

Krystyna MALIŃSKA

Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa
email: kmalinska@is.pcz.czyst.pl

Zmiany właściwości fizycznych materiałów podczas kompostowania w warunkach laboratoryjnych

Znajomość właściwości fizycznych materiałów przeznaczonych do kompostowania - takich jak: zawartość wody, wielkość cząstek, gęstość nasypowa, porowatość i przepuszczalność powietrzna oraz wytrzymałość mechaniczna - jest niezbędna na każdym etapie kompostowania. Właściwości fizyczne różnią się ze względu na rodzaj materiałów i ich udział w mieszance kompostowej. Na etapie przygotowania mieszanek kompostowych istotną rolę odgrywa zawartość wody, gęstość nasypowa, wielkość cząstek i wytrzymałość mechaniczna. Wpływają one bezpośrednio na porowatość i przepuszczalność powietrzną i ich zmianę wraz z głębokością przyzmy kompostowej, a tym samym warunkują procesy wymiany gazowej i ciepła podczas procesu kompostowania. Kompostowanie jest procesem dynamicznym, podczas którego zachodzą różnego rodzaju zmiany o charakterze biochemicznym. Zmiany dotyczą również właściwości fizycznych kompostowanych materiałów. Na skutek biodegradacji materii organicznej zawartej w materiałach przeznaczonych do kompostowania dochodzi do zmniejszenia rozmiaru cząstek, zwiększenia zawartości wody i gęstości nasypowej, a tym samym redukcji porowatości i przepuszczalności powietrznej. Literatura podaje niewiele przykładów prac badawczych, które szczegółowo opisują zmiany właściwości fizycznych podczas kompostowania. Celem prezentowanych badań była analiza zmian zawartości wody, gęstości nasypowej, wytrzymałości mechanicznej, porowatości i przepuszczalności powietrznej dla mieszanki wyłoków jabłkowych i ścinek drzewnych WJ:SD w stosunku wagowym 1:1 (s.m.), zawartości wody ok. 65% i porowatości powietrznej ok. 30 i 45% poddanej kompostowaniu w reaktorach laboratoryjnych przez okres 3 tygodni. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla badanej mieszanki początkowe wartości wytrzymałości mechanicznej, gęstości nasypowej, porowatości i przepuszczalności powietrznej zależały w dużej mierze od zawartości wody. Po zakończeniu kompostowania zmianom uległy wszystkie badane właściwości fizyczne. W przypadku porowatości i przepuszczalności powietrznej stwierdzono ich wzrost, który mógł być spowodowany rodzajem i udziałem materiałów w mieszance kompostowej. Łatwo biodegradowalne wyłoki jabłkowe o wysokiej zawartości wody i gęstości nasypowej ulegały rozkładowi szybciej, podczas gdy ścinki drzewne o niskiej podatności na biodegradację i znacznie niższej gęstości nasypowej ulegały rozkładowi znacznie wolniej. W rezultacie nastąpił spadek gęstości nasypowej mieszanki i wzrost porowatości oraz przepuszczalności powietrznej. Wytrzymałość mechaniczna badanej mieszanki wzrosła prawie dwukrotnie i mogła być uzależniona od końcowej zawartości wody, substancji organicznej i rozmiaru cząstek.

Słowa kluczowe: materiały i mieszanki przeznaczone do kompostowania, gęstość nasypowa, wytrzymałość mechaniczna, porowatość i przepuszczalność powietrzna, kompostowanie

Wprowadzenie

Zagospodarowanie odpadów biodegradowalnych na drodze kompostowania wymaga odpowiedniego doboru substratów i dodatków w celu przygotowania mie-

szanek kompostowych o odpowiednich parametrach. Etap przygotowania mieszanek kompostowych uważa się za kluczowy dla przebiegu procesu kompostowania [1, 2]. W celu przygotowania mieszanki o optymalnym składzie niezbędne jest określenie właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych materiałów przeznaczonych do kompostowania. Właściwości fizyczne materiałów przeznaczonych do kompostowania obejmują takie parametry, jak: zawartość wody, gęstość nasypowa, wielkość cząstek, porowatość i przepuszczalność powietrzna oraz własności termiczne, elektryczne, mechaniczne i optyczne [3]. Właściwości fizyczne przetwarzanych odpadów odgrywają istotną rolę na każdym etapie procesu kompostowania. Na etapie doboru substratów i przygotowania mieszanek kompostowych za istotne właściwości fizyczne odpadów biodegradowalnych i materiałów strukturalnych uważa się: zawartość wody, gęstość nasypową, wielkość cząstek oraz wytrzymałość mechaniczną. Na etapie produkcji kompostu najważniejszymi właściwościami fizycznymi odpadów są porowatość i przepuszczalność powietrzna, uwarunkowane zawartością wody, gęstością nasypową, wielkością cząstek oraz wytrzymałością mechaniczną. Natomiast do właściwości fizycznych charakteryzujących końcowy produkt, określanych w normach oraz podyktowanych zastosowaniem, należą zawartość wody, gęstość nasypowa, porowatość, wodochłonność, przewodność właściwa czy temperatura. Znajomość początkowych właściwości fizycznych substratów i mieszanek oraz ich wzajemnych zależności w pryzmie podczas kompostowania pozwala na efektywne projektowanie procesu oraz dobór optymalnych technologii kompostowania [1, 3].

