

## PORÓWNANIE WPŁYWU DWÓCH RODZAJÓW LISTEW ZABURZAJĄCYCH NA RUCH ZŁOŻA W SUSZARKACH BĘBNOWYCH

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

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

### STRESZCZENIE

Badania przeprowadzono w celu określenia wpływu zastosowania przegród zaburzających na proces suszenia osadów ściekowych. Badania przeprowadzono dla trzech przegród ułożonych osiowo, jednej przegrody umieszczonej centralnie oraz w aparacie bez przegród. Zastosowanie trzech przegród powoduje rozluźnienie złoża przy niższych prędkościach obrotowych, co wpływa na skrócenie czasu suszenia. Zastosowanie jednej przegrody nie wpłynęło na zwiększenie powierzchni kontaktu pomiędzy cząstkami, a omywającym je gazem. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z obliczonymi na podstawie wzorów dostępnych w literaturze na charakterystyczne prędkości obrotowe. Największe różnice odnotowano dla wirowania całego wypełnienia – 24,2 obr/min, najmniejsze natomiast dla prędkości krytycznej – 1,4 obr/min.

**Słowa kluczowe:** aparat bębnowy, listwy zaburzające, suszarki bębnowe.

### THE INFLUENCE OF TWO TYPES OF DISTURBING ELEMENTS ON THE BEHAVIOUR OF THE BED IN DRUM DRYERS

#### ABSTRACT

The aim of the study was to determine the effects of disrupting strips on the sewage sludge drying process. The research was carried out for four cases: without strips, with three strips on the circumference of the drum and one central strip arranged horizontally and vertically. Due to the loosening of the bed at low velocity, using three strips situated on the circumference of the drum is preferred, as it reduces the drying time. Using one strip in the central part of the drum is not effective – there is no increased degree of bed relaxation. The experimental and calculated results from the models available in the literature for characteristic rotational velocity were compared. The greatest differences were observed for centrifuging – 24.2 rpm – whereas the smallest ones were noted for the critical velocity – 1.4 rpm.

**Keywords:** rotating drum, disturbing elements, drum dryers.

### WPROWADZENIE

Osady ściekowe są głównym odpadem powstającym podczas oczyszczania ścieków. Od 1 stycznia 2016 roku w Polsce zakazano składowania osadów ściekowych, w związku z czym konieczne jest ich przetworzenie i wykorzystanie. Ze względu na to iż stanowi on źródło energii często wykorzystywane jako paliwo alternatywne, a jego wartość opałowa jest zbliżona do węgla brunatnego [Szruba 2015, Środa i in. 2012].

Ze względu na ciągły wzrost wytwarzania osadów ściekowych w oczyszczalni ścieków zagospodarowanie ich jest w fazie rozwoju. Opty-

malizacja metod termicznego przetwarzania osadów powinna opierać się na poprawie efektywności już istniejących instalacji, a dopiero w dalszej kolejności rozbudowa suszarni i spalarni osadów ściekowych [Szruba 2015, Środa i in. 2012].

Zmniejszenie zawartości wody w osadzie ściekowym powoduje zwiększenie jego wartości opałowej, dlatego ważne jest aby poddać je procesowi osuszania. W nowoczesnych suszarniach uzyskuje się materiał w postaci granulek o wymiarach 1 – 4 mm, oraz o zawartości suchej masy w granicach 90–95%. Energochłonność procesu suszenia jest zależna od wstępnego odwodnienia osadu. Ze względu na wysoką wartość

ciepła parowania wody oraz sprawność suszarni (większości przypadków nieprzekraczającą 65%) minimalne zapotrzebowanie na ciepło podczas suszenia wynosi 3775 kJ/kg [Środa i in. 2012].

Na szybkość oraz efekt suszenia mają wpływ:

- różnica temperatur między powierzchnią cząstek osadu a ich środowiskiem,
- prędkość medium grzewczego,
- różnica wilgotności pomiędzy powierzchnią cząstek a wilgotnością medium grzewczego,
- powierzchnia kontaktu suszonego osadu z medium grzewczym [Heidrich, Witkowski 2010, Środa i in. 2012].

W procesie przetwarzania osadów ściekowych istotnym jest ich granulacja, polegająca na zmianie stanu skupienia cząstek półpłynnych na materiał stały do bezpiecznego transportu i realizacji operacji technologicznych. W trakcie granulacji osady poddaje się higienizacji np. poprzez:

- pasteryzację – podgrzanie osadu i utrzymanie jego temperatury przez pewien czas na określonym poziomie,
- wapnowanie – poprzez dodanie wapna do osadu,
- higienizację radiacją – zastosowanie wiązek przyspieszonych elektronów oraz promieniowania gamma [Szymków, Świtecka 2013].

