

## ROZPAD PELLETOW W CZASIE KATARAKTOWANIA DLA RÓŻNYCH STOPNI WYPEŁNIENIA APARATU BĘBNOWEGO

Karolina Skoczowska<sup>1</sup>, Krystian Malek<sup>1</sup>, Roman Ulbrich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole  
e-mail: k.skoczowska@doktorant.po.edu.pl, krystian.malek@onet.eu, r.ulbrich@po.opole.pl

### STRESZCZENIE

Badania przeprowadzono w celu określenia rozpadu pelletów przy różnych stopniach wypełnienia obrotowego bębna – od 15% do 30%. Pomiary współczynnika rozpadu określono wg normy EN 15210–1:2009 (E) dla początku i końca kataraktowania. Analiza wyników badań wykazała wpływ stopnia wypełnienia bębna, rodzaj wypełnienia oraz stan zachowania się złoża na rozpad pelletów oraz prędkości obrotowe. Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna współczynnik rozpadu maleje, jednak nie przekroczył on dopuszczalnej w normie granicy 2,5%. Prędkości obrotowe odpowiadające początkowi i końcowi kataraktowania wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna malały.

**Słowa kluczowe:** aparat bębnowy, współczynnik rozpadu, pellety, kataraktowanie.

### PELLETS DISINTEGRATION FOR THE DURING CATARACTING FOR DIFFERENT FILL-IN-DEGREE IN ROTATING DRUM

#### ABSTRACT

The research were conducted to determine the pellets degradation for different fill-in-degree of the rotating drum – from 15% to 30%. Measurements of the degradation coefficient was determined for the start and finally of cataracting in accordance with EN 15210–1: 2009 (E). The analysis of results showed the impact of the fill-in-degree, pellets type and velocity of the drum on the pellets degradation. When fill-in-degree increase pellets degradation coefficient decreased, but it is not exceeded according to the norm 2.5%.

**Keywords:** rotating drum, degradation coefficient, pellets, cataracting.

### WPROWADZENIE

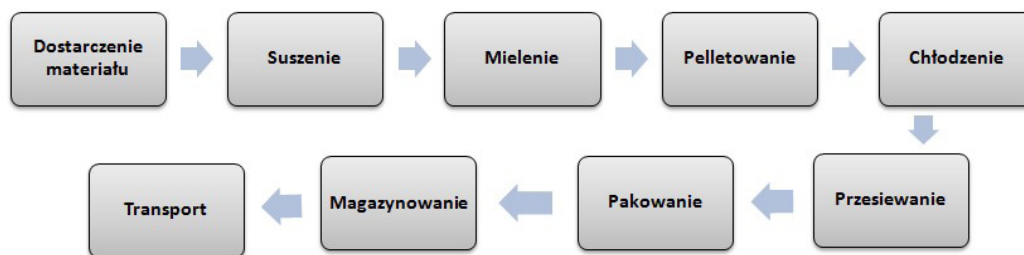
Celem wytworzenia pelletów jest nadanie materiałowi wsadowemu (np. trocinom, zrębki drewna) odpowiedniego kształtu oraz właściwości fizyko-chemicznych. Przykładowy ciąg technologiczny wytwarzania i obróbki pelletów został pokazany na rys. 1.

W zależności od przyjętej technologii wytwarzania pelletów w aparatach bębnowych mogą być one poddawane takim procesom jak: suszenie, chłodzenie oraz przesiewanie.

Suszenie jest jednym z najbardziej kosztownych procesów w produkcji pelletów. Całkowite zapotrzebowanie na energię w procesie usuwania wilgoci wynosi około 10–12% wartości opałowej produktu końcowego. Optymalizacja susze-

nia jest więc ważnym elementem w obniżeniu kosztów jak i minimalizacji wpływu produkcji pelletów na środowisko. Spalanie produktów pochodzenia drzewnego bez uprzedniego suszenia jest niekorzystne ze względu na obniżoną wartość opałową, a także niskie temperatury spalania i wysokie emisje węglowodorów (w porównaniu ze spalaniem suchych materiałów) [Pirraglia i in. 2010; Rya i in. 2006; Sai 2013; Stahl 2008].

