

DOROTA KULIKOWSKA, KATARZYNA BILICKA*

ANALIZA PRZEMIAN MATERII ORGANICZNEJ I ZWIĄZKÓW AZOTU PODCZAS KOMPOSTOWANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH

ANALYSIS OF ORGANIC MATTER AND NITROGEN COMPOUNDS TRANSFORMATIONS DURING SEWAGE SLUDGE COMPOSTING

Streszczenie

W artykule analizowano przemiany materii organicznej oraz związków azotu podczas kompostowania osadów ściekowych. Wykazano, że ubytek materii organicznej wyniósł 18%, a szybkość degradacji materii organicznej na przyłomie kształtowała się na poziomie 0,46 g/kg s.m. · d. Stosunek C/N w dojrzałym produkcie wyniósł 17,8, przy czym wśród mineralnych form azotu dominował azot amonowy. Podczas kompostowania obserwowano wzrost zawartości zarówno kwasów huminowych, jak i fulwowych, przy czym kwasów huminowych było średnio czterokrotnie mniej niż fulwowych. W dojrzałym kompoście zawartość kwasów huminowych wynosiła 10,6% s.m.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, kompostowanie, humifikacja, kwasy humusowe i fulwowe

Abstract

In this article, transformations of organic matter and nitrogen compounds during sewage sludge composting were analyzed. It was shown that the organic matter degradation was 18% and the rate of organic matter decomposition was 0.46 g/kg d.m. · d. In mature compost C/N ratio equaled 17.8, but in mineral forms of nitrogen ammonium predominated. During the composting process an increase in concentration of humic acids and fulvic acids was observed. However, humic acids concentration was 4-fold lower than fulvic acids, on average. In mature compost humic acids was 10.6 % d.m.

Keywords: sewage sludge, composting, humification, humic and fulvic acids

* Dr inż. Dorota Kulikowska, mgr inż. Katarzyna Bilicka, Katedra Biotechnologii w Ochronie Środowiska, Wydział Ochrony Środowiska i Rybactwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

1. Wstęp

W ostatnich latach notuje się wzrost ilości wytwarzanych osadów ściekowych, co jest związane zarówno z budową nowych oczyszczalni, jak i modernizacją już istniejących, w których w celu uzyskania wysokiego stopnia redukcji związków biogenych, zwłaszcza fosforu, stosuje się reagenty chemiczne. Według informacji podanych przez GUS, tylko w ciągu 2 lat ilość wytworzonych osadów ściekowych wzrosła o 20%, z 359 819 Mg s.m. w 2000 r. do 435 737 Mg s.m. w 2002 r. W praktyce osady najczęściej są składowane, mimo że wiele przesłanek wskazuje na potencjalną możliwość ich zagospodarowania, np. poprzez kompostowanie. Z punktu widzenia unieszkodliwiania osadów, kompostowanie jest procesem wielofunkcyjnym, zapewniającym ich stabilizację, zniszczenie organizmów chorobotwórczych, redukcję masy i uwodnienia.

Jednym z ważniejszych czynników wpływających na jakość kompostu jest dobranie składników, z których się go otrzymuje. Uważa się, że stosunek zawartości węgla do zawartości azotu (C/N) w materiale kompostowanym powinien wynosić 22–35:1 [1]. Taką optymalną wartość uzyskuje się przez wymieszanie odpadów organicznych bogatych w węgiel (liście, słoma, papier) ze składnikami bogatymi w azot, takimi jak obornik lub osady ściekowe. Innym czynnikiem jest temperatura, która wpływa na aktywność metaboliczną mikroorganizmów oraz dynamikę populacji, tj. jej skład i liczebność. Wzrost temperatury podczas kompostowania jest funkcją temperatury początkowej oraz szybkości przemian związków organicznych powodujących uwalnianie ciepła. Na początku prawidłowo zachodzącego procesu kompostowania dochodzi do szybkiego wzrostu temperatury (tzw. faza termofilna), który sprzyja procesowi higienizacji. Z kolei woda stanowi medium transportujące substancje odżywcze niezbędne do metabolicznej aktywności mikroorganizmów [2]. Zbyt niska zawartość wody może wpływać na zahamowanie procesów biologicznych (Liang i in., cyt. za: Bertoldi i in.) [3]. Z drugiej strony nadmierna zawartość wody w kompoście sprzyja powstawaniu warunków beztlenowych, co również powoduje hamowanie procesów zachodzących podczas kompostowania [4]. Wielu autorów za optymalną uznaje wartość w przedziale 50–70%.

