,77 \cdot 10^{-3} v + 3,25 \cdot 10^{-4} \alpha^2 - 5,41 \cdot 10^{-4} s^2 - 3,64 \cdot 10^{-6} \alpha^3 \quad (1)$$

Wynika z niej, że wszystkie zmienne niezależne określone w programie badań wywierają istotny wpływ na wydajność rozdrabniacza podczas rozdrabniania pszenżyta. Analizę regresji przeprowadzono na poziomie istotności $\alpha_{gr} = 0,05$.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe charakterystyki wydajności rozdrabniacza podczas rozdrabniania pszenżyta dla czterech różnych wartości kątów bijaków α , prędkości obwodowych końców bijaków v oraz wybranej wartości szczeliny bijakowej s jak i dwóch wartości średnic otworów w sitach rozdrabniacza d . Z przedstawionych charakterystyk regresji wielowymiarowej wynika, że największą wydajnością rozdrabniania pszenżyta charakteryzują się bijaki w kształcie wycinka kołowego o kącie $\alpha = 45^\circ$, zaś najmniejszą wydajnością charakteryzują się bijaki prostokątne $\alpha = 0^\circ$.



Lp.	α [°]	v [m/s]	Lp.	α [°]	v [m/s]	Lp.	α [°]	v [m/s]	Lp.	α [°]	v [m/s]	s [mm]	d [mm]
1	0	38	2	0	45	3	0	52	4	0	59	15	5
	35	38		35	45		35	52		35	59		
	45	38		45	45		45	52		45	59		
	55	38		55	45		55	52		55	59		

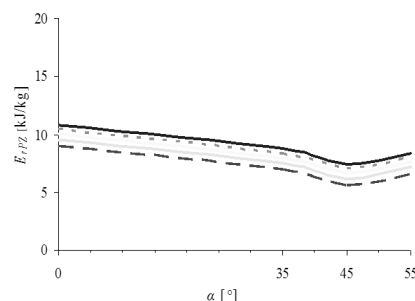
Rys. 3. Wpływ kąta bijaków na wydajność rozdrabniacza bijakowego podczas rozdrabniania pszenżyta dla wartości prędkości obwodowych końców bijaków v , szczeliny bijakowej $s = 15$ mm i średnicy otworów w sitach $d = 5$ mm

Jednostkowe zużycie energii na rozdrabnianie. W wyniku przeprowadzenia analizy regresji wielowymiarowej otrzymano następujący wzór, który uwzględnia wpływ zmiennych niezależnych na jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania pszenżyta:

$$E_{jPZ} = 3,21 \cdot 10^{-1} + 3,72 \cdot 10^{-1} \alpha - 3,66d - 2,06 \cdot 10^{-2} \alpha^2 + -9,26 \cdot 10^{-3} s^2 - 6,16 \cdot 10^{-4} v^2 + 2,38 \cdot 10^{-4} \alpha^3 \quad (2)$$

Ze wzoru (2) wynika, że wszystkie zmienne niezależne określone w programie badań wywierają istotny wpływ na jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania pszenżyta. Analizę regresji przeprowadzono na poziomie istotności $\alpha_{gr} = 0,05$.

Na rys. 4 pokazano przykładowe charakterystyki jednostkowe zużycia jednostkowej energii podczas rozdrabniania pszenżyta w zależności od przyjętych w planie badań kątów bijaków α jak i prędkości obwodowych końców bijaków v dla wybranych wartości szczeliny bijakowej s i średnicy otworów w sitach rozdrabniacza d .



Lp.	α [°]	v [m/s]	Lp.	α [°]	v [m/s]	Lp.	α [°]	v [m/s]	Lp.	α [°]	v [m/s]	s [mm]	d [mm]
1	0	38	2	0	45	3	0	52	4	0	59	15	5
	35	38		35	45		35	52		35	59		
	45	38		45	45		45	52		45	59		
	55	38		55	45		55	52		55	59		

Rys. 4. Wpływ kąta bijaków na jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania pszenżyta dla wartości prędkości obwodowych końców bijaków v , szczeliny bijakowej $s = 15$ mm i średnicy otworów w sitach $d = 5$ mm

Jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania pszenżyta ma charakter funkcji wielomianowej i osiąga najmniejszą wartość dla wirnika uzbrojonego w bijaki w kształcie wycinka kołowego $\alpha = 45^\circ$, natomiast największą wartość osiąga przy zastosowaniu wirnika z bijakami prostokątnymi $\alpha = 0^\circ$. Trend zmian opracowanej funkcji regresji wielowymiarowej jest podobny dla każdej wartości szczeliny bijakowej s jak i średnicy otworów w sitach d , natomiast różnice występują tylko w poszczególnych wartościach jednostkowego zużycia energii.