Zarówno suszenie jak i granulacja może być prowadzona równocześnie w jednym urządzeniu – aparacie bębnowym. Ruch złoża w aparacie bębnowym wywołany jest obrotami bębna napędzanego najczęściej za pomocą silnika elektrycznego. Ruch złoża jest zależny od parametrów prowadzenia procesu, a także od właściwości materiału wsadowego. Rysunek 1 przedstawia przepływ warstwy złoża w zależności od prędkości obrotowej. Przy niskiej prędkości bębna cząstki toczą się po złożu (rys. 1a). Zwiększając prędkość obrotową tworzy się tzw. nerka – rozpoczyna się ruch kaskadowy, gdzie zewnętrzna część złoża cyrkuluje wokół nieruchomego rdzenia (rys. 1b). Moment w którym cząstki odrywają się od złoża i wykonują autonomiczny ruch opadając

na złożo nazywany jest początkiem kataraktowania (rys. 1c). Kiedy cząstki zaczynają opadać na przeciwległą ściankę bębna następuje zatrzymanie procesów zachodzących w złożu, a cząstki jedynie cyrkulują w bębnie (rys. 1d). Prędkość krytyczna określa stan w którym siła grawitacji oraz odśrodkowa są w równowadze, a cząstki osiągają najwyższy punkt w bębnie (rys. 1e). Kiedy siła odśrodkowa jest większa od siły grawitacji złożo wiruje wraz z bębniem (rys. 1f) [Ingram i in. 2005, Boss 1987].

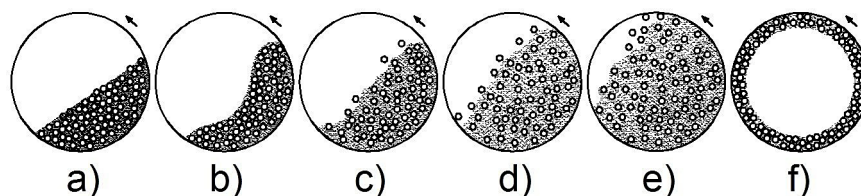
## METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (rys. 2) którego głównym elementem jest obrotowy bęben o średnicy 700mm i szerokości 30 mm. Bęben napędzany jest silnikiem elektrycznym, a jego prędkość obrotowa jest płynnie regulowana przy użyciu falownika. Przednią ścianę aparatu wykonano z przezroczystego pleksiglasu, co umożliwiło rejestrację procesów wewnątrz bębna. Rejestracji obrazów dokonano przy użyciu szybkiej kamery CMOS HCC-1000 (1024) połączonej ze stanowiskiem komputerowym. W celu poprawy jakości rejestrowanych obrazów bęben oświetlono reflektorami a jego tylną ścianę pokryto czarną emalią.

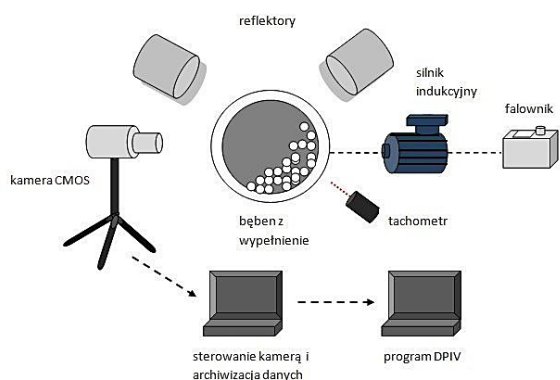
W badaniach wykorzystano dwa rodzaje listew zaburzających:

- 3 listwy o długości 100 mm, umieszczone osiowo na obwodzie bębna,
- jedna listwa o długości 200 mm w środku bębna.

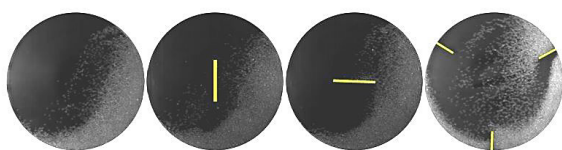
Celem badań było porównanie stopnia rozluźnienia oraz zwarcia złoża w aparacie bębnowym w zależności od rodzaju zastosowanych listew zaburzających. Analizę przeprowadzono dla czterech przypadków pokazanych na rysunku 3. Określenie rozluźnienia złoża dokonano więc dla pionowej i poziomej pozycji listwy zaburzającej przy zastosowaniu jednej centralnej listwy. Dla bębna zaopatrzonego w trzy listwy analizy dokonano kiedy jedna z nich znajdowała się w pozycji pion-



