

OCENA ZAWARTOŚCI CYNKU, MANGANU, MIEDZI I ŻELAZA  
W PRZEKOMPOSTOWANYCH KOMUNALNYCH ODPADACH  
BIODEGRADOWALNYCH

*Krzysztof Gonddek, Michał Kopeć*

Katedra Chemii Rolnej i Środowiskowej, Uniwersytet Rolniczy  
Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków  
e-mail: rrgondek@cyf-kr.edu.pl

**Streszczenie.** Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu procesu kompostowania wybranych odpadów komunalnych z różnymi dodatkami (skrobia, olej jadalny, mocznik) na zawartość niektórych form cynku, manganu, miedzi i żelaza w uzyskanych kompostach. Obiektem badań był kompost surowy „grzejny” z odpadów roślinnych i innych biodegradowalnych (oznaczonych w katalogu odpadów kodem 20 02 01), opuszczających komorę biostabilizatora kompostowni pracującej w systemie MUT – Kyberferm. Ekstrakcję Zn, Mn, Cu i Fe przeprowadzono według procedury McLarena i Crowforda. Dodatkowo z oddzielnej naważki kompostów przeprowadzono ekstrakcję metali ciężkich wodą redestylowaną przez 30 dni. Zawartość metali ciężkich w uzyskanych ekstraktach oznaczono metodą ICP-AES na aparacie JY 238 Ultrace firmy Jobin Yvon. Ogólna zawartość cynku, manganu, miedzi i żelaza w badanych kompostach nie wyklucza ich rolniczego wykorzystania. Większy wpływ na zawartość badanych pierwiastków śladowych w poszczególnych frakcjach miał rodzaj pierwiastka niż dodatek do kompostowania skrobi, oleju jadalnego czy mocznika. Stwierdzono istotne zwiększenie zawartości w ekstrakcie wodnym cynku, manganu i żelaza po 30-stu dniach ekstrakcji w porównaniu do zawartości oznaczonej w ekstrakcie wodnym uzyskanym według procedury McLarena i Crowforda. Zmniejszeniu uległa zawartość miedzi.

Słowa kluczowe: kompost, cynk, mangan, miedź, żelazo

WSTĘP

Proces kompostowania można zdefiniować jako kontrolowany, biologiczny rozkład i stabilizacja substratów organicznych w warunkach tlenowych oraz odpowiedniej wilgotności, co prowadzi do wzrostu temperatury materiału do zakresu termofilnego (Horiuchi i in. 2003, Ishii i Takii 2003, Wang i in. 2004). Efektem procesu jest produkt pewny sanitarnie, na ogół zasobny w związki humusowe i biogenne oraz wystarczająco stabilny dla potrzeb magazynowania i wprowadzania do gruntu bez szkodliwego wpływu na środowisko (Jędrzak 2007).

Niektóre rodzaje odpadów komunalnych charakteryzują się dużą zawartością substancji organicznej oraz składników nawozowych, co sprawia, że mogą one stanowić materiał wyjściowy do procesu kompostowania. Czynnikiem dyskwalifikującym późniejsze wykorzystanie produktu może być nadmierna zawartość składników zanieczyszczających, w tym metali ciężkich (Rosik-Dulewska 2001).

W wyniku procesów biochemicznych zachodzących podczas kompostowania, pierwotnie nieaktywne formy metali ciężkich mogą zostać uaktywnione (Hsu i Lo 2001), co w zależności od przeznaczenia kompostu może stwarzać niekorzystne warunki dla wzrostu i rozwoju roślin. Rosik-Dulewska i Mikszta (2004) uważają, że całkowita zawartość metali ciężkich w kompostach nie powinna stanowić jedynej podstawy pozwalającej na ocenę ich wykorzystania.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu procesu kompostowania wybranej grupy odpadów komunalnych oznaczonych w katalogu odpadów kodem 20 02 01, z różnymi dodatkami (skrobia, olej jadalny, mocznik) na zawartość wybranych form cynku, manganu, miedzi i żelaza w uzyskanych kompostach.

#### MATERIAŁ I METODY

Obiektem badań był kompost surowy „grzejny” z odpadów roślinnych i innych biodegradowalnych (kod w katalogu odpadów 20 02 01), opuszczających komorę biostabilizatora kompostowni pracującej w systemie MUT – Kyberferm. Czas przebywania materiału organicznego w komorze wynosił 14 dni. Do sporządzenia materiału wyjściowego do badań wykorzystano odpady w następujących proporcjach: zrębki świeże 10,18%; zrębki siane 33,69%; wyłoki 21,94%; trawa 23,13% oraz odpad tytoniowy 10,96%. Proces kompostowania materiału wyjściowego (kompostu grzejnego) prowadzono w pojemnikach izolowanych o pojemności 20 dm<sup>3</sup> przez okres 210 dni. Doświadczenie obejmowało następujące warianty prowadzone w dwóch powtórzeniach: I – kompost surowy bez dodatków (obiekt kontrolny); II – kompost surowy + skrobia; III – kompost surowy + olej jadalny; IV – kompost surowy + mocznik. Dodatek skrobi, oleju jadalnego (produkty spożywcze) lub mocznika (czysty chemicznie) wynosił 5% w stosunku do świeżej masy kompostu grzejnego. Po dokładnym wymieszaniu komponentów materiał umieszczono w pojemnikach wyposażonych w system do napowietrzania. W czasie kompostowania kontrolowano temperaturę i wilgotność materiału w pojemnikach. W odstępach 2 tygodniowych kontrolowano ubytek masy kompostowanego materiału oraz mieszano materiał wewnątrz pojemnika, uzupełniając straty wody. Po zakończonym procesie kompostowania materiały dokładnie wymieszano, a następnie przesiano przez sito o średnicy oczek 1 cm i pobrano próbki do oznaczeń chemicznych.

