
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 18
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus
ISSN 1899-3230

Rok VII

Warszawa–Opole 2014

ALFRED NOLEPA*

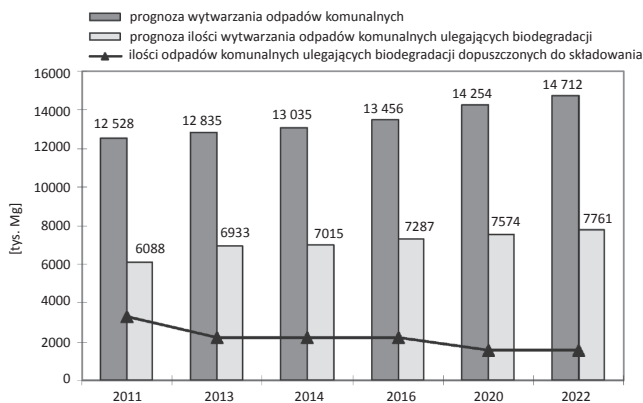
Teoretyczne podstawy mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów

Słowa kluczowe: odpady komunalne, frakcja biodegradowalna, kompostowanie.

Spełnienie wymagań prawnych przez Polskę w zakresie ograniczenia ilości deponowanej frakcji organicznej odpadów komunalnych na składowiskach do 35%, w odniesieniu do ilości tych odpadów zdeponowanych na składowiskach w 1995 r., skutkuje koniecznością rozbudowy infrastruktury technicznej w zakresie zagospodarowania odpadów komunalnych. Jedną z metod jest mechaniczno-biologiczne przetwarzanie frakcji biodegradowalnej zawartej w tych odpadach. W artykule przedstawiono wybrane aspekty teorii rozkładu tlenowego, tj. kompostowania, wymagania techniczno-technologiczne oraz niektóre wymagania najlepszych dostępnych technik (BAT).

1. Wstęp

Prognozowane ilości wytwarzanych odpadów komunalnych w Polsce i odpadów komunalnych ulegających biodegradacji oraz części odpadów ulegających biodegradacji dopuszczonych do składowania w latach 2011–2022, zgodnie z Krajowym planem gospodarki odpadami 2014, przedstawiono na rycinie 1.



Ryc. 1. Prognozowane ilości wytwarzanych odpadów komunalnych, w tym odpadów komunalnych ulegających biodegradacji w latach 2011–2022 [1]

* Inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, a.nolepa@icimb.pl

Przewiduje się wzrost ilości wytwarzanych odpadów w przeliczeniu na jednego mieszkańca do poziomu 329 kg w 2013 r. i 377 kg w 2020 r. z tempem przyrostu od 1,2 do 1,6% na rok. W tabeli 1 przedstawiono dane dotyczące zagospodarowania odpadów w 2012 r.

T a b e l a 1

Ilości odpadów komunalnych zagospodarowanych w 2012 r. [3]

Wyszczególnienie	Ilość [tys. Mg]
Odpady komunalne wytworzone*	12 084
Odpady komunalne zebrane*	9 581
Unieszkodliwione w spalarniach i kompostowniach**	977
Zdeponowane na składowiskach	7 158
Zebrane selektywnie	1 005
Wysegregowane z odpadów zmieszanych	440

* Dane szacunkowe.

** Poprzez zastosowanie metody termicznej i biologicznej (bez odpadów biodegradowalnych zebranych selektywnie).

Podstawową jednostką terenową gospodarki odpadami komunalnymi jest region obejmujący swym obszarem gminy liczące łącznie co najmniej 150 tys. mieszkańców lub obszar jednej gminy liczącej powyżej 500 tys. mieszkańców, obsługiwany przez regionalne instalacje przetwarzania odpadów komunalnych, o minimalnej mocy przerobowej wystarczającej do przyjmowania i przetwarzania odpadów z obszaru zamieszkałego przez co najmniej 120 tys. mieszkańców, spełniający wymagania najlepszej dostępnej techniki i technologii [2].

Preferowane są następujące metody zagospodarowania odpadów w zależności od ilości mieszkańców w regionie [1]:

- od 150 do 300 tys. mieszkańców – mechaniczno-biologiczne przekształcanie zmieszanych odpadów komunalnych i pozostałości z sortowni;
- powyżej 300 tys. mieszkańców – termiczne przekształcanie zmieszanych odpadów komunalnych.

W ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko – Działanie 2.1 utworzono w Polsce listę 12 projektów kluczowych, których celem jest budowa instalacji do termicznej utylizacji odpadów. Do 30 czerwca 2010 r. – terminu nadsyłania wniosków – wpłynęło 8 wniosków na realizację tych inwestycji [4]. Łączna moc przerobowa tych instalacji kształtuje się na poziomie ok. 1700 tys. Mg/rok. Aktualnie (2014 r.) buduje się 6 instalacji w 6 regionach o sumarycznej wydajności ok. 1 mln Mg/rok. W pozostałych regionach odpady będą przekształcane w instalacjach mechaniczno-biologicznego przetwarzania (MBP) odpadów komunalnych.

Mechaniczno-biologiczne przetwarzanie zmieszanych odpadów komunalnych składa się z dwóch etapów. Pierwszy mechaniczny polega na odsianiu frakcji od

0 do 80 lub 100 mm, z którego frakcję nadsitową kieruje się do dalszego przetwarzania, którego celem jest odzysk energetyczny i surowcowy. Frakcja podsitowa kierowana jest do przekształcania biologicznego tlenowego lub beztlenowego.

