

Agnieszka DOMIŃCZYK, Liliana KRZYSTEK, Stanisław LEDAKOWICZ

e-mail: agapd@o2.pl

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

## Biologiczne suszenie mieszaniny stałych odpadów przemysłu papierniczego oraz organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych

### Wstęp

Ilości odpadów organicznych generowanych i gromadzonych rokrocznie na świecie, w tym także w krajach europejskich, stanowią ogromny problem. W związku z tym, do najważniejszych zadań nowoczesnej gospodarki odpadowej należy jak najefektywniejsze wykorzystanie materiałowych i energetycznych właściwości odpadów, a także ich bezpieczna eliminacja z punktu widzenia ochrony środowiska. Odzysk energii z odpadów organicznych ma zasadniczy wpływ na zachowanie zasobów naturalnych, obniżenie emisji metanu, dwutlenku węgla, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz pyłów. Pociąga to za sobą poprawę stanu ekosystemów naturalnych, a także przyczynia się do polepszenia standardów życia ludzi oddziałując m. in. w sposób pozytywny na ich zdrowie.

Obiecującym rozwiązaniem problemu zagospodarowania odpadów organicznych są biologiczne technologie ich unieszkodliwiania, takie jak proces biologicznego suszenia (biosuszenia) materii organicznej. Jest to metoda, która może być wykorzystywana zarówno do produkcji kompostu jak i odpadopochodnego paliwa. Biologiczne suszenie jest to autotermiczny (samogrzewalny) proces, który wykorzystuje do suszenia ciepło uwalniane podczas rozkładu materii organicznej. Jest to zatem interesująca alternatywa zagospodarowania odpadów z punktu widzenia kosztów.

Biosuszenie prowadzi do ubytku wilgoci przy jednoczesnym zachowaniu wartości kalorycznej, w efekcie czego powstaje stałe paliwo. Odpady ogrzewają się samoczynnie na skutek rozkładu łatwo degradowalnej części materii organicznej. Przyczynia się to do redukcji zawartości wilgoci, a także zaniku procesu biologicznej degradacji, czego wynikiem jest otrzymanie stabilnego, możliwego do składowania paliwa [Sugni i inni, 2002; Adani i inni, 2005; Tita G. i inni, 2007].

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu ilości dodawanych stałych odpadów z przemysłu celulozowo-papierniczego na przebieg procesu ich biosuszenia wraz z organiczną frakcją stałych odpadów komunalnych tak, aby otrzymać paliwo stałe o jak najwyższej zawartości energii, a także dobór warunków procesu pozwalający nadać mu charakter ciągły.

### Materiały i metody

W badaniach wykorzystano mieszaninę stałych odpadów przemysłu celulozowo-papierniczego oraz frakcji organicznej świeżych stałych odpadów komunalnych o modelowym składzie. Podczas prowadzenia procesów biologicznego suszenia analizowano: suchą masę (sm), suchą masę organiczną (smo), zawartość pierwiastków CHNS, ciepło spalania i wartość opałową. Suchą masę (sm) i suchą masę organiczną (smo) wykonano według normy PN-75/C-04616/01. Skład elementarny materii organicznej (zawartość pierwiastków CHNS) określono w analizatorze elementarnym NA-2500-M (*CE Instruments*) zgodnie z normą PN ISO 13878:2002. Ciepło spalania i wartość opałową ustalono za pomocą kalorymetru KL-12 Mn według normy PN-73/G-04513 (PN-ISO 1928:2002).

Badania doświadczalne obejmowały serie procesów prowadzonych w poziomym reaktorze suszarniczym, zaizolowanym 6 cm warstwą pianki poliuretanowej, w celu ograniczenia strat ciepła. Szerokość i długość reaktora suszarniczego wynosiły kolejno 45 cm i 145 cm, natomiast jego całkowita pojemność była równa 240 dm<sup>3</sup>. Odpady umieszczano na perforowanej, poliwęglanowej płycie, mającej 387 otworów o średnicy 0,5 cm oraz o łącznej powierzchni przekroju 0,76 m<sup>2</sup>. Warstwa odpadów w reaktorze miała wysokość ok. 20 cm.

