INŻYNIERIA ROLNICZA
AGRICULTURAL ENGINEERING

2012: Z. 4(139) T.1
S. 377-387

ISSN 1429-7264

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej
http://www.ptir.org

METODYKA OKREŚLANIA STRAT I ILOŚCI WYTWARZANEGO CIEPŁA W PROCESIE KOMPOSTOWANIA ODPADÓW BIOLOGICZNYCH

Piotr Sołowiej
Katedra Elektrotechniki Energetyki Elektroniki i Automatyki
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Streszczenie. Kompostowanie jest procesem biologicznym, w którym w fazie termofilnej wydzielane są znaczne ilości ciepła. W pracy przedstawiono metodykę wyliczania ilości ciepła wytwarzanego w procesie kompostowania odpadów biologicznych w izolowanych, napowietrzanych bioreaktorach. Szczególną uwagę zwrócono na sposób obliczenia strat ciepła przez obudowę bioreaktora. Metodykę opracowano w oparciu o powszechnie znane zależności i polskie normy. Przedstawiono także koncepcję odzyskiwania nadmiaru ciepła z kompostowania odpadów. Głównym celem opracowanej metodyki jest dostarczenie informacji niezbędnych do projektowania urządzeń umożliwiających odprowadzenie nadmiaru ciepła z kompostowanej pryzmy, bez szkodliwego wpływu na przebieg procesu i jakość produktu końcowego jakim jest humus. Odpowiednio dobrany sposób odbioru ciepła z pryzmy kompostu, może być czynnikiem utrzymującym temperaturę złoża na optymalnym poziomie i przyczynić się do wydłużenia fazy termofilnej i tym samym skrócenia czasu trwania procesu.

Słowa kluczowe: kompostowanie, utylizacja odpadów, odzysk ciepła

Wprowadzenie

Kompostowanie – jako metoda utylizacji odpadów biologicznych stosowane jest od bardzo dawna. Niewielkie nakłady energetyczne oraz możliwość wykorzystania powstałego produktu jako wysokowartościowy nawóz rolniczy decydują o szerokim zastosowaniu tego procesu. W praktyce stosowane są różne technologie kompostowania: w pryzmach lub boksach na wolnym powietrzu, w systemach izolowanych komór lub obracających się bębnach z kontrolowanym napowietrzaniem [Dach, Sęk 1996; Dach i in. 2003; Fernández 2010]. Efektywność tego procesu bardzo w znacznym stopniu uzależniona jest od odpowiedniego stopnia napowietrzenia oraz kontroli wilgotności przez cały okres jego trwania.

Kompostowanie jest to suma procesów mikrobiologicznych polegających na przetworzeniu – przez mikroorganizmy materiału biologicznego do postaci humusu. Poza humusem

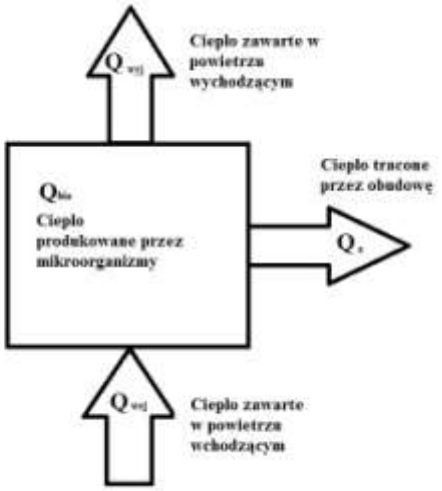
mikroorganizmy wytwarzają znaczne ilości dwutlenku węgla uwalnianego do atmosfery, a jednocześnie produkują znaczne ilości ciepła.

