

**KAROLINA SKOCZKOWSKA, KRYSZTIAN MALEK,
ROMAN ULBRICH***

BADANIE PROCESU ROZDRABNIANIA PELLETÓW PODCZAS SUSZENIA W APARACIE BĘBNOWYM

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad stopniem rozdrobnienia pelletów w suszarkach bębnowych. Wyznaczono współczynnik wytrzymałości dla trzech rodzajów pelletów drzewnych. Wyniki uzyskane w aparacie bębnowym porównano z wynikami otrzymanymi zgodnie z normą EN 15210-1:2009 (E). Rozpad pelletów nie przekroczył 2,5% (dopuszczalnej granicy). Dodatkowo dla każdego materiału ustalono optymalne prędkości pracy suszarki bębnowej - początek i koniec kataraktowania.

Słowa kluczowe: suszenie, rozdrabnianie, pellety, suszarki bębnowe, kataraktowanie, prędkości charakterystyczne

WSTĘP

Zgodnie z wymogami Unii Europejskiej należy dążyć do zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii w technologiach energetycznych. Spalanie lub współspalanie biomasy pozytywnie wpływa na emisję związków szkodliwych m.in. dwutlenek węgla, a pozostały popiół może być z łatwością wykorzystany jako nawóz. Głównym surowcem biomasy energetycznej jest drewno, słoma i odpady drzewne. Ze względu na łatwość dostępu do ww. surowców rozwój energetyki opartej na biomase odnotowuje ciągły wzrost – od 5 do 9% rocznie. Pallety w dużym stopniu mogą zastąpić w Polsce węgiel, a co za tym idzie pomóc w ograniczeniu emisji tzw. gazów cieplarnianych [Rynkiewicz i Dobek 20013, Jakubiak i Kordylewski 2008, Bakhareva 2008].

Proces pelletyzacji przeprowadza się w celu uzyskania produktu o żądanym kształcie, aby ułatwić transport i załadunek biopaliwa. Dodatkowo zwiększa się gęstość i zmniejsza wilgotność, co ma pozytywny wpływ na wartość opałową. Technologia produkcji pelletów może być różna, jednak w każdej z nich bioma-

* Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Środowiska

sa zostaje poddana procesom takim, jak: dostarczenie surowca, rozdrabniania, granulacja, suszenie, przesiewanie oraz składowania [Stahl 2008, Pirraglia i in. 2010].

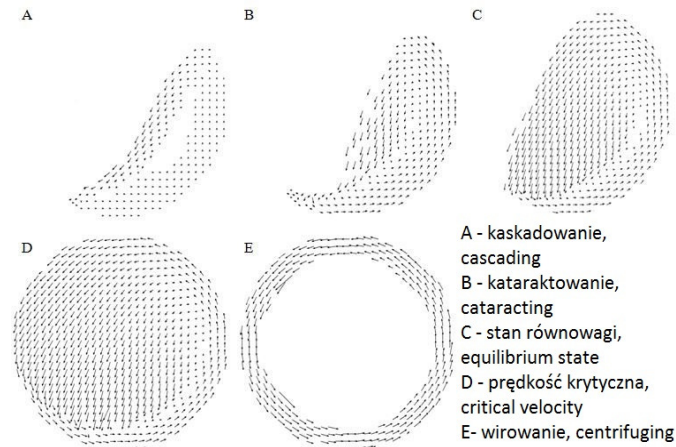
Suszenie jest procesem mającym na celu usunięcie z ciała wilgoci, poprzez dostarczenie energii cieplnej. W zależności od rodzaju jego dostarczenia można wyróżnić suszenie [Warych 1996, Sai 2013]:

- konwekcyjne – usunięcie wilgoci przez przepływający gorący czynnik np. spaliny, powietrze
- kontaktowe – przewodzenie, gdy materiał suszony jest w bezpośrednim kontakcie z czynnikiem grzewczym,
- radiacyjne – promieniowanie
- pole elektromagnetyczne lub akustyczne
- specjalne – inne metody suszenia, tj.: liofilizacja, ekstrakcyjne lub próżniowe.

Suszenie pelletów ma na celu zwiększenie wartości opałowej biopaliwa. Według normy EN 14961-2 i 4 wilgotność produktu końcowego nie powinna przekraczać 10%. Ze względu na duże zawilgocenie produktu dostarczanego do zakładu pelletyzującego – nawet 45%, proces usuwania wilgoci jest niezbędny. Zasada suszenia pelletów w aparatach bębnowych opiera się na konwekcji i przewodzeniu ciepła. Suszarki bębnowe ze względu na prostą budowę i sposób działania, obok suszarek taśmowych i komorowych są najczęściej stosowanymi aparatami do usuwania wilgoci z materiałów ziarnistych. Praca suszarek bębnowych polega na indukowaniu ruchu wypełnienia, który wynosi wsad na pewną wysokość, a następnie opada on w strumień przepływającego przeciwnie do, gorącego płynu (najczęściej spalin lub powietrza) [Sai 2003, Arruda i in. 2009].

