

Barbara Filipek-Mazur, Monika Tabak

**ZMIANY ZAWARTOŚCI POPIOŁU, WĘGLA
ORGANICZNEGO OGÓŁEM ORAZ WĘGLA ZWIĄZKÓW
PRÓCHNICZNYCH W OSADZIE ŚCIEKOWYM
KOMPOSTOWANYM Z DODATKIEM SŁOMY**

***CHANGES IN THE CONTENT OF ASH, TOTAL ORGANIC
CARBON AND CARBON OF HUMUS COMPOUNDS
IN SEWAGE SLUDGE COMPOSTED
WITH A STRAW ADDITION***

Streszczenie

Warunkiem poprawy właściwości gleby oraz wielkości plonu i jakości roślin w wyniku nawożenia kompostem jest użycie jako nawozu materiału stabilnego i dojrzałego. Stopień dojrzałości kompostu można oszacować między innymi na podstawie zawartości i właściwości związków próchnicznych. Celem badań była ocena zmian zawartości popiołu, utlenialnego węgla organicznego ogółem oraz węgla związków próchnicznych w osadzie ściekowym kompostowanym z dodatkiem słomy pszennej. Ponadto, celem pracy było określenie (na podstawie uzyskanych wyników) stopnia dojrzałości wytworzonego kompostu. W wyniku mineralizacji materii organicznej, w trakcie kompostowania, nastąpiło zmniejszenie zawartości węgla organicznego oraz wartości stosunku C : N, natomiast zwiększenie zawartości popiołu w materiale. Ponadto stwierdzono zwiększenie zawartości węgla ekstrahowanego z kompostu mieszaniną $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 + 0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ NaOH}$, a zmniejszenie zawartości węgla ekstrahowanego wodą destylowaną. Otrzymane wyniki wskazywały na dojrzałość wytworzonego kompostu.

Słowa kluczowe: osad ściekowy, kompost, związki próchniczne, kwasy huminowe, kwasy fulwowe

Summary

The condition for improving the properties of soil as well as the yield and quality of plants, as a result of fertilization with compost, is to use a stable and mature material. The degree of compost maturity can be evaluated, among others, basing on the content and properties of humus compounds. The aim of the research was to assess the changes in the content of ash, oxidizable total organic carbon as well as carbon of humus compounds in sewage sludge composted with a wheat straw addition. In addition, the aim of this work was to determine (basing on the obtained results) the degree of maturity of the produced compost. Mineralization of organic matter, which occurred during the composting process, resulted in lowering both the organic carbon content and the value of the C: N ratio, but increasing the ash content. Moreover, an increase in the content of carbon extracted from the compost with the mixture of $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 + 0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ NaOH}$, and a decrease in the content of carbon extracted with distilled water were stated. The results of the carried out experiment indicated that the obtained compost was mature.

Key words: *sewage sludge, compost, humus compounds, humic acids, fulvic acids*

WSTĘP

Nawozowe wykorzystanie kompostu niedojrzałego i niestabilnego może prowadzić do pogorszenia właściwości gleby, a w rezultacie do obniżenia poziomu i jakości plonów. Warunkiem uzyskania dojrzałego i stabilnego kompostu jest prowadzenie procesu kompostowania w odpowiednich warunkach oraz przez okres zapewniający dostateczne zaawansowanie procesów mineralizacji i humifikacji. Stopień dojrzałości kompostu szacowany jest między innymi na podstawie zawartości i właściwości związków próchnicznych, w tym:

- zawartość węgla organicznego w materiale oraz w wyciągach wodnych, kwaśnych lub alkalicznych,
- zawartość węgla kwasów huminowych i fulwowych w wyciągach kompostu,
- parametry widm wyciągów i preparatów substancji próchnicznych (w zakresie promieniowania ultrafioletowego, światła widzialnego, promieniowania podczerwonego, magnetycznego rezonansu jądrowego) oraz skład elementarny kwasów huminowych i zawartość grup funkcyjnych tych kwasów [Bernal i in. 1998; Campitelli, Ceppi 2008; Drozd i in. 2003; Spaccini, Piccolo 2009; Zmora-Nahum i in. 2005].