W materiale wyjściowym i materiałach uzyskanych po procesie kompostowania wykonano następujące oznaczenia: zawartość suchej masy w temperaturze 105°C przez 12 godzin; pH potencjometrycznie w zawiesinie kompostu i wody, zachowując stosunek suchej masy materiału do wody 1:10; przewodność elektrolityczną – konduktometrycznie; zawartość węgla organicznego metodą miareczkową po mineralizacji próbki w dichromianiepotasu, zawartość ogólną badanych metali ciężkich (Zn, Mn, Cu i Fe) oznaczono po mineralizacji próbki w piecu muflowym (450°C przez 5 godz.) i roztworzeniu pozostałości w rozcieńczonym (1:2) kwasie azotowym. Oznaczenia wykonano według metodyki zaproponowanej przez Barana i Turskiego (1996) oraz Krzywego (1999). Do wyodrębnienia poszczególnych form badanych metali ciężkich zastosowano wodę redestylowaną (formy wodnorozpuszczalne metali), roztwór  $\text{CaCl}_2$  o stężeniu 0,05 mol·dm<sup>-3</sup> (formy wymienne metali, niespecyficznie adsorbowane), roztwór 2,5%  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (formy wymienne metali, specyficznie adsorbowane) oraz roztwór  $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$  o stężeniu 0,1 mol·dm<sup>-3</sup> (formy metali związane z materią organiczną). Ekstrakcję przeprowadzono według procedury zaproponowanej przez McLarena i Crowforda (Bogacz 1996). Dodatkowo z oddzielnej naważki kompostów przeprowadzono ekstrakcje badanych metali ciężkich wodą redestylowaną przez 30 dni, a oznaczone zawartości porównano do oznaczonych w ekstraktach wodnych przygotowanych według metody McLarena i Crowforda. Zawartość metali ciężkich w uzyskanych roztworach i ekstraktach oznaczono metodą ICP-AES na aparacie JY 238 Ultrace firmy Jobin Yvon. Przedstawione wyniki analiz stanowią średnią arytmetyczną z 3 powtórzeń. Dla podanych w tabelach wartości średnich obliczono błąd standardowy. Średnie wartości pH badanych kompostów oraz wartości błędu standardowego obliczono po przeliczeniu pH na stężenie jonów wodorowych.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Zawartość suchej masy w badanych materiałach organicznych po procesie kompostowania była zróżnicowana ze względu na rodzaj dodanego komponenta (tab. 1). W porównaniu do kompostu „grzejnego” pobranego po opuszczeniu komory bioreaktora zawartość suchej masy zwiększyła się jedynie w biomasie z dodatkiem skrobi.

Odczyn jest jedną z najważniejszych cech fizykochemicznych substancji odpadowych, jak również jest dobrym wskaźnikiem przebiegu procesu dojrzwania kompostu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono wyraźne zwiększenie wartości pH w badanych kompostach w porównaniu do materiału wyjściowego (kompostu „grzejnego”) (tab. 1 i 2). Iglesias-Jimenez i Perez-Garcia (1991) również wykazali zwiększenie wartości pH kompostowanych odpadów. Przyrost wartości pH kompostowanej biomasy może być spowodowany zwiększeniem

szeniem się zawartości rozpuszczalnych form pierwiastków alkalicznych takich jak magnez czy wapń, co wykazali w swoich badaniach Drozd i in. (1996).

**Tabela 1.** Wybrane właściwości kompostu surowego „grzejnego” po opuszczeniu bioreaktora  
**Table 1.** Selected properties of raw "heating" compost after removal from the bioreactor

Oznaczenie – Determination	
Sucha masa – Dry matter ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$549,8 \pm 2,20$
pH H <sub>2</sub> O	$6,52 \pm < 0,01$
C organiczny – Organic C ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. – d.m.)	$320,1 \pm 7,16$
Przewodność elektrolityczna – Electrolytic conductivity ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	$5,58 \pm 0,07$
Formy ogólne – Total forms ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. – d.m.)	
Zn	$177,8 \pm 3,3$
Mn	$201,4 \pm 0,5$
Cu	$27,2 \pm 0,5$
Fe	$4296 \pm 82$

$\pm$  Błąd standardowy średniej – Standard error of mean, n = 3.

**Tabela 2.** Wybrane właściwości materiałów organicznych po procesie kompostowania  
**Table 2.** Selected properties of organic materials after composting process

Obiekty – Objects	Sucha masa Dry matter ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH H <sub>2</sub> O	C organiczny Organic C ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. – d.m.)	Przewodność elektrolityczna Electrolytic conductivity ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
I. Kompost surowy bez dodatku (kontrola) Raw compost without addition (control)	$515,0 \pm 20,2$	$7,85 \pm < 0,01$	$309,9 \pm 4,1$	$6,31 \pm 0,07$
II. Kompost surowy + skrobia Raw compost + starch	$645,9 \pm 28,6$	$7,84 \pm 0,03$	$312,1 \pm 3,7$	$5,98 \pm 0,06$
III. Kompost surowy + olej jadalny Raw compost + edible oil	$512,7 \pm 21,7$	$7,74 \pm 0,02$	$302,8 \pm 7,7$	$5,90 \pm 0,07$
IV. Kompost surowy + mocznik Raw compost + urea	$544,3 \pm 24,7$	$7,58 \pm 0,01$	$318,5 \pm 6,0$	$5,76 \pm 0,27$

$\pm$  Błąd standardowy średniej – Standard error of mean, n = 3.