Stosowanie kompostu jako naturalnego czynnika nawozowego jest istotne z punktu widzenia poprawy wydajności upraw. Ponadto kompost może być stosowany, aby poprawić strukturę gleb, a także zwiększyć żyzność oraz zawartość próchnicy glebowej. Dlatego z rolniczego punktu widzenia ważna jest nie tylko ogólna zawartość węgla, ale też substancji humusowych. W niniejszych badaniach przeanalizowano przemiany materii organicznej i związków azotu podczas kompostowania osadów ściekowych. Dokonano także analizy zawartości i składu frakcyjnego kwasów humusowych w analizowanym kompoście.

2. Metodyka badań

2.1. Charakterystyka wsadu

W artykule analizowano przemiany materii organicznej oraz związków azotu podczas kompostowania prefermentowanych osadów ściekowych pochodzących z miejskiej oczyszczalni ścieków, pracującej w systemie Bardenpho, z usuwaniem związków organicznych i biogenych oraz chemicznym strącaniem związków fosforu. Prefermentowane osady

ściekowe (po fermentacji mezofilowej) i odpady lignocelulozowe kompostowano w podanych poniżej proporcjach (% wagowe mokrej masy):

- osady ściekowe – 65%,
- odpady zielone – 15%,
- kora – 5%,
- słoma rzepaczana – 15%.

Wartości zawartości wody, materii organicznej oraz azotu w kompostowanych materiałach zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Charakterystyka kompostowanych materiałów

	Zawartość wody [%]	Zawartość materii organicznej [% s.m.]	Zawartość azotu [% s.m.]
Osady po fermentacji	86	35	3
Odpady zielone	35	80	1,2
Słoma rzepaczana	15	55	0,7
Kora	15	70	0,2

Z przedstawionych danych wynika, że najwyższą zawartość wody cechuje osady ściekowe, a najniższą słomę rzepaczaną i korę, które zostały wprowadzone w celu zmniejszenia zawartości wody w kompostowanym wsadzie i jednocześnie jako materiał strukturotwórczy. Osad nadmierny zawierał też dużo azotu, co powodowało, że stosunek C/N był niski (nieco ponad 11). Dlatego, aby uzyskać optymalną do kompostowania proporcję C/N, wprowadzono materiał bogaty w węgiel – odpady zielone, w których materia organiczna stanowiła 80%.

2.2. Warunki kompostowania

Osady ściekowe i odpady lignocelulozowe kompostowano w systemie przyzmowym. Początkowa zawartość wody wynosiła 68%, a stosunek C/N 27:1.

W początkowym okresie kompostowania przyzma przerzucana była z częstotliwością 2 razy w tygodniu. Po 6 dniach kompostowana biomasa uzyskała temperaturę powyżej 55°C, która utrzymywała się przez 2 tygodnie. Po obniżeniu temperatury do ok. 40°C kompost został przesiany w celu odzyskania materiału strukturotwórczego. Kolejnym etapem było dojrzewanie kompostu w stertach o wysokości ok. 3,5 m.

W czasie kompostowania próbki do analiz pobrano w dniu uformowania przyzmy oraz w 49, 80, 215 i 245 dniu doświadczenia.

2.3. Metody analityczne

Przemiany materii organicznej oraz azotu podczas kompostowania osadów ściekowych kontrolowano na podstawie zawartości:

- substancji organicznych (PN-Z-15011-3),
- węgla organicznego,
- C_{org} we frakcji labilnych i stabilnych kwasów humusowych, fulwowych i huminowych,
- azotu Kjeldahla (PN-Z-15011-3), azotu amonowego (PN-EN 26777:1999) azotynowego i azotanowego (PN-82/C-04576.08),
- stosunku C/N.

