

**Krystyna MALIŃSKA**

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

## Laboratoryjne wyznaczanie porowatości powietrznej materiałów przeznaczonych do kompostowania

Artykuł przedstawia laboratoryjną metodykę wyznaczania porowatości powietrznej materiałów przeznaczonych do kompostowania, pozwalającą na symulację zmian porowatości powietrznej w pryzmie o wybranych wymiarach. Porowatość powietrzna jest kluczowym parametrem fizycznym, warunkującym zainicjowanie i prawidłowy przebieg procesu kompostowania w pryzmach. Optymalna porowatość powietrzna w pryzmie kompostowej pozwala na prawidłowy transport tlenu oraz odprowadzenie wody i ciepła z pryzmy podczas kompostowania. Porowatość powietrzną materiałów przeznaczonych do kompostowania można wyznaczyć wieloma metodami laboratoryjnymi, m.in. metodą piknometryczną, saturacji materiału wodą lub teoretyczną w oparciu o pomiar np. gęstości nasypowej. Jednakże tak wyznaczona porowatość powietrzna nie odzwierciedla zmian wraz z głębokością pryzmy. Pomiar porowatości powietrznej w pryzmie kompostowej może być trudny i wymagać zburzenia struktury pryzmy. Do tego celu można wykorzystać metodę wyznaczania zmian porowatości powietrznej dla wybranych materiałów wraz z głębokością pryzmy o dowolnych wymiarach na podstawie laboratoryjnych pomiarów gęstości nasypowej w warunkach zmiennego obciążenia, wytrzymałości mechanicznej, zawartości wody oraz substancji organicznej. Przykładowo dodatek słomy do wytloków jabłkowych zmniejszył zawartość wody i znacznie zwiększył wytrzymałość mechaniczną oraz porowatość powietrzną tej mieszanki kompostowej. Porowatość powietrzna dla pryzmy o wysokości 2 m zbudowanej z tej mieszanki zmieniała się z głębokością w zakresie 70-3%. Na podstawie wyznaczonych zmian porowatości powietrznej w pryzmie można określić: (1) konieczny udział materiału strukturotwórczego w mieszance kompostowej, który zapewni optymalną porowatość powietrzną w pryzmie w przypadku kompostowania materiałów o wysokiej zawartości wody, wysokiej gęstości nasypowej oraz znacznej podatności na kompaktację oraz (2) wydatek powietrza i częstotliwość napowietrzania pryzm.

**Słowa kluczowe:** kompostowanie, pryzma, własności fizyczne, gęstość nasypowa, porowatość powietrzna, wytrzymałość mechaniczna

### Wstęp

Kompostowanie jest powszechnie określane jako forma odzysku, tzw. recyklingu organicznego i unieszkodliwiania stałych odpadów ulegających biodegradacji, które obejmują zarówno frakcję selektywnie zbieranych odpadów komunalnych, jak również odpadów pochodzących z rolnictwa, leśnictwa, sadownictwa, produkcji żywności, przemysłu drzewnego, etc. Jest uważane za technologię nieskomplikowaną o niskich nakładach kosztów i powszechnej akceptacji społecznej [1]. Mechanizm procesu polega na biodegradacji materii organicznej przez mikroorganizmy w warunkach tlenowych, której towarzyszy inaktywacja organizmów patogennych,

redukcja zawartości wody oraz objętości odpadów organicznych [2]. Produktem końcowym jest kompost - materiał zbliżony do próchnicy, bogaty w substancje humusowe i biogenne, który jest stabilny i pewny sanitarnie oraz wolny od odorów i patogenów, co pozwala na jego magazynowanie oraz bezpieczne wprowadzanie do środowiska.

Wśród systemów kompostowania wyróżnia się kompostowanie w przyzmach statycznych, kompostowanie metodą mat, kompostowanie kontenerowe i komorowe, kompostowanie w przyzmach przerzucanych, kompostowanie rzędowe i tunelowe, kompostowanie w bębnach oraz kompostowanie wieżowe [1]. Najpowszechniejszą i jednocześnie najprostszą metodą kompostowania jest kompostowanie w przyzmach. Charakteryzuje się ona niewielkimi nakładami pracy i wymaganiami technicznymi, lecz jest najbardziej czasochłonną spośród stosowanych metod kompostowania. Kompostowanie w przyzmach można prowadzić na otwartej przestrzeni lub pod zadaszeniem [3]. Wyróżnia się kompostowanie w przyzmach statycznych, przyzmach przerzucanych, przyzmach z pasywnym systemem napowietrzania oraz przyzmach z wymuszonym systemem napowietrzania [1, 2, 4, 5]. Podczas kompostowania w przyzmach statycznych tlen dostarczany jest do wnętrza przyzm poprzez dyfuzję cząsteczkową oraz konwekcję powietrza. W przyzmach statycznych coraz częściej wykorzystuje się systemy napowietrzania pasywnego i wymuszonego lub ich kombinację. Wydatek zatłaczanego powietrza jest wyznaczany w oparciu o wymiary oraz własności fizyczne (tj. zawartość wody, gęstość nasypowa, porowatość i przepuszczalność powietrzną), charakteryzujące przyzmę kompostową.