Badania przeprowadzono w celu oceny zmian zawartości popiołu, utlenialnego węgla organicznego ogółem oraz węgla związków próchnicznych w trakcie kompostowania osadu ściekowego z dodatkiem słomy pszennej. Celem pracy było również określenie, wykorzystując uzyskane wyniki, stopnia dojrzałości wytworzonego kompostu.

MATERIAŁ I METODY

Wykorzystany w doświadczeniu osad ściekowy pochodził z oczyszczalni ścieków komunalnych należącej do Wodociągów i Kanalizacji Krzeszowice Sp. z o.o. (użyto osadu po rocznym okresie stabilizacji). W celu przygotowania materiału do kompostowania osad zmieszano z siewką słomy pszennej w stosunku wagowym 1:1 w przeliczeniu na suchą masę. Wybrane właściwości osadu ściekowego i słomy pszennej użytych w doświadczeniu przedstawiono w tabeli 1. Kompostowanie prowadzono w pomieszczeniu zamkniętym, w trakcie procesu materiał okresowo napowietrzano i nawilżano (do 60–70% wilgotności). Próbkę kompostu pobrano po 1, 5, 9, 13, 17 i 21 tygodniach procesu.

Tabela 1. Wybrane właściwości osadu ściekowego i słomy pszennej
Table 1. Selected properties of the sewage sludge and wheat straw

Materiał / Material	Popiół / Ash	C_o	Popiół : C_o / Ash : C_o	C_o : N
	$g \cdot kg^{-1}$ s.m. / $g \cdot kg^{-1}$ d.m.			
Osad ściekowy / Sewage sludge	517,64	188,09	2,75	6,32
Słoma pszenna / Wheat straw	75,06	344,16	0,22	40,07

Analizom poddano wysuszony i zmielony materiał. Zawartość popiołu oznaczono po prażeniu do stałej masy w temperaturze 500°C. Zawartość ulecialnego węgla organicznego ogółem (C_o) oraz zawartość węgla w wydzielonych frakcjach związków próchnicznych oznaczono metodą Tiurina. Oznaczenie składu frakcyjnego związków próchnicznych wykonano metodą Kononowej-Bielczikowej, zgodnie z którą do ekstrakcji związków próchnicznych wykorzystuje się mieszaninę $Na_4P_2O_7$ i NaOH (0,1 mol $Na_4P_2O_7$ i 0,1 mol NaOH w 1 dm³) [Kononowa 1968]. Ponadto wykonano ekstrakcję wodą destylowaną. W przypadku każdej z ekstrakcji określono:

- zawartość węgla organicznego w wyciągu uzyskanym po ekstrakcji (C_{wyc}),
- zawartość węgla kwasów huminowych wytraconych przy użyciu H_2SO_4 ($d=1,84$) z wyciągu uzyskanego po ekstrakcji (C_{kh}),
- zawartość węgla kwasów fulwowych w wyciągu uzyskanym po ekstrakcji ($C_{kf} = C_{wyc} - C_{kh}$),
- zawartość węgla organicznego niehydrolizującego ($C_{nhydr} = C_o - C_{wyc}$),
- wartość stosunku zawartości kwasów huminowych do fulwowych ($C_{kh} : C_{kf}$).

WYNIKI I DYSKUSJA

W trakcie kompostowania osadu ściekowego z dodatkiem słomy pszennej nastąpiło zwiększenie zawartości popiołu, natomiast zmniejszenie zawartości węgla organicznego w materiale (tab. 2). Stwierdzono zwiększenie wartości stosunku zawartości popiołu do węgla organicznego oraz zmniejszenie wartości stosunku zawartości węgla organicznego do azotu ogólnego (tab. 2).