W dalszej części artykułu omówione zostanie tlenowe przekształcanie frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych, czyli kompostowanie lub stabilizacja tlenowa. Kompostowaniu poddaje się selektywnie zebrane odpady zielone w celu uzyskania produktu możliwego do wykorzystania, czyli kompostu. Stabilizacji tlenowej poddaje się frakcje biodegradowalne odpadów komunalnych, które ze względu na zawarte w nich substancje zanieczyszczające nie mogą stanowić surowca do produkcji kompostu. W wyniku tego procesu powstanie tzw. stabilizat. Procesy biologiczne i chemiczne zachodzące w trakcie kompostowania i stabilizacji tlenowej są takie same.

2. Cel przekształcania biologicznego

Biologiczne przekształcanie odpadów zielonych i bioodpadów zebranych selektywnie, tj. kompostowanie, stosuje się w celu nieuciążliwego dla środowiska oraz możliwie szybkiego rozkładu substancji organicznych i ich przekształcenie w substancje próchnicze. Dąży się przy tym do tego, aby w czasie okresu intensywnego kompostowania, a następnie dojrzewania wyprodukować jakościowo wartościowy produkt do nawożenia roślin. Kompost wykorzystuje się jako próchnicę, substancję odżywczą, polepszacz gleby lub jako część składową substratów roślinnych i kultury gleby [9].

Czas dojrzewania kompostu jest uzależniony między innymi od oczekiwanej jakości gotowego produktu, jak np. stabilność struktury, która jest ważna w przypadku zazieleniania nasypów i skarp, czy też chłonność wody w wykorzystaniu go jako ziemi doniczkowej [5]. Celem biologicznego przekształcania frakcji biodegradowalnej, uzyskanej w wyniku mechanicznej obróbki zmieszanych odpadów komunalnych, jest możliwie szybka ich stabilizacja. Procesy są tak prowadzone, aby emisja zanieczyszczeń, powstająca w wyniku rozkładu frakcji organicznej odpowiedzialnej za emisję odorów oraz gazów cieplarnianych, np. metanu na składowiskach nie była uciążliwa dla środowiska. Oprócz redukcji ilości gazu cieplarnianego emitowanego ze składowisk i zanieczyszczonych odcieków, redukuje się również masa i objętość przetwarzanych odpadów.

Po spełnieniu określonych prawem warunków, stabilizat uzyskany w procesie kompostowania frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych może być deponowany na składowiskach odpadów innych niż niebezpiecznych i obojętnych. W zależności od potrzeb, procesy zachodzące w trakcie kompostowania tego rodzaju odpadów można również wykorzystać w celu ich wysuszenia, np. do współspalania z węglem [6]. Stabilizat po przesianiu go przez sito o prześwicie oczek o wielkości do 20 mm można wykorzystać do odzysku jako kompost niespełniający np. wymagań do rekultywacji składowiska [7].

3. Podstawowe parametry sterowania procesem kompostowania

Prawidłowy przebieg procesu kompostowania jest uwarunkowany między innymi optymalnym sterowaniem procesu biologicznego przetwarzania materiału ze względu na zróżnicowane ilości substancji organicznych w materiale wyjściowym oraz różną strukturę wsadu. Z tego względu przyspieszenie procesu biologicznego przetwarzania wymaga technicznego wspomaganie, by zapewnić odpowiednie warunki tego procesu.

Na właściwy przebieg procesu kompostowania, tj. optymalny przebieg reakcji biologicznych i chemicznych oraz wielkość emisji z procesu, jak również jakość produktu w przypadku odpadów biodegradowalnych, mają wpływ następujące sterowalne parametry [5]:

- jakość mieszaniny materiałowej surowego kompostu,
- sterowanie gospodarką wodną,
- zasilanie tlenem materiału podczas kompostowania,
- sterowanie temperaturą podczas kompostowania.

4. Procesy biologiczne zachodzące podczas kompostowania

Wiedza w zakresie stopniowo przebiegających procesów biologicznych i chemicznych w trakcie prowadzenia kompostowania jest podstawą do optymalnego nim sterowania. W związku z powyższym ważnym elementem jest wystarczające zrozumienie biologii tego procesu.

4.1. Działanie mikroorganizmów

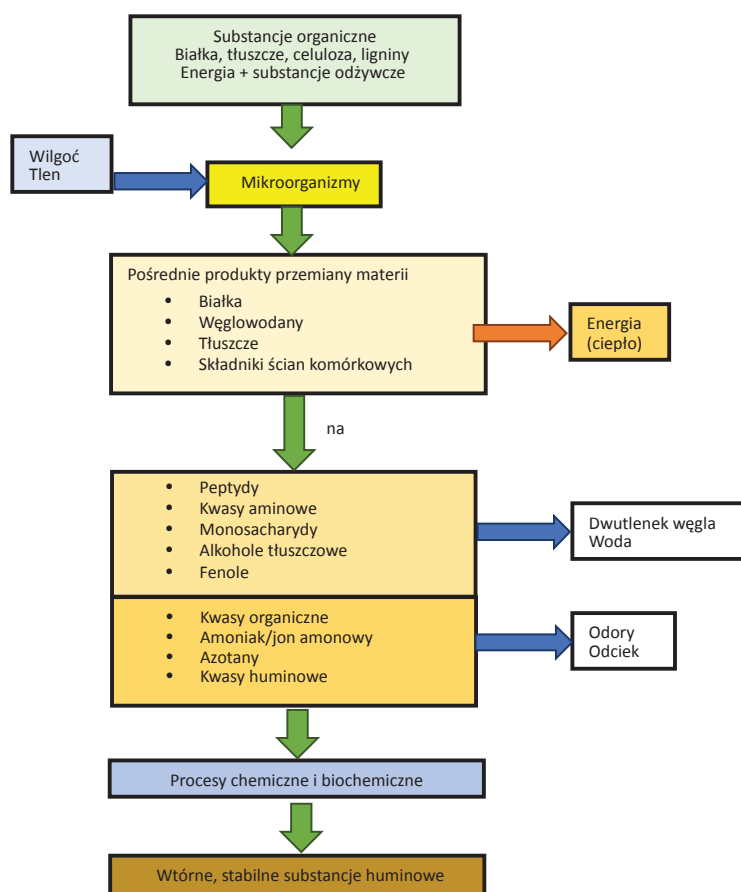
W czasie procesu biologicznego rozkładu w warunkach tlenowych, zawarta w odpadach frakcja organiczna jest wykorzystywana przez mikroorganizmy pobierające tlen jako źródło energii i substancji odżywczych. Część węgla pozostaje w substancji komórkowej mikroorganizmów jako element ich struktury, a pozostała część w postaci dwutlenku węgla uwalnia się do atmosfery. Białko, tłuszcze i węglowodany ulegają w procesie kompostowania hydrolizie. Produkty hydrolizy, takie jak: monosacharydy z węglowodanów, peptydy i aminokwasy z białek i związki fenolowe z aromatycznych części składowych ścianek komórek, częściowo są przekształcane w kwasy organiczne (kwas octowy, kwas masłowy, kwas walerianowy, kwas propionowy) i dwutlenek węgla [5].