Do prawidłowego przebiegu procesu kompostowania w przyzmach niezbędne jest zapewnienie odpowiednich parametrów biochemicznych i fizycznych, z których najistotniejsze to zawartość wody, podatność na biodegradację, C/N oraz porowatość powietrzna. Uzyskanie optymalnych wartości parametrów dla przebiegu kompostowania możliwe jest na etapie doboru substratów i przygotowywania mieszanek kompostowych. Porowatość powietrzna jest istotnym parametrem w doborze materiałów strukturotwórczych oraz projektowaniu wymiarów przyzmy [6-10].

Porowatość powietrzna w przyzmi kompostowej wpływa na przepuszczalność powietrzną, która warunkuje transport tlenu oraz odprowadzenie wody i ciepła z przyzmy. W dużej mierze porowatość powietrzna uzależniona jest od zawartości wody. Zwiększona zawartość wody powoduje wzrost masy w danej objętości. Nadmiar wody wypełnia wolne przestrzenie powietrzne, redukując tym samym porowatość powietrzną materiałów. W konsekwencji spadek wolnych przestrzeni prowadzi do ograniczenia przepuszczalności powietrznej, a więc ograniczenia transportu tlenu i odprowadzenia wody i ciepła z przyzmy kompostowej. Porowatość powietrzna w przyzmi kompostowej zależy również od podatności materiałów na kompaktację. Kompaktacja jest spowodowana wzrostem naprężeń pionowych warstw materiału wraz z głębokością przyzmy. Materiały podatne na kompaktację w przyzmi charakteryzują się niską wytrzymałością mechaniczną. Również ze zwiększającą się zawartością wody materiały stają się bardziej plastyczne i podatne na kompaktację, a ich wytrzymałość mechaniczna maleje, powodując wzrost gęstości nasypowej pod

ciężarem materiału w pryzmie [11]. W konsekwencji prowadzi to do redukcji porowatości powietrznej wraz z głębokością pryzmy. Bezpośrednio na porowatość i przepuszczalność matrycy kompostowych mają 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 porowatość i przepuszczalność powietrzną [12, 13]. Porowatość powietrzną mieszanki kompostowej można zwiększyć, dodając naturalnych materiałów strukturotwórczych, takich jak np. słoma czy ściłki drzewne lub też materiałów strukturalnych wykonanych z tworzyw sztucznych.

Celem artykułu jest przedstawienie metodyki wyznaczania porowatości powietrznej dla materiałów przeznaczonych do kompostowania oraz przygotowywania mieszanek kompostowych w warunkach laboratoryjnych. Proponowana metoda pozwala na wyznaczenie porowatości powietrznej oraz symulacji jej zmian wraz z głębokością pryzmy na podstawie zależności matematycznych oraz laboratoryjnie oznaczonej zawartości wody, substancji organicznej, gęstości nasypowej oraz wytrzymałości mechanicznej.

## 1. Porowatość powietrzna

Porowatość powietrzna materiałów kompostowych jest to stosunek objętości porów wypełnionych powietrzem do całkowitej objętości materiału, wyrażony wzorem [13-15]:

$$n = \frac{V_g}{V_g + V_w + V_s} \quad (1)$$

gdzie:

$n$  - porowatość powietrzną,  $m^3/m^3$ ,

$V_g, V_w, V_s$  - odpowiednio objętość fazy gazowej, wodnej i stałej,  $m^3$ .

Porowatość powietrzna zależy od zawartości wody, gęstości nasypowej oraz rozmiaru cząstek, a także stopnia kompaktacji materiału w pryzmie [2]. Wyznaczenie porowatości powietrznej polega na pomiarze objętości przestrzeni powietrznych w materiałach kompostowych. W warunkach laboratoryjnych pomiar porowatości można wykonać metodami analitycznymi na drodze: (1) saturacji materiału kompostowego wodą, w którym objętość przestrzeni powietrznych wyznacza się z różnicy mas materiału przed i po dodaniu wody, (2) pomiaru gęstości właściwej cząstek lub (3) pomiaru piknometrycznego [2, 15-18], oraz metodami empirycznymi wykorzystującymi zależności pomiędzy porowatością powietrzną a innymi parametrami, takimi jak np. gęstość nasypowa, wielkość cząstek czy gęstość właściwa. Wśród wszystkich metod wyznaczania porowatości powietrznej za najdokładniejszą uważa się pomiar objętości przestrzeni powietrznych z użyciem piknomietru powietrznego [17, 19].