Nadmiar rozpuszczalnych soli w kompostach, przy ich przyrodniczym wykorzystaniu, może być przyczyną zachwiania równowagi w roztworze glebowym, co skutkuje ujemną reakcją roślin. Dobrą miarą zasolenia kompostów jest ich przewodność elektrolityczna (Baran i Turski 1996). Przewodność elektrolityczna roztworów wodnych zależy od rodzaju rozpuszczalnych substancji, ich stężenia i temperatury. Wartość przewodności elektrolitycznej w badanych kompostach, niezależnie od dodatku była większa niż w kompoście „grzejnym” (tab. 2). Zwiększenie wartości przewodności elektrolitycznej w materiałach organicznych po procesie kompostowania wynikała z postępującej mineralizacji materii organicznej, co doprowadziło do uwolnienia składników mineralnych m.in. odpowiedzialnych za zwiększenie wartości przewodności elektrolitycznej badanych materiałów. We wcześniejszych badaniach Gondka (2006) oraz badaniach przeprowadzonych przez Dimambro i in. (2007) oznaczono znacznie mniejsze wartości przewodności elektrolitycznej zarówno w kompostach z odpadów komunalnych nie segregowanych jak również w kompostach z odpadów roślinnych i innych biodegradowalnych.

Zawartość węgla organicznego zmniejszyła się we wszystkich kompostach w porównaniu do zawartości oznaczonej w kompoście „grzejnym” pobranym po wyjęciu z bioreaktora (tab. 1 i 2). Również Drozd i Licznar (2004) wskazują na ubytek zawartości węgla organicznego w kompostowanej biomase odpadów. Ubytek ten jak wykazali cytowani autorzy był uwarunkowany wilgotnością kompostowanych odpadów. W warunkach większej wilgotności obserwowano mniejszą temperaturę kompostowanej masy, zwłaszcza w termofilnej fazie procesu.

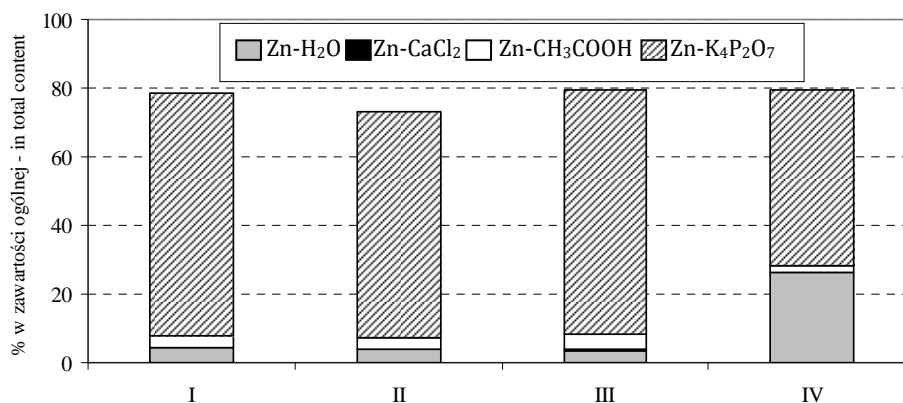
Ogólna zawartość cynku była największa w kompoście bez dodatków (tab. 3). Na podstawie proponowanych przez Komisję Europejską limitów metali ciężkich w kompostach badane materiały (niezależnie od dodatku) można zaliczyć do klasy drugiej pod względem zawartości cynku ogólnego (Wasiak i Madej 2009). Zawartość cynku wyekstrahowanego wodą była największa w kompoście z dodatkiem mocznika. Udział tej formy cynku w zawartości ogólnej, w kompostach z dodatkiem skrobi, oleju jadalnego oraz w kompoście bez dodatku nie przekraczał 5% (rys. 1). W kompoście z dodatkiem mocznika udział ten był średnio ponad 6-krotnie większy. Zawartość form wymiennych cynku (suma zawartości po ekstrakcji  $\text{CaCl}_2$  oraz  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) była porównywalna do zawartości form tego pierwiastka wyekstrahowanych wodą, przy czym znacznie więcej cynku wyekstrahowano roztworem kwasu octowego niż chlorku wapnia. Najwięcej cynku w badanych kompostach oznaczono w połączeniach z materią organiczną. Średnio udział cynku w tej frakcji w odniesieniu do zawartości ogólnej w kompostach z dodatkiem skrobi, oleju jadalnego oraz w kompoście bez dodatku wynosił blisko 70%, natomiast w kompoście z dodatkiem mocznika był o blisko 20% mniejszy (rys. 1). Dla określenia ewentualnego tempa uwalniania cynku z badanych materiałów organicznych w oddzielnych nawązkach przeprowadzono 30 dniową ekstrakcję tego pierwiastka wodą redestylowaną. W kompoście bez dodatku ( $21,14 \text{ mg Zn}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ ) oraz

z dodatkiem oleju jadalnego ( $17,12 \text{ mg Zn}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ ) przyrost zawartości badanych form cynku przekraczał 80% w stosunku do zawartości tego pierwiastka oznaczonych w ekstraktach wodnych przygotowanych według metody McLarena i Crowforda (tab. 3, rys. 2). W kompoście z dodatkiem skrobi stwierdzono mniejszy przyrost zawartości cynku, który wynosił 62%. Najmniejszy przyrost zawartości tego pierwiastka stwierdzono w kompoście z dodatkiem mocznika (6,5%). Zawartość różnych form cynku podczas kompostowania odpadów ulega dużej dynamice. Drozd i Licznar (2004) wykazali zmniejszenie się zawartości rozpuszczalnych form cynku w pierwszych tygodniach procesu kompostowania. Istotny wpływ na zawartość form mobilnych tego pierwiastka mogła mieć wilgotność kompostowanych odpadów. Według Drozda i Licznara (2004) większa wilgotność kompostowanych odpadów wpływa na zmniejszenie zawartości form wodno rozpuszczalnych tego pierwiastka. W przeprowadzonych badaniach własnych dodatek do kompostowanych odpadów mocznika spowodował zwiększenie zawartości cynku wyekstrahowanego wodą (tab. 3). Również Drozd i Licznar (2004) wskazują na zwiększenie rozpuszczalności związków cynku w kompostowanych odpadach w zależności od dodatku azotu. Według Rosik-Dulewskiej i Mikszta (2004) zawartość cynku związanego z substancją organiczną w kompostach z odpadów komunalnych nie przekraczała 30% ogólnej zawartości tego pierwiastka. W badaniach własnych udział ten był ponad 2-krotnie większy (rys. 1).