W warunkach aerobowych dochodzi przy tym do znacznej redukcji ilości węgla. W dalszej części procesu generowane jest białko, CO₂ i woda oraz, w zależności od poziomu pH i zawartości azotu, powstaje amoniak lub jon amonowy. W trak-

cie dalszej części kompostowania, w warunkach odpowiedniej ilości tlenu oraz we właściwych temperaturach, jon amonowy utlenia się i poprzez jon azotynowy przechodzi w jon azotanowy [5].

Zapotrzebowanie na tlen i jego rozdział w kompostowanej masie odpadów jest uzależnione od wielu parametrów. Najbardziej istotne z nich to [5]:

- rodzaj biogenych odpadów, tj. skład ich substancji organicznych,
- aktualny stan rozkładu,
- zawartość wody względnie będąca do dyspozycji, w celu intensywnej wymiany gazowej, powierzchnia pokryta cienką warstwą wody,
- proporcjonalne wymiary i stabilność objętości porów przewodzących powietrze,
- kształt geometryczny kompostowanej masy odpadów.



Ryc. 2. Przekształcanie biogenych substancji wyjściowych poprzez rozkład biologiczny [5]

Na rycinie 2 przedstawiono poglądowo stopniową mineralizację materiału wyjściowego i produkty przemiany materii. Uwalniane rodzaje emitowanych substancji i energii wskazują na konieczność profesjonalnego sterowania procesem kompostowania.

Wytwarzanie kompostu w procesie przemiany materii wymaga, ze względu na nagromadzenie substancji organicznych ich niewystarczającej struktury lub będących do dyspozycji środków techniczno-technologicznych, przede wszystkim zapewnienia w przeważającej części tlenowo przebiegającego procesu kompostowania względnie jego optymalizację. Możliwość wpływania na proces zasadniczo ogranicza się do fazy redukcji podstawowych organicznych substancji wyjściowych. Na następujący potem proces powstawania próchnicy ze względu na środki techniczno-technologicznych można mieć tylko warunkowy wpływ.

4.2. Uwarunkowania temperaturowe

Tempo rozkładu biologicznego w czasie intensywnego kompostowania zależy w dużym stopniu od ilości dostępnych drobnoustrojów w materiale wsadowym. Substancje organiczne pod względem podatności na rozkład dzieli się na łatwo i trudno ulegające rozkładowi biologicznemu. Cechą charakterystyczną biologicznego rozkładu substancji organicznych przez mikroorganizmy jest wzrost temperatury procesu. Jej wartość jest zależna od intensywności procesów rozkładu i objętości masy biologicznej. Wzrost temperatury w kompostowanym środowisku nazywane jest samoogrzaniem.

W trakcie kompostowania odpadów biodegradowalnych samoogrzanie jest pożądane z dwóch powodów [5]:

- 1) zmienia się populacja mikroorganizmów, a przez to dochodzi do przyspieszonego rozkładu biologicznego;
- 2) oprócz efektów antybiotycznych dochodzi (między innymi przez grzybowe produkty przemiany materii) także do termicznego unieszkodliwienia patogenów pod warunkiem oddziaływania na mikroflorę przez określony czas temperatury co najmniej 55°C.

W tabeli 2 przedstawiono trzy zakresy temperatur, które są wymagane dla różnych rodzajów mikroorganizmów.

T a b e l a 2

Zakresy temperatur oraz fazy i rodzaje mikroorganizmów dominujących w danych warunkach temperaturowych [5]

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

Należy mieć na uwadze, że od temperatury 75°C rozpoczyna się denaturyzacja białka, co powoduje zamieranie procesu biologicznych w trakcie kompostowania.

Dla trzech istotnych wymagań w procesie kompostowania, takich jak: higienizacja, rozkład biologiczny frakcji organicznej oraz maksymalna drobnoustrojowa różnorodność, w tabeli 3 przedstawiono optymalne poziomy temperatur.

T a b e l a 3

Wymagania procesowe i optymalne zakresy temperatur [5]

Wymagania procesowe	Temperatura [°C]
Higienizacja	> 55
Stopień rozkładu biologicznego; rozpoczynający się rozkład ligniny/ /humifikacja	45–55
Drobnoustrojowa różnorodność oraz rozkład biologiczny drobnoustrojowej masy, rozkład biologiczny ligniny/humifikacja	35–40

Poniżej przedstawiono ważne czynniki mające wpływ na przyrost temperatury w procesie biologicznego przetwarzania, a mianowicie.

