

Agnieszka DOMIŃCZYK-KUDERKO, Liliana KRZYSTEK, Stanisław LEDAKOWICZ, Magda POGODA

e-mail: agapd@o2.pl

Katedra Inżynierii Bioprocessowej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

## Biologiczne suszenie mieszaniny masy pofermentacyjnej z biogazowni i organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych

### Wstęp

Zgodnie z *Dyrektywą Rady Europejskiej [Dyrektywy Rady 1999/31/WE]* państwa członkowskie Unii Europejskiej są zobowiązane do zmniejszenia ilości lokowanych na składowiskach odpadów ulegających biodegradacji.

**Masa pofermentacyjna** jest produktem ubocznym (odpadem) powstającym w trakcie produkcji biogazu. Właściwości fizykochemiczne osadu pofermentacyjnego mogą znacznie różnić się w zależności od rodzaju oraz źródła pochodzenia materiału wykorzystywanego do produkcji biogazu, a także technologii zastosowanej do jego wytwarzania. Zagospodarowanie masy pofermentacyjnej jest w związku z tym zjawiskiem trudnym i problematycznym. Odpad ten może być wykorzystywany w postaci nawozu. Jednakże musi spełniać wtedy restrykcyjne wymagania związane z zawartością substancji toksycznych, metali ciężkich oraz wymaganiami higieniczno-sanitarnymi [Kołodziejek, 2012]. Po odpowiednim przetworzeniu (suszeniu) może służyć również jako biopaliwo. W przyszłości produkcja i wykorzystywanie masy pofermentacyjnej będzie miała coraz większe znaczenie, a producenci zobligowani są z uwagi na uwarunkowania prawne, środowiskowe oraz ekonomiczne do racjonalnego wykorzystania tego odpadu. Biologiczne technologie przetwarzania osadu pofermentacyjnego, takie jak proces biologicznego suszenia (biosuszenia) materii organicznej mogą być obiecującym rozwiązaniem problemu zagospodarowania masy pofermentacyjnej.

**Biologiczne suszenie** jest procesem prowadzącym do ubytku wody przy jednoczesnym zachowaniu wartości energetycznej, w wyniku czego powstaje stałe paliwo. W efekcie rozkładu łatwo degradowalnej części substancji organicznej odpady ogrzewają się samoczynnie. Prowadzi to do obniżenia zawartości wody oraz zaniku procesu degradacji biologicznej. W wyniku czego otrzymywane jest stabilne możliwe do składowania paliwo [Adami i in., 2002, Sugni i in., 2005].

Dotychczas nie prowadzono badań procesu biologicznego suszenia mieszaniny masy pofermentacyjnej i organicznej frakcji stałych odpadów miejskich o wilgotności dochodzącej do  $600 \text{ g kg}^{-1}$ .

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu ilości dodawanej masy pofermentacyjnej na przebieg procesu biologicznego suszenia wraz z organiczną frakcją stałych odpadów miejskich tak, aby otrzymać stałe, możliwe do składowania biopaliwo o zadowalającej wartości energetycznej.

### Badania doświadczalne

#### Materiały i metody

W niniejszej pracy jako substrat wykorzystano mieszaninę masy pofermentacyjnej pochodzącej z *Grupowej Oczyszczalni Ścieków* w Łodzi oraz organiczną frakcję stałych odpadów komunalnych o modelowym składzie [Zawadzka i in., 2010]. Wilgotność masy pofermentacyjnej wynosiła ok. 83%, natomiast zawartość substancji organicznej kształtowała się na poziomie ok. 66%. Analiza elementarna wykazała, że zawartość pierwiastków CHNS w badanym materiale wynosiła odpowiednio ok. 35% mas., 5% mas., 5% mas., 0% mas.. Ciepło spalania i wartość opałowa tego materiału, uwzględniając jego wilgotność, równała się odpowiednio ok.  $3 \text{ kJ/g}$  oraz  $0,6 \text{ kJ/g}$ .

Poszczególne składniki mieszaniny zostały dobrane tak, aby jej wilgotność mieściła się w granicach od 500 do  $600 \text{ g kg}^{-1}$ . Całkowita początkowa masa suszonych odpadów wynosiła ok. 30 kg.

