
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 10

ISSN 1899-3230

Rok V

Warszawa–Opole 2012

Teoretyczne podstawy kompostowania

Słowa kluczowe: kompostowanie, proces kompostowania, intensywne kompostowanie, możliwość oddziaływania.

Artykuł ten daje ogólną, teoretyczną wiedzę o kompostowaniu po to, aby lepiej zrozumieć proces i współdziałanie możliwych czynników mających wpływ na przebieg procesów kompostowania lub stabilizacji.

1. Cel kompostowania

W zależności od materiału wejściowego określa się różne cele przetwarzania odpadów przy pomocy kompostowania.

Odpady organiczne

Celem kompostowania odpadów organicznych jest możliwie szybki i bezzapachowy rozkład substancji organicznych i ich przekształcenie w przyjazne dla roślin substancje próchnicze. Przy tym dąży się do tego, aby podczas krótkiego efektywnego okresu intensywnego kompostowania i przy niskich emisjach zapachowych wyprodukować jakościowo wysokowartościowy produkt do nawożenia roślin. Wyprodukowany kompost może być stosowany jako próchnica i substancja odżywcza, jako polepszacz gleby, albo jako część składowa substratów roślinnych i kultur gleby. Czas dojrzewania zależy między innymi od oczekiwanych cech jakości końcowego produktu, takich jak np.: stabilność struktury przy zazielenianiu nasypów i skarp, chłonność wody i odporność na podlewanie dla ziemi doniczkowej lub stopień jego dojrzałości (stabilność) w przypadku wprowadzania go na rynek jako towar pakowany w workach [2].

Odpady resztkowe

Celem kompostowania odpadów resztkowych jest możliwie szybka ich stabilizacja z niską emisją, wywoływaną przez zawartą w odpadach rozkładalną frakcję organiczną, która odpowiedzialna jest za emisję metanu na składowiskach i uży-

* Mgr inż., Maschinen-Umwelttechnik-Transportanlagen GmbH, Austria.

skanie bezzapachowego półproduktu. Obok zmniejszenia ilości gazu cieplarnianego na składowiskach i ilości skażonych odcieków, dochodzi do redukcji masy i redukcji objętości pierwotnych odpadów resztkowych. W zależności od potrzeb, w procesie kompostowania odpadów resztkowych, materiał może być wysuszony, np. do współspalania albo wykorzystania do zazielenienia lub pokrycia powierzchni składowiska [1].

2. Możliwości oddziaływania na przebieg procesu intensywnego kompostowania i dojrzewania

Proces przekształcania materiału ze względu na nagromadzenie się w nim wyjściowych substancji organicznych, niewystarczającej struktury i ze względu na przyspieszenie procesu wymaga środków pomocniczych w celu umożliwienia w ogóle tlenowego procesu przetwarzania lub jego optymalizacji.

Na optymalizację procesu kompostowania, zarówno w odniesieniu do zarządzania emisjami, jak i jakości kompostu przy bioodpadach mają wpływ tylko cztery podstawowe sterowalne wielkości [2]:

- wymieszanie i zawartość wody w materiale wejściowym,
- sterowanie gospodarką wodną,
- zasilanie tlenem materiału podczas intensywnego kompostowania lub dojrzewania,
- sterowanie temperaturą materiału podczas intensywnego kompostowania lub dojrzewania.

Podstawą optymalnego kierowania procesem jest przede wszystkim wystarczające zrozumienie biologii procesu kompostowania.

3. Biologia procesu kompostowania

Znajomość sukcesywnie przebiegających procesów biochemicznych w czasie trwania biologicznego rozkładu i przemiany substancji organicznych jest podstawą celowego sposobu sterowania przebiegiem procesu kompostowania.