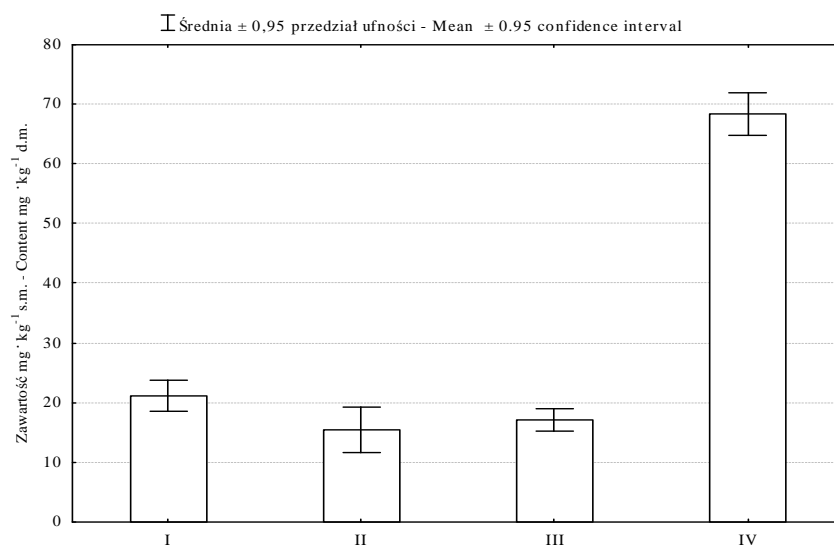
**Tabela 3.** Zawartość cynku w materiałach organicznych po procesie kompostowania  
**Table 3.** Content of zinc in organic materials after composting process

Obiekty – Objects	Zn ogólny Total Zn	Zn H <sub>2</sub> O	Zn CaCl <sub>2</sub>	Zn CH <sub>3</sub> COOH	Zn K <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
	(mg·kg <sup>-1</sup> s.m. – d.m.)				
I. Kompost surowy bez dodatku (kontrola) Raw compost without addition (control)	273,1±1,2	11,69±0,10	0,41±0,02	9,30±0,08	193,4±5,1
II. Kompost surowy + skrobia Raw compost + starch	251,8±1,7	9,51±0,27	0,49±0,01	8,62±0,01	165,3±3,7
III. Kompost surowy + olej jadalny Raw compost + edible oil	255,2±1,0	9,19±0,20	0,45±0,01	11,50±0,43	181,8±5,9
IV. Kompost surowy + mocznik Raw compost + urea	245,8±1,0	64,20±0,79	0,50±0,02	4,77±0,05	125,7±8,0

± Błąd standardowy średniej – Standard error of mean, n = 3.



**Rys. 1.** Udział poszczególnych frakcji cynku w zawartości ogólnej; oznaczenia jak w tabeli 3  
**Fig. 1.** Share of each fraction of zinc in total content; see Table 3 for symbols



**Rys. 2.** Zawartość Zn-H<sub>2</sub>O po trzydziestu dniach ekstrakcji; oznaczenia jak w tabeli 3  
**Fig. 2.** Content of Zn-H<sub>2</sub>O after thirty days of extraction; see Table 3 for symbols

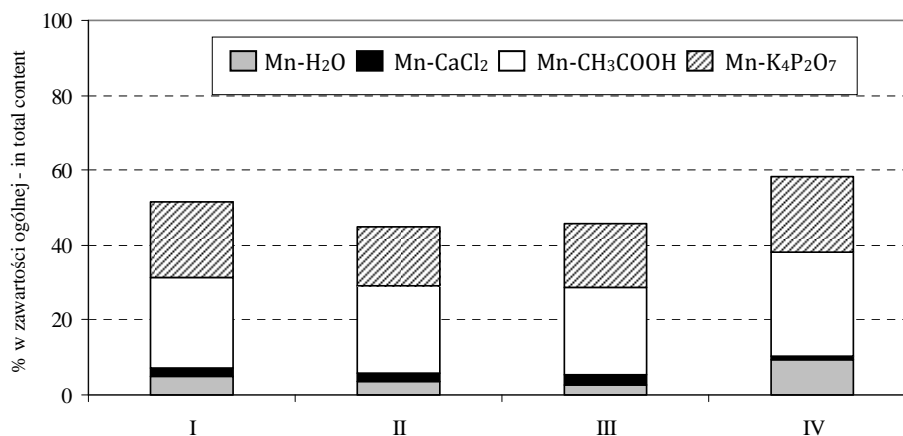
Ogólna zawartość manganu w badanych kompostach była porównywalna i mieściła się w zakresie od 243,6 mg do 275,8 mg·kg<sup>-1</sup> s.m. (tab. 4). Podobnie jak w przypadku cynku najwięcej form manganu wyekstrahowano wodą z kompostu z dodatkiem mocznika (23,46 mg Mn·kg<sup>-1</sup> s.m.), również w tym materiale stwierdzono największy udział manganu w zawartości ogólnej (rys. 3). Zawartości manganu wyekstrahowanego roztworem CaCl<sub>2</sub> była mniejsza od zawartości tego

pierwiastka wyekstrahowanego wodą, poza kompostem z dodatkiem oleju jadalnego (tab. 4).