Najważniejszym parametrem obrazującym przebieg procesu kompostowania jest temperatura [Liang i in. 2003; Miyatake i Iwabuchi 2006]. Proces ten dzieli się na trzy fazy: mezofilną, termofilną i stabilizacji. W fazie mezoflinej można zauważyć dużą aktywność mikroorganizmów mezofilnych, których pożywieniem jest łatwodegradowalna materia organiczna – głównie cukry i aminokwasy. Temperatura w tej fazie zawiera się w przedziale 25–45ºC. Powyżej 45ºC wyhamowana zostaje aktywność mikroorganizmów mezofilnych, a uaktywniają się mikroorganizmy termofilne, których procesy metaboliczne podnoszą temperaturę złoża do 70–80ºC. Trzecia faza to faza schładzania i dojrzewania – na skutek zmniejszania się populacji mikroorganizmów termofilnych temperatura obniża się do około 35–40ºC, aktywność podejmują mikroorganizmy mezofilne, aż do momentu przetworzenia pozostałej ilości biomasy.

Odpowiednie napowietrzanie pryzmy kompostu powoduje przedłużenie fazy termofilnej procesu [Dach i in. 2004, 2007], a co za tym idzie zwiększenie ilości przetworzonego (w tej fazie) materiału biologicznego. Przyczynia się to do zwiększenia efektywności procesu utylizacji odpadów biologicznych metodą kompostowania poprzez skrócenie czasu trwania całego procesu, oraz wpływa na zmniejszenie emisji metanu do atmosfery. Stopień aeracji powinien być jednak tak dobrany, aby dostarczyć odpowiednią ilość tlenu niezbędnego organizmom termofilnym do życia i jednocześnie nie spowodować nadmiernym napowietrzaniem wychłodzenia pryzmy oraz zbyt dużego spadku wilgoci, co może doprowadzić do spowolnienia a nawet zahamowania procesu.

Analizując tempo wydzielania dwutlenku węgla, pobierania tlenu oraz stopień przetworzenia biomasy podawanych przez kilku autorów [Finstein 1975; Strom 1978, Rothbaum 1961; Wiley 1957] stwierdzono, że najwyższe aktywności metaboliczne mikroorganizmów rejestrowane są w temperaturze zbliżonej do 60ºC, a jest to temperatura optymalna dla zdecydowanej większości mikroorganizmów termofilnych. Produkcja ciepła o temperaturze 60–65ºC w pryzmie kompostu przyczynia się nie tylko do pasteryzacji i likwidacji patogenów, lecz obok napowietrzania decyduje o głębszej dekompozycji materii organicznej [Macgregor i in. 1981]. Ciepło to ze względu na strukturę i właściwości fizyczne kompostowanego materiału biologicznego, kumuluje się w kompostowanej pryzmie osiągając temperatury nawet powyżej 80ºC. Dokonywano już prób wykorzystania ciepła powstałego w procesie kompostowania dla celów grzewczych [Sołowiej 2007].

Powyższe informacje pozwalają na sformułowanie założeń, które pozwoliłyby na optymalizację procesu utylizacji odpadów biologicznych poprzez odprowadzenie nadmiaru ciepła celem utrzymania temperatury złoża w zakresie 55–60ºC z jednoczesną kontrolą napowietrzania i wilgotności kompostowanego materiału. Regulację temperatury złoża kompostu można by przeprowadzić za pomocą regulacji intensywności napowietrzania, ale istnieje duże prawdopodobieństwo, że zbyt duże przepływy powietrza spowodowałyby odprowadzenie wilgoci – nadmierne wysuszenie złoża, co w rezultacie doprowadziłoby do spowolnienia i w skrajnych przypadkach do zatrzymania procesu kompostowania. Powstała idea wprowadzenia do pryzmy kompostu wymienników ciepła, które w sposób kontrolowany mogłyby odprowadzić nadmiar ciepła. Odbiór ciepła następowałby tylko w momencie osiągnięcia założonej temperatury złoża. Projektowanie takiego wymiennika ciepła wymaga wiedzy na temat ilości ciepła jaką taki wymiennik powinien odprowadzić.