Reaktor suszarniczy wyposażono w czujniki mierzące: temperaturę masy odpadów w sześciu punktach bioreaktora, temperaturę nad biomasą, wilgotność i temperaturę powietrza wlotowego i wylotowego oraz natężenie przepływu powietrza. Zapis wartości parametrów takich jak: temperatura i wilgotność powietrza wlotowego i wylotowego, temperatura biomasy, temperatura nad biomasą oraz natężenie przepływu powietrza nastąpiło co 1 min za pośrednictwem programu komputerowego *Advantech GeniDAQ Development seria 4.11.000* oraz modułów *Advantech ADAM: 4024, 4018, 4068, 4520*.

Ponadto tunel suszarniczy posiadał wentylator doprowadzający powietrze (wentylator wlotowy) oraz wentylator odprowadzający powietrze z reaktora (wentylator wyciągowy). Szybkość dostarczanego przez wentylator wlotowy powietrza wynosiła 86,35 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>, natomiast szybkość odprowadzanego z reaktora powietrza równała się 27,34 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. Powietrze doprowadzono rurą o średnicy 0,75 cm. Czas pracy wentylatora wyciągowego regulowano za pośrednictwem programu komputerowego w zależności od temperatury biomasy. Do reaktora dostarczano ciepłe powietrze o temperaturze 35°C przez 4 pierwsze godziny procesu, a następnie powietrze o temperaturze ok. 23°C (temperatura otoczenia).

Początkowa masa odpadów umieszczana w reaktorze wynosiła od 23 do 28 kg. Do badań wykorzystano mieszaninę odpadów o początkowej zawartości wilgoci od 565 do 590 g·kg<sup>-1</sup>.

Efekt ciągłości uzyskiwano poprzez dokładanie następnej partii odpadów do biomasy, po zakończeniu kolejnego cyklu procesu.

Wilgotność oraz proporcje dokładanych odpadów były zbliżone do wartości tych parametrów dla pierwszej części zastosowanego substratu.

### Wyniki

W pracy przeprowadzono dwie serie badawcze, dla różnych proporcji wykorzystywanego substratu. W procesie 1 całkowita początkowa masa odpadów wynosiła 23,25 kg. Odpady papiernicze stanowiły ok. 15% tej masy, a pozostałą część mieszanina organicznej frakcji miejskich odpadów stałych. Z kolei, w procesie 2 całkowita początkowa masa odpadów równała się 27,5 kg. Masa odpadów z przemysłu celulozowo-papierniczego wynosiła ok. 30% początkowej masy całkowitej, pozostałą część stanowiła mieszanina organicznej frakcji miejskich odpadów stałych.

W procesie 1., w którym zawartość początkowa wilgoci wynosiła 590 g·kg<sup>-1</sup>, uzyskano końcową zawartość wilgoci równą ok. 159 g·kg<sup>-1</sup>. Natomiast, w procesie 2. końcowa zawartość wilgoci wynosiła ok. 162 g·kg<sup>-1</sup>, przy zawartości początkowej wilgoci kształtującej się na poziomie 565 g·kg<sup>-1</sup> (Tab. 1).

Tab. 1. Zawartość wilgoci w suszonej biomasie

Proces	Zawartość wilgoci	
	Początek procesu [g·kg <sup>-1</sup> ]	Koniec procesu [g·kg <sup>-1</sup> ]
1	590	159
2	565	162

W obydwu procesach stwierdzono zbliżony stopień usunięcia wilgoci, który wyniósł ponad 70% (73,1% – proces 1, 71,3% – proces 2).

