

Agnieszka DOMIŃCZYK-KUDERKO, Liliana KRZYTEK, Stanisław LEDAKOWICZ, Martyna OLCZAK

e-mail: agapd@o2.pl

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

Biologiczne suszenie podłoża po uprawie pieczarki

Wstęp

Intensywny rozwój rolnictwa oraz nastawienie producentów rolnych głównie na jeden rodzaj produkcji rolnej powodują, że odpady organiczne pochodzące z tej gałęzi gospodarki stają się poważnym problemem. Odpady rolnicze i przemysłu rolno-spożywczego zawierają wszystkie niezbędne składniki do rozwoju mikroorganizmów. Pozostawienie tych odpadów w stanie surowym stwarza zagrożenie sanitarne wywołane rozwojem mikroflory patogennej oraz wynikające z ich naturalnej biodegradacji przez mikroorganizmy określone problemy środowiskowe. W wyniku rozkładu odpadów następuje emisja gazów do atmosfery, a także wymywanie związków biogenych do wód gruntowych i powierzchniowych powodujących ich eutrofizację, a tym samym naruszenie równowagi ekosystemu [Ledakowicz i Krzystek, 2005].

Podłoże do produkcji pieczarek. W Polsce w ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój pieczarkarstwa. Roczna produkcja pieczarek wynosi około 250 tys. ton grzybów rocznie. Plasuje to nasz kraj na pierwszym miejscu w Europie i trzecim na świecie [Kalembasa i in., 2012].

Podłoże do produkcji pieczarek jest wytwarzane na bazie materiałów organicznych z domieszką substancji mineralnych. W jego skład wchodzi obornik koński lub kurzy oraz m.in. słoma, torf i gips. Ilość zużytego podłoża po produkcji pieczarek w Polsce wynosi około 1500 tys ton rocznie. Odpad ten stwarza ogromne problemy producentom tych grzybów, ponieważ zazwyczaj nie posiadają oni własnych użytków rolnych, które umożliwiłyby im jego zagospodarowanie [Rutkowska, 2009].

Duża ilość odpadu po uprawie pieczarek, jako odpadu organicznego, narzuca konieczność jego racjonalnego zagospodarowania, bez szkody dla środowiska naturalnego. Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Środowiska [2015]* zużyte podłoże po produkcji pieczarek kwalifikowane jest do grupy odpadów z rolnictwa, sadownictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności. Z tych względów, poszukuje się najbardziej ekonomicznych i przydatnych metod jego zagospodarowania, umożliwiających pozyskanie energii i wartościowych produktów.

Jedną z metod jest wykorzystanie procesu biologicznego suszenia, w wyniku którego uzyskuje się stałe paliwo. Podczas biologicznego rozkładu łatwo degradowalnej części materii organicznej odpady ogrzewają się same. Zjawisko to prowadzi do zmniejszenia zawartości wody oraz zatrzymania procesu degradacji biologicznej. W rezultacie czego pozyskiwane jest stabilne, możliwe do składowania paliwo [Adani i in., 2002; Sugni i in., 2005].

Biologiczne suszenie stosowane jest dotychczas głównie w przypadku osadów ściekowych i odpadów stałych z przemysłu celulozowo-papierniczego, [Navaee-Ardeh i in., 2006, Dominczyk i in., 2014], stałych odpadów komunalnych [Adani i in., 2002, Sugni i in., 2005] oraz osadów ściekowych wraz z organiczną frakcją odpadów komunalnych [Zawadzka i in., 2010].

Badania procesu biologicznego suszenia mieszaniny podłoża po uprawie pieczarek i organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych o wilgotności wynoszącej ok. 0,600 kg/kg wilgotnego materiału nie były dotychczas prowadzone.

Celem poniższej pracy było zbadanie możliwości zagospodarowania zużytego podłoża po uprawie pieczarki wraz z organiczną frakcją stałych odpadów komunalnych w sposób pozwalający na uzyskanie stałego paliwa o jak najwyższej wartości energetycznej.