Rys. 1. Bilans ciepła bioreaktora
Fig. 1. Bioreactor heat balance

Obliczenie ilości ciepła koniecznego do odprowadzenia dla utrzymania odpowiedniej temperatury wymaga opracowania odpowiedniej metodologii. Metodologia ta powinna obejmować wszystkie strumienie ciepła dostarczanego, wytwarzanego i traconego w procesie kompostowania. Ze względów na konieczność kontroli napowietrzania i strat ciepła do otoczenia metodologia zostanie ograniczona do zamkniętych bioreaktorów.

Sposoby obliczania ciepła generowanego w procesie kompostowania, jak i jego rozpływu są dobrze znane [Ekinci i in. 2006; Kaiser 1996; Mudhoo i Mohee 2006, 2008; Nakayama i in. 2007; Petric i Selimbasic 2008]. Trzeba jednak zauważyć, że wszyscy ci autorzy przy obliczaniu strat ciepła przez obudowę bioreaktora posługują się ogólnym współczynnikiem przenikania ciepła przez obudowę bez uwzględnienia kierunku przepływu strumienia energii, różnic w oporze przejmowania ciepła i temperatur wewnątrz bioreaktora.

Zaproponowana metodologia jest rozwinięciem rozwiązania zaproponowanego przez Kaser'a [Kaiser 1996]. Rozwinięcie to dotyczy obliczania strat ciepła do otoczenia przez obudowę bioreaktora.

Bilans ciepła dla bioreaktora przedstawia następujące równanie:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{bio}}{dt} + \frac{dQ_{wej}}{dt} - \frac{dQ_{wyj}}{dt} - \frac{dQ_s}{dt} \tag{1}$$

gdzie:

Q – ilość ciepła bioreaktora [kJ];

$\frac{dQ_{bio}}{dt}$ – przyrost ciepła wytworzonego przez mikroorganizmy [kJ·h^{-1}],

$\frac{dQ_{wej}}{dt}$ – strumień ciepła dostarczonego przez napowietrzanie [kJ·h^{-1}],

$\frac{dQ_{wyj}}{dt}$ – strumień ciepła w powietrzu wychodzącym [kJ·h^{-1}],

$\frac{dQ_s}{dt}$ – strumień ciepła tracony poprzez ściany bioreaktora [kJ·h^{-1}].

Strumień ciepła doprowadzony do bioreaktora przez napowietrzanie

$$\frac{dQ_{wej}}{dt} = h_{wej} \cdot \frac{dV_{wej}}{dt} \tag{2}$$

gdzie:

V_{wej} – objętość powietrza dostarczonego w czasie kompostowania [m^3],

h_{wej} – entalpia powietrza dostarczonego w czasie kompostowania [$kJ \cdot m^{-3}$].

$$h_{wej} = h_{wej}^{parywodnej} + h_{wej}^{powsuchego} = r \cdot f_{wej} + c_{pd} \cdot T_{wej} \tag{3}$$

gdzie:

r – ciepło właściwe parowania wody dla 60ºC = 2359 [$kJ \cdot kg^{-1}$],

c_{pd} – ciepło właściwe powietrza suchego = 1,219 [$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$] przy 1 atm i 20ºC,

f_{wej} – (bezwzględna) wilgotność pary wodnej zawartej w powietrzu wejściowym [$kg \cdot m^{-3}$];

T_{wej} – temperatura powietrza wejściowego [ºC].

Strumień ciepła przekazywany z bioreaktora w powietrzu opuszczającym bioreaktor

$$\frac{dQ_{wyj}}{dt} = h_{wyj}^{parywodnej} + h_{wyj}^{powsuchego} = r \cdot f_{sat}(T) + c_{pd} \cdot T \tag{4}$$

gdzie: $f_{sat}(T) = 10^{0,0213 \cdot T - 2,19}$: wilgotność nasyconego powietrza [$kg \cdot m^{-3}$], wartości z zakresu ($0 \le T \le 80°C$) zgodnie z Campbell (Campbell 1997).