- podatność na rozkład biologiczny,
- stosunek C/N,
- wilgotność materiału wejściowego,
- napowietrzanie.

Sterowanie temperaturą w trakcie procesu kompostowania można prowadzić stosując się do poniższych zasad [5]:

- Samoogrzanie, przy zawartości w materiale wejściowym wystarczających ilości organicznych homogenicznie wymieszanych frakcji, spowoduje wzrost temperatury powyżej 55°C, czyli do poziomu wymaganego dla termicznej higienizacji wsadu. Dla zagwarantowania higienizacji odpadów, zgodnie z ramowymi uwarunkowaniami prowadzenia procesu, należy zwrócić uwagę na to, aby minimalną temperaturę higienizacji uzyskać w założonym czasie w całej warstwie kompostowanego materiału.
- Po fazie higienizacji należy temperaturę kompostowanego materiału, poprzez działania techniczne, takie jak: napowietrzanie, nawilżanie lub spulchnianie, możliwie szybko obniżyć i utrzymywać na poziomie poniżej 50–55°C, w celu uzyskania ciągłego biologicznego rozkładu i przemian oraz szybką humifikację i utworzenie kompleksu ilasto-humusowego.

W czasie pierwszego etapu procesu kompostowania, mezofilne i termotolerancyjne/termofilne grzyby rozpoczynają swój rozkład w zakresie temperatur pomiędzy 60 i 70°C. Po etapie higienizacji, następny etap kompostowania, przy

temperaturach częściowo znacznie wyższych niż 60–65°C, jest zdominowany przez bakterie termofilne. Na tym etapie występują także termofilne promieniowce. W trakcie przemiany pierwotnych substancji organicznych, najpierw powstają tylko pośrednie produkty przemiany, w trakcie których dochodzi do uwolnienia energii. W dalszym etapie kompostowania przetwarzane są średnio i trudno ulegające rozkładowi biologicznemu części składowe kompostowanych odpadów. Frakcje łatwo rozkładalne biologicznie uległy już częściowemu rozkładowi w fazie mezofilnej lub w fazie gorącego kompostowania. Zmianie ulega skład substratu, co powoduje spadek aktywności biologicznej, a następnie spadek temperatury. Po uzyskaniu temperatury poniżej 60°C, w zależności od składu substratu, rozwija się jedna, składająca się z bakterii, promieniowców i grzybów, mieszana populacja mikroorganizmów [5].

Kiedy drobnoustrojowy proces rozkładu biologicznego osiągnie stopień zaawansowania charakteryzujący się tym, że utworzone produkty rozkładu są zdolne do współreagowania, poprzez wiązanie energii, powstają wtórne stabilne substancje humusowe, tj. nowe związki organiczne. W końcowym etapie tworzą się organiczno-mineralne kompleksy oraz powstaje trudno lub długotrwale mineralizujący się humus [5].

5. Czynniki mające wpływ na biologiczny rozkład

5.1. Biologiczna podatność na rozkład frakcji organicznej

Szybkość rozkładu biologicznego lub mineralizacji w zależności od stabilności i posiadanego stosunku C/N składników organicznych przedstawiono w tabeli 4. Substancje organiczne dzieli się na takie, które łatwo lub ciężko ulegają rozkładowi biologicznemu.

Tabela 4
Szybkość rozkładu biologicznego różnych grup substancji organicznych w trakcie procesu kompostowania [5]

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. Wilgotność

Właściwa wilgotność jest bardzo ważna w czasie trwania całego procesu intensywnego kompostowania ze względu na to, że mikroorganizmy pobierają substancje odżywcze oraz tlen w postaci rozpuszczonej w wodzie. W wyselekcjonowanych odpadach kuchennych zawartość wody utrzymuje się na poziomie od 80 do 95% w świeżej masie. Prowadzi to podczas zbiórki i transportu do wydzielania się wody i powstania odcieków. W zależności od rodzaju struktury i pojemności wody w organicznych frakcjach wejściowych, zawartość wody w pojedynczych składnikach może się wahać w szerokim zakresie. Jednakże stabilność całej struktury oraz wystarczająca objętość powietrzna porów, nawet przy maksymalnych zawartościach wilgotności, gwarantuje odprowadzenie nadmiernej ilości wody i odpowiedni dostęp tlenu. Korzystne zakresy zawartości wilgoci, np. dla odpadów kuchennych ubogich pod względem zawartości materiału strukturalnego, kształtują się na poziomie 45–50% wilgotnej masy, natomiast dla mieszanin zdominowanych przez cięte odpady zielone bogate w materiał strukturalny na poziomie 45–60% wilgotnej masy.

5.3. Stabilność struktury kompostowanego wsadu

Stabilizacja struktury materiału poddawanego przetworzeniu biologicznemu jest warunkiem uzyskania wymaganej porowatości dla właściwej wymiany gazowej w materiale intensywnie kompostowanym lub dojrzewającym. Jest to czynnik istotny w takim samym stopniu dla zamkniętych reaktorów, jak i otwartych przyzm. Optymalny udział materiału strukturalnego, tj. zrębków lub rozdrobnionych gałęzi (w przypadku kompostowania frakcji biodegradowalnej zmieszanych odpadów komunalnych, funkcję tę pełnią frakcje nieorganiczne znajdujące się w części podsitowej) zależy od wybranej metody kompostowania, właściwości struktury i zawartości wody w pozostałych składnikach przetwarzanego materiału.

Podstawowa zasada stanowi, że im wyższy będzie przekrój kompostowanej partii, tym większe będzie jego samozagęszczenie. Stąd też można stwierdzić, że w przypadku dużego samozagęszczenia, przewietrzanie poprzez konwekcję (efekt kominowy w przypadku przyzmy) lub przewietrzanie wymuszone, nawet przy wysokim udziale materiału strukturalnego, nie będzie zagwarantowane [5].