Jednym z najistotniejszych parametrów materiałów przeznaczonych do kompostowania jest zawartość wody. Wpływa ona bezpośrednio na gęstość nasypową, wielkość cząstek oraz wytrzymałość mechaniczną, a w konsekwencji na porowatość i przepuszczalność powietrzną matrycy. Zwiększona zawartość wody w materiale powoduje wzrost masy w danej objętości. Nadmiar wody wypełnia wolne przestrzenie powietrzne, redukując tym samym porowatość powietrzną. W konsekwencji spadek wolnych przestrzeni prowadzi do ograniczenia przepuszczalności powietrznej. Zależność pomiędzy zawartością wody a porowatością i przepuszczalnością powietrzną nie jest do końca wyjaśniona. Ahn i in. podczas laboratoryjnych badań właściwości fizycznych, m.in. kompostu z odpadów ogrodowych, słomy, liści, ścinek drzewnych oraz trocin, zaobserwowali wzrost przepuszczalności powietrznej wraz ze zwiększającą się zawartością wody (w zakresie od 50 do 80% wodochłonności badanych materiałów) do głębokości nawet ok. 2 m dla modelowej pryzmy o wysokości 3 m. Postulują oni, że zawartość wody bliska całkowitej saturacji przestrzeni powietrznych może powodować agregację cząstek, prowadząc do zwiększania się porowatości oraz przepuszczalności powietrznej [4]. Woda ma również wpływ na wytrzymałość mechaniczną materiałów kompostowych. Wzrost zawartości wody powoduje, że materiały stają się bardziej plastyczne i podatne na kompaktację [5]. Ze zwiększającą się zawartością wody wytrzymałość mechaniczna maleje, powodując wzrost gęstości nasypowej pod ciężarem materiału w pryzmie, a w konsekwencji redukcję porowatości i przepuszczalności powietrznej. Jest istot-

nym parametrem w doborze materiałów strukturotwórczych oraz projektowaniu wymiarów pryzmy i zmian właściwości wraz z jej głębokością [6-8].

Gęstość nasypowa materiałów, a w konsekwencji porowatość i przepuszczalność powietrzna, jest również uzależniona od kompaktacji. Kompaktacja jest spowodowana wzrostem naprężeń pionowych warstw materiału wraz z głębokością pryzmy. Prowadzi do zwiększenia gęstości nasypowej oraz redukcji porowatości i przepuszczalności powietrznej w pryzmie. Materiały o niskiej wytrzymałości mechanicznej są podatne na kompaktację w pryzmie. Należy podkreślić, że w badaniach nad procesem kompostowania w warunkach laboratoryjnych efekt kompaktacji i zmian porowatości i przepuszczalności materiałów wraz z głębokością pryzmy jest często pomijany [9, 10].

Bezpośrednio na porowatość i przepuszczalność materiałów ma wpływ rozmiar i kształt cząstek. Cząstki o regularnych kształtach z przewagą cząstek drobnych wypełniają wolne przestrzenie, zmniejszając porowatość powietrzną i ograniczając przepuszczalność. Natomiast cząstki o zróżnicowanej wielkości i kształtach zmniejszają gęstość nasypową, a w konsekwencji zwiększają porowatość i przepuszczalność powietrzną [11, 12].

Znajomość zależności pomiędzy właściwościami fizycznymi i ich wpływu na biodegradację pozwala na zapewnienie optymalnych warunków podczas procesu kompostowania poprzez dobór odpowiednich substratów, projektowanie wymiarów pryzm i częstotliwości ich przerzucania oraz wybór systemów napowietrzających. Czynniki te w dużym stopniu decydują o kosztach i czasie trwania procesu oraz jakości końcowego produktu.

Kompostowanie jest procesem dynamicznym, w którym następuje szereg zmian biochemicznych. W konsekwencji również i właściwości fizyczne kompostowych materiałów ulegają zmianie. Rozkład materii prowadzi do wytworzenia ciepła i wzrostu temperatury, a tym samym do przyspieszenia reakcji biodegradacji. Podczas biodegradacji następuje zmniejszenie rozmiaru cząstek, zwiększenie zawartości wody i gęstości nasypowej, a w konsekwencji zmniejszenie porowatości i przepuszczalności powietrznej [6, 13]. W dostępnej literaturze istnieje niewiele prac, które szczegółowo opisują zmiany właściwości fizycznych podczas kompostowania.

Celem artykułu jest analiza zmian właściwości fizycznych, tj. zawartości wody, gęstości nasypowej, wytrzymałości mechanicznej, porowatości i przepuszczalności powietrznej, wybranej mieszanki wyłoków jabłkowych i ścinek drzewnych podczas kompostowania w warunkach laboratoryjnych, będących symulacją kompostowania w pryzmach z wymuszonym napowietrzaniem.

1. Materiały i metodyka

1.1. Materiały

Materiał badawczy stanowiła mieszanka wyłoków jabłkowych (WJ) i ścinek drzewnych (SD) jako materiału strukturotwórczego w stosunku wagowym 1:1

(sucha masa), co odpowiadało stosunkowi objętościowemu 1:0,6. W oparciu o przeprowadzoną symulację zmian porowatości powietrznej w pryzmie o wysokości 2 m taki udział materiału strukturotwórczego zapewniał porowatość powietrzną w zakresie ok. 48÷30% w całym profilu pryzmy. Za wartość zbliżoną do minimalnej wielu badaczy przyjmuje porowatość powietrzną ok. 30% [14-16].

1.2. Stanowiska badawcze

Stanowisko do badań zmian gęstości nasypowej i przepuszczalności powietrznej w zakresie zmiennego obciążenia przedstawiono w literaturze [9]. Stanowisko do kompostowania składało się z izolowanych reaktorów (o pojemności ok. 20 dm³), umieszczonych w drewnianym boksie z zamknięciem, jednostki osuszającej powietrze wychodzące z reaktorów, siłownika elektrycznego, analizatorów gazów O₂ i CO₂, elektronicznego systemu pomiaru temperatury wewnątrz reaktorów oraz regulatorów przepływu. Reaktory zostały również przystosowane do pomiaru spadku ciśnienia w złożu materiału oraz zmiany gęstości nasypowej w badanych warunkach obciążenia.