Opisany powyżej kierunek zmian zawartości popiołu i węgla organicznego w kompoście, a także wartości stosunków popiołu do węgla i węgla do azotu, wynikał z zachodzącej w trakcie kompostowania mineralizacji materii organicznej (prowadzącej do przekształcenia organicznych związków węgla w formy nieorganiczne) i był stwierdzany także przez innych autorów [Ciećko i in. 2001; Drozd i in. 1996; Drozd i in. 2003; Iglesias Jiménez, Pérez Garcia 1991]. W badaniach własnych, w wyniku kompostowania otrzymano materiał o wartości stosunku C : N równej 10,23 (tab. 2). Jak podają Iglesias Jiménez i Pérez Garcia [1991, na podstawie różnych źródeł], wartość stosunku C : N mniejsza od 20 świadczy o wystarczającym stopniu dojrzałości materiału, przy czym korzystniejsza jest wartość wynosząca 15 lub mniej. Wyniki niektórych badań wskazują, że wartość C : N dla dojrzałego kompostu powinna przyjmować wartości mniejsze od 12 [Bernal i in. 1998; Iglesias Jiménez, Pérez Garcia 1992]. Stwierdzona w przypadku uzyskanego w doświadczeniu własnym kompostu wartość stosunku zawartości węgla do azotu (10,23) wskazywała na wysoki stopień dojrzałości materiału. Należy jednak zaznaczyć, że już w pierwszym tygodniu kompostowania badany materiał charakteryzował się niską wartością stosunku węgla do azotu wynoszącą 14,60 (materiał przeznaczony do kompostowania powinien cechować się wartością stosunku C : N na poziomie 30–20 : 1 [Drozd i in. 2003]). W efekcie, stwierdzona w końcowym etapie procesu wartość C : N równa 10,23 nie mogła jednoznacznie potwierdzać dojrzałości wytworzonego kompostu.

Tabela 2. Zmiany zawartości węgla organicznego i popiołu oraz wartości stosunku C : N w kompoście

Table 2. Changes of organic carbon and ash content as well as the value of C : N ratio in the compost

Czas kompostowania [tygodnie] / Time of composting [weeks]	Popiół / Ash	C _o	Popiół : C _o / Ash : C _o	C _o : N
	g · kg ⁻¹ s.m. / g · kg ⁻¹ d.m.			
1	406,21	264,75	1,53	14,60
5	409,93	251,43	1,63	12,65
9	416,03	241,80	1,72	12,11
13	391,07	239,82	1,63	10,56
17	414,60	244,56	1,70	10,42
21	416,69	235,10	1,77	10,23

W wyniku procesu kompostowania nastąpiło zwiększenie zawartości węgla wyekstrahowanego z kompostu mieszaniną $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ i NaOH (tab. 3). Zwiększeniu uległa również zawartość węgla kwasów huminowych, a w rezultacie wartość stosunku $C_{\text{kh}} : C_{\text{kf}}$ (tab. 3). Kwasy fulwowe przeważały w wyekstrahowanym wyciągu jedynie w początkowym okresie kompostowania.

Tabela 3. Charakterystyka związków próchnicznych ekstrahowanych z kompostu przy użyciu mieszaniny $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ i NaOH

Table 3. Characteristics of humus compounds extracted from the compost, using a mixture of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ and NaOH

Czas kompostowania [tygodnie] / Time of composting [weeks]	$C_{\text{wyc}} / C_{\text{ex}}^*$	$C_{\text{kh}} / C_{\text{ha}}$	$C_{\text{kf}} / C_{\text{fa}}$	$C_{\text{kh}} : C_{\text{kf}} / C_{\text{ha}} : C_{\text{fa}}$	C_{nhydr}
1	102,41**	48,92	53,49	0,91	343,46
	—	—	—		—
5	22,97	10,97	12,00	1,14	77,03
	110,71	59,08	51,64		315,39
9	25,98	13,86	12,12	1,40	74,02
	110,77	64,67	46,10		303,30
13	26,75	15,62	11,13	1,44	73,25
	113,01	66,79	46,22		280,83
17	28,69	16,96	11,74	1,36	71,31
	114,68	66,16	48,52		303,07
21	27,45	15,84	11,61	1,69	72,55
	110,89	69,72	41,17		292,15
	27,51	17,30	10,21		72,49

* C_{wyc} – węgiel organiczny w wyciągu / C_{ex} – organic carbon in extract, C_{kh} – węgiel kwasów huminowych / C_{ha} – carbon of humic acids, C_{kf} – węgiel kwasów fulwowych / C_{fa} – carbon of fulvic acids, C_{nhydr} – węgiel niehydrolizujący / C_{nhydr} – non-hydrolyzing carbon

** licznik – zawartość w $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w przeliczeniu na masę bezpopielną / numerator – content in $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ d.m. on ash-free material basis, mianownik – zawartość w % C_o / denominator – % content in C_o