**Tabela 4.** Zawartość manganu w materiałach organicznych po procesie kompostowania  
**Table 4.** Content of manganese in organic materials after composting process

Obiekty – Objects	Mn ogólny	Mn	Mn	Mn	Mn
	Total Mn	H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> COOH	K <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
	(mg·kg <sup>-1</sup> s.m. – d.m.)				
I. Kompost surowy bez dodatku (kontrola) Raw compost without addition (control)	243,6±4,0	12,04±0,23	5,33±0,08	59,48±1,20	49,20±1,00
II. Kompost surowy + skrobia Raw compost + starch	275,8±4,0	10,05±0,22	6,44±0,02	64,07±1,10	43,40±1,40
III. Kompost surowy + olej jadalny Raw compost + edible oil	252,3±5,7	6,19±0,09	6,86±0,02	59,74±1,03	42,10±0,60
IV. Kompost surowy + mocznik Raw compost + urea	248,6±5,6	23,46±0,11	2,38±0,32	68,46±1,57	50,90±3,20

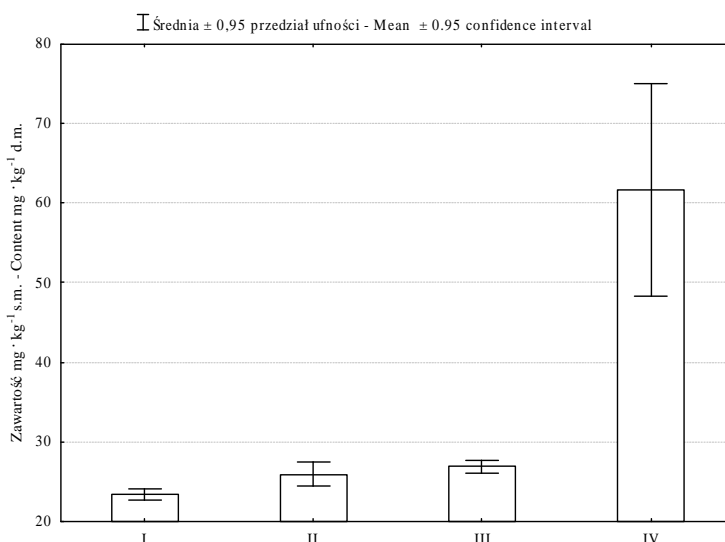
± Błąd standardowy średniej – Standard error of mean, n = 3.



**Rys. 3.** Udział poszczególnych frakcji manganu w zawartości ogólnej; oznaczenia jak w tabeli 4  
**Fig. 3.** Share of each fraction of manganese in total content; see Table 4 for symbols



Znacznie więcej manganu wyekstrahowano roztworem kwasu octowego, a udział tej formy manganu w zawartości ogólnej kształtował się na zbliżonym poziomie i średnio dla badanych materiałów wynosił ponad 24% (rys. 3). Zawartość manganu w formach związana z materią organiczną była znacznie mniejsza od oznaczonej zawartości form wymiennych tego pierwiastka (suma manganu wyekstrahowana  $\text{CaCl}_2$  i  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). Po 30 dniach ekstrakcji próbek kompostów wodą redestylowaną w każdym przypadku stwierdzono zwiększenie zawartości tej formy manganu (rys. 4) w porównaniu do zawartości manganu wyekstrahowanej wodą według metody McLarena i Crowforda (tab. 4). Najbardziej zwiększyła się zawartość tego pierwiastka w kompoście z dodatkiem oleju jadalnego a najmniej w kompoście bez dodatków. Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano zwiększenie zawartości form ogólnych manganu w porównaniu do zawartości tego pierwiastka oznaczonej w kompoście „grzejnym”. Również Drozd i Licznar (2004) wskazują na wyraźne zwiększenie zawartości m.in. zawartości ogólnych form manganu w wyniku kompostowania odpadów komunalnych. W prezentowanych badaniach własnych wykazano stosunkowo niewielkie zawartości manganu wyekstrahowanego wodą. Również Drozd i in. (1996) wskazują na zmniejszenie się, w miarę upływu czasu zawartości manganu w wyciągach wodnych kompostów. Według Gondka i Filipek-Mazur (2004) proces kompostowania osadów garbarskich obniżał zawartość manganu wyekstrahowanego wodą, natomiast zwiększenie form wodnorozpuszczalnych tego pierwiastka odnotowano w wyniku wermikompostowania.



**Rys. 4.** Zawartość  $\text{Mn-H}_2\text{O}$  po trzydziestu dniach ekstrakcji; oznaczenia jak w tabeli 4

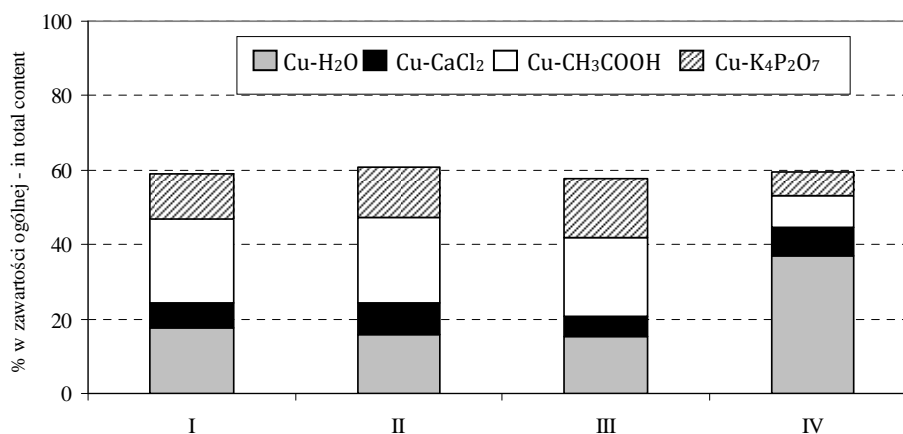
**Fig. 4.** Content of  $\text{Mn-H}_2\text{O}$  after thirty days of extraction; see Table 4 for symbols