Podczas pracy aparatów bębnowych, w zależności od prędkości obrotowych można wyznaczyć charakterystyczne stany zachowania się wsadu (kolejno od najniższych do najwyższych prędkości obrotowych bębna) [Ingram i in. 2005, Boss 1987]:

- kaskadowanie – wypełnienie tworzy tzw. nerkę, w której środek jest nieruchomy, natomiast cząstki na jej obwodzie cyrkulują (rys. 1A),
- kataraktowanie – cząstki wynoszone są na pewną wysokość, po czym wykonują autonomiczne opadanie na wsad bębna i toczą się po nim w dół (rys. 1B),
- stan równowagi – koniec kataraktowania, moment w którym cząstki zaczynają opadać poza złożę (rys. 1C),
- wirowanie pierwszych cząstek (prędkość krytyczna) – moment, w którym siły ciężkości i odśrodkowa są w równowadze (rys. 1D),
- wirowanie całego wsadu (rys. 1E).



Rys. 1. Stany charakterystyczne zachowania się wsadu podczas pracy suszarki bębnowej
 Fig. 1. The characteristics states of behaviour of the bed in rotary dryer

Charakterystyczne prędkości obrotowe można opisać wzorami [Oyama 1940, Nityanand 1986]:

$$n_{kr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

gdzie:

- n_{kr} – prędkość krytyczna, obr·min⁻¹,
- g – przyspieszenie ziemskie, m·s²,
- R – promień bębna, m,
- D – średnica bębna, m.

$$n_{ch} = \frac{C}{D^{0,47} \cdot \varphi^{0,14}} \quad (2)$$

gdzie:

- n_{ch} – założona prędkość obrotowa, obr·min⁻¹,
- C – stała, różna ze względu na prędkość charakterystyczną:
 - początek kataraktowania $C = 54$
 - koniec kataraktowania $C = 72$
 - wirowanie całego wsadu $C \geq 86$,
- D – średnica bębna, m,
- φ – stopień wypełnienia bębna, %.

Zachowanie się wypełnienia w aparatach bębnowych może być opisywane przy pomocy liczby Frouda, która określa stosunek promienia bębna oraz prędkości obrotowych do sił grawitacji:

$$Fr = \frac{R \cdot \omega^2}{g} \quad (3)$$

gdzie:

R – promień bębna, m,

ω – prędkość obrotowa bębna, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$,

g – przyspieszenie ziemskie, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

W literaturze określono zakres liczby Frouda dla poszczególnych ruchów złoża, przy wypełnieniu bębna powyżej 10 % (tabela 1). [Mellmann 2001].

Tab. 1. Zachowanie się złoża w zależności od liczby Frouda

Tab. 1. Behaviour of the bed depending on the Froude number

Zachowanie się złoża Behaviour of the bed	Liczba Frouda, Fr [-] Froude number, Fr [-]
Kaskadowanie (Cascading)	$10^{-3} < Fr < 10^{-1}$
Kataraktowanie (Catacting)	$0,1 < Fr < 1$
Wirowanie (Centrifuging)	$Fr \geq 1$

Ze względu na ruch wsadu najodpowiedniejsze dla pracy suszarki bębnowej jest kataraktowanie. Swobodnie opadające cząstki omywane są indywidualnie przez gorący gaz, a proces suszenia zachodzi z najwyższą intensywnością. Podczas kataraktowania siła uderzeniowa opadających pelletów na wsad jest największa. Rozdrabnianie pelletów w suszarkach bębnowych może być spowodowane omówioną siłą uderzeniową jak również ścieraniem się cząstek między sobą oraz ściankami bębna. Ze względu na procesy, tj.: składowanie, transport oraz aplikację pelletów rozdrobnienie jest efektem niepożądanym. Podczas rozpadu pelletów powstaje pył, który spowalnia proces suszenia cząstek. Dodatkowo może on powodować zapylenie instalacji transportujących cząstki do pieców. Według normy EN 14961-2 i 4 ilość frakcji drobnej po procesie wytworzenia pelletów nie może przekraczać 1%. W celu zmniejszenia ryzyka rozdrobnienia często proces suszenia prowadzi się dla kaskadowania wsadu, jednak wiąże się to z ryzykiem nieusunięcia wilgoci z nieruchomego rdzenia [Lisboa i in. 2007, Arruda i in. 2009, Jakś i in. 2013].