### 1.1. Wyznaczanie porowatości powietrznej metodą piknometryczną

Wyznaczenie porowatości powietrznej za pomocą piknomtru opiera się na równaniu stanu gazu doskonałego i polega na pomiarze zmiany ciśnienia w zbiorniku ciśnieniowym połączonym ze zbiornikiem właściwym, w którym znajduje się badany materiał. Zbiornik ciśnieniowy napełniany jest powietrzem do stałego ciśnienia, a następnie otwierany za pomocą zaworu, w wyniku czego następuje przepływ powietrza do zbiornika właściwego, gdzie panuje ciśnienie atmosferyczne. W rezultacie dochodzi do spadku ciśnienia w zbiorniku ciśnieniowym. Porowatość powietrzną można obliczyć na podstawie pomiaru ciśnienia początkowego i końcowego w zbiorniku ciśnieniowym oraz znanej objętości zbiornika ciśnieniowego i właściwego oraz materiału w nim umieszczonego:

$$n = \frac{\left( \frac{P_1 \times V_B}{P_2} \right) - V_A - V_B - V_S}{V_S} \quad (2)$$

gdzie:

$P_1$  - początkowe ciśnienie w komorze ciśnieniowej,  $\text{dm}^3$ ,

$P_2$  - końcowe ciśnienie w komorze ciśnieniowej,  $\text{dm}^3$ ,

$V_A$  - objętość zbiornika właściwego,  $\text{dm}^3$ ,

$V_B$  - objętość zbiornika ciśnieniowego,  $\text{dm}^3$ ,

$V_S$  - objętość próbki materiału,  $\text{dm}^3$ .

Komercyjnie dostępne piknometry są drogie i mogą posiadać niewielkie rozmiary (do ok.  $0,15 \text{ dm}^3$ ) [15]. Z tego względu mogą być nieodpowiednie do badań materiałów przeznaczonych do kompostowania, charakteryzujących się dużą różnorodnością kształtów i wielkości cząstek.

### 1.2. Wyznaczanie porowatości powietrznej metodami obliczeniowymi

Metody pomiaru porowatości powietrznej są czasochłonne i mogą się znacznie różnić, dlatego wielu badaczy wykorzystuje teoretyczną zależność porowatości powietrznej od gęstości nasypowej, której pomiar laboratoryjny jest nieskomplikowany i możliwy do przeprowadzenia również w warunkach polowych [20, 21]. Gęstość nasypową określa się jako całkowitą masę materiału w znanej objętości [2, 20]:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

gdzie:

$\rho$  - gęstość nasypowa,  $\text{kg/m}^3$ ,

$m$  - masa ogółem materiału,  $\text{kg}$ ,

$V$  - objętość materiału,  $\text{m}^3$ .

Agnew i Leonard [22] otrzymali liniową zależność porowatości powietrznej od gęstości nasypowej:

$$n = 100 - 0,09\rho \quad (4)$$

gdzie:

$n$  - porowatość powietrzna, %,

$\rho$  - całkowita gęstość nasypowa,  $\text{kg/m}^3$ .

Wzór ten może być stosowany jedynie do wyznaczania porowatości powietrznej materiałów o wysokiej zawartości wody i/lub niskiej gęstości nasypowej [8].

Dla wszystkich materiałów w procesie kompostowania porowatość powietrzną można wyznaczyć teoretycznie w oparciu o pomiar: gęstości nasypowej, zawartości wody i substancji organicznej, oraz wyznaczonych eksperymentalnie gęstości właściwych wody, frakcji organicznej i nieorganicznej ze wzoru [6, 8]:

$$n = 1 - \rho \left( \frac{(1 - SM)}{\rho_w} + \frac{SM \cdot SO}{\rho_{so}} + \frac{SM \cdot (1 - SO)}{\rho_p} \right) \quad (5)$$

gdzie:

$n$  - porowatość powietrzna,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ,

$\rho$  - całkowita gęstość nasypowa,  $\text{kg/m}^3$ ,

SM - sucha masa, g/g,

SO - substancja organiczna, g/g,

$\rho_w$  - gęstość właściwa wody,  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,

$\rho_{so}$  - gęstość właściwa substancji organicznej,  $1600 \text{ kg/m}^3$ ,

$\rho_p$  - gęstość właściwa substancji nieorganicznej,  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

Richard i in. [8] badali zależności własności fizycznych dla słomy i obornika oraz ich mieszanki na różnym etapie kompostowania. Wartości porowatości powietrznej obliczone z powyższego wzoru wykazywały wysoką korelację ( $R^2 = 0,99$ ) w stosunku do wartości otrzymanych na podstawie metody piknometrycznej.

### 1.3. Metody wyznaczania zmian porowatości powietrznej wraz z głębokością pryzmy

Wyznaczenie porowatości powietrznej materiałów przeznaczonych do kompostowania za pomocą metod analitycznych i empirycznych nie stwarza żadnych problemów. Jednakże tak wyznaczona porowatość powietrzna dla mieszanek kompostowych nie odzwierciedla zmian wraz z głębokością pryzmy, ponieważ nie uwzględnia zmian spowodowanych kompaktacją materiału w pryzmie. Pomiar porowatości powietrznej w pryzmie kompostowej może być trudny i wymagać zburzenia struktury pryzmy. Z tego względu do określania zmian porowatości powietrznej wraz z głębokością pryzmy wykorzystuje się zależność porowatości powietrznej od gęstości nasypowej oraz uwzględnia efekt kompaktacji materiału w pryzmie.