1.3. Metodyka

Dla mieszanek kompostowych wyznaczono: zawartość wody i substancji organicznej, pH, gęstość nasypową, wytrzymałość mechaniczną, porowatość i przepuszczalność powietrzną. Zawartość wody wyznaczono metodą suszarkową, a zawartość substancji organicznej na podstawie strat po prażeniu w temperaturze 550°C. Metodykę pomiaru gęstości nasypowej, wytrzymałości mechanicznej porowatości i przepuszczalności powietrznej dla materiałów przeznaczonych do kompostowania szczegółowo podano w literaturze [9, 17-19].

Gęstość nasypową określono jako całkowitą masę materiału w znanej objętości [1, 20] zgodnie z wzorem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

gdzie:

ρ - gęstość nasypowa, kg/m³,
 m - masa ogółem materiału, kg,
 V - objętość materiału, m³.

Wytrzymałość mechaniczna została wyznaczona na podstawie gęstości nasypowej w warunkach naprężenia w zakresie 0÷24626 N/m² z wzoru [6, 8]:

$$\rho_{\sigma} = \rho_{\max} - (\rho_{\max} - \rho_0) \cdot \exp\left(\frac{-\sigma}{WM}\right) \quad (2)$$

gdzie:

ρ_{σ} - gęstość nasypowa przy znanej wartości naprężenia, kg/m³,
 ρ_{\max} - maksymalna gęstość nasypowa, kg/m³,

ρ_0 - minimalna gęstość nasypowa, kg/m^3 ,

σ - naprężenie pionowe, N/m^2 ,

WM - wytrzymałość mechaniczna, N/m^2 .

Na podstawie pomiarów gęstości nasypowej, suchej masy, zawartości substancji organicznej oraz wyznaczonych eksperymentalnie wartości gęstości właściwej wody, frakcji organicznej oraz nieorganicznej obliczono porowatość powietrzną z wzoru [6, 8]:

$$n = 1 - \rho \cdot \left(\frac{(1 - SM)}{\rho_w} + \frac{SM \cdot SO}{\rho_{so}} + \frac{SM \cdot (1 - SO)}{\rho_p} \right) \quad (3)$$

gdzie:

n - porowatość powietrzną, m^3/m^3 ,

ρ - całkowita gęstość nasypowa, kg/m^3 ,

SM - sucha masa, g/g,

SO - substancja organiczna, g/g,

ρ_w - gęstość właściwa wody (1000 kg/m^3),

ρ_{so} - gęstość właściwa substancji organicznej (2500 kg/m^3),

ρ_p - gęstość właściwa substancji nieorganicznej (1600 kg/m^3).

Przepuszczalność powietrzną na podstawie pomiaru ciśnienia przy prędkości przepływu powietrza w zakresie $0,0003 \div 0,06 \text{ m/s}$ obliczono z wzoru [4, 8, 9]:

$$\kappa = \frac{v\mu}{\frac{dP}{dx}} \quad (4)$$

gdzie:

κ - współczynnik przepuszczalności, m^2 ,

v - średnia prędkość liniowa przepływu powietrza, m/s ,

μ - lepkość dynamiczna powietrza (np. dla 30°C - $0,00000185 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$),

$\frac{dP}{dx}$ - gradient ciśnienia, Pa/m .

Przebieg procesu kompostowania w warunkach laboratoryjnych był monitorowany w oparciu o codzienny pomiar stężenia tlenu i dwutlenku węgla w wchodzącym i wychodzącym z reaktorów powietrzu, temperatury oraz zawartości wody i substancji organicznej w próbkach pobieranych podczas cotygodniowego mieszania kompostowanego materiału. Szybkość zużycia tlenu O_2 określono na podstawie pomiarów stężenia tlenu w powietrzu wchodzącym i wychodzącym i obliczono z wzoru [21]:

$$\text{O}_2 = ([\text{O}_2]_1 - [\text{O}_2]_2) \cdot \frac{A \cdot B(\text{O}_2)}{SO_0} \quad (5)$$

gdzie:

O_2 - szybkość zużycia O_2 , g O_2 /kg $SO \cdot d$,

$[O_2]_1$, $[O_2]_2$ - stężenie O_2 odpowiednio we wchodzącym i wychodzącym powietrzu, % v/v,

SO_0 - początkowa masa substancji organicznej, kg/kg suchej masy,

A - liniowa prędkość przepływu powietrza, dm^3/min ,

B (O_2) - współczynnik przeliczeniowy ($19,10 \text{ g } O_2 \cdot min/dm^3 \cdot d \cdot \%$).

Gęstość nasypową, porowatość i przepuszczalność powietrzną badanej mieszanki kompostowej wyznaczano podczas cotygodniowego mieszania materiału w reaktorach, a wytrzymałość mechaniczną po zakończeniu procesu.