W ramach badań nad procesem biosuszenia analizowano: wilgotność, suchą masę, suchą masę organiczną, gęstość nasypową, skład

elementarny materii organicznej, ciepło spalania oraz wartość opałową materiału badawczego przed procesem i po procesie.

Analizę suchej masy oraz suchej masy organicznej sporządzono zgodnie z normą *PN-75/C-04616/01*. Zawartość pierwiastków CHNS (skład elementarny) wykonano w analizatorze elementarnym *NA-2500-M (CE Instruments)* według *PN ISO 13878:2002*. Ciepło spalania i wartość opałową określono za pośrednictwem kalorymetru *KL-12 Mn* zgodnie z normą *PN-73/G-04513 (PN-ISO 1928:2002)*. Poszczególne analizy wykonywano w trzech powtórzeniach, a otrzymane wyniki uśredniono.

#### Aparatura

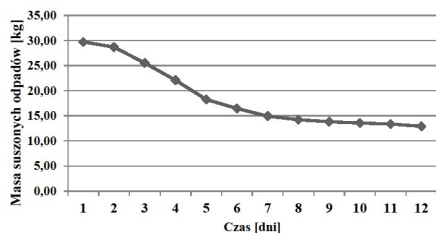
Opisywane w pracy eksperymenty przeprowadzono w poziomym reaktorze (tunelu) suszarniczym, który dla ograniczenia strat ciepła izolowano 0,6 m warstwą pianki poliuretanowej. Długość i szerokość bioreaktora równały się odpowiednio 1,45 m i 0,45 m, zaś jego całkowita pojemność wynosiła  $240 \text{ dm}^3$ . Suszoną biomasę lokowano na perforowanej, poliwęglanowej płycie, posiadającej 387 otworów o średnicy 0,005 m, których łączna powierzchnia przekroju równała się  $0,76 \text{ m}^2$ . Wysokość warstwy suszonych odpadów sięgała ok. 0,2 m. Poziomy reaktor suszarniczy wyposażono w odpowiednią aparaturę kontrolno-pomiarową, za której pośrednictwem mierzono: temperaturę suszonych odpadów w 6 punktach pomiarowych (na wlocie, wewnątrz i na wylocie reaktora w górnej i dolnej warstwie biomasy), temperaturę i wilgotność powietrza wlotowego i wylotowego, temperaturę powietrza nad suszoną biomasą oraz natężenie przepływu powietrza. Zapis powyższych parametrów odbywał się co 1 min za pośrednictwem programu komputerowego *Advantech GeniDAQ Development* seria 4.11.000 oraz modułów *Advantech ADAM: 4024, 4018, 4068, 4520, 4015*. Szczegółowy opis aparatury znajduje się w pracy Dominczyk i in. [2014].

Tunel suszarniczy zaopatrzone także w wentylator doprowadzający powietrze (wentylator tłoczący), nagrzewnicę kanałową ogrzewającą wprowadzane do reaktora powietrze w początkowej fazie procesu oraz wentylator odprowadzający powietrze (wentylator ssący). Czas pracy wentylatora ssącego regulowano w zależności od wilgotności powietrza wylotowego za pośrednictwem programu komputerowego. Przez pierwsze 4 godziny do reaktora dostarczano powietrze o temperaturze  $35^\circ\text{C}$  w celu zainicjowania procesów mikrobiologicznych, a następnie o temperaturze ok.  $23^\circ\text{C}$  (temperatura otoczenia).

Opisywaną konstrukcję umieszczono na wadze w celu rejestracji ubytku masy suszonych odpadów w czasie. Spadek masy substratu odnotowywano raz na dobę.