5.4. Wartość pH

W przypadku mieszanin materiału wejściowego z dużym udziałem świeżych odpadów kuchennych dochodzi w fazie początkowej, tzn. w ciągu pierwszych 3 do 7 dni, do obniżenia się wartości pH od 4 do 6. Faza kwaśna powoduje znaczne opóźnienie rozkładu biologicznego oraz tworzenie się lekkich kwasów

organicznych. Dodanie wapna już w ilości 0,2% wag. powoduje osłabienie albo skrócenie fazy opóźnienia. Natomiast ilości wapna powyżej 0,4% prowadzą do uwolnienia amoniaku (NH_3), co jest źródłem wydzielania się odorów. W przypadku kompostowania osadów ściekowych stabilizowanych wapnem, posiadających pH na poziomie 10–12, nie jest możliwa żadna aktywność biologiczna. Należy wtedy do wsadu domieszać odpowiednią ilość ciętych odpadów zielonych, aby w krótkim czasie (1 do 3 tygodni) uzyskać obniżenie wartości pH poniżej 8. Osady stabilizowane polimerami posiadają przeważnie pH w granicach 6,5 do 7,0 [5].

5.5. Stosunek C/N

Stosunek C/N oznacza masowy stosunek węgla organicznego do azotu w substancji organicznej przeznaczony do kompostowania. Mikroorganizmy potrzebują do życia węgla organicznego oraz odpowiednio mniejszych ilości azotu. Jeśli substancje te zawarte są w kompostowanej masie odpadów w odpowiednim stosunku, to mikroorganizmy mnożą się szybko i w ten sposób szybko doprowadzają do rozkładu frakcji organicznej. Optymalny stosunek C/N, w materiale przeznaczonym do kompostowania, na początku intensywnego procesu kompostowania waha się w granicach od 25 do 35. W przypadku wyższego stosunku C/N (> 35) proces rozkładu biologicznego przebiega wolniej. Przy niższym stosunku C/N (< 20) może wystąpić emisja amoniaku, który stanowi zanieczyszczenie (emisja odorów). Obniża się również jakość kompostu. Natomiast w przypadku przetwarzania materiałów z wyższym stosunkiem C/N (> 30), należy dodać materiał zawierający azot (np. gnojowica, mocznik albo osady ściekowe), co może przyspieszyć rozkład biologiczny. Produkt z procesu kompostowania powinien się charakteryzować stosunkiem C/N wynoszącym < 20. Wyższy udział azotu w kompoście gwarantuje uzyskanie lepszych parametrów wymaganych w odniesieniu do nawozów organicznych [5].

W tabeli 5 przedstawiono przykładowe wartości parametru C/N dla różnych materiałów wsadowych.

T a b e l a 5

Przykładowe wartości stosunków C/N [5]

Nawóz rolniczy		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 ziemniaczane	25
obornik bydłocy (ubogi w słome)	20	liście	30–60
obornik koński	25	ściółka iglasta	30–100

cd. tab. 5

Nawóz rolniczy		Odpady zielone	
obornik odbydłecy (bogaty w słomę)	30	słoma (jęczmień, rośliny strączkowe)	40–50
Bioodpady		słoma (owies)	60
Materiał	Stosunek 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	Stosunek C/N
odpady kuchenne	23	torf	30–50
owoce	35	trociny (lite drewno)	100–500
makulatura	120–170	karton	200–500

6. Czas kompostowania

W przypadku zachowania korzystnych warunków procesu, tj.: stosunku C/N, odpowiedniej wilgotności, stabilności struktury, odpowiedniego przepływu powietrza, wystarczający czas przetwarzania bioodpadów w zamkniętym procesie intensywnego kompostowania, gwarantujący uzyskanie odpowiedniej stabilności dla dalszego dojrzewania na otwartym placu, wynosi od 21 do 28 dni. Rzeczywisty okres intensywnego kompostowania zależy jednak w dużej mierze od oczekiwanej jakości kompostu.

7. Nieprawidłowości w procesie kompostowania

- Nie należy mieszać gotowego produktu po fazie dojrzewania z materiałem wejściowym [5].
- Nieprawidłowo dokonana ocena wsadu lub nieprawidłowy wybór metody sterowania procesem intensywnego kompostowania może skutkować wysuszeniem materiału poddawanego kompostowaniu, jest to tzw. sucha stabilizacji. Może się to zdarzyć w przypadku zbyt intensywnego przewietrzania oraz niedostatecznego nawilżania przetwarzanego materiału. W takim przypadku, po opróżnieniu reaktora i umieszczeniu przesuszonego materiału w celu jego dalszego dojrzewania w otwartych przyzmacach oraz jego nawilżeniu, możliwe jest ponowne rozpoczęcie intensywnej fazy kompostowania z typowymi dla niej uwarunkowaniami, między innymi z emisją odorów [5].
- Nie należy prowadzić procesu kompostowania w temperaturach powyżej 70°C, ponieważ już od 65°C dochodzi do wyraźnego spowolnienia rozkładu frakcji organicznej oraz może to skutkować emisją odorów do środowiska i obniżeniem jakości kompostu [5].

8. Wymagania w zakresie emisji z biologicznego przetwarzania odpadów [6]

Wymagania przedstawione w niniejszym artykule zostały opracowane na podstawie wytycznych austriackich w zakresie MBP.