Uzyskane w ramach przeprowadzonych badań wyniki znajdują potwierdzenie w danych literaturowych. Iglesias Jiménez i Pérez Garcia [1991] stwierdzili zwiększenie zawartości węgla ekstrahowanego mieszaniną $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ i NaOH z kompostów wytworzonych z odpadów miejskich bez dodatków oraz z dodatkiem osadów ściekowych. W trakcie kompostowania sukcesywnie zwiększała się zawartość węgla kwasów huminowych oraz wartość stosunku $C_{\text{kh}} : C_{\text{kf}}$ [Iglesias Jiménez, Pérez Garcia 1991], co świadczyło o zwiększeniu stopnia polimeryzacji związków próchnicznych. W wyniku przeprowadzonego

kompostowania autorzy stwierdzili zmniejszenie zawartości węgla kwasów fulwowych. Podobny kierunek zmian badanych parametrów stwierdzili również Drozd i in. [2003] w trakcie kompostowania odpadów miejskich (ekstrakcję związków próchnicznych z kompostu przeprowadzono przy użyciu NaOH). Jak podają Iglesias Jiménez i Pérez Garcia [1992], na dojrzałość kompostu wskazują: wartość stosunku $C_{kh} : C_{kf}$ większa od 1,6 oraz udział zawartości węgla kwasów huminowych w węglu wyekstrahowanym, wynoszący więcej niż 62%. W badaniach własnych przedstawione parametry przyjmowały odpowiednio wartości 1,69 oraz 62,88%, co świadczyło o dojrzałości uzyskanego materiału.

W trakcie kompostowania stwierdzono zmniejszenie zawartości węgla substancji próchnicznych ekstrahowanych z kompostu przy użyciu wody destylowanej (tab. 4). Taki kierunek zmian odnotowano zarówno w przypadku kwasów huminowych, jak i fulwowych.

Tabela 4. Charakterystyka związków próchnicznych ekstrahowanych z kompostu przy użyciu wody destylowanej

Table 4. Characteristics of humus compounds extracted from the compost, using distilled water

Czas kompostowania [tygodnie] / Time of composting [weeks]	C_{wyc} / C_{ex}^*	C_{kh} / C_{ha}	C_{kf} / C_{fa}	$C_{kh} : C_{kf} / C_{ha} : C_{fa}$	C_{nhydr}
1	22,44**	3,58	18,86	0,19	423,43
	5,03	0,80	4,23		94,97
5	15,40	4,09	11,31	0,36	410,70
	3,62	0,96	2,66		96,38
9	12,47	2,75	9,72	0,28	401,59
	3,01	0,66	2,35		96,99
13	11,83	1,31	10,52	0,12	382,01
	3,00	0,33	2,67		97,00
17	10,37	1,97	8,39	0,24	407,39
	2,48	0,47	2,01		97,52
21	7,48	0,79	6,69	0,12	395,56
	1,86	0,20	1,66		98,14

* patrz Tabela 3 / see Table 3

** patrz Tabela 3 / see Table 3

Podobnie, jak w badaniach własnych, zmniejszenie zawartości węgla w wyciągach wodnych kompostów (przygotowanych na bazie odpadów miejskich, osadów ściekowych oraz nawozów naturalnych) stwierdzili również Ber-

nal i in. [1998], Drozd i in. [1996], Drozd i in. [2003] oraz Zmora-Nahum i in. [2005]. Zawartość ekstrahowalnego wodą węgla organicznego w kompoście zależy od intensywności procesów prowadzących do zmniejszenia i zwiększenia puli rozpuszczalnej materii organicznej [Said-Pullicino i in. 2007]. Zmniejszenie zawartości węgla ekstrahowalnego wodą jest przede wszystkim skutkiem mineralizacji rozpuszczalnych, niskocząsteczkowych związków węgla obecnych w materiale poddanym kompostowaniu oraz przekształcania tych związków w formy bardziej złożone, o mniejszej rozpuszczalności w wodzie [Said-Pullicino i in. 2007; Zmora-Nahum i in. 2005]. Zwiększeniem zawartości ekstrahowalnego węgla organicznego skutkują procesy mikrobiologicznego rozkładu stałej materii organicznej kompostu oraz biochemicznej syntezy związków niskocząsteczkowych, odbywającej się *de novo* [Said-Pullicino i in. 2007]. Zawartość węgla wydzielonego wodą oznaczona po zakończeniu procesu kompostowania ($4,36 \text{ g C}_{\text{wyc}} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$) wskazywała na dojrzałość wytworzonego kompostu. Zgodnie z danymi literaturowymi, dojrzały materiał powinien się cechować zawartością rozpuszczalnego węgla organicznego mniejszą od $17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Bernal i in. 1998], a według bardziej restrykcyjnych kryteriów mniejszą od $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Zmora-Nahum i in. 2005 za Hue, Liu 1995], a nawet od $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zmora-Nahum i in. [2005].