Zawartość substancji organicznych oraz azotu Kjeldahla oznaczano w suchej masie kompostu; z suchej masy kompostu ekstrahowano też kwasy humusowe. Suchą masę badanego materiału przygotowano wg PN-Z-15011-3. Ekstrakcji labilnych i stabilnych kwasów huminowych dokonano zgodnie z metodyką podaną przez Giegużyńską [5]. Zawartość azotu amonowego, azotynowego i azotanowego oznaczano w wyciągu wodnym z mokrej masy kompostu.

Podczas kompostowania kontrolowano temperaturę oraz zawartość wody.

3. Omówienie wyników badań i dyskusja

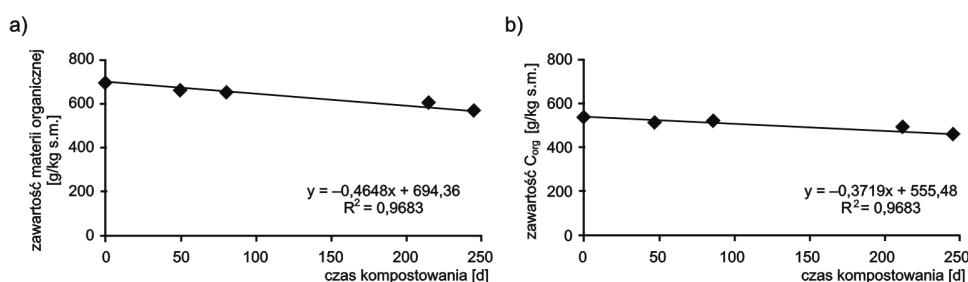
Badania polegały na analizie przemian materii organicznej oraz związków azotu podczas kompostowania osadów ściekowych w systemie pryzmowym. Określono szybkość degradacji materii organicznej oraz przeanalizowano zawartość i skład frakcyjny substancji humusowych.

Kompostowanie osadów ściekowych trwało 245 dni, z czego faza mineralizacji oraz higienizacji 35 dni, a dojrzewania 210 dni.

3.1. Ubytek materii organicznej

W wyniku kompostowania następuje wyraźny ubytek materii organicznej, co jest spowodowane intensywnie przebiegającymi procesami mineralizacji tych substancji. Jako produkty końcowe mogą powstawać woda, dwutlenek węgla, wodór, metan, siarkowodór i amoniak. Część związków organicznych jest wykorzystywana przez mikroorganizmy jako źródło węgla.

W niniejszych badaniach ubytek materii organicznej podczas kompostowania analizowano na podstawie zmian zawartości materii organicznej oraz węgla organicznego (rys. 1a, b).



Rys. 1. Zmiany zawartości materii organicznej oraz węgla organicznego podczas kompostowania osadów ściekowych: a) materia organiczna; b) węgiel organiczny

Fig. 1. Changes of organic matter and organic carbon during activated sludge composting
a) organic matter, b) organic carbon

Z przedstawionych danych wynika, że w kompostowanym wsadzie zawartość materii organicznej oraz węgla organicznego wynosiła odpowiednio 700 g/kg s.m. i 559 g/kg s.m. W czasie 245 dni kompostowania nastąpił 18% ubytek materii organicznej.