Zastosowanie listew zaburzających pozwala na zmniejszenie prędkości obrotowych suszarek bębnowych przy utrzymaniu odpowiedniego stopnia usuwania wilgoci. Listwa wynosi część wsadu (10-15%) na odpowiednią wysokość, a następnie cząstki wykonują ruch swobodnego opadania (podobny jak podczas kataraktowania). Dodatkowo takie rozwiązanie pozytywnie wpływa na wymie-

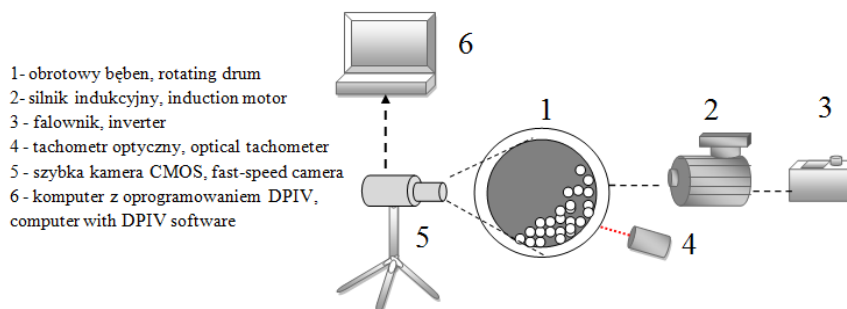
szanie się materiału wsadowego. W zależności od konstrukcji na obwodzie bębna może być utwierdzonych od jednego do kilkunastu elementów zaburzających [Lisboa i in. 2007, Arruda i in. 2009].

Celem badań jest określenie stopnia rozdrobnienia pelletów w czasie pracy suszarki bębnowej zaopatrzonej w listwę zaburzającą oraz określenie prędkości charakterystycznych dla stanów zachowania się wsadu.

METODOLOGIA BADAŃ

Badania przeprowadzono w obrotowym bębnie o średnicy 700 mm i szerokości 30 mm. W celu umożliwienia rejestracji zachowania się wypełnienia w czasie pracy aparat wykonano z transparentnego tworzywa sztucznego, a jego tylną część pokryto czarną emalią. Suszarka bębnowa wyposażona jest w silnik indukcyjny, którego prędkość jest płynnie regulowana przy użyciu falownika, a ilość obrotów mierzona jest poprzez tachometr optyczny (rys. 2). Ruch pelletów w czasie obrotów bębna rejestrowano poprzez szybkoklatkową, monochromatyczną kamerę cyfrową połączoną z komputerem z odpowiednim oprogramowaniem. Do określenia wektorów prędkości oraz trajektorii ruchu poszczególnych pelletów użyto programu DPIV (z ang. Digital Particle Image Velocimetry).

Prędkości charakterystyczne dla zachowania się wypełnienia zostały wyznaczone na podstawie danych otrzymanych z programu do cyfrowej anemometrii obrazów wektorów prędkości.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

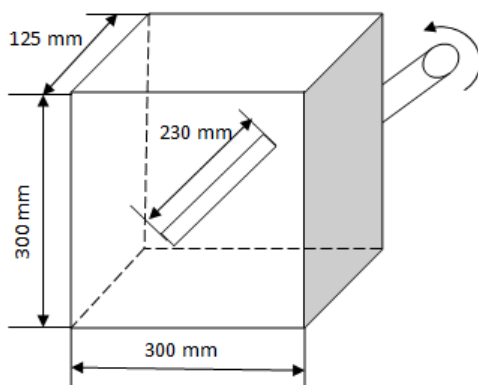
Fig. 2. The scheme of test stand

Wyznaczenie współczynnika wytrzymałości wypełnienia oparto o normę EN 15210-2:2010 (E) – Badanie wytrzymałości brykietu. W tym celu zastosowano listwę zaburzającą o wysokości 200 mm (rys. 3), która powodowała wyniesienie cząstek na odpowiednią wysokość.



Rys. 3. Widok budowy bębna
Fig. 3. The view of drum

Wyniki badań porównano z wcześniejszymi – uzyskanymi przez Badę i Dytkowską w ramach pracy inżynierskiej, zakończonej w roku 2014 – dla użytych w badaniach pelletów. Badania te wykonane były na przyrządzie do określania wytrzymałości pelletów, zgodnie z zaleceniami normy europejskiej EN 15210-2:2010 (E). Aparat ukazano na rys. 4. Określenie zbieżności wyników badań otrzymanych na znormalizowanym testerze oraz aparacie bębnowym ma na celu wskazanie możliwości zastosowania obrotowego bębna w celach badawczych wytrzymałości mechanicznej pelletów.