Urządzenia do biologicznego przetwarzania materiałów wsadowych lub odpadów w warunkach tlenowych (kompostowanie), muszą być wykonane jako instalacje zamknięte lub obudowane, w których wytworzone jest podciśnienie poprzez odciąganie gazów procesowych. Odciągane w trakcie kompostowania z instalacji powstające gazy odlotowe są w całości kierowane do oczyszczania. Strumienie gazów odlotowych z punktów załadunku, wyładunku lub przeładunku oraz z przerzucania kompostowanych materiałów są tak samo kierowane do oczyszczenia. Odciągnięte strumienie gazów odlotowych, mogą również służyć jako źródło powietrza procesowego potrzebnego do kompostowania.

W celu ograniczenia emisji należy wykorzystać możliwości zastosowania procesów i technologii niskoemisyjnych, poprzez wielokrotne wykorzystanie gazów odlotowych jako powietrza procesowego podczas kompostowania lub zastosować zintegrowany recykling wody lub pozostałości w formie szlamu.

Instalacje (obiekty) powinny być zbudowane i eksploatowane w taki sposób, aby strumienie gazów odlotowych spełniały wymagania zawarte w tabeli 6 w zakresie wartości granicznych emisji.

Ustanowione w wytycznych [5] graniczne wartości emisji obowiązują w odniesieniu do eksploatacji instalacji w normalnych warunkach. Jednakże, gdy warunki odbiegają od normalnych (np. faza załadunku lub rozładunku) oraz w okresie prac konserwacyjnych i naprawczych, poprzez zastosowanie odpowiednich środków, należy w miarę możliwości zapewnić ich dotrzymanie.

Wartości graniczne emisji (tab. 6) są przedstawione jako stężenie masowe w odniesieniu do objętości gazów odlotowych w warunkach normalnych (273 K, 1013 hPa) po odliczeniu wilgoci. Rozrzedzanie gazów odlotowych w celu nieprzekraczania granicznych wartości emisji jest niedopuszczalne.

T a b e l a 6

Graniczne wartości emisji [6]

1. Związki organiczne przedstawione jako całkowity węgiel organiczny	
– wartość półgodzinna	40 mg/m ³
– wartość średniodobowa	20 mg/m ³
– stosunek masowy	100 g/t _{odpadów}
2. Tlenki azotu przedstawione jako dwutlenek azotu (NO ₂)*	
– wartość półgodzinna	150 mg/m ³
– wartość średniodobowa	100 mg/m ³
3. Amoniak	20 mg/m ³
4. Dioksyny i furany** (2-, 3-, 7-, 8-TCDD – ekwiwalent (I-TEQ))	0,1 ng/m ³
5. Pył całkowity	10 mg/m ³
6. Odory	500 GE/m ³
7. Pozostałe parametry***	

* Jeżeli na podstawie zastosowanej technologii oczyszczania gazów odlotowych powstawania tlenków azotu (NO_x) nie można wykluczyć.

** Jeżeli na podstawie zastosowanej technologii oczyszczania gazów odlotowych powstawania polichlorowanych dibenzodioskyn oraz polichlorowanych dibenzofuranów nie można wykluczyć.

*** W zależności od planowanych technologii i odpadów do przetwarzania, należy również wziąć pod uwagę, przy rozważaniu wszystkich możliwych emisji, wszystkie istotne gazy cieplarniane (np. N₂O) i w danym przypadku je ograniczyć. W odniesieniu do instalacji IPPC, zgodnie z ustawą o gospodarce odpadami, należy ograniczyć w każdym przypadku istotne zanieczyszczenia z katalogu (w takim stopniu, w jakim to ma znaczenie dla określenia wartości granicznych emisji); (patrz również załącznik 3 Dyrektywy 96/61/EG w sprawie zintegrowanego unikania i zmniejszania zanieczyszczenia środowiska).

9. Niektóre wymagania BAT dla procesu biologicznego przetwarzania odpadów

Przetwarzanie odpadów jest uregulowane przez dokument tzw. BREF Komisji Europejskiej z sierpnia 2006 pt.: Zintegrowane zapobieganie i kontrola zanieczyszczeń. Dokument referencyjny w zakresie najlepszych dostępnych technik dla przemysłu przetwarzania odpadów – sierpień 2006 [8]. Powyższy dokument referencyjny jest odzwierciedleniem wymiany informacji przeprowadzonej na mocy artykułu 16 ustęp 2 Dyrektywy Rady 96/61/WE (Dyrektywa IPPC) i obej-

muje działalność opisaną w sekcji 5 załącznika 1 do dyrektywy, dotyczącego zarządzania odpadami.

Sektor odpadów jest ściśle regulowany w UE. W związku z czym, dostępnych jest wiele definicji prawnych terminów powszechnie stosowanych w tym sektorze. Instalacje przetwarzania odpadów obejmują operacje na rzecz odzyskiwania lub unieszkodliwiania odpadów. Wychodzi się z założenia, że instalacje przetwarzania odpadów świadczą usługi na rzecz społeczeństwa w celu zagospodarowania jego materiałów odpadowych.

Dokument referencyjny zawiera aktualną sytuację techniczną i środowiskową oraz krótki opis techniczny działań i procesów w sektorze przetwarzania odpadów, uzupełniony o rzeczywiste emisje oraz zużycie mediów w instalacjach. W dokumencie przedstawiono 940 technik przetwarzania odpadów, w tym między innymi przetwarzanie biologiczne, takie jak rozkład beztlenowy i tlenowy.

Zakłada się, że najlepsze dostępne techniki są punktem odniesienia, względem którego ocenia się bieżącą wydajność istniejącej instalacji lub dokonuje się oceny propozycji nowej instalacji. W ten sposób będą one narzędziem wspomagającym przy ustalaniu właściwych warunków opartych na najlepszych dostępnych technikach (BAT) dla danej instalacji. Przewiduje się, że nowe instalacje można zaprojektować tak, aby ich wydajność kształtowała się na przedstawionych poziomach ogólnych BAT lub była nawet wyższa. Uważa się także, że istniejące instalacje mogą osiągnąć poziomy ogólnych najlepszych dostępnych technik lub nawet wyższe, z zastrzeżeniem technicznego i ekonomicznego zastosowania technik w każdym przypadku.