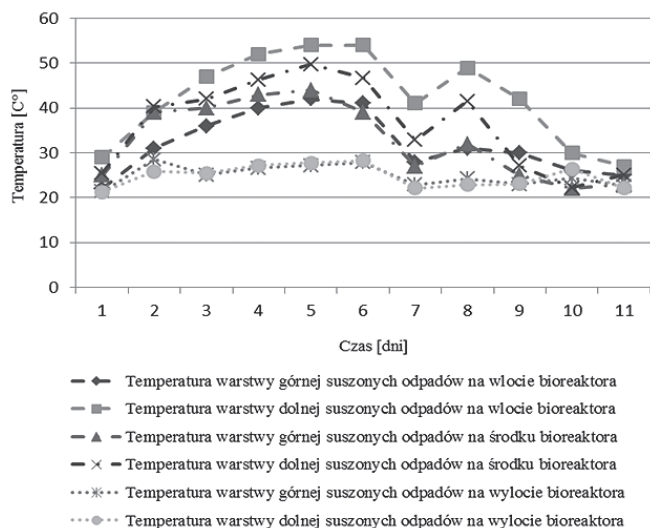
[Adani i inni, 2002] oraz [Sugni i inni, 2005] w badaniach nad procesem biologicznego suszenia uzyskali mniejszy stopień usunięcia wilgoci (ok. 50%).

Rys. 1 i 2 przedstawiają zmiany temperatury w warstwie górnej i dolnej suszonej biomasy w różnych częściach bioreaktora dla procesów 1. i 2. Najwyższą temperaturę osiągnięto w procesie 2. – ok. 60°C. Została ona odnotowana w 4. dobie procesu w warstwie górnej suszonej masy, w środkowej części bioreaktora.

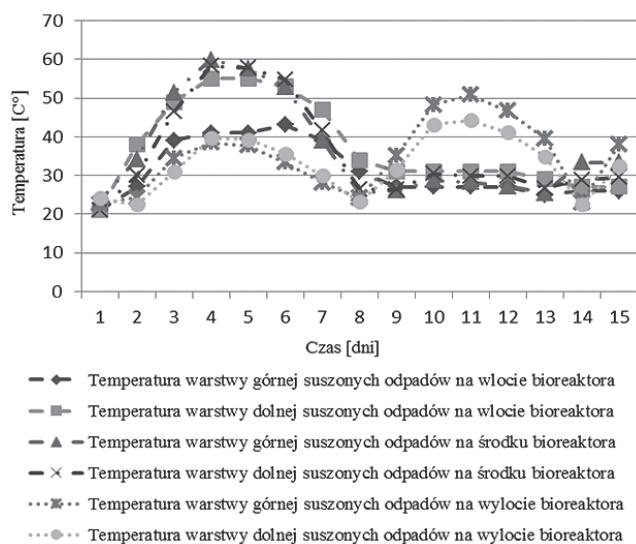
W procesie 1. maksymalna temperatura suszonych odpadów wyniosła ok. 54°C. Temperatura ta została zarejestrowana w dolnej warstwie na wlocie reaktora w 5. dniu procesu. Wyższe temperatury obserwowano zwykle w dolnych warstwach masy odpadów. Jednakże przeprowadzone procesy 1. i 2. wskazują, że nie jest to regułą. W procesie 1. najniższe temperatury zaobserwowano na wylocie z bioreaktora suszarniczego. W procesie nr 2 nie stwierdzono podobnej zależności.

[Adani i inni, 2002] oraz [Sugni i inni, 2005] otrzymali zbliżone maksymalne wartości temperatury suszonych odpadów (45–70°C) do uzyskanych w powyższej pracy.

Serie badań trwały kolejno pierwsza – 11 dni, druga – 15 dni. Pierwsza faza procesu zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku trwała ok. 7 dni. Drugi etap w procesie 1. trwał ok. 3 doby, natomiast w procesie 2. ok. 6 dni. Dołożenie następnej partii odpadów do bioreaktora spowodowało ponowny wzrost temperatury suszonej biomasy w miejscu dodania odpadów. Świadczy to o tym, że procesowi biologicznego suszenia można nadać charakter ciągły, niezależnie od tego, czy masa odpadów będzie dodawana na wlocie, czy na wylocie reaktora (Rys. 1 i 2).



Rys. 1. Zmiany temperatury w warstwie górnej i dolnej suszonych odpadów dla procesu 1.



Rys. 2. Zmiany temperatury w warstwie górnej i dolnej suszonych odpadów dla procesu 2.