Po procesie suszenia i granulacji pellety mogą osiągnąć temperaturę powyżej 150°C (najczęściej waha się ona w zakresie 60–90°C). Z tego względu pellety przed składowaniem należy poddać procesowi chłodzenia. Chłodzenie najczęściej odbywa się w aparatach bębnowych. Pellety w przeciwnym strumieniu powietrza poddawane są procesowi chłodzenia do momentu



Rys. 1. Przykładowy ciąg technologiczny w wytwarzaniu pelletów [Pirraglia i in. 2010]  
 Fig. 1. The example of a technology sequence in the production of pellets

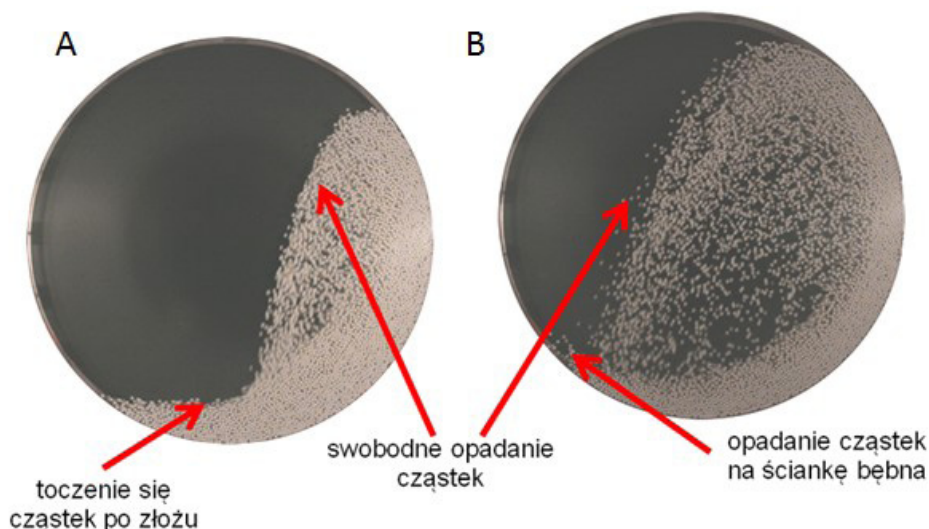
osiągnięcia przez cząstki kilku stopni powyżej temperatury otoczenia. Dodatkową zaletą procesu chłodzenia jest zwiększenie mechanicznej wytrzymałości pelletów [Stahl 2008].

Ostatnim etapem produkcji pelletów przed pakowaniem i dystrybucją jest jego przesiewanie w celu oddzielenia cząstek drobnych i zawrócenia ich do procesu granulacji. Duża zawartość cząstek drobnych w peliecie powoduje zwiększenie jego zdolności do absorpcji wilgoci oraz stworzenie warunków do rozwoju grzybów, odpowiedzialnych za wzrost temperatury oraz niebezpieczeństwo samozapłonu w składowanych przyzmacach. Zwiększenie zawartości cząstek drobnych w peliecie prowadzi również do zwiększenia emisji tlenków azotu podczas spalania, co prawdopodobnie wiąże się ze wzrostem temperatury spalania [Pirraglia i in. 2010; Rya i in. 2006; Stahl 2008].

W przemyśle często nie dostosowuje się stanów zachowania złoża do procesów w nich zachodzących. Przykładem jest m.in. suszenie pel-

letów w czasie kaskadowania – złoże tworzy tzw. nerkę, w której tworzy się nieruchomy rdzeń, wokół którego cyrkulują pozostałe cząstki (rys. 2A) [Arruda i in. 2009, Lisboa i in. 2007].

W celu optymalizacji procesów suszenia oraz chłodzenia w aparatach bębnowych należy prowadzić je w warunkach w których występuje największa powierzchnia kontaktu pomiędzy pelletami a przepływającym płynem. Kryterium to spełnia ruch cząstek podczas kataraktowania, kiedy to cząstki po oderwaniu się od złoża wykonują autonomiczny ruch w bębnie a następnie opadają na złoże (rys. 2B). Granicami kataraktowania złoża są prędkości charakterystyczne – początek kataraktowania oraz stan równowagi (koniec kataraktowania). Przekroczenie prędkości końca kataraktowania powoduje zwiększenie prędkości cząstek oraz siły z jaką opadają one na przeciwną ściankę aparatu, co prowadzi do niekorzystnego ze względu na otrzymywany produkt wzrostu rozdrobnienia pelletów [Arruda i in. 2009, Lisboa i in. 2007].