Udział procentowy rozdrobnionych frakcji. W wyniku przeprowadzenia analizy regresji wielowymiarowej otrzymano wzory uwzględniające wpływ zmiennych niezależnych na zawartości frakcji podczas rozdrabniania pszenżyta:

– dla frakcji pylistej:

$$X_{1PZ} = 2,45 \cdot 10^{-1} + 1,40 \cdot 10^{-2} \alpha + 1,37 \cdot 10^{-2} s - 4,64 \cdot 10^{-2} d^2 + -6,83 \cdot 10^{-4} \alpha^2 - 4,41 \cdot 10^{-4} s^2 + 3,66 \cdot 10^{-5} v^2 + 7,46 \cdot 10^{-6} \alpha^3 \quad (3)$$

– dla frakcji drobnej:

$$X_{2PZ} = 5,29 \cdot 10^{-1} + 1,33 \cdot 10^{-2} \alpha - 1,90 \cdot 10^{-2} s - 1,75 \cdot 10^{-2} d^2 + -6,93 \cdot 10^{-4} \alpha^2 + 7,72 \cdot 10^{-4} s^2 + 3,71 \cdot 10^{-5} v^2 + 7,80 \cdot 10^{-6} \alpha^3 \quad (4)$$

– dla frakcji grubej:

$$X_{3PZ} = 2,00 \cdot 10^{-1} + 2,74 \cdot 10^{-2} \alpha - 6,39 \cdot 10^{-2} d^2 + 1,38 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + -1,56 \cdot 10^{-4} s^2 - 7,37 \cdot 10^{-5} v^2 + 1,53 \cdot 10^{-5} \alpha^3 \quad (5)$$

Z opracowanych równań regresji wielowymiarowej (3) - (5) wynika, że wszystkie zmienne niezależne określone w programie badań wywierają istotny wpływ na udział poszczególnych frakcji podczas rozdrabniania pszenżyta. Analizę regresji przeprowadzono na poziomie istotności $\alpha_{gr} = 0,05$.

W tab. 2 zestawiono wartości zmiennych niezależnych, dla których wartości zmiennych zależnych były największe i najmniejsze. Wartości te zostały zebrane w oparciu o przedstawione w pracy równania regresji wielowymiarowej.

Tab. 2. Zestawienie wartości zmiennych zależnych i niezależnych

Zmienna zależna			Zmienne niezależne			
Symbol	Nazwa	Wartość	Kąt bijaków α [°]	Szerokość szczeliny bijakowej s [mm]	Średnica otworów w sitach d [mm]	Prędkość obwodowa końców bijaków v [m/s]
W_{PZ}	Wydatność rozdrabniacza	max	45	15	5	66
		min	0	20	3	38
E_{rPZ}	Jednostkowa energia rozdrabniania	min	45	20	5	66
		max	0	10	3	38
X_{1PZ}	Udział frakcji pylistej	min	45	10	5	38
		max	0	15	3	66
X_{2PZ}	Udział frakcji drobnej	max	0	20	3	66
		min	45	10	5	38
X_{3PZ}	Udział frakcji grubej	max	45	10	5	38
		min	0	20	3	66

Wnioski

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że istotny wpływ na wydajność rozdrabniacza oraz jednostkowe zużycie energii i zawartości frakcji w rozdrobnionych ziarnach zbóż pszenżyta wywiera:

- postać konstrukcyjna zespołu bijakowego,
- kąt bijaków,
- prędkość obwodowa końców bijaków,
- średnica otworów w sitach,
- szczelina bijakowa;

Zastosowanie w rozdrabniaczu bijakowym nowej konstrukcji wirnika, uzbrojonego w bijaki w kształcie wycinka kołowego, spowodowało zwiększenie wydajności rozdrabniacza od 11 do 32% oraz zmniejszenie zużycia jednostkowej energii na rozdrabnianie od 14 do 46% - w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem konstrukcyjnym wirnika;

Zastosowanie nowej konstrukcji wirnika rozdrabniacza bijakowego, uzbrojonego w bijaki w kształcie wycinka kołowego, skutkuje zmniejszeniem zawartości frakcji pylistej w rozdrobnionym zbożu, w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem konstrukcyjnym. Zastosowanie bijaków o kącie $\alpha = 45^\circ$ wpływa na:

- zmniejszenie zawartości frakcji pylistej od 7,26 do 7,75% ,
- zmniejszenie zawartości frakcji drobnej od 8,58 do 9,23%,
- zwiększenie zawartości frakcji grubej od 16,33 do 16,49%;

Przeprowadzona ocena efektywności rozdrabniania dowiodła, że w przypadku rozdrabniania pszenżyta, najbardziej efektywnym rozwiązaniem konstrukcyjnym zespołu bijakowego jest zastosowanie bijaków w kształcie wycinka kołowego $\alpha = 45^\circ$, szczeliny bijakowej o wartości $s = 10$ mm oraz sit o średnicy otworów $d = 5$ mm;

LITERATURA

- Bochat A., Bogusz M., (1998). *Zespół roboczy urządzenia do rozdrabniania materiałów ziarnistych*. Patent PL 173497
- Bochat A., Wesołowski L., (2009). Nowa konstrukcja zespołu roboczego rozdrabniacza bijakowego. *Inż. Ap. Chem.*, 48(2), 25-26
- Bochat A., Wesołowski L., (2010). Analiza rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy bijakowych w aspekcie efektywności ich funkcjonowania. *Inż. Ap. Chem.*, 49(5), 22-23
- Chwiej M., (1986). Opracowanie analityczne elementów roboczych rozdrabniarki bijakowej w aspekcie wydajności i zużycia energii. *Roczniki Nauk Roln. Seria C*, 76(3), 101
- Dmitrewski J., (1992). *Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych*. PWRiL, Warszawa
- Flizikowski J., (2005). *Konstrukcja rozdrabniaczy żywności*. Wyd. ATR, Bydgoszcz
- Kapur P. C., Schoenert K., Furstenau D. W., (1990). Energy-size relationship for breakage of single particles in rigidly mounted roll mill. *Int. J. Min. Proc.*, 29, 221-233. DOI: 10.1016/0301-7516(90)90055-4
- Kośmicki Z., (2001). O istocie badań empirycznych i symulacyjnych na etapie przygotowania produkcji maszyn rolniczych. *Inż. Roln.*, 13(33), 15-20
- Magdalinović N., (1989). A procedure for rapid determination of the Bond work index. *Int. J. Min. Proc.*, 27(1-2), 125-132. DOI: 10.1016/0301-7516(89)90010-0
- Maneklal Global Exports, (2010). *Hammer mill feed machinery*. Mumbai, India (05.2016) <http://www.maneklalexports.com/>
- Munson Machinery Co., Inc., (2010). *Hammer mills*. Utica, USA (05.2016) <http://www.munsonmachinery.com/products/size/HammerMill/index.asp>
- Obidziński S.: Hejft R., (2000). Wpływ prędkości układu roboczego rozdrabniacza na energochłonność procesu rozdrabniania. *Zesz. Nauk. Pol. Opolskiej*, 60, 185-193
- Opielak M., Komsta H., (2000). Kierunki badań procesu rozdrabniania sypkich materiałów rolno-spożywczych. *Zesz. Nauk. Pol. Opolskie*, 60, 209-217
- Opielak M., (2000). *Wybrane zagadnienia rozdrabniania materiałów w przemyśle rolno-spożywczym*. Wyd. Akad. Roln., Lublin
- PN-R-64798:1989. *Pasze - Oznaczanie rozdrobnienia*
- Polnet, (2008). *Rozdrabniacz bijakowy* (05.2016) <http://www.silosy.info/pl/mieszalnie-pasz/rozdrabniacz-bijakowy>
- Strom S., (1971). *Ring hammer*. Patent US 3580518
- Sweco, (2005). *SMW63 – Pin mill for fine products and coating* (05.2016) <http://techlib.sweco.com>
- Testmer, (2008). *Rozdrabniacze pionowe RB-P* (05.2016) <http://www.testmer.pl/urządzenia-przemyslu-paszowego/rozdrabniacze/>
- Vecoplan, (2008). *Shredders and grinders* (05.2016) <https://vecoplan.com/products/shredding/>
- Wesołowski L., Bochat A., (2010). Próba modelowania rozdrabniania materiałów ziarnistych za pomocą rozdrabniacza bijakowego. *Inż. Ap. Chem.*, 49(5), 127-129