2. Wyniki i dyskusja

2.1. Charakterystyka substratów i mieszanek kompostowych

Wytłoki jabłkowe stanowiły niejednorodną mieszaninę pozostałości po tłoczeniu jabłek na sok zawierającą pulpę, ogryzki, skórki itp., a ich struktura charakteryzowała się dużą plastycznością. Z uwagi na wysoką zawartość wody (ok. 78%) wytłoki jabłkowe cechowała duża gęstość nasypowa, wynosząca średnio 709 kg/m^3 , oraz porowatość powietrzna ok. 40%. Ścinki drzewne o średniej długości cząstek ok. 10,1 mm charakteryzowały się znacznie niższą zawartością wody (ok. 10%). Ich gęstość nasypowa wynosiła ok. 305 kg/m^3 , a porowatość powietrzna ok. 72%. Są to typowe wartości parametrów wyznaczanych metodami laboratoryjnymi dla materiałów strukturotwórczych stosowanych w kompostowaniu [10, 17, 22, 23]. Stosunek C/N dla wytłoków jabłkowych wynosił 46,6:1, a dla ścinek drzewnych 133,3:1. Wytłoki jabłkowe charakteryzowały się $pH = 3,7$, a ścinki drzewne $pH = 4,8$. Charakterystyka mieszanki kompostowej przedstawiona została w tabeli 1. Z uwagi na różnice w zawartości wody oraz gęstości nasypowej mieszanek potraktowano je indywidualnie, a nie jako powtórzenia.

Tabela 1. Początkowe właściwości mieszanki kompostowej WJ:SD 1:1 o zawartości wody ok. 65%

Table 1. Physical properties of the AP:WC composting mixture at the ratio of 1:1 after compaction was applied

ZW %			SO %	WM N/m^2	ρ_0 kg/m^3	n %	κ m^2
docelowa	nr reaktora	rzeczywista					
65	1	64,9±2,8	97,9±0,2	29 092	584	49,4	1,54E-07
	2	63,7±2,7	97,9±0,5	35 243	595	48,7	1,30E-07
	3	65,1±1,7	97,9±0,1	28 726	602	47,8	1,93E-07
	4	67,5±1,6	97,6±0,5	19 904	618	45,9	1,82E-07
	5	64,7±4,2	97,5±0,4	30 294	613	46,9	1,16E-07

ZW - zawartość wody, SO - substancja organiczna, WM - wytrzymałość mechaniczna, ρ_0 - początkowa gęstość nasypowa, n - porowatość powietrzna, κ - przepuszczalność powietrzna

W celu uzyskania porowatości powietrznej mieszanek kompostowych ok. 30 i 45% (wartości odpowiadające głębokości pryzmy, tj. ok. 0,4 i 1,9 m) zastosowano odpowiednio naprężenie pionowe $\sigma = 2835 \text{ N/m}^2$ oraz $\sigma = 10\,753 \text{ N/m}^2$. W tabeli 1 przedstawiono początkowe właściwości fizyczne mieszanki WJ:SD 1:1 o docelowej zawartości wody zbliżonej do 65% i porowatości powietrznej ok. 30 i 45%. Tabela 2 przedstawia właściwości mieszanki kompostowej o dostosowanych zakresach porowatości powietrznej. Z uwagi na różnice w zawartości wody i porowatości powietrznej wyniki kompostowania w reaktorach potraktowano indywidualnie.

Tabela 2. Właściwości fizyczne mieszanki kompostowej WJ:SD 1:1 po zastosowaniu kompaktacji
Table 2. Physical properties of the AP:WC composting mixture at the ratio of 1:1 after compaction was applied

ZW %			σ N/m ²	ρ kg/m ³	n %	κ m ²
docelowa	nr reaktora	rzeczywista				
65	1	64,9±2,8	2834	636	44,5	1,20E-07
	2	63,7±2,7	2834	660	43,1	9,93E-08
	3	65,1±1,7	2834	672	41,8	1,34E-07
	4	67,5±1,6	10 753	789	30,8	3,79E-08
	5	64,7±4,2	10 753	806	30,2	3,22E-08

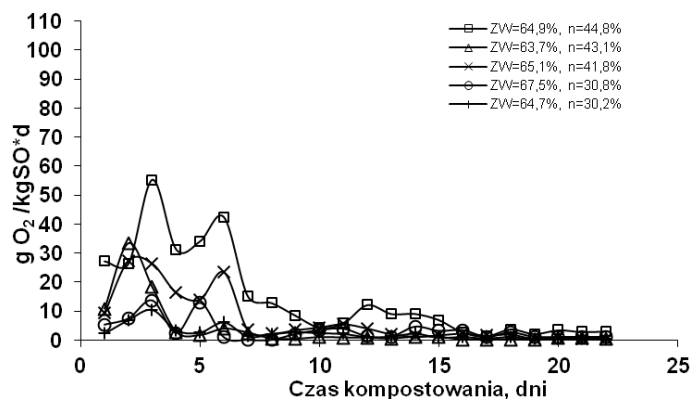
Po zastosowaniu naprężenia $\sigma = 2835 \text{ N/m}^2$ gęstość nasypowa zwiększyła się do ok. 636÷671 kg/m³, a porowatość powietrzna wyniosła ok. 44÷41%, natomiast przy naprężeniu $\sigma = 10\,753 \text{ N/m}^2$ gęstość nasypowa wzrosła do ok. 775÷806 kg/m³, a porowatość zmalała do ok. 30%. Pod wpływem kompaktacji przepuszczalność powietrzna uległa znacznemu obniżeniu i dla porowatości ok. 44÷41% wynosiła 9,93E-08÷1,20E-07 m², a dla ok. 30% wynosiła 3,33E-08÷4,34E-08 m². Ahn i in. również zaobserwowali spadek porowatości i przepuszczalności powietrznej wraz ze wzrastającą kompaktacją w pryzmie o wysokości 3 m zbudowanej z materiałów strukturotwórczych (tj. z liści, trocin, słomy itp.) [17].

2.2. Przebieg procesu kompostowania w systemie reaktorów laboratoryjnych

W procesie kompostowania dla mieszanki wytlóków jabłkowych i ścinek drzewnych WJ:SD 1:1 o zawartości wody 65% oraz porowatości ok. 30 i 45% wyznaczono szybkość zużycia tlenu, zmiany zawartości wody i substancji organicznej oraz temperatury.