Schaub-Szabo i Leonard [20] opracowali laboratoryjną metodę, pozwalającą na symulację gęstości nasypowej wraz z głębokością pryzmy. Badania przeprowadzono dla kompostu, ścierek drzewnych, słomy i torfu. Metoda polega na pomiarze gęstości nasypowej każdej warstwy o szerokości 500 mm w modelowanej pryzmie o wysokości 3,5 m. W celu symulacji zmian gęstości nasypowych w pryzmie określa się najpierw gęstość nasypową warstwy na powierzchni pryzmy, a gęstość następnej warstwy uzyskuje się poprzez zastosowanie obciążenia, jakie wywiera masa warstwy poprzedniej. Pomiar prowadzi się analogicznie dla kolejnych warstw aż do głębokości 3,5 m. Opierając się na wynikach otrzymanych gęstości nasypowych i głębokości pryzmy dla badanych materiałów, wyznaczono równania regresji (wartości  $R^2 = 0,92 \div 0,99$ ), na podstawie których zaproponowano wzór na obliczenie gęstości nasypowej na dowolnej głębokości w pryzmie:

$$D = Az^B \quad (6)$$

gdzie:

D - gęstość nasypowa na dowolnej głębokości,  $\text{kg/m}^3$ ,

z - głębokość, m,

A - stała charakteryzująca dany materiał, -,

B - stała zależna od podatności danego materiału na kompakcję, -.

Wyznaczone z równań regresji stałe A i B są charakterystyczne dla danego materiału i np. dla słomy wynoszą  $A = 61,81$ ,  $B = 0,184$ , a dla kompostu  $A = 495,17$ ,  $B = 0,104$ .

Wraz z głębokością pryzmy kompostowej obserwuje się zmianę gęstości nasypowej pod wpływem naprężenia pionowego. Dochodzi do deformacji objętościowej struktury materiałów kompostowych w pryzmie na skutek wywierania naprężenia pionowego przez kolejne warstwy materiału na kolejne aż do postawy pryzmy. Opór materiałów kompostowych na odkształcenie objętościowe wskutek działania siły określa się jako wytrzymałość mechaniczną materiałów [6, 12, 17, 23]. Ginkel i in. [6] oraz Richard i in. [8] na podstawie badań zależności pomiędzy gęstością nasypową i wytrzymałością mechaniczną materiału a naprężeniem pionowym zaproponowali wzór, pozwalający na obliczenie gęstości nasypowej w warunkach dowolnego naprężenia:

$$\rho_\sigma = \rho_{\max} - (\rho_{\max} - \rho_0) \cdot \exp\left(\frac{-\sigma}{WM}\right) \quad (7)$$

gdzie:

$\rho_\sigma$  - gęstość nasypowa przy znanej wartości naprężenia,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\rho_{\max}$  - maksymalna gęstość nasypowa,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\rho_0$  - minimalna gęstość nasypowa,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\sigma$  - naprężenie pionowe,  $\text{N/m}^2$ ,

WM - wytrzymałość mechaniczna,  $\text{N/m}^2$ .

Minimalną gęstość nasypową materiału obserwuje się przy naprężeniu  $\sigma = 0$  na powierzchni pryzmy kompostowej, natomiast maksymalną gęstość charakteryzuje brak wolnych przestrzeni w matrycy materiału. W oparciu o znane wartości powyższych parametrów oraz pomiary zmian gęstości nasypowej w warunkach znanych naprężeń z powyższego wzoru można wyznaczyć wytrzymałość mechaniczną dla badanego materiału [7, 8, 24, 25].

Powyższą metodykę wyznaczania zmian porowatości powietrznej wraz z głębokością pryzmy wykorzystuje urządzenie wyposażone w hydrauliczne obciążenie złoża materiału specjalnie zaprojektowane i zbudowane na potrzeby badań laboratoryjnych na Uniwersytecie w Wageningen w Holandii [7, 8]. Pozwala również na piknometryczny pomiar porowatości powietrznej, gęstości nasypowej oraz spadku ciśnienia w złożu w warunkach zmiennego obciążenia [7, 8, 11, 17].

## 2. Materiały i metodyka

### 2.1. Materiały

Do badań wykorzystano następujące substraty do kompostowania: trawa po koszeniu trawnika, wytloki warzywno-owocowe z tłoczenia soków oraz materiały strukturotwórcze: słoma, liście, trociny. Sporządzono następujące mieszanki kompostowe z różnym dodatkiem materiału strukturotwórczego: (1) trawa + słoma w stosunku wagowym 1:2,1 kg s.m./kg s.m., ( $1:2,5 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$ ), (2) trawa + słoma w stosunku wagowym 1:1,0 kg s.m./kg s.m. ( $1:1,3 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$ ), (3) trawa + słoma w stosunku wagowym 1:0,7 kg s.m./kg s.m. ( $1:0,8 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$ ), (4) trawa + trociny w stosunku wagowym 1:2,0 kg s.m./kg s.m. ( $1:0,6 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$ ) oraz (5) wytloki warzywno-owocowe + słoma w stosunku wagowym 1:0,5 kg s.m./kg s.m. ( $1:0,02 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$ ).