Badania doświadczalne

Materiały

Jako substrat wykorzystano w niniejszej pracy mieszaninę podłoża po uprawie pieczarek pochodzącego z *Uprawy Pieczarek Markiewicz* w Dobroniu (woj. łódzkie) oraz organiczną frakcję stałych odpadów miejskich o wzorcowym składzie [Zawadzka i in., 2010]. Charakterystykę podłoża po uprawie pieczarek przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Właściwości podłoża po uprawie pieczarki

Parametr	Jednostka	Wartość uśredniona
Wilgotność	kg/kg wilgotnego materiału	0,672
Sucha masa	% s.m.	34,81
Sucha masa organiczna	% s.m.	67,27
Popiół	% s.m.	32,73
Azot	% s.m.	2,54
Węgiel	% s.m.	30,08
Wodór	% s.m.	3,32
Siarka	% s.m.	0,00
Tlen	% s.m.	32,32
Ciepło spalania	J/g wilgotnego materiału	4186,00
Wartość opałowa	J/g wilgotnego materiału	2034,00

Wybrane komponenty mieszaniny zostały dobrane tak, aby jej wilgotność mieściła się w granicach od 0,500 do 0,600 kg/kg wilgotnego materiału, natomiast stosunek C/N był zbliżony do optymalnego dla procesu kompostowania. Początkowa całkowita masa suszonych odpadów wynosiła ok. 27 kg.

Metodyka

W ramach badań nad procesem biologicznego suszenia analizowano przed i po procesie następujące parametry: suchą masę, suchą masę organiczną, gęstość nasypową, skład elementarny materii organicznej, ciepło spalania oraz wartość opałową materiału badawczego.

Analizę suchej masy oraz suchej masy organicznej przeprowadzono zgodnie z normą [PN-75/C-04616/01, 1975].

Skład elementarny (zawartość pierwiastków CHNS) wykonano według normy [PN ISO 13878:2002] w analizatorze elementarnym NA-2500-M firmy CE Instruments.

Ciepło spalania i wartość opałową określono zgodnie z normą [PN-73/G-04513; PN-ISO 1928:2002] za pośrednictwem kalorymetru KL-12 Mn. Wyżej wymienione analizy sporządzono w trzech powtórzeniach, a otrzymane wyniki uśredniono.

Aparatura

Badania eksperymentalne wykonano w poziomym reaktorze (tunelu) suszarniczym, zaizolowanym w celu ograniczenia strat ciepła 0,6 m warstwą pianki poliuretanowej. Szerokość i długość reaktora wynosiła odpowiednio 0,45 m i 1,45 m, natomiast jego całkowita pojemność równała się 240 dm³.

Suszoną masę organiczną umieszczano na perforowanej płycie poli-

węglanowej. Warstwa suszonych odpadów miała wysokość ok. 0,2 m.

Poziomy tunel (reaktor) suszarniczy zaopatrzone w odpowiednią aparaturę kontrolno-pomiarową, za pomocą której dokonywano następujących pomiarów: temperatury biomasy w 6 punktach pomiarowych (w górnej i dolnej warstwie biomasy, na wlocie, w środkowej części i na wylocie reaktora), temperatury i wilgotności powietrza wlotowego i wylotowego, temperatury powietrza nad suszonymi odpadami oraz natężenia przepływu powietrza. Rejestracja wyżej wymienionych parametrów odbywała się co 1 min. za pośrednictwem programu komputerowego *Advantech GeniDAQ Development* seria 4.11.000 oraz modułów *Advantech ADAM: 4024, 4018, 4068, 4520, 4015*. Dokładna charakterystyka aparatury znajduje się w pracy *Domińczyk i in. [2014]*.

Reaktor wyposażono również w wentylator doprowadzający powietrze (wentylator wlotowy), wentylator odprowadzający powietrze (wentylator wylotowy) oraz nagrzewnicę kanałową ogrzewającą we wstępnej fazie procesu wprowadzane do tunelu powietrze. Praca wentylatora wylotowego uzależniona była od wilgotności powietrza wylotowego oraz regulowana za pośrednictwem programu komputerowego. Do reaktora w celu zainicjowania procesów mikrobiologicznych przez pierwsze 4 godziny procesu tłoczono powietrze o temperaturze 35°C, a następnie zasysane było powietrze o temperaturze ok. 24°C - 27°C (temperatura panująca w pomieszczeniu). W celu rejestracji ubytku masy suszonych odpadów w czasie całą konstrukcję umieszczono na wadze. Spadek masy badanego materiału rejestrowano raz na dobę.