Rys. 4. Schemat testera do określania wytrzymałości mechanicznej pelletów
Fig. 4. The scheme of tester of the mechanical durability for pellets

Badania przeprowadzono dla trzech rodzajów pelletów o jednakowej średnicy równej 6 mm, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 2. Zgodnie z normą wypełnienie stanowił materiał o wadze 2 kg. Każdorazowo próba ba-

dana była przez 300 s przy prędkości 21 obr·min⁻¹. Następnie przesiewano materiał na wytrząsarce o rozmiarze sita 2,3 mm oraz nadziarno ważono na wadze analitycznej. Współczynnik wytrzymałości pelletów obliczono zgodnie z równaniem 4, rozpad wypełnienia zgodnie z równaniem 5. Zgodnie z normą EN 15210-2:2010 (E) jego wartość nie powinna przekraczać 2,5%.

$$D_u = \frac{m_{nz}}{m_c} \cdot 100 \quad (4)$$

gdzie:

D_u – współczynnik wytrzymałości mechanicznej pelletów, %,

m_c – masa całkowita materiału poddanego procesowi rozdrabniania, g,

m_{nz} – masa nadziarna - materiału pozostałego na sicie, g.

$$R_u = \frac{m_c - m_{nz}}{m_c} \cdot 100 \quad (5)$$

gdzie:




R_u – współczynnik rozpadu pelletów, %,

m_c – masa całkowita materiału poddanego procesowi rozdrabniania, g,

m_{nz} – masa nadziarna - materiału pozostałego na sicie, g.

Tab. 2. Charakterystyka pelletów użytych w badaniach

Tab. 2. Statement of the pellets used

Pellet	Producent Producer	Widok rzeczywisty Real view	Gęstość nasypowa Bulk density [kg·m ⁻³]	Długość pelletów Length of pellets [mm]	
				min	max
A	Euro Pellet		630	7	37
B	Pellet wykonany z resztek mebli Remains of furniture pellets		790	5	22
C	Wood Pellet		705	6	32

WYNIKI BADAŃ

Badania pozwoliły na wyznaczenie prędkości obrotowych, podczas których rozpoczynał się lub kończył charakterystyczny ruch wypełnienia (tabela 3). Stany charakterystyczne dla pelletu A zaobserwowano przy niższych prędkościach obrotowych niż dla pelletów B i C, co może być spowodowane jego mniejszą gęstością nasypową. Dla pelletów B i C prędkości obrotowe odpowiadające stanom charakterystycznym były zbliżone.

Tab. 3. Prędkości dla charakterystycznych stanów zachowania się pelletów w czasie pracy aparatu bębnowego w obr·min⁻¹

Tab. 3. Velocity for the characteristic states of the behaviour of bed in rotary drum in rpm

Pellet	A	B	C
Początek kaskadowania Start cascading	10	8	8
Początek kataraktowania Start cataracting	24	24	24
Koniec kataraktowania Finally cataracting	38	40	42
Prędkość krytyczna Critical velocity	48	48	48
Wirowanie Centrifuging	68	74	70

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych otrzymane dla obrotowego bębna, zestawione z wynikami otrzymanymi z badań wykonanych na testerze wytrzymałości mechanicznej [Badera i Dytkowska 2014]. Dla wszystkich prób oraz rodzajów pelletów średni rozpad pelletów mieścił się w dopuszczalnej granicy – 2,5%.

Analiza wyników badań wykazała spadek współczynnika rozpadu pelletów w obrotowym bębnie o 22, 24 i 50% odpowiednio dla pelletów A, B i C w stosunku do badań wykonanych w testerze do określania wytrzymałości mechanicznej pelletów. Aparaty bębnowe ze względu na niewielki rozpad pelletów mogą być z powodzeniem stosowane jako suszarki. Możliwe jest również zastosowanie aparatów bębnowych jako urządzenia do wyznaczania współczynnika wytrzymałości mechanicznej nie tylko do brykietu ale również pelletów drzewnych, przy czym należy zmniejszyć wartość dopuszczalną dla frakcji, która uległa rozpadowi.

Tab. 4. Porównanie wyników badań wykonanych wytrzymałości mechanicznej aparatem bębnowym oraz wykonanych na testerze pelletów wg [Badera, Dytkowska 2014].