### 2.2. Stanowisko badawcze

Do realizacji badań posłużyło stanowisko do badań zmian gęstości nasypowej w zakresie zmiennego obciążenia. Składało się ono z pojemnika wykonanego z tworzywa sztucznego o objętości  $16 \text{ dm}^3$ , na którego dnie znajdowała się perforowana płyta (o średnicy równej średnicy pojemnika) na nóżkach, podtrzymująca złożę materiału. Pojemnik był wyposażony w krążek (o średnicy równej średnicy pojemnika) z drążkiem oraz rurę wykonaną z PCV z podziałką do odczytywania zmian gęstości nasypowej pod wpływem obciążenia. Zakres stosowanego obciążenia wynosił  $0 \div 12 \text{ kg}$ . Stanowisko to działa na zbliżonej zasadzie jak stanowisko zaprojektowane do symulacji zmian gęstości nasypowej oraz spadku ciśnienia w złożu materiału w zakresie znanego obciążenia [25], jednakże nie posiada opcji pomiaru spadku ciśnienia w złożu materiału oraz cechuje się znacznie niższymi kosztami.

### 2.3. Metodyka

Dla substratów, materiałów strukturotwórczych oraz przygotowanych mieszanek kompostowych wyznaczono zawartość wody, zawartość substancji organicznej oraz gęstość nasypową. Zawartość wody wyznaczono metodą suszarkową, a zawartość substancji organicznej na podstawie strat po prażeniu w temp. 550°C. Gęstość nasypową wyznaczono w wyniku pomiaru masy w znanej objętości pojemnika i obliczono ze wzoru (3). Porowatość powietrzną obliczono ze wzoru (5) na podstawie pomiarów gęstości nasypowej, suchej masy, zawartości substancji organicznej oraz znanych wartości gęstości właściwej wody, substancji organicznej oraz substancji nieorganicznej. Wytrzymałość mechaniczną wyznaczono, opierając się na pomiarach zmian gęstości nasypowej badanych materiałów przeznaczonych do kompostowania w warunkach znanego zakresu obciążenia i obliczono ze wzoru (7). Wszystkie pomiary laboratoryjne wykonano w trzech powtórzeniach.

Do symulacji zmian gęstości nasypowej i porowatości powietrznej przyjęto przykładową pryzmę o wysokości 2 m i szerokości 1 m, podzieloną na warstwy o grubości 0,1 m. Założono, że warstwy pryzmy są jednorodne, a naprężenie pionowe jest rozłożone równomiernie. Gęstość nasypową jako funkcję głębokości pryzmy wyznaczano na podstawie wzoru (7) dla każdej następnej warstwy materiału w pryzmie, uwzględniając obciążenia, jakie wywierają kolejne jej warstwy [24]. Dla tak uzyskanych wartości gęstości nasypowej odpowiadających danym głębokościom w pryzmie o wysokości 2 m obliczono porowatość powietrzną z wzoru (5). Symulację zmian gęstości nasypowej i porowatości powietrznej wykonano dla pryzmy o podanych wymiarach zbudowanej z wybranych do badań materiałów, tj.: substratów, materiałów strukturotwórczych oraz przygotowanych mieszanek kompostowych.

## 3. Wyniki i dyskusja

Charakterystykę materiałów przeznaczonych do kompostowania przedstawiono w tabeli 1.

Trawa oraz wytloki warzywno-owocowe charakteryzowały się wysoką zawartością wody. Wytłoki warzywno-owocowe posiadały wysoką gęstość nasypową, niską wytrzymałość mechaniczną oraz bardzo niską porowatość powietrzną. Spowodowane jest to plastyczną strukturą wytłoków o niewielkich rozmiarach cząstek. Kompostowanie odpadów o wysokiej zawartości wody - takich jak wytłoki warzywno-owocowe - wymaga dodatku materiału strukturotwórczego, który nie tylko zmniejszy zawartość wody, ale zwiększy wytrzymałość mechaniczną i porowatość powietrzną. Takimi materiałami strukturotwórczymi mogą być słoma, trociny, ścinki drzewne czy też liście. Słoma i trociny charakteryzują się niską zawartością wody oraz wysoką porowatością powietrzną i wytrzymałością mechaniczną. W pryzmie zbudowanej tylko z wytłoków warzywno-owocowych gęstość nasypowa wraz z głębokością pryzmy znacznie wzrosła (rys. 1), a porowatość powietrzna zmniej-