W niniejszej pracy określono także empiryczne ciepło spalania oraz wartość opałową wykorzystywanej w badanych procesach mieszaniny odpadów papierniczych oraz organicznej frakcji odpadów z gospodarstw domowych. Wyznaczone doświadczalnie wartości ciepła spalania i wartości opałowej suszonej masy odpadów wyniosły zarówno dla procesu 1., jak i 2. odpowiednio ok. 14 kJ·g<sup>-1</sup> i ok. 13 kJ·g<sup>-1</sup>. Jednakże, w przypadku procesu 2, gdzie procentowy udział odpadów przemysłu papierniczego był większy, wartości ciepła spalania i wartości opałowej były nieznacznie wyższe (Tab. 2).

Tab. 2. Ciepło spalania i wartość energetyczna materiału określona empirycznie

Parametr	Proces 1	Proces 2
Ciepło spalania [kJ·g <sup>-1</sup> ]	14,42	14,61
Wartość opałowa [kJ·g <sup>-1</sup> ]	13,14	13,33

Zbliżone wartości opałowe (12,39–16,72 kJ·g<sup>-1</sup>), uzyskali także [Sugni i inni 2005].

Otrzymane wyniki są również porównywalne z wartościami opałowymi wyznaczonymi dla innych rodzajów biomasy wykorzystywanej, jako biopaliwo takiej jak: słoma, drewno, rośliny energetyczne oraz ziarno owsa (15–20 kJ·g<sup>-1</sup>) [Niedziółka i inni, 2006].

Wyniki przeprowadzonej analizy zawartości suchej masy organicznej (smo) oraz analizy elementarnej suszonych odpadów posłużyły do określenia ich teoretycznej wartości opałowej. Do jej wyliczenia wybrano następujące zależności: wzór Boie'a ( $Q_B$ ), Dulonga (w modyfikacji Bertelotha) ( $Q_D$ ), Alieva ( $Q_A$ ) oraz Gnaigera ( $Q_G$ ) [Bieńkowski, 1990]. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że wartość opałowa wyznaczona na podstawie składu elementarnego z zależności Boie'a ( $Q_B$ ), Dulonga (w modyfikacji Bertelotha), Gnaigera ( $Q_G$ ) jest wyższa niż wartość opałowa wyznaczona doświadczalnie. Natomiast wartość opałowa określona za pomocą wzoru Alieva ( $Q_A$ ) była znacznie niższa od wyznaczonej empirycznie (Tab. 3).

Tab. 3. Wartość energetyczna obliczona na podstawie składu elementarnego

Wartość energetyczna [kJ·g <sup>-1</sup> ]	Proces 1.	Proces 2.
$Q_B$	15,38	16,73
$Q_D$	13,19	15,40
$Q_A$	9,23	11,65
$Q_G$	15,62	15,98

## Wnioski

W przeprowadzonych procesach biologicznego suszenia uzyskano ok. 70% usunięcie wilgoci. Biologiczne suszenie materii organicznej o wilgotności dochodzącej do 600 g·kg<sup>-1</sup> umożliwia otrzymanie wysuszonego produktu końcowego o wartości opałowej wynoszącej ok. 13,24 kJ·g<sup>-1</sup> oraz ciepła spalania ok. 14,52 kJ·g<sup>-1</sup>.

Wraz ze wzrostem procentowego udziału stałych odpadów przemysłu celulozowo-papierniczego w masie suszonego materiału podnosiła się wartość opałowa oraz wartość ciepła spalania końcowego produktu.

Otrzymane wyniki badań świadczą o tym, że końcowy produkt uzyskany z wykorzystanego substratu może być dobrym biopaliwem, a procesowi można nadać charakter ciągły.

## LITERATURA

- Adani F., Baido D., Calcaterra E., Genevini P., 2002. The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. *Bioresour. Technol.*, 83, nr 3, 173-179. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00231-0
- Bieńkowski P., 1990. Evaluation of methods of calculation energetic value of organic matter from its elementary composition. *Pol. Ecol. Stud.*, 16, nr 3-4, 245-285
- 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. *Bioresour. Technol.*, 96, nr 12, 1331-1337. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.11.016
- Titta G., Viviani G., Sabella, D., 2007. *Biostabilization and biodrying of municipal solid waste*. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Sardinia, Italy, 1-5 October 2007, 1085-1086.