3.1. Mikroorganizmy

W trakcie procesu dojrzewania zawarta w odpadach substancja organiczna jest przez aerobowe mikroorganizmy pobierające tlen wykorzystywana jako źródło energii i substancji odżywczych. Przy tym część węgla pozostaje w substancji komórkowej mikroorganizmów (masa biologiczna), a pozostała część jako dwutlenek węgla (CO_2) uwalnia się do atmosfery. Białko, węglowodany i tłuszcze są poddawane procesowi hydrolizy. Produkty hydrolizy (monosacharydy z węglo-

wodanów, peptydy i aminokwasy z białek i związki fenolowe z aromatycznych części składowych ścianki komórki) przekształcają się częściowo w kwasy organiczne (kwas octowy, kwas masłowy, kwas walerianowy, kwas propionowy) i dwutlenek węgla, jako ostatni podczas oddawania ciepła (tab. 1). W warunkach aerobowych dochodzi przy tym do znacznej redukcji węgla. Na koniec powstaje białko, ale także tworzy się bezpośrednio CO₂, woda i w zależności od wartości pH i zawartości azotu powstaje amoniak względnie amon. Przy wystarczającej ilości tlenu w późniejszej fazie kompostowania, przy odpowiedniej temperaturze, amon utlenia się i poprzez azotyn przechodzi w azotan [2].

T a b e l a 1

Aerobowy rozkład biologiczny cukru i bilans energii [2]

Aerobowy rozkład w procesie kompostowania	$C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$ Uwalniająca się energia – 2875 [kJ/Mol]
---	--

3.2. Zapotrzebowanie na tlen

Zapotrzebowanie w tlen i rozdział tlenu w materiale podczas intensywnego kompostowania i dojrzewania zależy od wielu czynników. Istotnymi są [2]:

- rodzaj bioorganicznego odpadu, w więc skład substancji organicznej,
- aktualny stan rozkładu biologicznego,
- zawartość wody,
- udział i stabilność objętości porów przepuszczających powietrze,
- geometria intensywnego kompostowania lub dojrzewania (np. kompostowanie w pryzmach).

3.3. Temperatura

3.3.1. DROBNOUSTROJOWE ZAKRESY TEMPERATUR

Tempo biologicznego rozkładu podczas intensywnego kompostowania zależy w znacznym stopniu od dostępności drobnoustrojów w substancji wyjściowej. Rozróżnia się substancje organiczne, które łatwo i trudno ulegają rozkładowi biologicznemu. Przy biologicznym rozkładzie przez mikroorganizmy substancji organicznych dochodzi, w zależności od intensywności procesów rozkładu i objętości masy biologicznej, do podwyższenia temperatury w kompostowanym środowisku („samoogrzanie”).

Przy kompostowaniu odpadów biologicznych (względnie odpadów biogenych z grupy odpadów kuchennych albo resztek z produkcji żywności) samoogrzanie jest pożądane z dwóch powodów [2]:

1. Dochodzi do zmiany populacji mikroorganizmów i przez to do przyspieszonego rozkładu biologicznego.
2. Obok efektów antybiotycznych (m.in. przez grzybowe produkty przemiany materii) dochodzi także do termicznej inaktywacji potencjalnych patogennych zarodków. Tutaj przez określony czas na mikroflorę musi działać temperatura w zakresie co najmniej 55°C.

Rozróżnia się trzy zakresy temperatur, które potrzebne są dla tego rodzaju mikroorganizmów (por. tab. 2).

T a b e l a 2

Zakresy temperatury oraz fazy i rodzaje mikroorganizmów [2]

Zakres temperatury	Temperatura [°C]	Rodzaj mikroorganizmów
Zakres psychrofilny	od -4 do 20	bakterie i grzyby pleśniowe
Zakres mezofilny	od 15 do 42	bakterie i promieniowce
Zakres termofilny	od 45 do 75	bakterie i mezofile do ciepło-tolerancyjnych zarodników grzybów włącznie

Od 75°C rozpoczyna się denaturyzacja białka i w tym zakresie kompostowania zamiera proces biologicznego dojrzenia.