Strumień ciepła przekazywany przez obudowę do otoczenia

Sposób obliczenia ilości ciepła przekazywanego przez obudowę bioreaktora zaproponowany przez Kaiser'a [1991] jest bardzo ogólny:

$$\frac{dQ}{dt} = u \cdot (T - T_z) \tag{5}$$

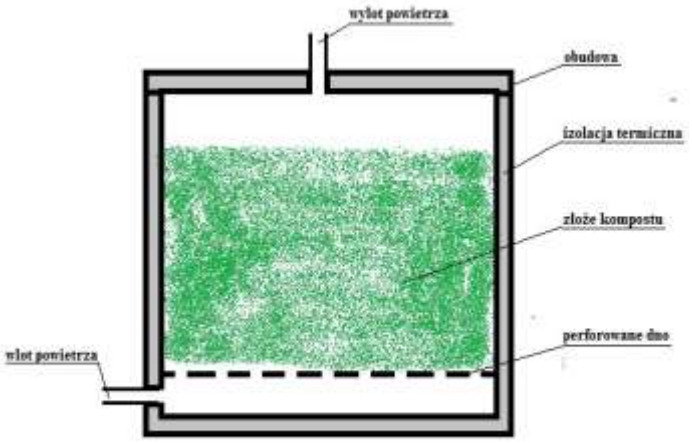
gdzie:

T – temperatura wewnątrz bioreaktora [ºC],

T_z – temperatura otoczenia [ºC],

u – ogólny współczynnik przenikania ciepła przez obudowę [$kJ \cdot K^{-1} \cdot h^{-1}$],

Opracowując sposób obliczania strat przez obudowę przyjęto, że pomijając drobne różnice konstrukcyjne, ogólna budowa bioreaktorów do kompostowania odpadów biologicznych jest bardzo podobna (rys. 2).



Rys. 2. Ogólna budowa bioreaktorów
Fig. 2. General structure of bioreactors

W przypadku potrzeby określenia strat ciepła przez obudowę należy zidentyfikować strumienie ciepła opuszczające bioreaktor przez obudowę (rys. 3). Zakładając, że struktura ścian bioreaktora jest wszędzie taka sama (dno, ściany boczne, pokrywa) wielkość strumienia będzie zależała od jego kierunku, różnicy temperatur oraz od oporu przejmowania ciepła wewnątrz bioreaktora. Metoda obliczenia oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła została opracowana na podstawie normy PN-EN ISO 6946:2008, a dla mostków cieplnych – PN-EN ISO 14683:2008. Założono, że bioreaktor ma kształt sześcianu foremnego o długości krawędzi zewnętrznej – L. Zwykle ściany bioreaktora zbudowane są trzywarstwowo:

– warstwa wewnętrzna (wytrzymała, odporna na korozję) o grubości d_1 [m], i współczynniku przewodzenia ciepła λ_1 [W·m^{-1}K^{-1}];
– warstwa izolacji o grubości d_2 [m] i współczynniku przewodzenia ciepła λ_2 [W·m^{-1}K^{-1}];
– obudowa zewnętrzna o grubości d_3 [m] i współczynniku przewodzenia ciepła λ_3 [W·m^{-1}K^{-1}];

Wobec tego grubość ściany bioreaktora:

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \tag{6}$$

Między wnętrzem bioreaktora o temperaturze T_w a otoczeniem o temperaturze T_z strumień ciepła przez obudowę:

$$\phi = H_{st}(T_w - T_z) \tag{7}$$

gdzie:

ϕ – strumień ciepła [W];
H_{st} – współczynnik strat ciepła obudowy [W·K^{-1}]
T_w – temperatura wewnętrzna bioreaktora [K],
T_z – temperatura otoczenia [K].