Ogólna zawartość miedzi w kompostach z dodatkiem skrobi, oleju jadalnego oraz w kompoście kontrolnym (bez dodatków) kształtowała się na zbliżonym poziomie i średnio wynosiła  $37,63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (tab. 5). O blisko  $7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  s.m. więcej ogólnych form miedzi oznaczono w kompoście z dodatkiem mocznika. Oznaczone ogólne zawartości Cu w badanych materiałach są znacznie mniejsze od proponowanych przez Komisję Europejską limitów zawartości miedzi w kompostach (Wasiak i Madej 2009). Zawartość Cu wyekstrahowana wodą była największa w kompoście z dodatkiem mocznika (tab. 4). W porównaniu do zawartości tej formy miedzi w pozostałych kompostach była to zawartość o 20 mg większa. Udział tej formy miedzi w zawartości ogólnej w kompoście z dodatkiem mocznika stanowił ponad 30%, natomiast w pozostałych kompostach niewiele ponad 15% (rys. 5). Zawartość form miedzi niespecyficycznie adsorbowanych wyekstrahowanych roztworem  $\text{CaCl}_2$  była mniejsza od zawartości form wodno rozpuszczalnych. Natomiast zawartość form miedzi specyficycznie adsorbowanych, oznaczonych po ekstrakcji kwasem octowym była większa (tab. 5). Stwierdzono stosunkowo mały udział w zawartości ogólnej miedzi związanej z materią organiczną niezależnie od zastosowanego dodatku. Po 30 dniach ekstrakcji miedzi z badanych kompostów zawartość tego pierwiastka zmniejszyła się we wszystkich ekstraktach, najbardziej w ekstrakcie z kompostu z dodatkiem mocznika w porównaniu do zawartości miedzi wyekstrahowanej wodą według metody McLarena i Crowforda (tab. 5, rys. 6).

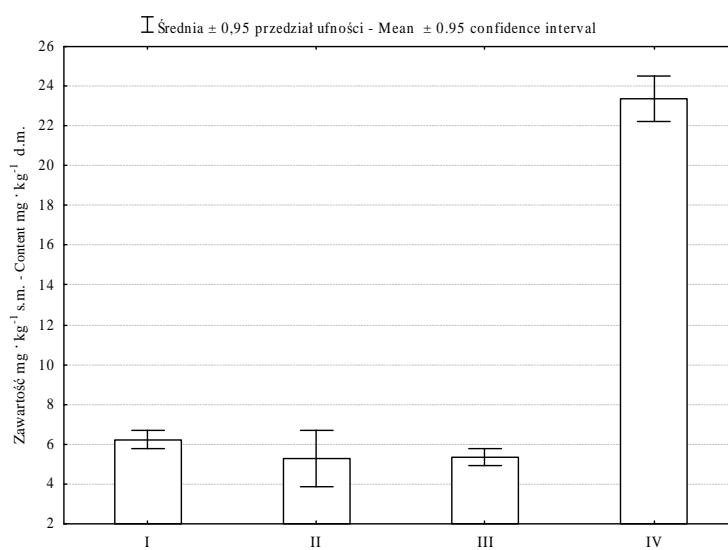
**Tabela 5.** Zawartość miedzi w materiałach organicznych po procesie kompostowania  
**Table 5.** Content of copper in organic materials after composting process

Obiekty – Objects	Cu ogólny	Cu	Cu	Cu	Cu
	Total Cu	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2$	$\text{CH}_3\text{COOH}$	$\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$
	(mg·kg <sup>-1</sup> s.m. – d.m.)				
I. Kompost surowy bez dodatku (kontrola) Raw compost without addition (control)	37,96±0,58	6,64±0,24	2,53±0,98	8,68±1,08	4,63±0,88
II. Kompost surowy + skrobia Raw compost + starch	36,78±0,46	5,74±0,20	3,18±0,41	8,54±1,88	4,90±0,70
III. Kompost surowy + olej jadalny Raw compost + edible oil	38,17±0,40	5,83±0,70	2,04±0,85	8,14±1,34	6,02±0,16
IV. Kompost surowy + mocznik Raw compost + urea	44,50±1,52	26,43±0,73	3,46±0,41	3,74±0,25	2,90±0,18

± Błąd standardowy średniej – Standard error of mean, n = 3.



**Rys. 5.** Udział poszczególnych frakcji miedzi w zawartości ogólnej; oznaczenia jak w tabeli 5  
**Fig. 5.** Share of each fraction of copper in total content; see Table 5 for symbols



**Rys. 6.** Zawartość Cu-H<sub>2</sub>O po trzydziestu dniach ekstrakcji; oznaczenia jak w tabeli 5  
**Fig. 6.** Content of Cu-H<sub>2</sub>O after thirty days of extraction; see Table 5 for symbols

Podobnie jak w przypadku manganu w badanych kompostach wykazano zwiększenie się zawartości ogólnych form miedzi, co potwierdzają wyniki badań innych autorów (Drozd i Licznar 2004). Według Rosik-Dulewskiej i Mikszta (2004) najwięcej miedzi, do około 60% udziału w zawartości ogólnej w kompo-

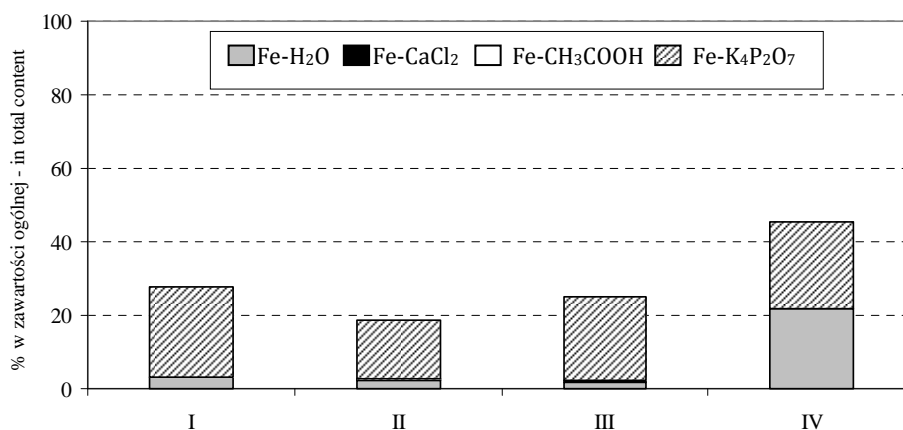
stowanych z odpadów komunalnych zgromadzone jest we frakcji związanej z substancją organiczną. Wyniki badań własnych wskazują, że udział miedzi we frakcji organicznej nie przekraczał 20% w zawartości ogólnej tego pierwiastka. Było to spowodowane znacznym udziałem form wodnorozpuszczalnych i wymiennych manganu, które w sumie w zawartości ogólnej stanowiły ponad 40%, a w przypadku kompostu z dodatkiem mocznika ponad 50%.