Rys. 2. Ruch złoża w aparacie bębnowym: A) początek kataraktowania, B) koniec kataraktowania  
 Fig. 2. The bed behavior on the rotating drum: A) star cataracting, B) finally cataracting

Prędkości obrotowe dla początku i końca kataraktowania można wyliczyć wg wzoru Oyama [Boss 1987, Oyama 1940]:

$$n = \frac{C}{D^{0,47} \varphi^{0,14}} \text{ [obr/min]} \quad (1)$$

gdzie:  $C$  – stała: dla początku kataraktowania  $C = 54$ , dla końca kataraktowania  $C = 72$ ;  
 $D$  – średnica bębna [m];  
 $\varphi$  – stopień wypełnienia bębna [%].

## METODYKA BADAŃ

Stanowisko badawcze (rys. 3) zbudowano z obrotowego bębna zasilanego silnikiem indukcyjnym, którego prędkości obrotowe regulowane są poprzez falownik. Prędkości obrotowe mierząno przy pomocy tachometru optycznego. Bęben wykonano z transparentnego materiału sztucznego o średnicy 700 mm i szerokości 30 mm. Obserwacje zachowania się złoża przeprowadzono przy pomocy szybkiej, monochromatycznej kamery CMOS.

Badania przeprowadzono dla początku i końca kataraktowania złoża dla trzech rodzajów pelletów przy czterech stopniach wypełnienia bębna: 15%, 20%, 25% i 30%. Zgodnie z normą EN 15210-1:2009 (E) czas pracy aparatu wynosił 300 s, po którym złoża było przesiewane na wytrząsarce o sicie w rozmiarze 2,3 mm. Materiał stanowiący wypełnienie bębna był ważony przed oraz po procesie początku/końca kataraktowania na wadze analitycznej z dokładnością do 0,01g.

Materiał badawczy stanowiły pellety o gęstości usypowej:

- EuroPellet 630 kg/m<sup>3</sup>,
- WoodPellet 705 kg/m<sup>3</sup>,
- Pellety wykonane ze ścinek meblowych 790 kg/m<sup>3</sup>.

Współczynnik rozpadu pelletów określono zgodnie z normą EN 15210-1:2009 (E):

$$R_u = \frac{m_c - m_{nz}}{m_c} \cdot 100 \quad (2)$$

gdzie:  $m_c$  – masa całkowita materiału poddanego procesowi rozdrabniania [g],  
 $m_{nz}$  – masa nadziarna, materiału pozostałego na sicie [g].

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

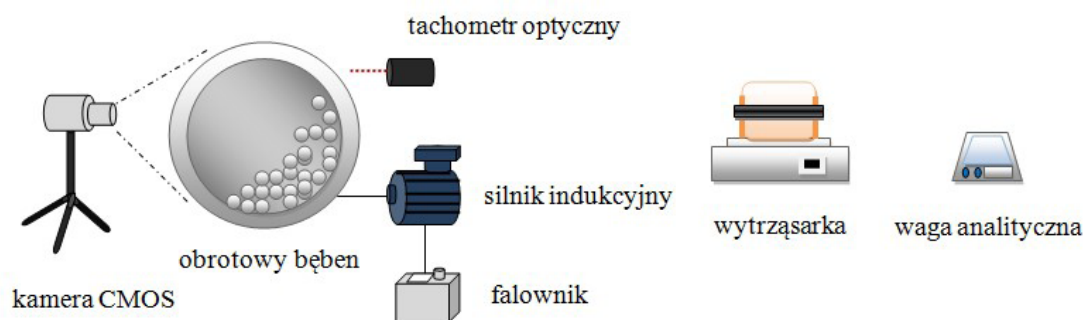
Analizie poddano wpływ stopnia wypełnienia bębna na zaobserwowane prędkości charakterystyczne dla początku i końca kataraktowania złoża, które zestawiono w tabeli 1 i 2 wraz z wynikami obliczeń dokonanych na podstawie wzoru (1).

Badania wykazały wpływ stopnia wypełnienia bębna na prędkości odpowiadające początkowi oraz końcowi kataraktowania. Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna prędkości obrotowe dla stanów charakterystycznych malały.