Wyniki i dyskusja

Badania eksperymentalne obejmowały dwa procesy biologicznego suszenia, w których jako substrat zastosowano różne proporcje mieszaniny materiału badawczego. Początkowa całkowita masa odpadów wynosiła ok. 27 kg dla obydwu procesów (Tab. 2). Zawartość zużytego podłoża po uprawie pieczarek w procesie 1 wynosiła ok. 10% (3 kg), natomiast w procesie 2 odpad ten stanowił ok. 30% (9 kg) całkowitej początkowej masy wsadu. Pozostałą część suszonych odpadów tworzyła organiczna frakcja stałych odpadów miejskich.

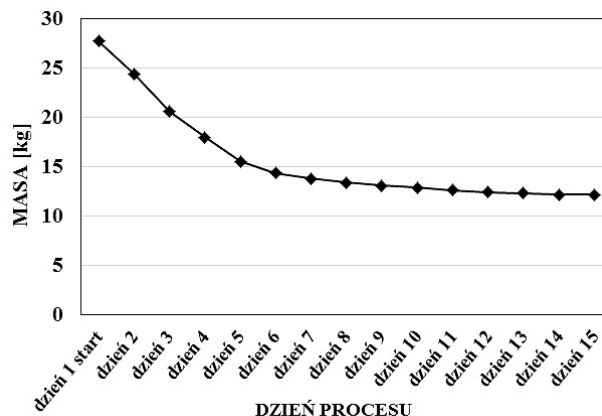
Proces 1 trwał 15 dni, zaś proces 2 zakończył się 14 dnia. *Sugni i in. [2005]* podają, że odpowiednie zarządzanie parametrami procesu pozwala na pozyskanie paliwa organicznego pochodzącego z odpadów w stosunkowo krótkim czasie, wynoszącym 8÷9 dni.

W trakcie przebiegu doświadczenia do 7 dnia trwania obydwu procesów odnotowywano gwałtowny spadek masy suszonych odpadów, natomiast w kolejnych dniach obserwowano niewielkie jej ubytki. Począwszy od 11 dnia prowadzenia procesów zmiany masy odpadów oraz zmiany temperatur ich poszczególnych warstw były niewielkie (Rys. 1 i 2). Końcowa masa wsadu w przypadku obu procesów była zbliżona i wyniosła ok. 12 kg (Tab. 2).

Zarejestrowane maksymalne wartości temperatury mieszaniny suszonych odpadów w obu procesach były podobne.

Tab. 2. Parametry charakteryzujące biomasę przed i po procesie biosuszenia

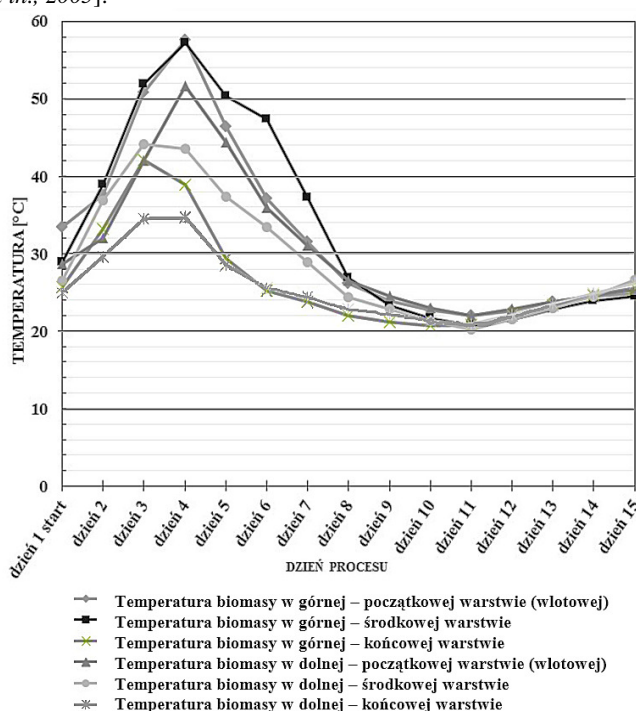
Parametr	Proces 1		Proces 2	
	przed	po	przed	po
Masa całkowita biomasy, [kg wilgotnego materiału]	27,74	12,15	27,06	11,80
Wilgotność początkowa, [kg/kg wilgotnego materiału]	0,563	0,135	0,559	0,131
Azot, [% s. m.]	1,78	2,12	1,77	2,49
Węgiel, [% s. m.]	42,23	42,49	41,46	40,51
Ciepło spalania, [J/g wilgotnego materiału]	7624,00	14860,00	7712,00	14729,00
Wartość opałowa, [J/g wilgotnego materiału]	5467,00	13384,00	5592,00	13421,00