Ilość ciepła Q przekazywanego przez przegrodę:

$$Q = \phi \cdot t = H_{st} \cdot (T_w - T_z) \cdot t \tag{8}$$

gdzie:

Q – ilość przekazywanego ciepła [J],
t – czas [s].

Współczynnik strat ciepła przez przegrodę obliczamy:

$$H_{st} = A \cdot U + \psi \cdot l \tag{9}$$

gdzie:

A – pole przegrody [m^2],
U – współczynnik przenikania ciepła przegrody [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],
ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],
l – długość mostka [m].

Współczynnik przenikania ciepła przegrody (wg PN-EN ISO 6946:2008):

$$U = \frac{1}{R_p} \tag{10}$$

gdzie:

R_p – całkowity opór cieplny przegrody [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$], wyliczono ze standardowej zależności:

$$R_p = \frac{d}{\lambda} \tag{11}$$

gdzie:

d – grubość warstwy materiału [m],
λ – współczynnik przewodzenia cieplnego materiału przegrody [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

Całkowity opór cieplny przegrody obliczono jako sumę oporów przejmowania ciepła z wnętrza bioreaktora do przegrody i z przegrody do otoczenia oraz zsumowanego oporu cieplnego warstw materiałów z których zbudowana jest przegroda. Opór cieplny kilku warstw materiałów przylegających do siebie jest sumą oporów poszczególnych warstw.

$$R_p = R_i + R + R_e \tag{12}$$

gdzie:

R_i – opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej bioreaktora [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$],
R – opór warstw materiału ściany bioreaktora [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$],
R_e – opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej bioreaktora [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$].

$$R = + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \tag{13}$$

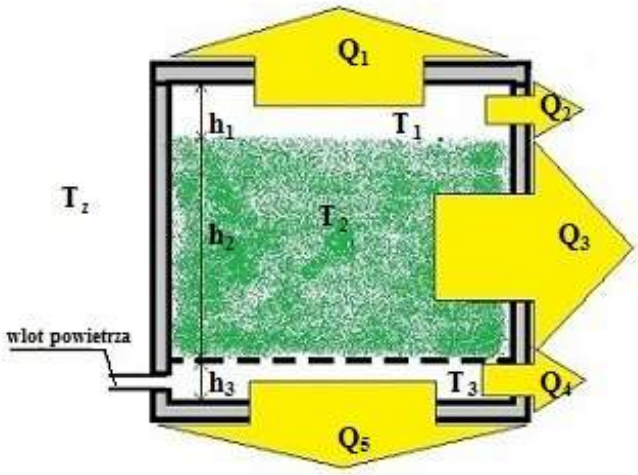
gdzie:

d_1 – grubość warstwy wewnętrznej [m] o współczynniku przewodzenia ciepła λ_1 [W·m^{-1}K^{-1}],

d_2 – grubość warstwy izolacji [m] o współczynniku przewodzenia ciepła λ_2 [W·m^{-1}K^{-1}],

d_3 – grubość warstwy zewnętrznej [m] o współczynniku przewodzenia ciepła λ_3 [W·m^{-1}K^{-1}].

Ze względu na kierunki przepływu ciepła, konstrukcję bioreaktora i położenie złoża kompostu, ciepło przekazywane przez obudowę bioreaktora do otoczenia podzielono na pięć strumieni (rys. 3). Strumień przekazywany przez pokrywę górną oznaczono jako Q_1.



Rys. 3. Oznaczenie strumieni ciepła, temperatur oraz charakterystycznych wielkości niezbędnych przy wyznaczaniu strat energii

Fig. 3. Symbols of the heat streams, temperatures and characteristic sizes indispensable at determining energy looses

Biorąc pod uwagę różnice w oporach przejmowania ciepła wewnątrz bioreaktora dla znanej długości boku (L), określono wysokości determinujące powierzchnię przepływu poszczególnych strumieni przez ściany boczne. Strumieniowi Q_2 opowiada wysokość h_1, strumieniowi Q_3 – wysokość h_2 i wysokość h_3 strumieniowi Q_4. Straty przez dno określono jako Q_5.