### Wyniki i dyskusja

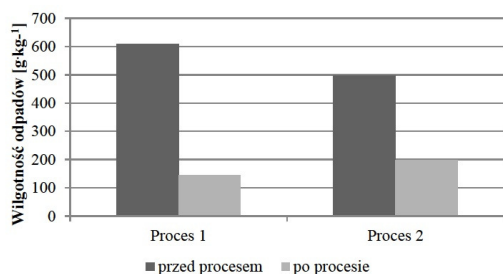
W ramach badań doświadczalnych przeprowadzono dwa procesy biologicznego suszenia, w których wykorzystano różne proporcje zastosowanej mieszaniny materiału badawczego. W procesie 1. zawartość masy pofermentacyjnej w mieszaninie wynosiła ok. 10% (ok. 3 kg), zaś w procesie 2. odpad ten stanowił ok. 33% (ok. 10 kg) całkowitej początkowej masy wsadu. Pozostałą część substratu tworzyła organiczna frakcja stałych odpadów komunalnych. Początkowa całkowita masa suszonego materiału wynosiła odpowiednio 29,70 kg dla procesu 1 oraz 26,44 kg dla procesu 2. Początkowa zawartość wilgoci w procesie 1. wynosiła  $609 \text{ g kg}^{-1}$ , a w procesie 2. równała się  $497 \text{ g kg}^{-1}$ . Natomiast masa końcowa wsadu była zbliżona dla obydwu procesów i wynosiła ok. 13 kg (12,92 kg w proces 1. oraz 12,86 kg w procesie 2.). W czasie trwania eksperymentów do 6 dnia procesów obserwowano gwałtowny spadek masy suszonych odpadów, a w kolejnych dniach odnotowywano niewielkie jej ubytki (Rys. 1).



Rys. 1. Zmiany masy suszonych odpadów w czasie procesu biosuszenia.

Średnie wartości wilgotności i temperatury powietrza wylotowego w procesie 1 wynosiły odpowiednio 52,65 % i 24,47°C, natomiast w procesie 2 równały się odpowiednio 56,92% i 25,23°C. Maksymalną temperaturę nad biomasa zarejestrowano 4 dnia w obu procesach (32°C w procesie 1. oraz 33°C w procesie 2.).

W obu procesach uzyskano wysoki stopień usunięcia wilgoci, który wyniósł ponad 60% (76,2% w procesie 1. a 60,3% w procesie 2.). Zawartość końcowa wilgoci kształtowała się na poziomie 145 g·kg<sup>-1</sup> w przypadku procesu 1 oraz 198 g·kg<sup>-1</sup> w przypadku procesu 2. (Rys. 2). Proces 1. trwał 12 dni. Z kolei czas trwania procesu 2. wyniósł 11 dni.

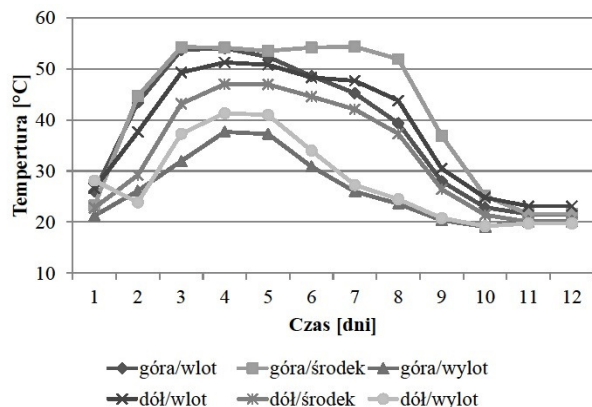


Rys. 2. Wilgotność odpadów przed i po procesie biologicznego suszenia

Maksymalna temperatura suszonych odpadów wyniosła ok. 54°C zarówno w procesie 1, jak i w procesie 2. W procesie 1. temperatura ta została zarejestrowana 3 dnia doświadczenia w środkowej części reaktora w górnej warstwie biomasy i utrzymywała się przez 5 kolejnych dni (Rys. 3). Natomiast w procesie 2. odnotowano ją na wlocie reaktora w dolnej warstwie suszonych odpadów w 4 dniu eksperymentu. Wysokie temperatury w tym procesie utrzymywały się krócej niż to miało miejsce w przypadku procesu 1., rejestrowano je przez kolejne 3 dni.

Zawadzka i in. [2010] w badaniach nad biologicznym suszeniem organicznej frakcji odpadów domowych o wysokiej wilgotności otrzymali zbliżone maksymalne temperatury (48÷53°C).

W oparciu o bilans energii opracowany przez Zawadzką i in., [2010] obliczono ilość ciepła biologicznego wytwarzanego w trakcie trwania procesu biologicznego suszenia. Wartość ciepła biologicznego obliczonego na podstawie w/w bilansu energii wyniosła 550 W/m<sup>3</sup>



Rys. 3. Zmiany temperatury w warstwie górnej i dolnej odpadów w różnych częściach bioreaktora dla procesu 1.

dla procesu 1. (10% masy pofermentacyjnej) oraz 308 W/m<sup>3</sup> w przypadku procesu 2. (30% masy pofermentacyjnej).