Zastosowanie najlepszej dostępnej techniki w tlenowym przetwarzaniu odpadów wymusza dostosowanie się do poniższych wymagań.

1. Ulepszyć przetwarzanie mechaniczno-biologiczne poprzez:

- a) stosowanie całkowicie obudowanych bioreaktorów;
- b) unikanie warunków beztlenowych w trakcie przetwarzania tlenowego poprzez kontrolowanie procesu biologicznego rozkładu i ilości dostarczanego do procesu powietrza przy zastosowaniu wymuszonego systemu napowietrzania oraz poprzez dostosowanie napowietrzania do rzeczywistej aktywności biologicznej;
- c) stosowanie optymalnej gospodarki wodnej z wykorzystaniem odcieków powstających w procesie;
- d) termiczne izolowanie sufitu hali lub reaktora, w którym zachodzi proces rozkładu biologicznego w procesie tlenowym;
- e) zminimalizowanie ilości gazów odlotowych do poziomów 2500 do 8000 m³_n na tonę odpadów. (W trakcie opracowywania dokumentu BAT nie zgłoszono poziomów ilości gazów odlotowych poniżej 2500 m³_n na tonę);

- f) zapewnienie jednolitego materiału wsadowego;
- g) recykling wód procesowych lub szlamowych pozostałości w ramach procesu tlenowego w celu całkowitego uniknięcia emisji do wody. W przypadku generowania ścieków należy je oczyścić;
- h) ciągle zdobywanie wiedzy na temat korelacji między kontrolowanymi zmiennymi rozkładu biologicznego a mierzonymi emisjami (gazowymi);
- i) redukcje emisji związków azotu przez zoptymalizowanie wskaźnika C:N.
2. Zredukować emisje z przetwarzania mechaniczno-biologicznego do poziomów przedstawionych w tabeli 7.

T a b e l a 7

*Poziomu emisji gazowych z instalacji MBP [8]**

Parametr	Oczyszczone gazy odlotowe
Odory (ouEm ³)	< 500-6000
NH ₃ (mg/Nm ³)	< 1-20

*Dla LZO i cząsteczek stałych zob. ogólną BAT 41. TWG uznała, że do tej tabeli należało również dodać N₂O (zob. Sekcja 4.6.10) i Hg, niemniej jednak nie dostarczono wystarczających danych, aby zweryfikować wartości w tych kwestiach.

Redukcję emisji należy przeprowadzić przy użyciu odpowiedniej kombinacji następujących technik:

- a) ciągle utrzymanie właściwego zarządzania procesem;
- b) wykorzystanie regeneracyjnego utleniacza termicznego;
- c) usuwanie pyłu.

3. Ograniczyć emisje całkowitego azotu, amoniaku, azotanów i azotynów do wody.

10. Podsumowanie

- Wypełnienie przez Polskę wymagań redukcji ilości deponowanej frakcji organicznej w odpadach komunalnych do 2020 r. do poziomu 35% w stosunku do ilości wytworzonych odpadów w 1995 r., wymaga znacznego rozbudowania istniejącej infrastruktury technicznej w zakresie przetwarzania i unieszkodliwiania odpadów komunalnych.
- Zgodnie z Krajowym planem gospodarki 2014 w zależności od liczby mieszkańców w regionie preferuje się następujące formy unieszkodliwiania odpadów komunalnych.
 - od 150 do 300 tys. mieszkańców – mechaniczno-biologiczne przekształcenie zmieszanych odpadów komunalnych i pozostałości z sortowni;

– powyżej 300 tys. mieszkańców – termiczne przekształcenie zmieszanych odpadów komunalnych.

- Budowa instalacji termicznego przekształcania odpadów jest związana z dużymi kosztami. Aktualnie (2014 r.) w Polsce buduje się 6 instalacji o łącznej wydajności ok. 1 mln Mg/rok. Z tego też względu znaczenia nabiera drugi sposób, tj. ich przetworzenie w instalacjach do mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów.
- Mechaniczno-biologiczne przetwarzanie zmieszanych odpadów komunalnych składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap – mechaniczny polega na odsianiu frakcji od 0 do 80 lub 100 mm, z którego frakcję nadsitową kieruje się do dalszego przetwarzania mającego na celu odzysk energetyczny i surowcowy. Frakcja podsitowa kierowana jest do przekształcania biologicznego tlenowego lub beztlenowego.
- Kompostowaniu poddaje się selektywnie zebrane odpady zielone w celu uzyskania produktu możliwego do wykorzystania, czyli kompostu. Stabilizacji tlenowej poddaje się frakcje biodegradowalne odpadów komunalnych, które ze względu na zawarte w nich substancje zanieczyszczające nie mogą stanowić surowca do produkcji kompostu. W wyniku tego procesu powstanie tzw. stabilizat.
- Celem biologicznego przekształcania odpadów zielonych i bioodpadów zebranych selektywnie, tj. kompostowania, jest nieuciążliwy dla środowiska oraz możliwie szybki rozkład substancji organicznych i ich przekształcenie w substancje próchniczne. Natomiast celem biologicznego przekształcania frakcji biodegradowalnej, uzyskanej w wyniku mechanicznej obróbki zmieszanych odpadów komunalnych, jest możliwie szybka ich stabilizacja oraz redukcja masy i objętości.
- Procesy kompostowania są tak prowadzone, aby emisja zanieczyszczeń powstająca w wyniku rozkładu frakcji organicznej odpowiedzialnej za emisję odorów oraz gazów cieplarnianych, np. metanu, na składowiskach nie była uciążliwa dla środowiska. Oprócz redukcji ilości gazu cieplarnianego emitowanego ze składowisk i zanieczyszczonych odcieków, zmniejsza się również masa i objętość przetwarzanych odpadów. Po spełnieniu określonych prawem warunków stabilizat uzyskany w procesie kompostowania frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych, może być bezpiecznie deponowany na składowiskach odpadów innych niż niebezpiecznych i obojętnych.
- Za procesy rozkładu biologicznego odpowiadają mikroorganizmy rozmnażające się i działające w różnych fazach procesu, które charakteryzują się zróżnicowaną temperaturą i tak – dla zakresu psychrofilnego wymagane są temperatury w zakresie od -4 do 20°C, dla zakresu mezofilnego od 15 do 42°C, a dla zakresu termofilnego od 45 do 75°C. Powyżej tej temperatury proces rozkładu biologicz-