Strumień ciepła przekazywany przez pokrywę górną (w czasie t) jest sumą strat ciepła przez powierzchnię płaską (Q_1) i mostek cieplny na styku pokrywy górnej i ściany bocznej obudowy.

$$\begin{aligned} Q_1 &= H_{1T} \cdot (T_1 - T_z) \cdot t \\ &= (A_1 \cdot U_1 + \psi_1 \cdot l_1) \cdot (T_1 - T_z) \cdot t \end{aligned} \tag{14}$$

gdzie:

Q_1 – ciepło strat przez pokrywę górną [J],
H_{1T} – współczynnik strat ciepła pokrywy górnej [W·K^{-1}],
T_1 – temperatura pod pokrywą górną [K],
A_1 – powierzchnia pokrywy górnej równa L^2 [m^2],
U_1 – współczynnik przenikania ciepła przegrody [W·m^{-2}·K^{-1}],
ψ_1 – liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka powstałego na styku pokrywy ze ścianą boczną. Klasa tego mostka – wg PN-EN ISO 14683:2008 to R9, a wartość współczynnika dla wymiarów zewnętrznych (w tym przypadku dla długości boku bioreaktora – L) wynosi –0,05 [W·m^{-1}·K^{-1}],
l_1 – długość mostka cieplnego – w tym przypadku równa 4L [m].

Opór cieplny pokrywy:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{i1} + R + R_{e1} \\ &= 0{,}14 + R \end{aligned} \tag{15}$$

gdzie:

R_1 – całkowity opór cieplny pokrywy bioreaktora [m^2·K·W^{-1}],
R_{i1} – opór przejmowania ciepła powierzchni wewnętrznej pokrywy bioreaktora, wg PN-EN ISO 6946:2008 dla strumienia ciepła skierowanego w górę wynosi 0,10 [m^2·K·W^{-1}],
R_{e1} – opór przejmowania ciepła powierzchni zewnętrznej pokrywy bioreaktora, wg PN-EN ISO 6946:2008 dla strumienia ciepła skierowanego w górę wynosi 0,04 [m^2·K·W^{-1}].

Podstawiając obliczony opór cieplny (15) oraz wartości określające mostek cieplny do równania 14 przyjmie ono postać:

$$Q_1 = \left(\frac{L^2}{R + 0{,}14} - 0{,}05 \cdot L \right) \cdot (T_1 - T_z) t \tag{16}$$

Strumień ciepła przekazywany przez ściany bioreaktora:

$$\begin{aligned} Q_2 &= H_{2T} \cdot (T_1 - T_z) \cdot t \\ &= (A_2 \cdot U_2 + \psi_2 \cdot l_2) \cdot (T_1 - T_z) \cdot t \end{aligned} \tag{17}$$

gdzie:

H_{2T} – współczynnik strat ciepła przez powierzchnię A_2 [W·K^{-1}],
A_2 – powierzchnia ścian bocznych dla strat ciepła Q_2 równa $4 \cdot h_1 \cdot L$ [m^2],
U_2 – współczynnik przenikania ciepła przegrody A_2 [W·m^{-2}·K^{-1}],
ψ_2 – liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka powstałego na styku pokrywy ze ścianą boczną. Klasa tego mostka – wg PN-EN ISO

14683:2008 to C2, a wartość współczynnika dla wymiarów zewnętrznych (w tym przypadku dla długości boku bioreaktora – L) wynosi –0,10 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

l_2 – długość mostka cieplnego – w tym przypadku równa $4 \cdot h_1$ [m].