Dla obu procesów obliczono także bilans wody i suchej masy. Zgodność bilansu wody kształtowała się na poziomie ok. 90%, natomiast bilansu suchej masy na poziomie ok. 80%. Świadczy to o prawidłowości przeprowadzonych badań i analiz.

W ramach badań określono także doświadczalnie ciepło spalania i wartość opałową suszonej biomasy przed i po procesie, uwzględniając wilgotność badanego materiału. W wyniku procesu biologicznego suszenia parametry te wzrosły w przybliżeniu dwukrotnie w porównaniu do stanu początkowego (Tab. 1).

Tab. 1. Ciepło spalania i wartość opałowa odpadów wyznaczone doświadczalnie

Parametr	Proces 1.		Proces 2.	
	przed	po	przed	po
Ciepło spalania [kJ·g <sup>-1</sup> ]	7,85	16,99	8,4	12,71
Wartość opałowa [kJ·g <sup>-1</sup> ]	5,62	15,52	6,34	11,69

Sugni i in. [2005] otrzymali w swojej pracy podobne wartości opałowe w przypadku biologicznego suszenia niesegregowanej frakcji miejskich odpadów stałych (12,39÷16,72 kJ·g<sup>-1</sup>).

Uzyskane wyniki są również zbliżone do wartości opałowych określonych dla innych typów biomasy wykorzystywanych jako biopaliwo np. ziaren owsa, drewna, roślin energetycznych, słomy (15÷20 kJ·g<sup>-1</sup>) [Niedziółka i in., 2006, Dominczyk i in., 2014].

Wyniki analizy zawartości suchej masy organicznej oraz analizy elementarnej wykorzystano do określenia teoretycznej wartości wartości opałowej i ciepła spalania produktu końcowego. Teoretyczne ciepło spalania dla procesów 1. i 2. wynosiło odpowiednio 15,36 i 14,99 kJ·g<sup>-1</sup>, natomiast teoretyczna wartość opałowa wyniosła odpowiednio 14,03 i 13,68 kJ·g<sup>-1</sup>.

## Wnioski

W przeprowadzonych procesach biologicznego suszenia uzyskano wysoki stopień redukcji wilgoci (60÷76%). Wysuszony produkt końcowy otrzymano w stosunkowo krótkim czasie (11÷12 dni). Proces biosuszenia umożliwił otrzymanie produktu końcowego o wartości opałowej wynoszącej średnio 13,61 kJ·g<sup>-1</sup> oraz ciepła spalania 14,85 kJ·g<sup>-1</sup>.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań dowodzą, że biologiczne suszenie mieszaniny masy pofermentacyjnej i organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych jest odpowiednim sposobem zagospodarowania wybranego materiału badawczego, a otrzymany w jego wyniku końcowy produkt może być dobrym, możliwym do składowania biopaliwem.

## LITERATURA

- Adani F., Baido D., Calcaterra E., Genevini P., 2002. The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. *Biores., Technol.*, **83**, 173-179. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00231-0
- Dominczyk A., Krzystek L., Ledakowicz S., 2014. Biodrying of organic municipal wastes and residues from the pulp and paper industry. *Dry. Technol.* **32**, 1297-1303. DOI:10.1080/07373937.2014.901349
- Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999r. w sprawie składowania odpadów. Dz. Urz. WE L 182 z 16.07.1999, 1
- Kołodziejak G. 2012. Możliwości wykorzystania potencjału energetycznego biogazu powstającego w trakcie procesu oczyszczania ścieków. Analiza opłacalności proponowanych rozwiązań. *Nafta-Gaz*, nr 12, 1036-1043
- Niedziółka I., Zuchniarz A., 2006. Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego. *Motrol.*, **8A**, 232-237
- Sugni M., Calcaterra E., Adani F., 2005. Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. *Biores.Technol.*, **96**, nr 12, 1331-1337. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.11.016
- Zawadzka A., Krzystek L., Stolerek P., Ledakowicz S., 2010. Biodrying of organic fraction of municipal solid wastes. *Drying Technol.* **28**, 1220-1226. DOI: 10.1080/07373937.2010.483034