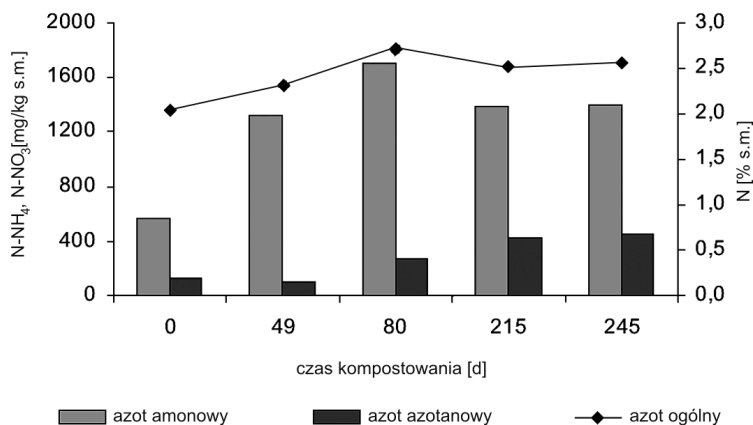
Z danych literaturowych wynika, że ubytek materii organicznej podczas kompostowania może wahać się w zależności od składu kompostowanej masy oraz warunków kompostowania. Ponsa i in. [6] podczas kompostowania przefermentowanych osadów ściekowych ze zrębkami drewnianymi w okresowo przerzucanych przyzmacach wykazali, że ubytek materii organicznej wynosił 11–30% w zależności od proporcji między osadem a zrębkami (10,55% przy stosunku osady ściekowej:zrębki drewniane 1:2 oraz 29,5% i 15,5% gdy stosunek ten kształtował się na poziomie odpowiednio 1:2,5 oraz 1:3). Podobne badania prowadzili Hernandez i in. [7], którzy wykazali, że rozkład materii organicznej po 90 dniach kompostowania osadów ściekowych (ustabilizowanych bez-tlenowo) z trocinami w proporcji 1:1 oraz 1:3 wyniósł odpowiednio 8,45% oraz 15,3%. Zdecydowanie wyższy, 33% ubytek materii organicznej, odnotowali Gea i in. [8] podczas kompostowania odpadów z przemysłu papierniczego.

Przeprowadzona w badaniach własnych analiza szybkości ubytku materii organicznej wskazuje, że proces zachodził zgodnie z reakcją 0 rzędu, a wyznaczona z równania prostej regresji szybkość ubytku związków organicznych wyniosła 0,46 g/kg s.m./d (materia organiczna) oraz 0,37 g/kg s.m. · d (węgiel organiczny). Yamada i in. [9] podczas kompostowania w warunkach laboratoryjnych osadów ściekowych w mieszaninie z trocinami wykazali, że szybkość degradacji materii organicznej zależała od ilości wprowadzanego powietrza. Autorzy stwierdzili, że rozkład materii organicznej następował najszybciej, gdy ilość wprowadzanego powietrza wynosiła 2,0 dm³/min · kg, a ubytek materii organicznej na poziomie 0,5 kg/d uzyskano po około 12 dniach kompostowania. W przypadku serii, w których ilość wprowadzanego powietrza wynosiła 0 i 4,0 dm³/min · kg po 19 dniach kompostowania ubytek materii wyniósł odpowiednio ok. 0,1 i 0,2 kg s.m./d.

3.2. Stężenia i formy azotu oraz proporcja C/N podczas kompostowania

Degradacja substancji organicznych zawierających azot prowadzi do powstawania azotu amonowego, który może być wykorzystywany przez mikroorganizmy do syntezy biomasy lub może być utleniany w procesie nityfikacji. Dlatego na początku kompostowania (w fazie mineralizacji) wzrasta stężenie azotu amonowego, a w okresie dojrzewania obserwuje się obniżenie stężenia azotu amonowego i wzrost stężenia azotu azotanowego. Wyniki uzyskane w badaniach własnych (rys. 2) wskazują, że w miarę postępowania biodegradacji kompostowego materiału obserwowano wyraźny wzrost stężenia azotu amonowego.

Maksymalne stężenie azotu amonowego (1704 mg/kg s.m.) odnotowano w 80 dniu procesu, a następnie notowano stopniowy spadek jego zawartości. W dojrzałym kompoście stężenie N–NH₄ wyniosło ok. 1400 mg/kg s.m. W czasie trwania procesu obserwowano także wzrost stężenia azotu azotanowego (ze 122 mg/kg do 449 mg/kg s.m.), co świadczy o zachodzącym procesie nityfikacji (w trakcie kompostowania analizowano również zawartość azotu azotynowego, ale ze względu na jego niskie stężenie, < 3,5 mg/kg s.m., danych nie umieszczono na wykresie). Wysokie stężenie azotu amonowego (700 mg/kg s.m.) w dojrzałym kompoście z osadów ściekowych odnotowali także Fang i in. [10]. Huang i in. [11] podczas kompostowania obornika wykazali związek pomiędzy zawartością azotu amonowego w dojrzałym kompoście a wartością C/N we wsadzie. Autorzy odnotowali, że przy początkowym C/N na poziomie 15, stężenie N–NH₄ w dojrzałym produkcie wyniosło 371 mg/kg s.m., podczas gdy przy C/N wynoszącym 30 wartość ta była 2,5-krotnie wyższa (912 mg/kg s.m.).