Współczynnik przenikania przegrody dla Q_2:

$$U_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{i2} + R + R_{e2}} = \frac{1}{0{,}13 + R + 0{,}04} = \frac{1}{R + 0{,}17} \tag{18}$$

gdzie:

R_{i2} – opór przejmowania ciepła powierzchni wewnętrznej pokrywy bioreaktora, wg PN-EN ISO 6946:2008 dla poziomego strumienia ciepła wynosi 0,13 [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$],

R_{e2} – opór przejmowania ciepła powierzchni zewnętrznej pokrywy bioreaktora, wg PN-EN ISO 6946:2008 dla poziomego strumienia ciepła wynosi 0,04 [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$],

Po odstawieniu odpowiednich wielkości do równania 17 i pomnożeniu stałych otrzymujemy:

$$Q_2 = \left(\frac{4 \cdot h_1 \cdot L}{R + 0{,}17} - 0{,}4 \cdot h_1 \right) \cdot (T_1 - T_z) t \tag{19}$$

Straty Q_3 obliczamy uwzględniając taki sam mostek cieplny, lecz pomijamy opór przejmowania ciepła powierzchni wewnętrznej ze względu na styk materiału kompostowanego ze ścianą wewnętrzną (w założeniu zachodzi tu zjawisko przewodzenia), natomiast opór przejmowania ciepła powierzchni zewnętrznej jest ten sam:

$$\begin{aligned} Q_3 &= H_{3T} \cdot (T_2 - T_z) \cdot t \\ &= (A_3 \cdot U_3 + \psi_2 \cdot l_3) \cdot (T_2 - T_z) \cdot t \end{aligned} \tag{20}$$

gdzie:

H_{3T} – współczynnik strat ciepła przez powierzchnię A_3 [$W \cdot K^{-1}$],

A_3 – powierzchnia ścian bocznych dla strat ciepła Q_3 równa $4 \cdot h_1 \cdot L$ [m^2],

U_3 – współczynnik przenikania ciepła przegrody A_2 [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

l_2 – długość mostka cieplnego – w tym przypadku równa $4 \cdot h_2$ [m],

T_2 – temperatura kompostu [ºC].

Współczynnik przenikania przegrody dla Q_3:

$$U_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R + R_{e2}} = \frac{1}{R + 0{,}04} \tag{21}$$

Po podstawieniu odpowiednich wielkości do równania 20 otrzymujemy:

$$Q_3 = \left(\frac{4 \cdot h_2 \cdot L}{R + 0{,}04} - 0{,}4 \cdot h_2 \right) \cdot (T_2 - T_z) t \tag{22}$$

Ponieważ temperatura nad dnem bioreaktora $T_3 \approx T_z$ ze względu na wtłaczane powietrze, strumienie Q_4 i Q_5 można pominąć.

Wobec powyższego całkowite ciepło tracone przez obudowę bioreaktora Q_s :

$$Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{23}$$

Podsumowanie

Metodyka została opracowana w celu możliwości oszacowania ilości ciepła jaką można odebrać w procesie kompostowania odpadów biologicznych. Głównym jej celem jest dostarczenie informacji niezbędnych do projektowania urządzeń umożliwiających odprowadzenie nadmiaru ciepła bez szkodliwego wpływu na przebieg procesu kompostowania i zarazem na jakość produktu wyjściowego jakim jest humus. Ponadto o jej uniwersalności świadczy możliwość zastosowania zarówno do bioreaktorów laboratoryjnych jak i kontenerowych systemów kompostowania.

Bibliografia

Dach J., Jędruś A., Kin K., Zbytek Z. (2004): Wpływ intensywności napowietrzania na przebieg procesu kompostowania obornika w bioreaktorze. Journal of Research and Applications in Agricultural Eng., 49 (1), 40-43.

Dach J., Niżewski P., Jędruś A., Boniecki P. (2007): Badania wpływu aeracji na dynamikę procesu kompostowania osadów ściekowych w bioreaktorze. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 52(1), 68-72.