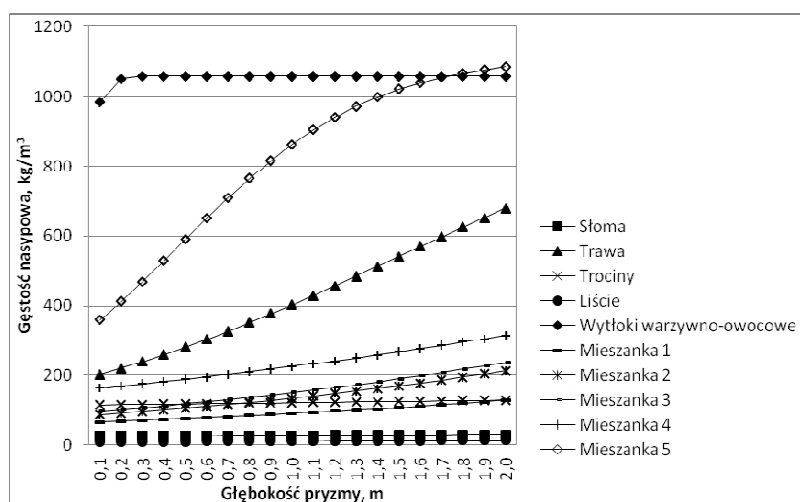


szyla się pod ciężarem materiału do zera już na głębokości ok. 0,6 m (rys. 2). Zwiększający się z głębokością pryzmy ciężar wytlóków spowodował deformację struktury i utratę wody.

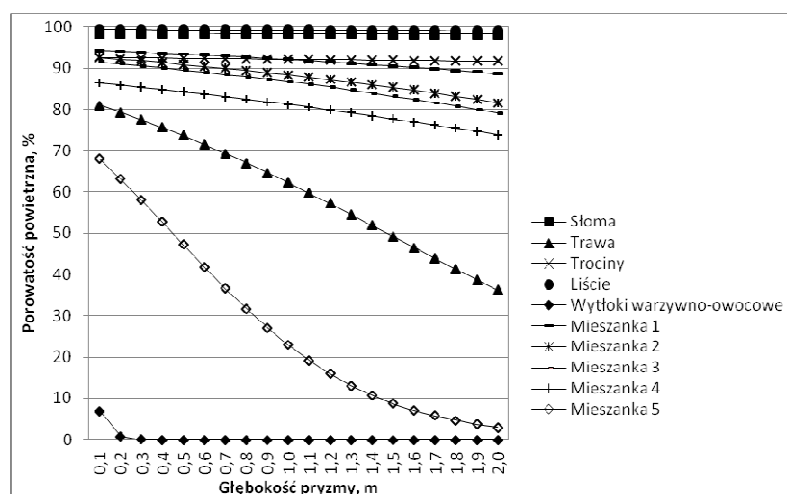
Tabela 1

## Charakterystyka substratów i mieszanek kompostowych

Materiał badawczy	ZW %	SO %	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	WM N/m <sup>2</sup>	n %
Trawa	84,7±0,4	86,7±0,4	191,9±24,3	9452±1280	82,0±2,3
Wytlóki warzywno-owocowe	85,8±0,2	93,4±0,1	984,6±26,0	445±22	7,0±2,5
Słoma	6,5±0,1	96,0±0,5	25,9±1,4	182209±18349	98,3±0,1
Trociny	7,4±0,3	99,6±0,1	115,3±2,8	370859±34856	92,5±0,2
Liście	17,2±0,6	89,9±0,6	9,6±2,5	75381±23716	99,4±0,2
<b>Mieszanka kompostowa 1</b> (trawa + słoma 1:2,1)	68,6±0,9	92,6±1,8	65,3±4,7	28213±4400	94,3±0,4
<b>Mieszanka kompostowa 2</b> (trawa + słoma 1:1)	65,7±4,7	91,1±1,5	86,8±18,7	20752±2465	92,5±1,6
<b>Mieszanka kompostowa 3</b> (trawa + słoma 1:0,7)	72,1±3,1	87,4±1,9	97,1±11,4	20013±3115	91,4±1,0
<b>Mieszanka kompostowa 4</b> (trawa + trociny 1:2)	56,8±5,6	96,6±0,6	143,2±22,8	31301±5788	88,0±1,9
<b>Mieszanka kompostowa 5</b> (wytlóki warzywno-owocowe + słoma 1:0,5)	73,1±3,5	91,4±0,6	358,3±13,4	4777±377	68,0±1,2



Rys. 1. Zmiany gęstości nasypowej w pryzmie kompostowej o wysokości 2 m



Rys. 2. Zmiany porowatości powietrznej w pryzmie kompostowej o wysokości 2 m

Dodatek słomy do wytlóków (mieszanka kompostowa 5) zredukował zawartość wody i znacznie zwiększył wytrzymałość mechaniczną oraz porowatość powietrzną przygotowanej mieszanki. Porowatość powietrzna dla tej mieszanki wraz z głębokością pryzmy wzrosła i kształtowała się w zakresie ok. 70-3%. Trawa - podobnie jak wytloki warzywno-owocowe - charakteryzowała się wysoką zawartością wody. Jednakże gęstość nasypowa była znacznie niższa, a porowatość powietrzna wyniosła ok. 82%. Również wytrzymałość mechaniczna, pomimo dużej zawartości wody, była znacznie wyższa niż w przypadku wytlóków. Powodem mogła być wielkość i geometria cząstek. Z tego względu dla trawy porowatość powietrzna wraz z głębokością pryzmy zwierała się w zakresie 80-35%. Zwiększający się udział słomy w mieszankach z trawą (mieszanka kompostowa 1, 2, 3) spowodował zwiększenie porowatości powietrznej oraz wytrzymałości mechanicznej. Oznacza to, że dalszy dodatek słomy nie wpływa znacząco na zmiany porowatości powietrznej w pryzmie. W przypadku dodania trocin do trawy (mieszanka 4) zaobserwowano znacznie zwiększenie się wytrzymałości mechanicznej oraz niewielki wzrost porowatości powietrznej.