Rys. 2. Zmiany zawartości azotu podczas kompostowania osadów ściekowych
 Fig. 2. Changes of nitrogen concentrations during activated sludge composting

Przy ocenie dojrzałości kompostu ważna jest proporcja NH_4/NO_3 w dojrzałym produkcie. W niniejszych badaniach stosunek NH_4/NO_3 wyniósł 3. Bernal i in. [12] oraz Jouraiphy i in. [13] podają, że wartość ta w dojrzałym kompoście wynosiła odpowiednio 0,16 i 0,2. Gomez-Brandon i in. [14] podają natomiast wartość stosunku NH_4/NO_3 na poziomie 3,57.

Stężenie azotu Kjeldahla w dojrzałym kompoście uzyskanym w badaniach własnych wyniosło 2,56% (rys. 2). Podobne wartości azotu ogólnego (2,41%) uzyskali Gomez-Brandon i in. [14] podczas kompostowania obornika. Fang i in. [10] podaje, że zawartość azotu ogólnego w kompoście z przefermentowanych osadów ściekowych i popiołu wynosiła 2%.

Konsekwencją zmian zawartości węgla i azotu jest zmiana stosunku C/N w dojrzałym kompoście. W badaniach własnych odnotowano spadek proporcji C/N z 27:1 do 17,8:1. Dane literaturowe wskazują, że stosunek C/N w kompostowanym materiale jest istotnym parametrem podczas kompostowania osadów ściekowych. Przyjmuje się, że proces kompostowania przebiega prawidłowo, gdy stosunek ten wynosi 20–30. W przypadku gdy stosunek C/N jest wyższy niż 30, następuje ograniczenie szybkości procesu kompostowania, gdy z kolei jest niższy niż 20, występują problemy z odorami. W wyniku kompostowania następują zmiany zawartości węgla i azotu, czego odzwierciedleniem jest zmiana stosunku C/N. Przyjmuje się, że w dojrzałym kompoście proporcja węgla do azotu powinna być zbliżona do 10:1, a więc do takiej, jaka występuje w próchnicy. Jednak biorąc pod uwagę różnorodność materiałów poddawanych kompostowaniu, powyższe kryterium wydaje się mieć wyłącznie charakter orientacyjny. W badaniach własnych stosunek C/N wyniósł ok. 18. Podobne wartości w dojrzałym kompoście uzyskał Wang i in. [15], kompostując obornik ze słomą, oraz Adani i in. [16] podczas kompostowania odpadów organicznych (osady ściekowe, odpady z tytoniu i bawełny). Niższe wartości stosunku C/N, na poziomie 12, odnotowali w kompoście z osadów ściekowych Jouraiphy i in. [13]. Natomiast Zbytniewski i Buszewski [17] w trakcie kompostowania przefermentowanych osadów ściekowych ze słomą i trocinami w proporcji 2:1:1 obserwowali wzrost C/N z 24 we wsadzie do 32 w dojrzałym produkcie.

3.3. Zawartość i skład frakcyjny kwasów humusowych

Przemiany materii organicznej podczas fazy dojrzewania prowadzą do powstania związków wielkocząsteczkowych o charakterze kwasów organicznych. Proces ten nazywa się humifikacją, a powstałe substancje w różnym stopniu rozkładu – humusem. Z rolniczego punktu widzenia ważnym zagadnieniem kompostowania jest nie tylko ogólna zawartość węgla, ale także substancji humusowych.

W niniejszym artykule, podczas kompostowania przefermentowanych osadów ściekowych, analizowano zawartość kwasów humusowych, huminowych oraz fulwowych. Ponadto zastosowanie dwóch roztworów ekstrakcyjnych, tj. pirofosforanu sodu oraz wodorotlenku sodu, umożliwiło otrzymanie kwasów huminowych labilnych o charakterze zbliżonym do kwasów fulwowych oraz stabilnych.