Ogólna zawartość żelaza kształtowała się na zbliżonym poziomie niezależnie od badanego kompostu (tab. 6). Zawartość żelaza wyekstrahowana wodą była największa w kompoście z dodatkiem mocznika. Zawartość ta znacznie odbiegała od oznaczonych w ekstraktach z pozostałych kompostów. Najwięcej żelaza oznaczono w połączeniach z materią organiczną (tab. 6, rys. 7). Udział tej formy Fe w zawartości ogólnej wynosił od 15% w kompoście z dodatkiem skrobi do 24% w kompoście bez dodatków. Stosunkowo niewielkie ilości żelaza oznaczono w formach wymiennych. W zawartości ogólnej udział sumy frakcji Fe oznaczonej po ekstrakcji  $\text{CaCl}_2$  i  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , niezależnie od kompostu nie przekraczał 0,5%. Po 30 dniach ekstrakcji żelaza z kompostów wodą redestylowaną stwierdzono zwiększenie zawartości tego pierwiastka w porównaniu do zawartości Fe oznaczonej w ekstraktach wodnych uzyskanych według procedury zaproponowanej przez McLaren i Crowforda (rys. 8).

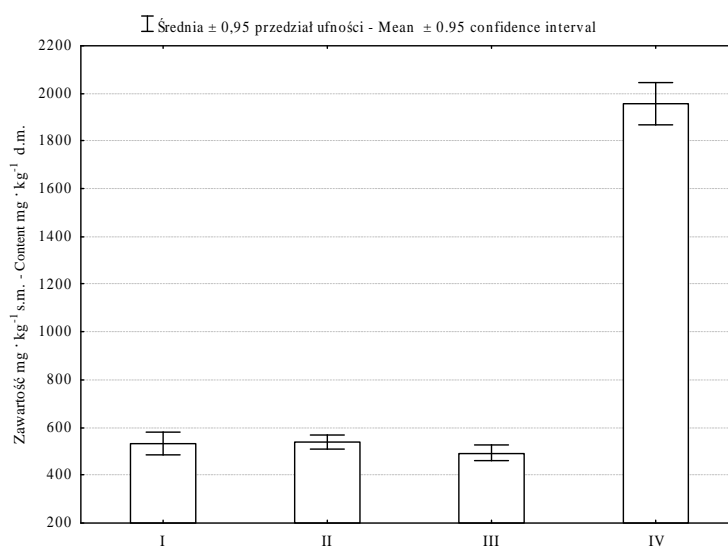
**Tabela 6.** Zawartość żelaza w materiałach organicznych po procesie kompostowania  
**Table 6.** Content of iron in organic materials after composting process

Objekty – Objects	Fe ogólny	Fe	Fe	Fe	Fe
	Total Fe	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2$	$\text{CH}_3\text{COOH}$	$\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$
	(mg·kg <sup>-1</sup> s.m. – d.m.)				
I. Kompost surowy bez dodatku (kontrola) Raw compost without addition (control)	5138±69	160,8±1,0	1,78±0,31	11,97±1,11	1253±170
II. Kompost surowy + skrobia Raw compost + starch	5436±765	132,4±2,2	1,84±0,56	10,72±0,81	861±73
III. Kompost surowy + olej jadalny Raw compost + edible oil	5367±125	105,8±1,6	1,60±0,23	10,59±0,65	1222±117
IV. Kompost surowy + mocznik Raw compost + urea	5420±415	1172,8±5,6	4,21±0,41	7,94±0,45	1288±136

± Błąd standardowy średniej – Standard error of mean, n = 3.



**Rys. 7.** Udział poszczególnych frakcji żelaza w zawartości ogólnej; oznaczenia jak w tabeli 6  
**Fig. 7.** Share of each fraction of iron in total content; see Table 6 for symbols



**Rys. 8.** Zawartość Fe-H<sub>2</sub>O po trzydziestu dniach ekstrakcji; oznaczenia jak w tabeli 6  
**Fig. 8.** Content of Fe-H<sub>2</sub>O after thirty days of extraction; see Table 6 for symbols

Najmniejszy przyrost zawartości tego pierwiastka po 30 dniach ekstrakcji (w porównaniu do zawartości oznaczonych we frakcji Fe-H<sub>2</sub>O wyekstrahowanej według procedury McLarena i Crowforda) stwierdzono w ekstrakcie uzyskanym z kompostu z dodatkiem mocznika, natomiast najbardziej zawartość ta zwiększyła

się w ekstrakcie z kompostu z dodatkiem oleju jadalnego. Oprócz kompostu z dodatkiem mocznika zawartość wodorozpuszczalnych i wymiennych form żelaza w badanych kompostach była niewielka. Jak stwierdzili Drozd i in. (1996) może to być podyktowane procesem wytrącania tego pierwiastka w warunkach oksydacyjnych i bardziej alkalicznych. Do zmniejszenia rozpuszczalności związków żelaza może się przyczynić również tworzenie trudno rozpuszczalnych kompleksów np. z cynkiem.

### WNIOSKI

1. Większy wpływ na zawartość badanych pierwiastków śladowych w poszczególnych frakcjach miał rodzaj pierwiastka niż dodatek różnych materiałów do kompostowania (skrobia, olej jadalny, mocznik).

2. Najwięcej cynku i żelaza w badanych materiałach było związane z materią organiczną, najmniej zaś wyekstrahowano roztworem  $\text{CaCl}_2$  (formy wymienne niespecyficznie adsorbowane). Najwięcej manganu i miedzi oznaczono w formach wymiennych, specyficznie adsorbowanych (ekstrakcja  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) oprócz materiału z dodatkiem mocznika, natomiast najmniej po ekstrakcji roztworem  $\text{CaCl}_2$ .