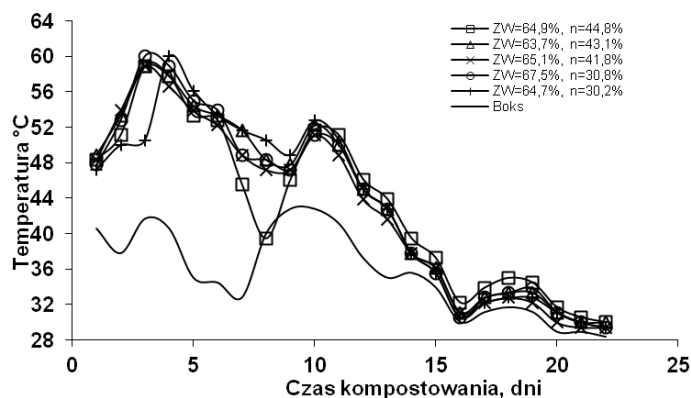
Początkowe właściwości fizyczne badanej mieszanki miały wpływ na szybkość zużycia tlenu. Jednakże bezpośredni wpływ mógł być jedynie określony w pierwszym tygodniu kompostowania, do momentu mieszania i poboru prób materiału. W dalszym etapie kompostowania, pomimo stosowania tych samych obciążeń, właściwości fizyczne, tj. zawartość wody, gęstość nasypowa, porowatość i przepuszczalność powietrzna oraz wytrzymałość mechaniczna, uległy zmianie na skutek

zachodzących procesów rozkładu. Spadek zawartości substancji organicznej podczas kompostowania był niewielki (dla mieszanek o zawartości wody 64,9%, 63,7%, 65,1%, 67,5%, 64,7% zawartość substancji organicznej wynosiła na początku procesu odpowiednio: 97,7%, 97,9%, 97,9%, 97,6%, 97,5%, a na końcu: 96,5%, 97,0%, 97,2%, 97,0%, 96,9%). Najwyższy ubytek, tj. ok. 1,2%, zaobserwowano dla mieszanki o ZW 64,9% i porowatości powietrznej ok. 45%. Rysunek 1 przedstawia szybkość zużycia tlenu podczas trwania procesu kompostowania. Podczas kompostowania mieszanki wyższą szybkość zużycia tlenu zaobserwowano dla porowatości ok. 45%.



Rys. 1. Szybkość zużycia tlenu podczas 3-tygodniowego kompostowania w warunkach laboratoryjnych

Fig. 1. Oxygen consumption rate during 3 week laboratory composting



Rys. 2. Zmiana temperatury podczas 3-tygodniowego kompostowania w warunkach laboratoryjnych

Fig. 2. Temperature during 3 week laboratory composting

W pierwszym tygodniu kompostowania zaobserwowano średni wzrost temperatury we wszystkich reaktorach do ok. 60°C ze średnią temperaturą ok. 50÷53°C (rys. 2).

Nie zaobserwowano znaczących zmian w temperaturze w pierwszym tygodniu z wyjątkiem mieszanki o początkowej zawartości wody 64,7% i porowatości 30,2%. Niższa temperatura mogła być spowodowana mniejszą szybkością biodegradacji na początku procesu. W przypadku wszystkich mieszanek wzrost temperatury zaobserwowano po mieszanii badanego materiału w reaktorach. Veeken i in. badali wpływ przepuszczalności powietrznej w pryzmach z pasywnym napowietrzaniem na temperaturę podczas kompostowania [7]. Na skutek kompaktacji w pryzmie porowatość, a tym samym przepuszczalność powietrzna uległy znacznej redukcji. Badacze stwierdzili, że istnieje wąski zakres przepuszczalności, który pozwoli na jednoczesne osiągnięcie najwyższej szybkości biodegradacji i sanitacji kompostowanego materiału. Zaobserwowali także, że przy przepuszczalności niższej niż $1,5E-08 \text{ m}^2$ temperatura była za wysoka, co prowadziło do zahamowania procesu biodegradacji. Natomiast przepuszczalność wyższa niż $2,5E-08 \text{ m}^2$ nie pozwala osiągnąć wymaganej sanitacji. Z tego względu określenie wpływu przepuszczalności powietrznej na biodegradację podczas kompostowania badanych mieszanek będzie wymagało dalszych badań.

2.3. Zmiana zawartości wody, gęstości nasypowej, wytrzymałości mechanicznej, porowatości i przepuszczalności powietrznej

Podczas 3-tygodniowego procesu kompostowania w reaktorach laboratoryjnych, zaobserwowano zmiany zawartości wody, gęstości nasypowej, porowatości i przepuszczalności powietrznej oraz wytrzymałości mechanicznej. Zmiana zawartości wody w badanych mieszankach podczas kompostowania została przedstawiona w tabeli 3.