Dach J., Sęk T. (1996): Perspektywy i możliwości wdrożenia w gospodarstwach Technologii produkcji kompostu z obornika. Postępy Nauk Rolniczych, 5, 91-102.

Ekinci, K., Keener, H.M., Akbolat, D. (2006): Effects of feedstock, airflow rate, and recirculation ratio on performance of composting systems with air recirculation. Bioresource Technology, 97(7), 922-932.

Fernández, F.J., Sánchez-Arias, V., Rodríguez, L., Villaseñor, J. (2010): Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste and winery waste in a rotary drum reactor. Waste Management, 30, 1948-1956.

Finstein M.S., Morris M.L. (1975): Microbiology of municipal solid waste composting. Advan. Appl. Microbiol., 19, 113-151.

Kaiser, J. (1996): Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach. Ecological Modelling, 91(1-3), 25-37.

Lu, Y., Wu, X., Guo, J. (2009): Characteristics of municipal solid waste and sewage sludge cocomposting. Waste Management, 29, 1152-1157.

Macgregor S.T., Miller F.C., Psarianos K.M., Finstein M.S. (1981): Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. Appl. Environ. Microbiol., 41, 1321-1330.

Miyatake, F., Iwabuchi, K. (2006): Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganism in dairy cattle manure. Bioresource Technology, 97, 961-965.

Mudhoo, A., Mohee, R. (2006): Sensitivity analysis and parameter optimization of a heat loss model for a composting system. Journal of Environmental Informatics, 8(2), 100-110.

Mudhoo, A., Mohee, R. (2008): Modeling heat loss during self-heating composting based on combined fluid film theory and boundary layer concepts. Journal of Environmental informatics, 11(2), 74-89.

Nakayama, A., Nakasaki, K., Kuwahara, F., Sano, Y. (2007). A lumped parameter heat transfer analysis for composting processes with aeration. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme, 129(7), 902-906.

Petric, I., Selimbasic, V. 2008. Development and validation of mathematical model for aerobic composting process. Chemical Engineering Journal, 139(2), 304-317.

Rothbaum H.P. (1961): Heat output of thermophiles occurring on wool. J. Bacteriology, 81, 165-171.

Sołowiej P. (2007): Przykład wykorzystania pryzmy kompostu jako niskotemperaturowego źródła ciepła. Inżynieria Rolnicza, 8(96), 247-253.

Strom P.F. (1978): The thermophilic bacterial populations of refuse composting as affected by temperature Ph.D. Thesis. Rutgers University, New Brunswick, NJ.

Wiley J.S. III. (1957): Progress report of high rate composting studies. Proc. Ind. Waste Conf., 12, 596-603.

„Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2013 jako projekt badawczy N N313 036136”

METHODOLOGY OF DETERMINATION OF LOSSES AND THE AMOUNT OF THE PRODUCED HEAT IN THE PROCESS OF BIOLOGICAL WASTE COMPOSTING

Abstract. Composting is a biological process in which in the thermophilic phase considerable amounts of heat are released. Methodology of calculating the amount of heat produced in the process of biological waste composting in isolated, aerated bioreactors was presented in the paper. Special consideration was placed on the method of calculation of heat losses through a bioreactor casing. The methodology was developed based on popular dependencies and the Polish norms. Moreover, the concept of excess heat recovery from composting waste was presented. The main purpose of the developed methodology is supply of information indispensable for designing devices which make heat removal from the composted heap possible without harmful impact on the course of the process and the quality of the final product that is humus. Properly selected method of heat receipt from the compost heap may be a factor which maintains the bed temperature at the optimal level and may contribute to lengthening the thermophilic phase and the same to shorten the time of the process.

Key words: composting, waste treatment, heat recovery,

Adres do korespondencji:
Piotr Sołowiej; e-mail: pit@uwm.edu.pl
Katedra Elektrotechniki Energetyki Elektroniki i Automatyki
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
ul. Oczapowskiego 11
10-756 Olsztyn