3. Stwierdzono przyrost zawartości w ekstrakcie wodnym cynku, manganu i żelaza po 30-stu dniach ekstrakcji w porównaniu do zawartości oznaczonej w ekstrakcie wodnym uzyskanym według procedury McLarena i Crowforda. Zmniejszeniu uległa zawartość miedzi.

### PIŚMIENNICTWO

- Baran S., Turski R., 1996. Ćwiczenia specjalistyczne z utylizacji odpadów i ścieków. Wyd. AR w Lublinie.
- Bogacz W., 1996. Badania nad formami mikroelementów w glebach Belgii. Cz. I. Procedura frakcjonowania metali w glebach. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 434, 1011-1015.
- Dimambro M. E., Lillywhite R. D., Rahn C. R., 2007. The physical, chemical and microbial characteristics of biodegradable municipal waste derived composts. *Compost Sci. & Utilization*, 15, 4, 243-252.
- Drozd J., Licznar M. 2004. Zmiany makro- i mikroskładników w czasie kompostowania odpadów komunalnych w różnych warunkach uwilgotnienia i przy różnym dodatku mocznika. [W] *Komposty z odpadów komunalnych produkcja, wykorzystanie i wpływ na środowisko*. Drozd J. (red.), Wyd. Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, 151-170.
- Drozd J., Licznar M., 2004. Transformacja materii organicznej podczas kompostowania odpadów komunalnych w odmiennych warunkach uwilgotnienia i przy różnym dodatku mocznika. [W] *Komposty z odpadów komunalnych produkcja, wykorzystanie i wpływ na środowisko*. Drozd J. (red.), Wyd. Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, 130-140.
- Drozd J., Licznar M., Patorczyk-Pytlik B., Rabikowska B., 1996. Zmiany w składzie chemicznym kompostów z odpadków miejskich w czasie ich kompostowania. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 437, 131-138.

- Gondek K., 2006. Zawartość różnych form metali ciężkich w osadach ściekowych i kompostach. *Acta Agrophysica*, 8(4), 825-838.
- Gondek K., Filipek-Mazur B., 2004. Zmiany zawartości rozpuszczalnych form żelaza i manganu oraz związków próchnicznych w osadzie ściekowym kompostowanym i wermikompostowanym. *Acta Agrophysica*, 4(3), 677-686
- Horiuchi J. I., Ebie K., Tada K., Kobayashi M., Kanno T., 2003. Simplified method for estimation of microbial activity in compost by ATP analysis. *Bioresource Technology* 86, 95-98.
- Hsu J. H., Lo S. L. 2001. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese and zinc from swine manure. *Environ. Pollut.*, 114, 1, 119-127.
- Iglesias-Jimenez E., Perez-Garcia V., 1991. Composting of domestic refuse and sewage sludge. Part. 1. Evaluation of temperature, pH, C/N ratio and cation exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 45-60.
- Ishii K., Takii S., 2003. Comparison of microbial communities in four different composting processes as evaluated by denaturing gradient gel electrophoresis analysis. *J. App. Microbiol.*, 95, 109-119.
- Jędrzak A., 2007. *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. Wyd. PWN Warszawa.
- Krzywy E., 1999. *Przyrodnicze zagospodarowanie ścieków i osadów*. Wyd. AR w Szczecinie.
- Rosik-Dulewska Cz., 2001. Zawartość składników nawozowych oraz metali ciężkich i ich frakcji w kompostach z odpadów komunalnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 477, 467-477.
- Rosik-Dulewska Cz., Mikszta M., 2004. Formy wybranych metali ciężkich w kompostach z odpadów komunalnych jako wskaźnik oddziaływania na środowisko. [W] *Komposty z odpadów komunalnych produkcja, wykorzystanie i wpływ na środowisko*. Drozd J. (red.), Wyd. Polskie Towarzystwo Substancji Humusowych, 171-185.
- Wang P., Chang C. M., Watson M. E., Dick W. A., Chen Y., Hoitink H. A. J., 2004. Maturity indices for composted dairy and pig manures. *Soil. Biol. & Biochem.* 36, 5, 767-776.
- Wasiak G., Madej M., 2009. Jakość kompostów Polskich w świetle kryteriów Unii Europejskiej i innych krajów. *Eko Problemy*, <http://odpady.org.pl/plugins/content/content.php?content.2833>

## ASSESSMENT OF ZINC, MANGANESE, COPPER AND IRON CONTENT IN COMPOSTED BIODEGRADABLE MUNICIPAL WASTES

*Krzysztof Gondek, Michał Kopeć*

Department of Agricultural and Environmental Chemistry, University of Agriculture  
Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków  
e-mail: rrgondek@cyf-kr.edu.pl

**Abstract.** The experiments aimed to determine the effect of composting process of selected municipal wastes with various admixtures (starch, edible oil or urea) on the content of zinc, manganese, copper and iron forms in the obtained composts. The object of research was raw "heating" compost from plants and other biodegradable wastes (marked with 20 02 01 code in the waste catalogue), leaving biostabilizer chamber of the composting plant operating in MUT-Kyberferm system. Extraction of Zn, Mn, Cu and Fe was conducted according to McLaren and Crawford procedure. Additionally, extraction of heavy metals from separate weighed portions of heavy metals was conducted for 30 days by means of redistilled water. Heavy metal content in the obtained extracts was assessed using ICP-AES method on JY 238 Ultrace apparatus (Jobin Yvon). Total content of zinc,

manganese, copper and iron in the analysed composts does not exclude their application in agriculture. The kind of element has a greater influence on the content of analysed trace elements in the individual fractions than the supplement of starch, edible oil or urea used for the composting. A significant increase in zinc, manganese and iron content was assessed in the water extract after 30 days of extraction in comparison with the content determined in the water extract obtained according to McLaren and Crawford procedure. Copper content decreased.

**Key words:** compost, zinc, manganese, copper, iron