3.3.2. WYMAGANIA PROCESOWE ODNOŚNIE DO TEMPERATURY

Dla trzech istotnych wymagań w samym procesie kompostowania, czyli dla higienizacji (z odpadów organicznych), rozkładu biologicznego masy organicznej i maksymalnej drobnoustrojowej różnorodności, można podać następujące optymalne temperatury:

T a b e l a 3

Wymagania procesowe i zakresy temperatur [2]

Wymaganie procesowe	Temperatura [°C]
Higienizacja	> 55
Stan rozkładu biologicznego, rozpoczynający się rozkład biologiczny ligniny / humifikacja	od 45 do 55
Drobnoustrojowa różnorodność + rozkład biologiczny drobnoustrojowej masy, rozkład biologiczny ligniny / humifikacja	od 35 do 40

3.3.3. PRZYROST TEMPERATUR

Decydujący wpływ na przyrost temperatury ma wiele ramowych czynników, takich jak:

- podatność materiału organicznego na jego rozkład,
- stosunek C/N,
- zawartość wody w materiale wejściowym,
- napowietrzanie,
- przerzucanie.

Przerzucanie powoduje z jednej strony krótkotrwałe ochłodzenie, z drugiej podgrzewa proces kompostowania w fazie termofilnej, a także przy przechodzeniu do fazy mezofilnej przez dostarczenie tlenu i tworzenie nowych powierzchni, na które mogą działać drobnoustroje. Podczas dojrzewania długotrwałość i dynamika tego procesu jest znów ściśle związana z przekrojem pryzmy. „Małe”, trójkątne pryzmy umożliwiają lepsze odtransportowanie ciepła poprzez konwekcję (efekt kominowy), podczas gdy większe pryzmy trapezowe muszą być częściej przerzucane.

3.3.4. STEROWANIE TEMPERATURĄ PRZY ODPADACH ORGANICZNYCH

Przy sterowaniu temperaturą można wyjść z 2 poniższych zasad [2]:

1. Samoogrzanie prowadzi przy istnieniu w materiale wejściowym wystarczającej ilości reaktywnych organicznych frakcji i przy ich homogenicznym wymieszaniu do temperatury powyżej 55°C. Temperatura ta potrzebna jest do termicznej higienizacji wsadu. Aby zagwarantować efekt higienizacji (dla odpadów typu bio), należy zgodnie z ramowymi uwarunkowaniami prowadzenia procesu zwracać uwagę na to, aby minimalna temperatura objęła w zakładanym czasie cały kompostowany materiał.

2. Po tej fazie należy najszybciej, jak jest to tylko możliwe, utrzymywać materiał w temperaturze poniżej 50–55°C poprzez napowietrzanie, spulchnianie i nawadnianie w celu uzyskania ciągłego rozkładu i przemiany, oraz szybką humifikację i tworzenie kompleksu ilasto-humusowego.

3.4. Przebieg kompostowania

W fazie startowej procesu kompostowania mezofilne grzyby i termotolerancyjne / termofilne grzyby rozpoczynają swój rozkład w temperaturze pomiędzy 60 a 70°C. Bez sztucznego wychłodzenia procesu po fazie higienizacji następną fazą kompostowania w temperaturze częściowo znacznie wyższej niż 60/65°C jest zdominowana przez bakterie termofilne. Występują także termofilne promieniowce. W materiale wejściowym w trakcie przemiany pierwotnych substancji organicznych, tworzą się najpierw tylko pośrednie produkty przemiany i dochodzi do uwolnienia energii. Podczas dalszego przebiegu kompostowania atakowane są coraz bardziej średnio i trudno ulegające rozkładowi biologicznemu części składowe obrabianych odpadów, gdyż frakcje łatwo ulegające rozkładowi biologicznemu zostały już częściowo utlenione w fazie mezofilnej, względnie w fazie gorącego kompostowania. Przy tym zmienia się rodzaj substratu, co powoduje spadek aktywności mikrobiologicznej, a w następstwie tego spadek temperatury. Kiedy temperatura spadnie poniżej 60°C, to w zależności od substratu rozwija się jedna składająca się z bakterii, promieniowców i grzybów mieszana populacja mikroorganizmów [2].

Dopiero kiedy drobnoustrojowy proces rozkładu biologicznego jest już tak dalece zaawansowany, że obecne są wcześniej wspomniane, zdolne do współreagowania produkty rozkładu, wtedy w następstwie wiązania energii powstają wtórne stabilne substancje humusowe, czyli nowe związki organiczne. Następnie tworzą się glino-mineralne i organiczno-mineralne kompleksy – powstaje trudno lub długotrwale mineralizujący się humus [2].