Tabela 3. Zawartość wody dla badanej mieszanki kompostowej podczas 3-tygodniowego kompostowania

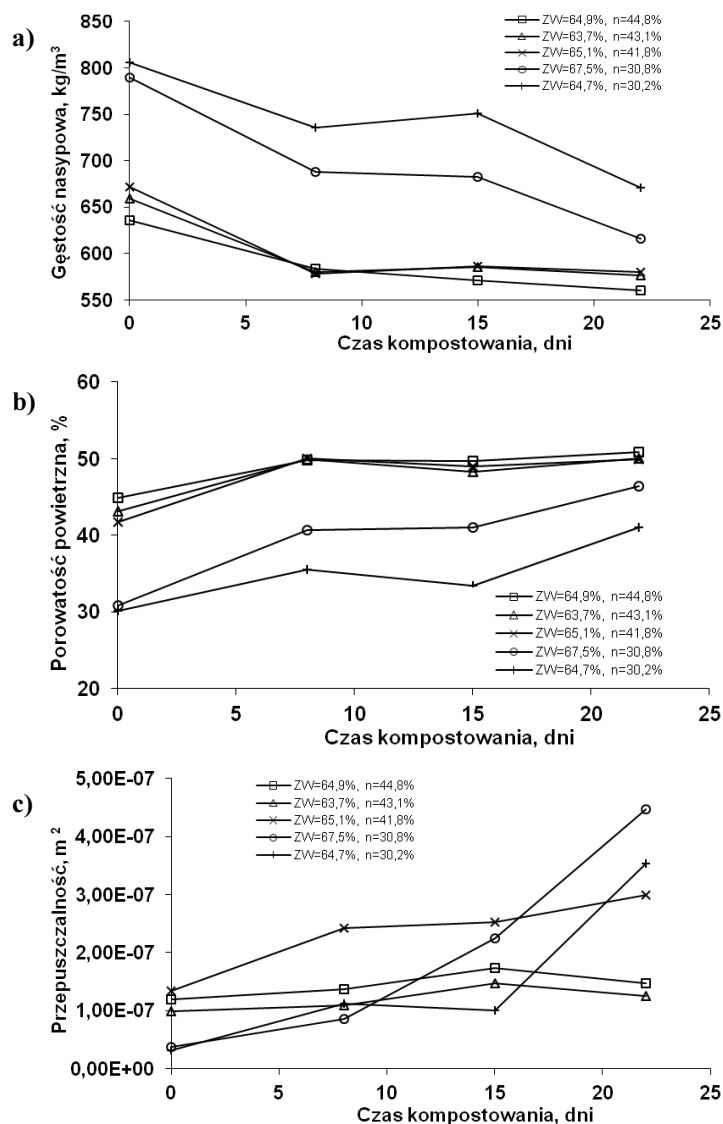
Table 3. Moisture content for the investigated composting mixture during 3 week laboratory composting

		ZW %			
docelowa	nr reaktora	dzień 0	dzień 7	dzień 14	dzień 22
65	1	64,9±2,8	63,3±2,3	68,7±0,8	67,7±1,3
	2	63,7±2,7	63,8±1,7	69,6±1,7	65,1±1,5
	3	65,1±1,7	64,6±1,7	66,2±1,4	64,3±3,3
	4	67,5±1,6	63,6±3,5	64,1±1,6	66,0±1,3
	5	64,7±4,2	67,6±2,1	70,6±2,0	68,2±0,3

Po tygodniu kompostowania, podczas którego zanotowano najwyższą temperaturę, zawartość wody we wszystkich mieszankach uległa niewielkiemu spadkowi (z wyjątkiem mieszanki o początkowej ZW = 64,7%). Może to świadczyć o tym, że ubytek wody zawartej w mieszance nastąpił na skutek intensywnego odparowania wilgoci wskutek wytworzonego ciepła. Natomiast w końcowym etapie procesu

wzrost zawartości wody mógł być spowodowany spadkiem temperatury, a tym samym zmniejszeniem intensywności odparowywania wilgoci.

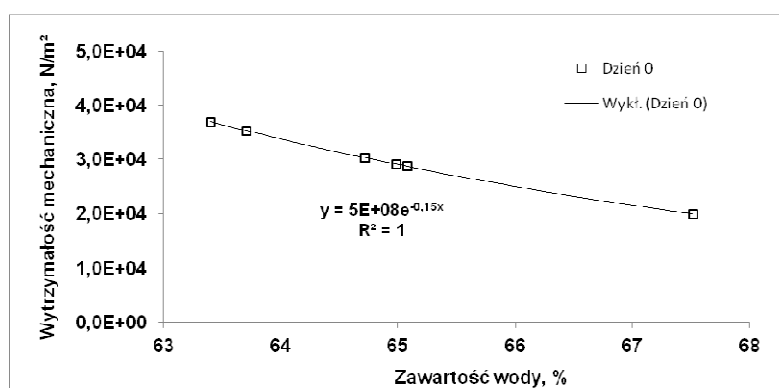
Pomiary gęstości nasypowej i spadku ciśnienia w złożu wykonywano w odstępach cotygodniowych przed mieszaniem materiału i pobieraniem prób. Po zakończonym kompostowaniu wyznaczono również wytrzymałość mechaniczną. We wszystkich mieszankach zaobserwowano ogólny spadek gęstości nasypowej, prowadzący do zwiększenia porowatości i przepuszczalności powietrznej (rys. 3).



Rys. 3. Gęstość nasypowa (a), porowatość powietrzna (b) i przepuszczalność powietrzna (c) podczas 3-tygodniowego procesu kompostowania w warunkach laboratoryjnych

Fig. 3. Bulk density (a), air-filled porosity (b) and air-permeability (c) during 3 week laboratory composting