Zawartość i skład frakcyjny kwasów humusowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Zawartość i skład frakcyjny kwasów humusowych w kompoście z osadów ściekowych (mg C/g mat. org.)

Czas (d)	Kwasy labilne			Kwasy stabilne			Suma		
	KH	KH _{humin}	KF	KH	KH _{humin}	KF	KH	KH _{humin}	KF
0	55,02	19,2	36,83	371,92	60,69	311,23	426,94	79,89	347,05
49	55,97	17,34	38,64	386,09	67,78	318,31	442,05	85,10	356,95
80	54,60	19,59	35,01	433,57	79,01	354,59	488,17	98,56	389,58
215	79,2	24,5	54,7	466,0	78,2	387,8	545,2	102,7	442,5
245	81,09	26,57	54,52	469,43	79,92	389,51	550,52	106,49	444,03

KH – kwasy humusowe, KH_{humin} – kwasy huminowe, KF – kwasy fulwowe

Z przedstawionych danych wynika, że podczas kompostowania zawartość kwasów humusowych wzrosła z 426,9 mg/g mat. org. we wsadzie do 550,5 mg/g mat. org. w dojrzałym kompoście, przy czym kwasy humusowe labilne stanowiły jedynie 12–14% ogólnej ilości kwasów humusowych. Dominującą frakcją, zarówno w fazie mineralizacji, jak i dojrzewania, były kwasy stabilne.

Wraz ze wzrostem zawartości kwasów humusowych, proporcjonalnie wzrastało stężenie kwasów huminowych i fulwowych (odpowiednio o 25% i 22%). Kwasy fulwowe stanowiły ponad 80% zawartości kwasów humusowych zarówno we frakcji labilnej, jak i stabilnej, przy czym stabilnych kwasów fulwowych było pięciokrotnie więcej niż stabilnych huminowych. W dojrzałym produkcie kwasy huminowe stanowiły 10,6% frakcji organicznej kompostu, w tym kwasy huminowe labilne 2,66%, a stabilne 7,99%.

Wzrost stężenia substancji humusowych odnotowali także Ouattmane i in. (2002) [18] podczas kompostowania różnego rodzaju odpadów organicznych. Autorzy wykazali, że stężenie kwasów humusowych i huminowych wzrosło odpowiednio z 12,4% do 19,2% oraz z 0,9% do 8,0% – podczas kompostowania frakcji organicznej odpadów komunalnych, oraz z 13,3% do 19% (kwasy humusowe) i z 4,7% do 13,5% (kwasy huminowe) – podczas kompostowania obornika.

W badaniach własnych podczas 245 dni kompostowania odnotowano wzrost zawartości zarówno kwasów huminowych, jak i fulwowych. Dane literaturowe dotyczące tego zagadnienia nie są jednoznaczne. Drozd i in. [19] podają, że podczas kompostowania następuje obniżenie zawartości kwasów fulwowych oraz wzrost stężenia kwasów humi-

nowych. Potwierdzają to badania Skalmowskiego [20], który odnotował spadek zawartości węgla organicznego we frakcji kwasów fulwowych i wzrost zawartości węgla we frakcji kwasów huminowych, kompostując odpady komunalne. Podobnie Jouraiphy i in. [13], kompostując osady ściekowe w mieszaninie z odpadami zielonymi, stwierdzili wzrost stężenia kwasów huminowych (z 26 do 39,5 mg/g), a spadek stężenia kwasów fulwowych (z 38 do 18 mg/g). Veeken i in. [21] w trakcie kompostowania (35 dni) odpadów organicznych odnotowali natomiast spadek zawartości kwasów huminowych z 16,9 g/kg do 9,6 g/kg, Amir i in. [22] z kolei odnotowali wzrost stężenia kwasów fulwowych z 6,4 do 14 mg/g podczas trwającego 180 dni procesu kompostowania ustabilizowanych beztlenowo osadów ściekowych ze słomą. Spadek zawartości kwasów humusowych podczas kompostowania osadów ściekowych z materiałem strukturotwórczym metodą pryzmy przrzucanej odnotowali Grigatti i in. [23].