4. Czas kompostowania

W korzystnych warunkach ramowych (stosunek C/N, sterowanie wilgotnością, stabilność struktury i wystarczający przepływ powietrza) wystarczy od 21 do 28 dni obróbki odpadów biologicznych i odpadów reszkowych w zamkniętym procesie intensywnego kompostowania, aby uzyskać wystarczającą stabilność do dalszego dojrzewania na otwartym powietrzu. Rzeczywisty okres intensywnego kompostowania zależy jednak od oczekiwanej jakości materiału wyjściowego.

5. Czynniki warunkujące skuteczne kompostowanie

5.1. Mikrobiologiczna podatność na rozkład substancji organicznej

Poniżej podano prędkość rozkładu biologicznego względnie prędkość mineralizacji w zależności od stabilności i będącego do dyspozycji stosunku C/N komponentów organicznych. Rozróżnia się organiczne substancje, które łatwo lub ciężko ulegają rozkładowi biologicznemu, przykładowo podano je w tabeli 4.

Tabela 4

Szybkość rozkładu biologicznego różnych klas substancji organicznych podczas procesu kompostowania [2]

Pochodzenie	Intensywne kompostowanie szybki rozkład	→	Dojrzewanie wolny rozkład
Roślinne	skrobia, cukier	celuloza	drewno
	tłuszcze, kwasy tłuszczowe	hemiceluloza	lignina
	białka, peptydy	pektyna, chityna	keratyna
	witaminy	tłuszcze, oleje, woski	
Zwierzęce	kał, mocz	kwasy żółciowe	pigmenty żółci
	śluz, krew		kości

5.2. Zawartość wody

Wystarczająca wilgotność jest przede wszystkim bardzo ważna przy starciu i nieodzowna podczas intensywnego kompostowania, ponieważ mikroorganizmy

wchłaniają substancje odżywcze i tlen w postaci rozpuszczonej. Czyste odpady kuchenne i obierki z warzyw wykazują zawartości wody od 80 do 95% w świeżej masie, co podczas zbiórki i transportu prowadzi do wydzielania się wody i powstania wód ociekowych. W zależności od stabilności struktury i pojemności wody w organicznych materiałach wejściowych, zawartość wody w pojedynczych komponentach może się wahać w szerokim zakresie. Stabilność struktury gwarantuje wystarczającą objętość powietrzną porów przy maksymalnej zawartości wilgotności, jak i odprowadzenie nadmiernej ilości wody.

5.3. Stabilizacja struktury

Stabilizacja struktury jest warunkiem uzyskania wymaganej porowatości dla odpowiedniej wymiany gazowej w materiale intensywnie kompostowanym lub dojrzewającym. Jest to obowiązujące w takim samym stopniu dla zamkniętych reaktorów, jak i dla otwartych pryzm. Optymalny udział zrębków, rozdrobnionych gałęzi i krzaków, jako materiału strukturalnego, zależy od wybranej metody kompostowania, właściwości struktury i zawartości wody w pozostałych składnikach kompostowanego materiału. Podstawową regułą jest to – im większy przekrój kompostowanej partii, tym większe samozagęszczanie i stąd prawdopodobieństwo, że przewietrzanie poprzez konwekcję (efekt kominowy w przypadku pryzmy) lub przewietrzanie wymuszone, nawet przy wysokim udziale materiału strukturalnego, nie będzie zagwarantowane[2].

5.4. Wartość pH

Szczególnie przy mieszaninach materiału wejściowego z wysokim udziałem świeżych odpadów kuchennych i warzyw dochodzi w fazie początkowej, tzn. w ciągu pierwszych 3–7 dni wartość pH obniża się do poziomu od 4 do 6. Kwaśna faza powoduje znaczne opóźnienie rozkładu C („faza opóźnienia”) i idzie w parze z tworzeniem się niskich kwasów organicznych. Przytłumienie albo skrócenie fazy opóźnienia można osiągnąć przez dodanie wapna już w ilości 0,2% wag. Ilości wapna powyżej 0,4% prowadzi do uwolnienia amoniaku (NH_3) i w związku z tym do wydzielania się odorów [2].