Analiza wykazała duże rozbieżności pomiędzy zaobserwowanymi prędkościami obrotowymi bębna, a obliczonymi ze wzoru (1). Różnice wahały się od 18,9 obr/min do 30,7 obr/min. Większe rozbieżności określono dla początku kataraktowania.

Zgodnie ze wzorem (2) wyznaczono współczynnik rozpadu pelletów (tabela 3). Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna współczynnik rozpadu malał.

Badania wykazały duży wpływ charakterystycznego stanu złoża na destrukcję pelletów. Dla końca kataraktowania współczynnik rozpadu był od 3 do 5 razy wyższy niż dla początku kataraktowania. Najwyższy współczynnik rozpadu wyznaczono dla EuroPelletu – 2,33%, przy 15% stopniu wypełnienia bębna, natomiast najniższy dla pelle-



Rys. 3. Stanowisko badawcze  
 Fig. 3. The test stand

**Tabela 1.** Prędkości obrotowe bębna odpowiadająca początkowi kataraktowania zaobserwowane oraz obliczone zgodnie ze wzorem (1)**Table 1.** The drum velocity was observed and calculated by equals (1) for start cataracting

Rodzaj pelletu	Stopień wypełnienia bębna			
	15%	20%	25%	30%
EuroPellet	14	13	12	10
WoodPellet	15	13	13	11
Ścinki meblowe	13	12	11	9
Obliczone wg wzoru (1)	43,7	42,0	40,7	39,7

**Tabela 2.** Prędkości obrotowe bębna odpowiadająca końcowi kataraktowania zaobserwowane oraz obliczone zgodnie ze wzorem (1)**Table 2.** The drum velocity was observed and calculated by equals (1) for finally cataracting

Rodzaj pelletu	Stopień wypełnienia bębna			
	15%	20%	25%	30%
EuroPellet	35	33	32	29
WoodPellet	36	34	33	30
Ścinki meblowe	39	36	35	34
Obliczone wg wzoru (1)	58,3	56,0	54,3	52,9

**Tabela 3.** Współczynnik rozpadu pelletów obliczony zgodnie ze wzorem (2)**Table 3.** The degradation coefficient calculated by equals (2)

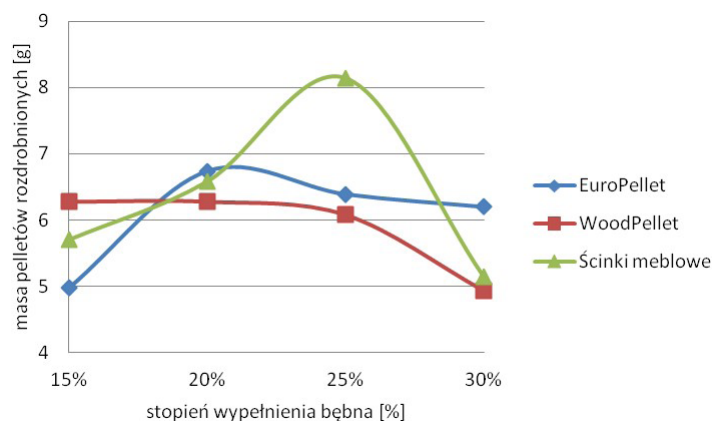
Rodzaj pelletu	Stan zachowania się złoża	Stopień wypełnienia bębna			
		15%	20%	25%	30%
EuroPellet	Początek kataraktowania	0,51	0,47	0,38	0,32
	Koniec kataraktowania	2,33	2,06	1,72	1,23
WoodPellet	Początek kataraktowania	0,59	0,42	0,34	0,23
	Koniec kataraktowania	1,86	1,88	1,73	1,23
Ścinki meblowe	Początek kataraktowania	0,44	0,36	0,39	0,20
	Koniec kataraktowania	1,35	1,10	1,10	0,66

tów wykonanych ze ścinek meblowych – 0,20%, przy 30% stopniu wypełnienia bębna.

Na podstawie wyników badań określono rozpad pelletów, który wyrażono w gramach (rys. 4 i 5). Można stwierdzić, iż dla końca kataraktowania ilość pelletów ulegających rozpadowi rośnie wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna do 25%, po czym maleje. Dla początkowego stanu kataraktowania wpływ stopnia wypełnienia bębna na masowy rozpad pelletów jest różny w zależności od rodzaju złoża. Różnice w rozpadzie pelletów pomiędzy początkiem, a końcem kataraktowania są znaczne – od 11,62 g do 25,28 g. Największy ubytek złoża zanotowano dla 25% stopnia wypełnienia WoodPelletem – 31,36 g, najniższy natomiast dla 15% wypełnienia bębna EuroPelletem – 4,93 g.