**Rys. 1.** Ruch złoża w aparacie bębnowym w zależności od prędkości obrotowej  
**Fig. 1.** Movement of the bed in the drum depending on the rotational velocity



Rys. 2. Stanowisko badawcze  
Fig. 2. The test stand

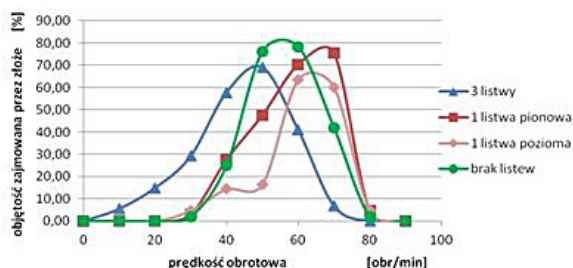


Rys. 3. Rodzaje listwy zaburzających  
Fig. 3. Types of disturbing elements

wej w dolnej części bębna, a pozostałe w pozycji 120 i 240°. Wyniki badań bębna z listwami porównano z badaniami bez listwy zaburzających.

Badany materiał stanowiły kulki szklane o średnicy 8mm i gęstości nasypowej 1480 kg/m<sup>3</sup>. Stopień wypełnienia bębna ustalono na poziomie 25% objętości bębna. Badania przeprowadzono dla prędkości od 0 do 100 obr/min co 10 obr/min, oraz przy charakterystycznych stanach zachowania się złoża. Obrazy o rozdzielczości 1024x1024 pikseli rejestrowano z częstotliwością 462 Hz. W jednej serii pomiarowej zapisano 50 pojedynczych obrazów.

W badaniach nie zaobserwowano przemieszczania się cząstek w kierunku prostopadłym do aparatu, dzięki czemu obraz powierzchni złoża przyjęto jako reprezentatywny dla całej objętości złoża.



Rys. 4. Objętość złoża rozluźnionego w bębnie  
Fig. 4. Loosened bed volume in the drum

Prędkości charakterystyczne zostały obliczone za pomocą wzorów: na prędkość krytyczną (1) oraz na prędkość początku i końca kataraktowania i prędkość wirowania (2) [Boss 1987].

$$n_k = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} [rpm] \quad (1)$$

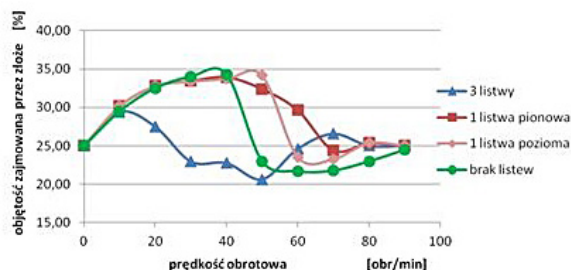
$$n = \frac{C}{D^{0,47} \phi^{0,14}} [rpm] \quad (2)$$

gdzie:  $g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],  
 $R$  – promień bębna [m],  
 $D$  – średnica bębna [m],  
 $C$  – stała dla: początku kataraktowania  $C=54$ , końca kataraktowania  $C=72$ , wirowania  $C \geq 86$ ,  
 $\phi$  – stopień wypełnienia bębna [%].

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Zastosowanie szybkiej kamery CMOS umożliwiło analizę rozkładu przestrzeni złoża w trakcie pracy aparatu. Rysunki 4 i 5 przedstawiają objętości bębna zajmowane przez złożo rozluźnione i zwarte w zależności od prędkości obrotowej i zastosowanych listwy zaburzających.

Zastosowanie 3 listwy zaburzających spowodowało obniżenie prędkości przy której złożo uległo rozluźnieniu. Złożo ulega cyklicznemu rozluźnieniu i zagęszczeniu. Maksymalny stopień rozluźnienia zaobserwowano przy ułożeniu listwy pod kątem 135°. Rozmieszczenie przegród na obwodzie bębna powoduje wynoszenie cząstek na większe wysokości nawet dla niskich prędkości obrotowych bębna. Najniższy stopień rozluźnienia zaobserwowano przy zastosowaniu jednej przegrody, czego powodem było odbijanie się cząstek od przegrody, ograniczając w ten sposób ich swobodny ruch. Maksymalne rozluźnienie złoża występowało przy prędkości od 30 do 70 obr/min.