5.5. Stosunek C/N

Stosunek C/N rozumie się jako stosunek masowy węgla organicznego do azotu w materiale organicznym przeznaczonym do kompostowania.

Mikroorganizmy, jak wszystkie żyjące organizmy, potrzebują do życia zarówno organicznego węgla, jak i proporcjonalnie mniejszych ilości azotu. Jeśli elementy te zawarte są w odpadach w odpowiednim stosunku, to szybko się tam rozmnażają i w ten sposób mogą szybko doprowadzić do rozkładu frakcji organicznej

znajdującej się w odpadach. Optymalny stosunek C/N w materiale odpadowym na początku intensywnego procesu kompostowania mieści się w granicach od 25 do 35. Przy wyższej wartości C/N (> 35) proces rozkładu biologicznego przebiega wolniej. Przy wartości C/N < 20 do atmosfery może się w formie gazowej ulatniać amoniak przez to nie tylko dochodzi do obciążenia środowiska (przede wszystkim poprzez obciążenie odorami), lecz także obniżania się jakości kompostu. Przy odpadach o wyższej wartości C/N (> 30) dodanie azotu (np. gnojówki, mocznika albo osadów ściekowych) można przyspieszyć proces rozkładu biologicznego. Gotowy materiał wyjściowy powinien mieć wartość C/N wynoszącą < 20 . Im wyższy jest udział azotu w kompoście, tym jest on lepszy do zastosowania jako nawóz organiczny [2].

W tabeli 5 przedstawiono przykłady wartości C/N różnych możliwych materiałów wsadowych.

Tabela 5

Przykłady wartości C/N [2]

Nawóz przemysłowy		Odpady zielone	
Materiał	Wartość C/N	Materiał	Wartość C/N
gnojówka	2–3	skoszona trawa	12–25
obornik kurzy	10	pozostałości ogrodowe	20–60
obornik – kompost	10	łodygi ziemniaków	25
obornik bydłocy (ubogi w słomę)	20	liście	30–60
obornik koński	25	ściółka iglasta	30–100
obornik bydłocy (bogaty w słomę)	30	słoma (jęczmień, rośliny strączkowe)	40–50
Bioodpady		słoma (owies)	60
Materiał	Wartość C/N	słoma (żyto, pszenica)	100
odpady warzywne	10–20	kora	100–130
resztki jedzenia	12–20	odpady z przycinania drzew i krzewów	100–150
resztki z owoców	15–25	Pozostałe	
kwiaty i odpady roślinne	20–60	Materiał	Wartość C/N
odpady kuchenne	23	torf	30–50
owoce	35	trociny (lite drewno)	100–500
makulatura	120–170	karton	200–500

7. Nieprawidłowe kompostowanie

W czasie kompostowania należy unikać: mieszania materiałów, suchej stabilizacji i „przegrzania” materiałów organicznych $> 70^{\circ}\text{C}$ [2]:

Mieszanie materiałów

Należy unikać mieszania materiału po dojrzeniu z materiałem wejściowym [2].

Sucha stabilizacja

Przy złej ocenie materiału wejściowego lub przy złym wyborze sterowania może w czasie prowadzenia intensywnego kompostowania dojść do wysuszenia materiału poddawanego kompostowaniu (tzw. suchej stabilizacji). To zdarza się w przypadku wyboru za wysokiego stopnia przewietrzania i za niskiego stopnia nawilżania. Skutkami takiej sytuacji w przypadku opróżnienia reaktora i ułożenia materiału do dojrzewania w otwartych przyzmacach i przy odpowiednim nawilżeniu jest ponowne rozpoczęcie intensywnej fazy kompostowania z typowymi dla niej konsekwencjami, tj. emisją odorów [2].

„Przegrzanie” materiałów organicznych > 70°C

Należy unikać temperatury powyżej 70°C, gdyż już od 65°C dochodzi do wyraźnego spowolnienia rozkładu frakcji organicznej, a to może prowadzić do obciążeń odorami i obniżenia jakości kompostu [2]*.

* Cytowaną literaturę zamieszczono po tłumaczeniu artykułu w języku niemieckim.