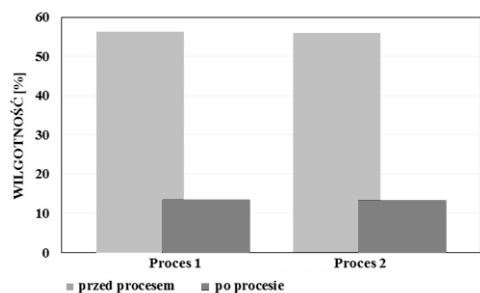


Rys. 1. Zmiana masy materiału w zależności od czasu suszenia dla procesu 1

W przypadku procesu 1 (10% podłoża po uprawie pieczarek) wyniosła ona 57,6°C, zaś w procesie 2 (30% podłoża po uprawie pieczarek) równała się 56,9°C. Zarówno w pierwszym jak i drugim procesie odnotowano ją 4 dnia eksperymentu w początkowej górnej warstwie badanej masy odpadów (Rys. 2). Temperatura powyżej 50°C utrzymywała się zarówno w pierwszym jak i drugim procesie przez 3 dni (od 3 do 5 dnia). W badaniach nad biosuszeniem organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych o wysokiej wilgotności *Zawadzka i in. [2010]* otrzymali zbliżone wartości maksymalnych temperatur suszonej biomasy (48÷53°C).

Zarówno wilgotności początkowe jak i końcowe biomasy odpadów były w przypadku procesu 1 (10% podłoża popieczarkowego) jak i procesu 2 (30% podłoża popieczarkowego) zbliżone do siebie. Początkowa wilgotność suszonego materiału w procesie 1 równała się 0,563 kg/kg wilgotnego materiału, zaś w procesie 2 wynosiła 0,559 kg/kg wilgotnego materiału. Końcowe wilgotności suszonego materiału wyniosły odpowiednio 0,135 kg/kg wilgotnego materiału dla procesu 1 oraz 0,131 kg/kg wilgotnego materiału dla procesu 2. Uzyskano zatem wysoki stopień usunięcia wilgoci, który wyniósł ponad 76% (76,09% w procesie 1 oraz 76,18% w procesie 2) (Rys. 3). W pracach nad procesem biologicznego suszenia niesegregowanej frakcji miejskich odpadów stałych inni autorzy uzyskali mniejszy stopień usunięcia wilgoci, który wynosił ok. 50% [*Adani i in., 2002, Sugni i in., 2005*].





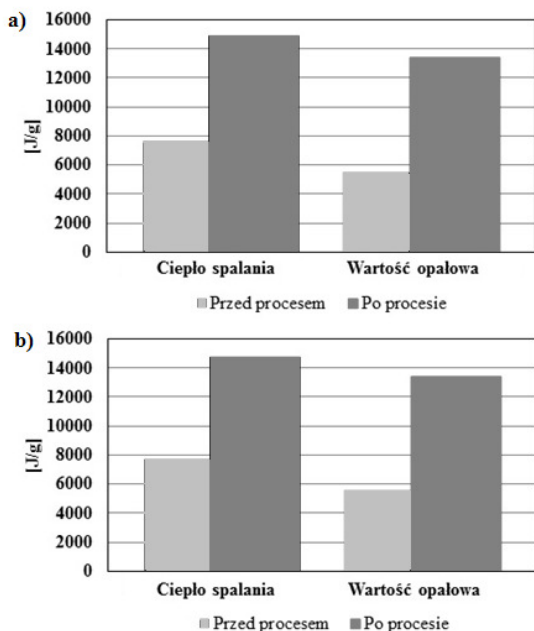
Rys. 3. Zmiany wilgotności w biomacie w procesie 1 i 2

W procesie 1 średnie wartości wilgotności i temperatury powietrza wylotowego wynosiły odpowiednio 40,67% i 26,77°C, zaś w procesie 2 – odpowiednio 32,80% i 24,68°C. Maksymalną temperaturę nad biomasą zarejestrowano 3 dnia w procesie 1 oraz 4 dnia w procesie 2, wynosiły one odpowiednio: 33,80°C oraz 29,80°C.

Badania eksperymentalne obejmowały również wyznaczenie ciepła spalania i wartości opałowej badanego materiału przed i po procesie z uwzględnieniem jego wilgotności. Odnotowano w przybliżeniu dwukrotny wzrost tych parametrów po procesach biologicznego suszenia w porównaniu do stanu początkowego (Tab. 2, Rys. 4).