Z uwagi na zachodzące procesy biochemiczne również i właściwości fizyczne, takie jak: gęstość nasypowa, porowatość i przepuszczalność powietrzna oraz wytrzymałość mechaniczna, ulegają zmianom. Zaobserwowane zmiany gęstości nasypowej, porowatości i przepuszczalności powietrznej podczas kompostowania mogły być uzależnione od składu mieszanki WJ:SD 1:1. Podczas kompostowania łatwobiodegradowalne wytloki jabłkowe o dużej gęstości nasypowej ulegały rozkładowi. Natomiast odporne na biodegradację ścinki drzewne, o znacznie niższej gęstości nasypowej, nie ulegały rozkładowi tak łatwo, powodując spadek gęstości nasypowej mieszanki, a w konsekwencji wzrost porowatości i przepuszczalności powietrznej. Tendencja tych zmian była odmienna od opisanej przez Veekena i in., którzy po 3 tygodniach kompostowania mieszanki odpadów zielonych, obornika i odpadów przetwórstwa żywności w pryzmach zaobserwowali wzrost gęstości nasypowej i niewielki spadek wytrzymałości mechanicznej [7]. Mohee i Mudhoo podczas trwającego 36 dni kompostowania mieszaniny ścierek drzewnych, obornika kurzego i zmieszanych warzyw w reaktorze obrotowym zaobserwowali spadek porowatości powietrznej z 76,3 do 40,0% oraz wzrost gęstości nasypowej z 255 do 628 kg/m³ [13]. Wytrzymałość mechaniczna w przypadku badanej mieszanki wytlóków jabłkowych i ścierek drzewnych mogła być uzależniona w dużej mierze od zawartości wody w materiale, substancji organicznej i wielkości cząstek.



Rys. 4. Początkowa wytrzymałość mechaniczna mieszanki kompostowej WJ:SD 1:1 o różnej zawartości wody

Fig. 4. Initial mechanical strength of the AP:WC composting mixture at the ratio of 1:1 and different moisture contents

Początkowe wartości wytrzymałości mechanicznej (rys. 4) wskazywały na spadek wytrzymałości badanych mieszanek z 35 243 N/m² dla zawartości wody 63,7% do 19 904 N/m² dla 67,5%. Zależność wytrzymałości mechanicznej od zawartości wody zaobserwowali inni badacze [9, 17]. Wytrzymałość mechaniczna słomy zbożowej o różnej zawartości wody, tj. 20, 50 i 80% wodochłonności, wynosiła odpowiednio 206 437, 61 575 i 13 644 N/m² [17]. Natomiast po 3 tygodniach kompostowania wytrzymałość mechaniczna wzrosła prawie 2-krotnie w porównaniu do początkowych wartości (tab. 4).

Tabela 4. Wytrzymałość mechaniczna mieszanki kompostowej WJ:SD 1:1 przed i po kompostowaniu w warunkach laboratoryjnych

Table 4. Mechanical strength of the AP:WC composting mixture before and after laboratory composting

		ZW %	WM N/m ²	ZW %	WM N/m ²
docelowa	nr reaktora	początkowe		końcowe	
65	1	64,9±2,8	29 092	67,7±1,3	45 754
	2	63,7±2,7	35 243	65,1±1,4	67 984
	3	65,1±1,7	28 726	64,3±3,3	67 106
	4	67,5±1,6	19 904	66,0±1,3	45 962
	5	64,7±4,2	30 294	68,2±0,3	40 775

Wpływ zawartości wody na wytrzymałość mechaniczną przekompostowanego materiału był również wyraźnie widoczny. W mieszance o najniższej zawartości wody 63,7% wytrzymałość mechaniczna wyznaczona laboratoryjnie wyniosła 67 106 N/m², a dla najwyższej badanej zawartości wody 68,2% była niższa i wynosiła 40 775 N/m². Na jej wartość mogła również wpływać zawartość substancji organicznej oraz wielkość cząstek.

Podsumowanie

Znajomość właściwości fizycznych materiałów przeznaczonych do kompostowania oraz zależności pomiędzy nimi są ważne na każdym etapie procesu kompostowania. Na etapie wyboru substratów i przygotowania mieszanek kompostowych istotne są zawartość wody, gęstość nasypowa, wielkość cząstek, a także wytrzymałość mechaniczna. Właściwości te wpływają na porowatość i przepuszczalność powietrzną w profilu pryzm kompostowych, tym samym wpływając na procesy wymiany gazowej i ciepła, warunkując przebieg procesu i jakość końcowego produktu. Początkowe wartości zawartości wody, gęstości nasypowej, porowatości i przepuszczalności powietrznej oraz wytrzymałości mechanicznej badanej mieszanki kompostowej uległy zmianie podczas 3-tygodniowego kompostowania w reaktorach laboratoryjnych. Zaobserwowano spadek gęstości nasypowej, a tym samym wzrost porowatości i przepuszczalności powietrznej po zakończeniu procesu kompostowania. Wytrzymałość mechaniczna badanej mieszanki zależała od zawartości wody zarówno na początku, jak i po zakończeniu kompostowania. Przedstawiona metodyka badań własności fizycznych materiałów przeznaczonych do kompostowania pozwala na określenie początkowych własności, takich jak gęstość nasypowa, porowatość i przepuszczalność powietrzna oraz wytrzymałość mechaniczna, oraz analizę ich zmian podczas przebiegu procesu kompostowania.