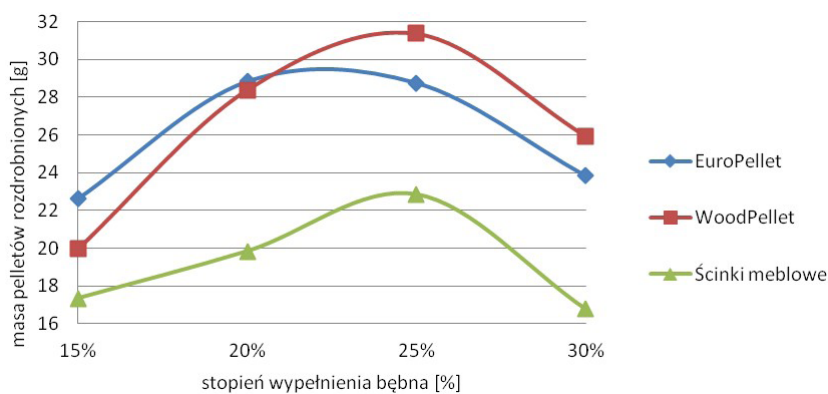
## WNIOSKI

1. Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna, prędkości obrotowe dla stanów charakterystycznych zmniejszają się.
2. Prędkości obrotowe zaobserwowane oraz obliczone ze wzoru Oyama dla początku i końca kataraktowania są rozbieżne – największa różnica wynosi 30,7 obr/min.
3. Współczynnik rozpadu pelletów malał wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bębna.
4. Stan zachowania się złoża ma istotny wpływ na współczynnik rozpadu pelletów – na końcu kataraktowania jest on od 3 do 5 razy większy niż na początku kataraktowania.



Rys. 4. Masa pelletów uległych rozpadowi dla początku kataraktowania

Fig. 4. The mass of pellets degradation for start cataracting



Rys. 5. Masa pelletów uległych rozpadowi dla końca kataraktowania

Fig. 5. The mass of pellets degradation for finally cataracting

5. Współczynnik rozpadu pelletów w żadnej z przeprowadzonych serii nie przekroczył dopuszczalnej przez normę EN 15210-1:2009 (E) granicy wynoszącej 2,5%.
6. Prędkości obrotowe dla m.in. procesu suszenia pelletów w aparatach bębnowych mogą oraz powinny odpowiadać procesowi kataraktowania złoża.
7. Należy kontynuować badania optymalizacji procesów zachodzących w aparatach bębnowych.

## LITERATURA

1. Arruda E.B., Lobato F.S., Assis A.J., Barrozo M.A.S. 2009. Modeling of Fertilizer Drying in Rotary-Aerated and Conventional Rotary Dryers. *Drying Technology*, 27, 1192–1198.
2. Boss J. 1987. Mieszanie materiałów ziarnistych, Kinetyka procesu mieszania materiałów ziarnistych. Aparaty i urządzenia do mieszania materiałów ziarnistych. PWN, Warszawa, Wrocław, 84–98, 133–144.
3. Lisboa M.H., Vitorino D.S., Delaiba W.B., Finzer J.R.D., Barrozo M.A.S. 2007. A study of particle motion in rotary dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24(3), 365–374.
4. Oyama Y. 1940. Studies on mixing of binary system of two size by ball mill motion. *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research*, No. 951, 17–29.
5. Pirraglia A., Gonzales R., Saloni D. 2010. Techno-economical analysis of wood pellets production for U.S. manufacturers. *Wood pellets feasibility. Bioresources* 5(4), 2374–2390.
6. Rya Ch., Bin Yang Y., Khor A., E Yates N., N Sharifi V., Swithenbank J. 2006. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments – fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel* 85, 1039–1046.
7. Sai P.S.T. 2013. Drying of solids in a rotary dryer. *Drying Technology* 31, 213–223.
8. Stahl M. 2008. Improving wood fuel pellets for household use – perspectives on quality, efficiency and environment. Dissertation. Karstad University Studies.