Rys. 5. Objętość złoża zwartego w bębnie  
Fig. 5. Compact bed volume in the drum

Analiza złoża zwartego w bębnie bez listew oraz z jedną listwą umieszczoną centralnie nie wykazała znacznych rozbieżności. W obu przypadkach złoże uległo nieznacznemu rozluźnieniu jednak stopień wzajemnego kontaktu w dalszym ciągu był wysoki. Zastosowanie jednej centralnej listwy nie wpływało na rozluźnienie złoża, ponieważ cząstki miały kontakt z listwą jedynie podczas kataraktowania kiedy złoże było już rozluźnione.

Zastosowanie listew zaburzających uniemożliwiło wyznaczenie charakterystycznych prędkości obrotowych, w związku z czym zostały one określone oraz obliczone ze wzorów (1) i (2) jedynie dla bębna bez przegród co zostało przedstawione w Tabeli 1.

Największe różnice w prędkościach charakterystycznych dla wyników eksperymentalnych oraz obliczeniowych wyznaczono dla wirowania całego złoża wraz z bębniem – 24,2 obr/min, a najmniejsze dla prędkości krytycznej – 1,4 obr/min.

Stopień napełnienia nie wpłynął na prędkości obrotowe odpowiadające toczenia i wirowania. Pozostałe prędkości charakterystyczne malały wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z uwagi na rozluźnienie złoża przy niższej prędkości korzystne jest stosowanie trzech lub więcej przegród na obwodzie bębna. Z powodu zwiększenia powierzchni kontaktu cząstek i medium grzewczego jest większa, prowadzi to do zwiększenia prędkości suszenia, a tym samym zwiększenia wydajności suszarki bębnowej oraz obniżenia kosztów eksploatacyjnych.

Zastosowanie pojedynczej przegrody umieszczonej centralnie w bębnie nie zwiększa stopnia rozluźnienia złoża, dla niektórych prędkości obrotowych powodował to nawet obniżenie stopnia rozluźnienia.

Wzrost stopnia wypełnienia suszarki bębnowej powoduje obniżenie większości prędkości charakterystycznych. Dla procesu toczenia i wirowania prędkości obrotowej były stałe.

Największa różnica pomiędzy prędkościami obliczonymi, a zaobserwowanymi wynosiła 24,2 obr/min dla wirowania całego złoża. Najmniejsza różnica – 1,4 obr/min, występowała dla prędkości krytycznej.

Znajomość zachowania się wypełnienia w suszarkach bębnowych prowadzi do zwiększenia wydajności procesu suszenia, a tym samym prowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na energię w trakcie przetwarzania osadów ściekowych.

## LITERATURA

1. Szruba M. 2015. Zagospodarowanie osadów ściekowych, Nowoczesne budownictwo Inżynieryjne, maj/czerwiec, 54–59.
2. Środa K., Kijo-Kleczkowska A., Otwinowski H. 2012. Termiczne unieszkodliwianie osadów ściekowych, Inżynieria Ekologiczna, nr 28, 67–81.
3. Heidrich Z., Witkowski A. 2010. Urządzenia do oczyszczania ścieków. Projektowe przykłady obliczeń. Wydanie II, Wydawnictwo „Seidel – Przywecki” Sp. z o.o., Warszawa.
4. Szymków J., Świtecka M. 2013. Granulacja zhigienizowanych osadów ściekowych, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 3, 262–263.
5. Heim A., Gluba T., Obraniak A. 1999. Badania momentu obrotowego podczas granulacji bębnowej, XXXVI Seminarium Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii, 49–62.
6. 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, vol. 158, 76–91.
7. Boss J. 1987. Mieszanie materiałów ziarnistych, Aparaty i urządzenia do mieszania materiałów ziarnistych, Roz. 9, 133–166.

**Tabela 1.** Prędkości obrotowe bębna zaobserwowane oraz obliczone wzorami (1) i (2)

**Table 1.** The drum velocity was observed and calculated by equals (1) and (2)

Charakterystyczne prędkości		Stopień wypełnienia				
		15%	20%	25%	30%	35%
Zaobserwowane	Toczenie	1	1	1	1	1
	Początek kaskadowania	18	18	18	16	14
	Początek kataraktowania	30	28	28	26	26
	Stan równowagi	52	46	44	40	38
	Prędkość krytyczna	60	58	54	52	48
	Wirowanie	86	86	84	86	86
Obliczone	Początek kataraktowania	43,7	42	40,7	39,7	38,8
	Stan równowagi	58,3	56	54,3	52,9	51,8
	Prędkość krytyczna	50,6	50,6	50,6	50,6	50,6
	Wirowanie	69,6	66,9	64,8	63,2	61,8