Wyniki uzyskane w badaniach własnych wskazują na wyższą, niż podają cytowani wcześniej autorzy, zawartość kwasów humusowych, przy podobnej zawartości kwasów huminowych. Z analizy zawartości kwasów humusowych w 24 próbkach kompostu z różnego rodzaju odpadów, w tym osadów ściekowych, przeprowadzonej przez Smidta i Tintnera [24] wynika natomiast, że ich procentowy udział we frakcji organicznej kompostu może się zmieniać w bardzo szerokim zakresie – od 8,9% do 46,8% (od 89 mg/g mat. org. do 468 mg/g mat. org.).

Z badań własnych wynika również, że stosunek zawartości kwasów huminowych do fulwowych (KH_{humin}/KF) był prawie stały podczas całego okresu kompostowania. Dane literaturowe dotyczące tych proporcji nie są jednoznaczne. Większość autorów wykazuje wzrost stosunku KH_{humin}/KF w dojrzałym kompoście w porównaniu z jego wartością w kompostowanym wsadzie [25, 26]. Badania Czeakały [27] wykazały wzrost analizowanego stosunku z 0,62 do 0,89 podczas kompostowania osadów ściekowych w mieszaninie ze słomą i korowiną oraz utrzymywanie się na prawie niezmiennym poziomie (0,61 we wsadzie, 0,69 w dojrzałym kompoście) podczas kompostowania osadów ściekowych ze zrębkami, słomą i korowiną. Wpływ rodzaju kompostowanych materiałów na wzrost/spadek stosunku KH_{humin}/KF wykazały też badania Eggena i Vethe'a [28].

4. Podsumowanie

W artykule badano przemiany materii organicznej oraz związków azotu podczas kompostowania osadów ściekowych w mieszaninie z odpadami lignocelulozowymi. Przeanalizowano również zawartość i skład frakcyjny kwasów humusowych. Znajomość zawartości substancji humusowych jest istotna z rolniczego punktu widzenia, gdyż kompost, poza składnikami pokarmowymi, kompensuje ubytek substancji próchnicznych w intensywnych uprawach polowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że:

1. Ubytek materii organicznej wyniósł 18%, a szybkość degradacji materii organicznej 0,46 g/kg s.m. · d.
2. Stosunek C/N w dojrzałym kompoście wyniósł 17,8:1; wśród mineralnych form azotu dominował azot amonowy, a proporcja NH_4/NO_3 kształtowała się na poziomie 3.
3. Podczas kompostowania obserwowano wzrost zawartości zarówno kwasów huminowych, jak i fulwowych, przy czym kwasów fulwowych było średnio 4-krotnie więcej niż huminowych.

4. Dominującą frakcją stanowiły kwasy stabilne, których w przypadku kwasów huminowych i fulwowych było odpowiednio 4- i 8-krotnie (wartości średnie) więcej niż labilnych.