Literatura

- [1] Haug R., *Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers, Boca Raton 1993.
- [2] Epstein E., *Industrial composting. Environmental Engineering and Facilities Management*, Taylor and Francis LLC, 2011.
- [3] Agnew J.M., Leonard J.J., The physical properties of compost, *Compost Science & Utilization* 2003, 11(3), 238-264.
- [4] Ahn H.K., Richard T.L., Glanville T.D., Hamron J.D., Reynolds D.L., Laboratory determination of compost physical modeling parameters. ASAE paper no. 044060, ASAE Annual Meeting 2004, USA.
- [5] Das K.C., Keener H.M., Moisture effect on compaction and permeability in composts, *Journal of Environmental Engineering* 1997, 123(3), 1-7.
- [6] Van Ginkel J.T., Raats P.A.C., Van Haneghem I.A., Bulk density and porosity distributions in a compost pile, *Netherlands Journal of Agricultural Science* 1999, 47, 105-121.
- [7] Veeken A., Timmermans J., Szanto G., Hamelers B. Design of passively aerated compost systems on basis of compaction-porosity-permeability data, *Organic Recovery and Biological Treatment, Proceedings of 4th International Conference: Advances for a Sustainable Society*, Australia, 2003, 85-98.
- [8] Richard T.L., Veeken A., de Wilde V., Hamelers H.V.M., Air-filled porosity and permeability relationships during solid-state fermentation, *Biotechnology Progress* 2004, 20, 1372-1381.
- [9] Malińska K., Richard T.L., The effect of moisture content, bulking agent ratio and compaction on permeability and air-filled porosity in composting matrices, [in:] *ORBIT 2006: Biological Waste Management - From Local to Global. Proceedings of the International Conference ORBIT 2006*, eds. E. Kraft, W. Bidlingmaier., M. De Bertoldi, L.F. Diaz, J. Barth, ORBIT e.V., Weimar 2006, 181-190.
- [10] Huet J., Druilhe C., Trémier A., Benoist J.C., Debenest G., The impact of compaction, moisture content, particle size and type of bulking agent on initial physical properties of sludge-bulking agent mixtures before composting, *Bioresource Technology* 2012, 114, 428-436.
- [11] Bear J., *Dynamic of fluids in porous media*, Dover Publications, Inc., New York 1988.
- [12] Richard T.L., *Aerobic bioprocess concepts. Euro Summer School - Biotechnology in organic waste management: from solid waste disposal to resource recovery*, Wageningen University, the Netherlands, 2003.
- [13] Mohee R., Mudhoo A., Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix, *Powder Technology* 2005, 155, 92-99.
- [14] Jeris J.S., Regan R.W., Controlling environmental parameters for optimum composting, *Compost Science* 1973, 14, 10-17.
- [15] Annan J.S., White R.K., Evaluation of techniques for measuring air filled porosity in composts of municipal biosolids and wood chips, [in:] *Composting in the Southeast*, ed. K.C. Das, 1998, 88-96.
- [16] Eftoda G., McCartney D., Determining the critical bulking agent requirement for municipal biosolids composting, *Compost Science & Utilization* 2004, 12(3), 208-218.
- [17] Ahn H.K., Richard T.L., Glanville T.D., Laboratory determination of compost physical parameters for modeling of airflow characteristics, *Waste Management* 2008, 28, 660-670.
- [18] Malińska K., Laboratoryjne wyznaczanie porowatości powietrznej materiałów przeznaczonych do kompostowania, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2012, 15(2), 155-167.
- [19] Malińska K., Zabochnicka-Świątek M., Selection of bulking agents for composting of sewage sludge, *Environmental Protection Engineering* 2013, 39(2), 91-103.
- [20] Schaub S.M., Leonard J.J., Characterizing the bulk density of compost, *Compost Science & Utilization* 1999, 7(4), 15-24.

- [21] Richard T.L., *The Kinetics of Solid-state Aerobic Biodegradation*, Cornell University, New York 1997.
- [22] Ahn H.K., Richard L.T., Glanville T.D., Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials, *Waste Management* 2008, 28, 1411-1416.
- [23] Chang J.I., Chen Y.J., Effects of bulking agent on food waste composting, *Bioresource Technology* 2010, 101, 5917-5924.

Changes in Physical Properties of Materials During Laboratory Composting

Knowledge about physical properties of composting materials - such as water content, particle size, bulking density, air-filled porosity and permeability, and mechanical strength - is important at every stage of composting process. Physical properties differ for various materials and ratios in composting mixtures. At the stage of selection of substrates and preparation of composting mixtures the following properties play an important role: water content, bulk density, particle size and mechanical strength. These properties have a direct effect on air-filled porosity and permeability and their changes with the depth of a composting pile, and thus rate of oxygen supply and heat and moisture removal. Knowledge and understanding the relationships between physical properties and their impact on biodegradation rate during composting allows to assure optimal parameters for the process by selection of adequate substrates, compost pile configuration and pile aeration, and also forced aeration systems. Composting is a dynamic process resulting in diverse changes of biochemical character. These changes also occur to physical properties of composting materials. Biodegradation of organic matter in composting materials results in reduction of particle size, increase in water content and bulk density, and thus reduction in air-filled porosity and permeability. The literature does not provide many examples of studies on changes in physical properties of composting materials during composting. The overall goal of this study was to analyze changes in moisture content, bulk density, mechanical strength, air-filled porosity and permeability of a mixture of apple pomace and woodchips AP:WC at a ratio of 1:1 (d.w), moisture content close to 65% and two air-filled porosities about 30% and 45% (obtained from compaction of selected stress) during 3-week composting in laboratory reactors. The obtained results showed that the initial physical properties for the investigated composting mixture, i.e. mechanical strength, bulk density, air-filled porosity and permeability depended mostly on moisture content. After completion of composting all the investigated physical properties underwent significant changes. Air-filled porosity and permeability increased. This effect was probably due to the composition of the investigated composting mixture. Apple pomace that showed high moisture content, bulk density and susceptibility to biodegradation underwent faster decomposition than wood chips. Wood chips are used as a bulking agent for composting of materials with high moisture and nitrogen content due to low susceptibility to biodegradation, low bulk density and moisture content, and thus high air-filled porosity and permeability. 3-week composting of apple pomace and wood chips mixture resulted in decrease in bulk density, and in consequence increase in air-filled porosity and permeability. Also, mechanical strength of the investigated mixture increased almost twice. This could result from the final moisture content, organic matter decomposition and decrease in particle size.

Keywords: composting materials and mixtures, bulk density, mechanical strength, air-filled porosity and permeability, composting