nego zamiera. W tym czasie odpady ulegają higienizacji oraz w wyniku reakcji biochemicznych humifikacji.

- Ważnymi elementami procesu kompostowania są: wilgotność, która powinna być utrzymywana w zależności od struktury przetwarzanych odpadów od 45 do 60%, wartość pH, która z zależności od fazy procesu powinna się mieścić w granicach od 6,0 do 8,5, stosunek C/N, którego wartość powinna się mieścić w granicach 1: 25–35 oraz czas kompostowania, który przy optymalnych warunkach w procesie zamkniętym powinien trwać od 21 do 28 dni. Po tym czasie dalszy proces dojrzewania prowadzi się na pryzmach otwartych.
- Równie ważnym elementem procesu jest prawidłowa ocena wsadu oraz prawidłowy wybór metody sterowania procesem intensywnego kompostowania, ponieważ błąd w tym zakresie może spowodować wysuszenie materiału, a nie jego biologiczny rozkład. W przypadku wysuszenia taki materiał po jego umieszczeniu na otwartej pryzmie i jego powtórny nawilżeniu ulegnie dalszemu rozkładowi biologicznemu ze wszystkimi jego skutkami, między innymi z emisją odorów.
- Proces kompostowania należy tak prowadzić, aby nie stanowił on obciążenia dla środowiska naturalnego. Oznacza to, że instalacja musi być wyposażona w urządzenia oczyszczające powietrze poprocesowe odprowadzane do środowiska oraz urządzenia zabezpieczające przed przenikaniem do środowiska odcieków i zanieczyszczonych wód.
- Instalacje do biologicznego przetwarzania odpadów muszą również wypełniać wymagania najlepszej dostępnej techniki w tym zakresie, m.in.:
 - stosowanie całkowicie obudowanych bioreaktorów;
 - unikanie warunków beztlenowych w trakcie przetwarzania tlenowego poprzez kontrolowanie procesu biologicznego rozkładu i ilości dostarczanego do procesu powietrza przy pomocy wymuszonego systemu napowietrzania oraz poprzez dostosowanie napowietrzania do rzeczywistej aktywności biologicznej;
 - stosowanie optymalnej gospodarki wodnej z wykorzystaniem odcieków powstających w procesie;
 - zminimalizowanie ilości gazów odlotowych do poziomów 2500–8000 m³_n na tonę odpadów;
 - zapewnienie jednolitego materiału wsadowego;
 - recykling wód procesowych lub szlamowych pozostałości w ramach procesu tlenowego w celu całkowitego uniknięcia emisji do wody. W przypadku generowania ścieków należy je oczyścić;
 - ciągle zdobywanie wiedzy na temat korelacji między kontrolowanymi zmiennymi rozkładu biologicznego a mierzonymi emisjami (gazowymi);

- redukcja emisji związków azotu poprzez zoptymalizowanie wskaźnika C:N;
- zainstalowanie i odpowiednia eksploatacja urządzeń służących do redukcji emisji zanieczyszczeń do powietrza, wód i gleby.

Literatura

- [1] Uchwała nr 217 Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2010 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2014”, MP z 2010 r. nr 101, poz. 1183.
- [2] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, Dz.U. z 2013 r. poz. 21, art. 35, ust. 5 i 6.
- [3] „Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej” 2013.
- [4] mos.gov.pl (14.09.2014).
- [5] BMLFUW, 2005: Stand der Technik Kompostierung – Grundlagenstudie.
- [6] BMLFUW, 2002: Richtlinie für die mechanisch-biologische Behandlung von Abfällen.
- [7] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 września 2012 r. w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych, Dz.U. z 2012 r. poz. 1052.
- [8] Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries August 2006, http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf (14.09.2014).
- [9] *Mechaniczno-biologiczne przetwarzanie frakcji biodegradowalnej odpadów komunalnych. Przewodnik po wybranych technologiach oraz metodach badań i oceny odpadów powstałych w tych procesach*, red. nauk. G. Siemiątkowski, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2012.

ALFRED NOLEPA

THE THEORETICAL BASIS OF MECHANICAL-BIOLOGICAL WASTE TREATMENT

Keywords: municipal waste, biodegradable fraction, composting.

Due to the fulfillment of legal requirements by Poland to reduce the amount of deposited organic fraction of municipal waste from landfill to 35% in relation to the amount of the waste deposited in landfills in 1995, develop of the technical infrastructure for the management of municipal waste will necessary. The one of this method is the mechanical-biological treatment of biodegradable fraction contained in this waste. In this article the selected aspects of the aerobic decomposition theory have been presented. The technical and technological requirements, and some of the requirements of best available techniques (BAT) have been also discussed.