Na podstawie danych literaturowych za minimalną wartość początkowej porowatości powietrznej w pryzmie uważa się 30% [2, 9]. Inni badacze [10] podają zakres porowatości powietrznej w pryzmie 26÷61% w przypadku kompostowania organicznej frakcji odpadów komunalnych i ścieków drzewnych. Zakres ten odpowiadał stężeniu tlenu w pryzmie na poziomie 5% - czyli minimalnemu stężeniu tlenu dla mikroorganizmów tlenowych [2, 5]. Natomiast wartości porowatości powietrznej w zakresie 60÷70% w przypadku odpadów o niskiej podatności na biodegradację mogą być za wysokie i w rezultacie nie pozwolą na osiągnięcie temperatury w zakresie termofilowym. Jednakże literatura przedmiotu nie podaje, czy przytoczone dane dotyczą zaleceń dla początkowej porowatości powietrznej w pryzmie czy też takiej, którą należy utrzymywać podczas procesu kompostowania w pryzmie

[19]. Literatura również nie podaje zależności pomiędzy porowatością powietrzną materiałów i mieszanek kompostowych a stężeniem tlenu w pryzmie. Przyjmuje się, że warunkach laboratoryjnych odniesieniem jest głównie porowatość powietrzna, a w pryzmach stężenie tlenu w przestrzeniach powietrznych. Z tego względu konieczne będą dalsze badania dotyczące: (1) określenia zależności pomiędzy stężeniem tlenu w pryzmach a porowatością powietrzną wyznaczoną laboratoryjnie, (2) określenia wpływu początkowej porowatości powietrznej na przebieg procesu kompostowania w pryzmach oraz (3) wyznaczenia porowatości powietrznej w pryzmie, jaką należy utrzymywać podczas przebiegu procesu kompostowania.

## Podsumowanie

Porowatość powietrzna w pryzmach jest kluczowym parametrem dla zainicjowania procesu kompostowania. Wyznaczenie jej w warunkach rzeczywistych może być trudne i wymagać zburzenia struktury pryzmy. Jednakże porowatość powietrzną materiałów przeznaczonych do kompostowania można wyznaczyć w warunkach laboratoryjnych w oparciu o metodę piknometryczną oraz metody obliczeniowe uwzględniające zmiany porowatości powietrznej wraz z głębokością pryzmy. Metoda piknometryczna jest uważana za najdokładniejszą metodę wyznaczenia porowatości powietrznej. W przypadku braku możliwości wykorzystania tej metody do wyznaczenia początkowej porowatości powietrznej oraz jej zmian wraz z głębokością pryzmy zaleca się stosowanie wzoru (5), zaproponowanego przez Richarda i in. [8], oraz wzoru (7), zaproponowanego przez Ginkela i in. [6] oraz Richarda i in. [8]. Przedstawiona metodyka pozwala na wyznaczenie porowatości powietrznej oraz przeprowadzenie symulacji jej zmian z głębokością pryzmy na podstawie laboratoryjnych oznaczeń zawartości wody, substancji organicznej, gęstości nasypowej oraz wytrzymałości mechanicznej. Do tego celu może posłużyć zmodyfikowane stanowisko do wyznaczania zmian gęstości nasypowej w zakresie znanego obciążenia zaproponowane przez Malińską i Richarda [25]. Przedstawiona metoda pozwala na dobór substratów do kompostowania, określenie udziału materiału strukturotwórczego dla danej mieszanki kompostowej w warunkach laboratoryjnych bez konieczności budowy pryzm w warunkach rzeczywistych oraz projektowania wymiarów pryzm i doboru systemów napowietrzających.

## Literatura

- [1] Jędrzak A., Haziak K., Określenie wymagań dla kompostowania i innych metod biologicznego przetwarzania odpadów, Zielona Góra 2005, [http://www.mos.gov.pl/odpady/metody\\_gospodarowania/okreslenie\\_wymagan\\_II.pdf](http://www.mos.gov.pl/odpady/metody_gospodarowania/okreslenie_wymagan_II.pdf)
- [2] Haug R., Practical Handbook of Compost Engineering, Lewis Publishers, Boca Raton 1993.
- [3] Jędrzak A., Technologie biologicznego przetwarzania odpadów ulegających biodegradacji, VII Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Woda - Ścieki - Odpady w Środowisku: Biologiczne przetwarzanie stałych odpadów organicznych, Zielona Góra 2004 (materiały w wersji elektronicznej).