WNIOSKI

1. W wyniku mineralizacji materii organicznej, w trakcie kompostowania osadu ściekowego z dodatkiem słomy pszennej zwiększeniu uległa zawartość popiołu w kompoście, natomiast zmniejszeniu – zawartość węgla organicznego, a w rezultacie wartość stosunku C : N.

2. W trakcie kompostowania stwierdzono zwiększenie zawartości węgla ekstrahowanego mieszaniną $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ i NaOH. Zwiększeniu uległa również zawartość węgla kwasów huminowych w ekstrakcie oraz wartość stosunku węgla kwasów huminowych do węgla kwasów fulwowych.

3. W efekcie przeprowadzonego kompostowania nastąpiło zmniejszenie zawartości węgla ekstrahowanego z kompostu przy użyciu wody destylowanej.

4. Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować o dojrzałości wytworzonego kompostu.

BIBLIOGRAFIA

- Bernal M.P., Paredes C., Sánchez-Monedero M.A., Cegarra J. *Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes*. Bioresource Technology, 63, 1998, s. 91–99.
- Campitelli P., Ceppi S. *Effects of composting technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids*. Geoderma, 144, 2008, s. 325–333.

- Ciećko Z., Harnisz M., Najmowicz T. *Dynamika zawartości węgla i azotu w osadach ściekowych podczas ich kompostowania*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 475, 2001, s. 253–262.
- Drozd J., Licznar M., Jamroz E., Bekier J. *Próchniczne indeksy dojrzałości kompostów [w:] Substancje humusowe w glebach i nawozach*, Dębska B. (red.), Gonet S.S. (red.), PTSH Wrocław 2003, s. 75–94.
- Drozd J., Licznar M., Patorczyk-Pytlik B., Rabikowska B., Jamroz E. *Zmiany zawartości węgla i azotu w procesie dojrzenia kompostów z odpadów miejskich*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 437, 1996, s. 123–130.
- Iglesias Jiménez E., Pérez Garcia V. *Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity*. Resources, Conservation and Recycling, 6, 1991, s. 45–60.
- Iglesias Jiménez E., Pérez Garcia V. *Determination of maturity indices for city refuse composts*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 38, 1992, s. 331–343.
- Kononowa M. *Substancje organiczne gleby, ich budowa, właściwości i metody badań*. PWRiL, Warszawa 1968, s. 390.
- Said-Pullicino D., Erriquens F.G., Gigliotti G. *Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity*. Bioresource Technology, 98, 2007, s. 1822–1831.
- Spaccini R., Alessandro Piccolo A. *Molecular characteristics of humic acids extracted from compost at increasing maturity stages*. Soil Biology and Biochemistry, 41, 2009, s. 1164–1172.
- Zmora-Nahum S., Markovitch O., Tarchitzky J., Chen Y. *Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity*. Soil Biology and Biochemistry, 37, 2005, s. 2109–2116.

Prof. dr hab. inż. Barbara Filipek-Mazur
Katedra Chemii Rolnej i Środowiskowej
Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie
Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków
tel. +48 12 662 4344,
e-mail: rrfilipe@cyf-kr.edu.pl

Mgr inż. Monika Tabak
Katedra Chemii Rolnej i Środowiskowej
Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie
Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków
tel. +48 12 662 43 47,
e-mail: Monika.Tabak@ur.krakow.pl

Recenzent: Prof. dr hab. Jerzy Gruszczyński