Literatura

- [1] Jokela J., Rintala J., Oikari A., Renikainen O., Mutka K., Nyrönen T., *Aerobic composting and anaerobic digestion of pulp and paper mill sludges*, Water Sci. Technol. 36, 1997, 181-188.
- [2] McCartney D., Tingley J., *Development of a rapid moisture content method for compost materials*, Compost Sci. and Util. 6, 1998, 73-91.
- [3] Liang C., Das K.C., McClendon R.W., *The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend*, Bioresource Technol. 86, 2003, 131-137.
- [4] Tiquia S.M., Tam N.F.Y., Hodgkiss I.J., *Microbial activities during composting of spent pig-manure sawdust litter at different moisture contents*, Bioresource Technol. 55, 1996, 201-206.
- [5] Giegużyńska E., *Badania nad zróżnicowaniem składu frakcyjnego, budową i właściwościami fizykochemicznymi kwasów huminowych gleb deluwialnych kateny Dłusko na Pojezierzu Ińskim*, praca doktorska, Wydział Kształowania Środowiska i Rolnictwa, Akademia Rolnicza w Szczecinie, 2002.
- [6] Ponsa S., Pagans E., Sanchez A., *Composting of dewatered wastewater sludge with various ratios of pruning waste used as a bulking agent and monitored by respirometer*, Biosystems Engineering 102, 2009, 433-443.
- [7] Hernandez T., Masciandaro G., Moreno J.I., Garcia C., *Changes in organic matter composition during composting of two digested sewage sludges*, Waste Manage. 26, 2006, 1370-1376.
- [8] Gea T., Artola A., Sanchez A., *Composting of de-inking sludge from the recycled paper manufacturing industry*, Bioresource Technol. 96, 2005, 1161-1167.
- [9] Yamada Y., Kawase Y., *Aerobic composting of waste activated sludge: kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen composting*, Waste Manage. 26, 2006, 49-61.
- [10] Fang M., Wong J.W.C., Ma K.K., Wong M.H., *Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: nutrient transformations*, Bioresource Technol. 67, 1999, 19-24.
- [11] Huang G.F., Wong J.W.C., Wu Q.T., Nagar B.B., *Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust*, Waste Manage. 24, 2004, 805-813.
- [12] Bernal M.P., Paredes C., Sanchez-Monedero M.A., Cegarra J., *Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes*, Bioresource Technol. 63, 1998, 91-99.
- [13] Jouraiphy A., Amir S., Gharous M., *Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste*, Int. Biodeter. and Biodegr. 56, 2005, 101-108.

- [14] Gomez-Brandon M., Lazcano C., Domingues J., *The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure*, Chemosphere 70, 2008, 436-444.
- [15] Wang W., Wang X., Liu J., Ishii M., Igarashi Y., Cui Z., *Effects on oxygen concentrations on the composting process and maturity*, Compost Sci. Util. 3, 2007, 184-190.
- [16] Adani F., Genevini P.L., Gasperi F., Tambone F., *Composting and humification*, Compost Sci. Util. 1, 1999, 24-33.
- [17] Zbytniewski R., Buszewski B., *Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost, Part 1, Chemical and spectroscopic properties*, Bioresource Technol. 96, 2005, 471-478.
- [18] Ouattmane A., D'Orazio V., Hafidi M., Senesi N., *Chemical and physicochemical characterization of humic acid-like materials from composts*, Compost Sci. Util. 1, 2002, 39-46.
- [19] Drozd J., Linczar M., *Zmiany w składzie chemicznym kompostów z odpadków miejskich w czasie ich kompostowania*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, Akademia Rolnicza, Wrocław 1997, 45-57.
- [20] Skalmowski K., *Kompostowanie odpadów komunalnych. Modele rozwiązań technologicznych*, Prace Naukowe, WIŚ PW, z. 39, 2001.
- [21] Veeken A., Nierop K., Wilde V., Hamelers B., *Characterization of NaOH-extracted humic acids during composting of a biowaste*, Bioresource Technol. 72, 2000, 33-41.
- [22] Amir S., Hafidi M., Merlina G., Revel J.C., *Structural characterization of fulvic acids during composting of sewage sludge*, Process Biochem. 40, 2005, 1693-1700.
- [23] Grigatti M., Ciavatta C., Gessa C., *Evolution of organic matter from sewage sludge and garden trimming during composting*, Bioresource Technol. 91, 2004, 163-169.
- [24] Smidt E., Tintner J., *Application of differential scanning calorimetry (DSC) to evaluate the quality of compost organic matter*, Thermochim. Acta 459, 2007, 87-93.
- [25] Domeizel M., Khalil A., Prudent P., *UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost*, Bioresource Technol. 94, 2004, 177-184.
- [26] Hsu J.-H., Lo S.-L., *Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure*, Environ. Pollut. 104, 1999, 189-196.
- [27] Czekała J., *Chemical properties of a compost produced on the basis of sewage sludge and different biowastes*, Journal Research Applications Agricultural Engineering 53/3, 2008, 35-41.
- [28] Eggen T., Vethe Ø., *Stability indices for different composts*. Compost Sci. Util. 1, 2001, 19-26.