- [4] Rynk R., On-farm Composting Handbook, Northeast Regional Agricultural Engineering Service 1992.
- [5] Epstein E., Industrial Composting. Environmental Engineering and Facilities Management, Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
- [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 4<sup>th</sup> 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] Jeris J.S., Regan R.W., Controlling environmental parameters for optimum composting, *Compost Science* 1973, 14, 10-17.
- [10] Eftoda G., McCartney D., Determining the critical bulking agent requirement for municipal biosolids composting, *Compost Science & Utilization* 2004, 12(3), 208-218.
- [11] Das K.C., Keener H.M., Moisture effect on compaction and permeability in composts, *Journal of Environmental Engineering* 1997, 123, 1-7.
- [12] Bear J., *Dynamic of Fluids in Porous Media*. Dover Publications, Inc., New York 1988.
- [13] Richard T.L., Hamelers H.V.M., Veeken A., Silva T., Moisture relationships in composting processes, *Compost Science & Utilization* 2002, 4(10), 286-302.
- [14] Majewski J., *Hydrogeologia*, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1966.
- [15] Oppenheimer J.R., Martin A.G., Walker L.P., Measurements of air-filled porosity in unsaturated organic matrices using a pycnometer, *Bioresource Technology* 1997, 59, 241-247.
- [16] Annan J.S., White R.K., Evaluation of techniques for measuring air filled porosity in composts of municipal biosolids and wood chips, Proceedings of the 1998 Conference on Composting in the Southeast, 88-96.
- [17] Agnew J.M., Leonard J.J., Feddes J., Feng Y., A modified air pycnometer for compost air volume and density determination, *Canadian Biosystems Engineering* 2003, 45, 6.25-6.35.
- [18] Su D., McCartney D., Wang Q., Comparison of free air space test methods, *Compost Science & Utilization* 2006, 14(2), 101-113.
- [19] Ruggieri L., Gea T., Artola A., Sanchez A., Air filled porosity measurements by air pycnometry in the composting process: A review and a correlation analysis, *Bioresource Technology* 2009, 100, 2655-2666.
- [20] Schaub-Szabo S.M., Leonard J.J., Characterizing the bulk density of compost, *Compost Science & Utilization* 1999, 7(4), 15-24.
- [21] Huerta-Pujol O., Soliva M., Marinez-Farre F.X., Valero J., Lopez M., Bulk density determination as a simple and complementary tool in composting process control, *Bioresource Technology* 2010, 101, 995-1001.
- [22] Agnew J.M., Leonard J.J., Using a modified pycnometer to determine free air space and bulk density of compost mixtures while simulating compressive loading, *International Symposium on Composting and Compost Utilization*, Eds. F.C. Michel, R. Rynk, H.A.J. Hoitink, J.G. Press, Emmaus, PA, 2002.
- [23] Pisarczyk S., *Mechanika gruntów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [24] 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.

- [25] Malińska K., Richard T., The effect of moisture content, bulking agent ratio and compaction on permeability and air-filled porosity in composting matrices, [w:] ORBIT 2006: Biological Waste Management - From Local to Global. Proceedings of the International Conference ORBIT 2006. E. Kraft, W. Bidlingmaier, M. de Bertoldi, L.F. Diaz, J. Barth (Eds.). ORBIT e.V., Weimar 2006, 181-190.

### Laboratory Determination of Air-Filled Porosity for Composting Materials

The paper presents laboratory determination of air-filled porosity for composting materials. The described method allows for simulation of changes in air-filled porosity with composting pile depth for various pile configurations. Air-filled porosity in a composting pile is a key physical parameter for initiation and proper management of composting. The optimal air-filled porosity in a composting pile allows adequate transport of oxygen and removal of moisture and heat from a pile during the entire process of composting. Air-filled porosity of composting materials can be determined by means of several methods including laboratory tests by pycnometry and water saturation as well as theoretical calculations based on laboratory measurements of e.g. bulk density. However, the air-filled porosity determined with these methods does not reflect the changes in air-filled porosity with composting pile depth. It provides the information about the air-filled porosity observed at the top of a pile. With the increase in a pile depth the air-filled porosity of a composting mixture is reduced due to compaction resulting from stress applied by consequent layers of the composting material in a pile. For materials with high moisture content the air-filled porosity may be reduced to zero at the base of a composting pile. Direct measurement of air-filled porosity in a composting pile can pose many difficulties and requires disturbing the pile structure. Not to mention that building a composting pile in full scale requires significant quantities of composting materials and labor. Therefore, the changes in air-filled porosity with the depth of a composting pile at selected pile configurations can be determined from laboratory measurements of bulk density at applied stress, mechanical strength, moisture content and organic matter content. This method allows simulation of changes in air-filled porosity with the pile depth for various composting materials and mixtures at selected pile configurations. In case of composting materials with high moisture content and susceptibility to compaction, this simulation will allow determination of the optimal addition of a bulking agent to a composting mixture in order to provide and maintain adequate oxygen supply during the process of composting. What is more, it can be used to determine the frequency of pile turning and/or configuration of aeration system.

**Keywords:** composting, a composting pile, physical properties, bulk density, air-filled porosity, mechanical strength