W przypadku biologicznego suszenia niesegregowanej frakcji miejskich odpadów stałych *Sugni i in.* [2005] uzyskali w swojej pracy podobne wartości opałowe (12390–16720 J/g). Otrzymane wyniki są również podobne do wartości opałowych odnotowanych dla innych rodzajów biomasy wykorzystywanych jako paliwo pochodzenia organicznego np. drewna, ziaren owsa, słomy, roślin energetycznych, odpadów z przemysłu papierniczego (15000–20000 J/g) [Niedziółka i Zuchniarz, 2006, Domińczyk i in., 2014].

Analiza elementarna oraz określenie zawartości suchej masy organicznej pozwoliły na wyznaczenie teoretycznej wartości ciepła spalania oraz wartości opałowej produktu końcowego.



Rys. 4. Zmiany ciepła spalania i wartości opałowej (a) dla procesu 1, (b) dla procesu 2

Teoretyczna wartość opałowa produktu końcowego dla procesu 1 wyniosła 15605 J/g, zaś dla procesu 2: 14864 J/g. Natomiast teoretyczne ciepło spalania badanego materiału po procesie wyniosło 16950 J/g w przypadku procesu 1 oraz 16129 J/g dla procesu 2.

Podsumowanie i wnioski

W badanych procesach biologicznego suszenia mieszaniny zużytego podłoża po uprawie pieczarki i organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych otrzymano wysoki poziom usunięcia wilgoci, wynoszący ponad 76%. Końcowy produkt w postaci wysuszonej biomasy uzyskano we względnie krótkim czasie (już po 10–11 dniach).

Proces biologicznego suszenia wybranej materii organicznej o początkowej wilgotności wynoszącej ok. 0.600 kg/kg umożliwił otrzymanie produktu końcowego o wartości opałowej wynoszącej średnio 13403 J/g oraz ciepła spalania 14795 J/g.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów świadczą, że biologiczne suszenie zastosowanej w badaniach mieszaniny podłoża po uprawie pieczarek i organicznej frakcji stałych odpadów domowych może być dobrym sposobem umożliwiającym racjonalne zagospodarowanie wybranego substratu, w postaci możliwego do składowania paliwa o zadowalającej wartości energetycznej.

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
- Domińczyk A., Krzystek L., Ledakowicz S., 2014. Biodrying of organic municipal wastes and residues from the pulp and paper industry. *Drying Technol.* 32, 1297-1303. DOI:10.1080/07373937.2014.901349
- Kalembsa D., Becger M., Bik B., Makolewski A., 2012. Właściwości materii organicznej podłoża po uprawie pieczarki. *Acta Agrophysica* 19 (4), 713-723.
- Ledakowicz S., Krzystek L., 2005. Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. *Biotechnologia*, 3: 165-183.
- Navae-Ardeh, S.; Bertrand, F.; Stuart, P.R., 2006. Emerging biodrying technology for the drying of pulp and paper mixed sludge. *Drying Technol.*, 24(7), 863–878. DOI:10.1080/07373930600734026
- Niedziółka I., Zuchniarz A., 2006. Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego. *Motrol.*, 8A, 232-237
- PN-73/G-04513, (1973). *Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości węgla i wodoru metodą Sheffield*
- PN-75/C-04616/01, (1975). *Woda i ścieki - Badania specjalne osadów. Oznaczanie zawartości wody, suchej masy, substancji organicznych i substancji mineralnych w osadach ściekowych*
- PN ISO 13878:2002. *Jakość gleby - Oznaczanie zawartości azotu całkowitego po suchym spalaniu ("analiza elementarna")*
- PN-ISO 1928:2002. *Paliwa stałe - Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej*
- Rozporządzenie Ministra Środowiska, (2015) z dnia 9 grudnia 2015 r. w sprawie katalogu odpadów. Dz.U. Nr 112, poz. 1206
- Rutkowska B., 2009. Możliwości rolniczego wykorzystania zużytych podłoży po produkcji pieczarek. Odpady w kształtowaniu i inżynierii środowiska. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rohn.*, 535: 349-354
- Sugni M., Calcaterra E., Adani F., 2005. Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. *Biores. Technol.*, 96(12), 1331-1337. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.11.016
- Zawadzka A., Krzystek L., Stolarek P., Ledakowicz S., 2010. Biodrying of organic fraction of municipal solid wastes. *Drying Technol.* 28, 1220-1226. DOI: 10.1080/07373937.2010.483034