Tab. 4. The comparison of results of own research in rotary drum and for the tester of the mechanical durability pellets consist in [Badera, Dytkowska 2014].

Pellet	Aparat bębnowy Rotary drum					Tester wytrzymałości Mechanical durability tester	
	próba1 trial 1	próba2 trial 2	próba3 trial 3	D _u	R _u	D _u	R _u
Pellet A	98,93	98,94	98,88	98,92	1,08	98,70	1,38
Pellet B	99,01	98,97	99,09	99,02	0,98	98,62	1,29
Pellet C	98,82	98,85	98,72	98,79	1,21	97,58	2,42

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

- Badania potwierdzają możliwość zastosowania aparatu bębnowego zaopatrzonego w pojedynczą listwę do wyznaczania wytrzymałości mechanicznej pelletów.
- Rozpad pelletów mieścił się w dopuszczalnej granicy wg normy EN 15210-1:2009 (E).
- Optymalnymi prędkościami pracy suszarek bębnowych są prędkości od początku do końca kataraktowania.

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego – inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego II, w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007-2013 na rok akademicki 2014/2015

LITERATURA

1. ARRUDA E.B., LOBATO F. S., ASSIS A.J., AND BARROZO M.A.S.; 2009. Modeling of Fertilizer Drying in Roto-Aerated and Conventional Rotary Dryers. Drying Technology, Nr 27, 1192-1198.
2. BAKHAREVA A.; 2008. Ciepło z biomasy w praktyce. Czysta Energia, Nr 10, 26.
3. BOSS J.; 1987. Mieszanie materiałów ziarnistych. Aparaty i urządzenia do mieszania materiałów ziarnistych, Roz. 9, 133-166.

4. INGRAM A., SEVILLE J.P.K., PARKER D.J., FAN X. , FORSTER R.G.; 2005. Axial and radial dispersion in rolling mode rotating drums. *Powder Technology*, 158, 76-91.
5. JAKŚ J., PIOTRKOWSKI A., PIOTRKOWSKI P.; 2013. Wybrane aspekty eksploatacji instalacji do wytwarzania peletu. Materiały pokonferencyjne: VI Konferencja Eko-Euro-Energia 2013, Inżynieria-Odnawialnych Źródeł Energii, pod red. Adama Mrozińskiego, Bydgoszcz, 38-53.
6. JAKUBIAK M., KORDYLEWSKI W.; 2008. Pelety podstawowym biopaliwem dla energetyki. *Archiwum Spalania*, Vol. 8, Nr 3-4, 108-118.
7. 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*, vol. 24, no. 03, 365-374.
8. MELLMANN J.; 2001. The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behaviour. *Powder Technology*, 118, 251-270.
9. NITYANAND N., MANLEY B., HENEIN H.; 1986. An analysis of radial segregation for different sized spherical solids in rotary cylinders. *Metallurgical transactions B*, vol. 17B, 247-257.
10. OYAMA Y.; 1940. Studies on Mixing of Binary System of Two Size by Ball Mill Motion. *Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research* 951, 17-29 [Boss 1987].
11. PIRRAGLIA A., GONZALEZ R., SALONI D.; 2010. Techno-economical analysis of wood pellets production for U.S. manufacturers. *BioResources*, Nr 5(4), 2374-2390.
12. RYNKIEWICZ M., DOBEK T.K.; 2013. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne peletów w zależności od składu i temperatury ich przechowywania. *Inżynieria Rolnicza*, Z. 3, Nr 146, T2, 321-220.
13. SAI P.S.T.; 2013. Drying of Solids in a Rotary Dryer. *Drying Technology*, 31, 213-223.
14. STAHL M.; 2008. Improving Wood Fuel Pellets for Household Use. *Perspectives on Quality, Efficiency and Environment*, Karlstad University Studies, 49.
15. WARYCH J.; 1996. Aparatura chemiczna i procesowa. *Suszarki*, Roz. 21. Wyd. Politechnika Warszawska, s. 304-326.

RESEARCH OF THE PELLETS GRINDING IN THE ROTARY DRYER

S u m m a r y

The article consist information about pellets shredding in rotary dryer. The aim of this research was determine of the mechanical durability for three different woods pellets. The experimental results for the rotary drums were compared with results were carried out with EN 15210-1:2009 (E) norm. In article was determined ranging of characteristic velocity for the rotary dryer. The disintegration of the pellets is less than 2.5% (permissible limit). In addition, for each material the optimal velocity - start and finally of cataracting, was determined.

Key words: drying, screening, pellets, rotary dryer, cataracting, characteristic velocity