

Robert SIDEŁKO, Izabela SIEBIELSKA, Kazimierz SZYMAŃSKI
Anna SKUBAŁA*, Natalia KOŁACZ*

Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji
Katedra Gospodarki Odpadami, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

e-mail: Robert.sidelko@tu.koszalin.pl

*doktorantki

Ocena stabilności kompostu w czasie rzeczywistym

W pracy przedstawiono wyniki badań próbek kompostu pobieranych w kolejnych fazach jego produkcji metodą pryzm napowietrzanych poprzez okresowe przerzucanie. Surowiec do kompostowania stanowiły odwodnione mechanicznie, częściowo ustabilizowane osady ściekowe z oczyszczalni ścieków komunalnych w Słupsku. Prezentowane wyniki są związane z tematem badawczym dotyczącym opracowania modelu matematycznego do oceny stabilności biologicznej kompostu w trakcie jego produkcji. Podstawowym celem modelowania numerycznego będzie stworzenie praktycznego narzędzia, umożliwiającego ocenę stabilności kompostu w czasie rzeczywistym (on-line), w oparciu o wartość prognozowanego wskaźnika AT-4. Monitorowane w trakcie kompostowania wskaźniki fizykochemiczne, stanowiące zmienne niezależne, to temperatura i stężenie tlenu w porach kompostu oraz sucha masa, substancja organiczna, OWO i azot ogólny.

Słowa kluczowe: kompostowanie, osady ściekowe, stabilność kompostu

Wprowadzenie

Zgodnie z obowiązującym Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych (DzU 2012, poz. 1052), wydzielona frakcja granulometryczna poniżej 80 mm, umownie określana jako frakcja organiczna, jest frakcją, w której zawartość składników biodegradowalnych wynosi ponad 80% [1]. Ostateczne unieszkodliwienie tej frakcji, polegające na składowaniu w wyznaczonym miejscu, wymaga, ogólnie rzecz ujmując, zmniejszenia zdolności do zagniwania poprzez zastosowanie procesu biologicznego przetwarzania. Niezależnie od sposobu biologicznego przetwarzania odpadów, wytworzony produkt jest kwalifikowany jako stabilizat, jeżeli spełnia alternatywnie trzy warunki związane z procentowym ubytkiem lub końcową zawartością substancji organicznej (s.o.) bądź węgla organicznego lub ma określoną wartość indeksu wyrażającego aktywność biologiczną (oddechową) mikroorganizmów. W przypadku kompostowania osadów ściekowych ocena stabilności biologicznej jest szczególnie istotna, ponieważ kompost, klasyfikowany jako nawóz organiczny, musi spełniać wymogi Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z 18 czerwca 2008 r. (DzU 2008, Nr 119, poz. 765). Określona w rozporządzeniu zawartość s.o. w nawozie organicznym powinna wynosić co najmniej 30% suchej masy (s.m.), natomiast wspomniane kryterium stabilności określa zawartość s.o. w materiale na nie więcej niż 35% s.m. Zawartość substancji

organicznej w kompoście dojrzałym, która na ogół mieści się w przedziale 20÷50%, nie wpływa na wysoką aktywność biologiczną, ponieważ w wyniku przemian biochemicznych następuje częściowa transformacja materii organicznej w związki humusowe [2-5]. Trudno zatem uznać zawartość lub ubytek substancji organicznej za wiarygodny miernik aktywności biologicznej, w odróżnieniu od wskaźników opartych na testach respiracji, w tym wskaźnika AT-4, wyrażającego ilość tlenu pobraną przez próbkę materiału w ciągu czterech kolejnych dni.

Wykonanie testu respiracji, służącego ocenie aktywności biologicznej kompostu lub stabilizatu, w oparciu o metodę pomiaru AT-4 może trwać nawet do 7 dni [6]. W sytuacji gdy proces kompostowania przebiega dwuetapowo z zastosowaniem zamkniętych reaktorów lub pryzm napowietrzanych w halach, to zakończenie pierwszej tzw. fazy gorącej wymaga ustabilizowania materiału na poziomie odpowiadającym wartości AT-4 nie większej niż 20 mg O₂/g s.m. Można zatem stwierdzić, że ze względu na metodykę badawczą wykorzystanie AT-4 jako wskaźnika technologicznego jest znacznie ograniczone, ponieważ decyzje o zakończeniu fazy gorącej muszą być podejmowane w czasie rzeczywistym. W tym kontekście bardziej praktyczne są testy respiracyjne w oparciu o metody dynamiczne, czego przykładem jest metoda DRI (Dynamic Respiration Index) lub metoda RI (Respiratory Index) wykonywana *in situ* i przeprowadzana w temperaturze procesowej w czasie 4 lub 24 godzin [7]. Niezależnie od rodzaju surowca i sposobu kompostowania, pomiędzy obydwoma wskaźnikami istnieje potwierdzona wysoka, dodatnia korelacja [8]. Sanchez i inni [9], prowadząc badania modelowe kompostowania osadów ściekowych z dodatkiem trzciny jako materiału strukturalnego w proporcji 2:5 (suchej masy), stwierdzili korelację pomiędzy AT-4 i RI, wyrażoną współczynnikiem Pearsona - k, wynoszącą 0,9965.

Bez wątplenia, spadek wartości parametru AT-4 w trakcie kompostowania jest skutkiem postępującego ubytku zawartości substancji organicznej, której ilość w wyniku procesu mineralizacji systematycznie maleje. Badania prowadzone w skali przemysłowej przez Lornage i innych [10] w 2007 r. wykazały, że w czasie 25 tygodni stabilizacji tlenowej frakcji organicznej wydzielonej z odpadów komunalnych obniżeniu s.o. z 61,9 do 39,4% s.m. odpowiadał spadek wartości AT-4 z 82,9 do 16,0 mg O₂/g s.m.

Stwierdzona wysoka współzależność pomiędzy obydwoma parametrami umożliwia wykorzystanie modelowania matematycznego do prognozowania wartości AT-4 na podstawie zmiany zawartości s.o., opisanej równaniem kinetyki I rzędu. Powyższe sformułowanie stanowi zasadniczą tezę badań dotyczących opracowania metody oceny stabilności biologicznej na podstawie wartości zmiennych monitorowanych *on-line*. W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki pierwszej części projektu, związanej bezpośrednio z badaniami terenowymi.

1. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na terenie kompostowni osadów ściekowych w Słupsku, należącej do spółki „Wodociągi Słupsk”. Podczas badań obserwowano zmiany

wartości wybranych parametrów fizykochemicznych w trakcie procesu kompostowania, który w stosowanej technologii jest realizowany dwuetapowo. Etap pierwszy, poprzedzony tygodniowym okresem formowania przyzmy, przebiega z intensywnym napowietrzaniem poprzez przrzucanie przyzmy dwa razy w ciągu tygodnia. Po około sześciu tygodniach kompost jest kierowany do boksów, gdzie dojrzewa przez kolejne dwa do trzech miesięcy. Formowanie przyzmy polega na naprzemiennym układaniu warstw z odwodnionych, częściowo stabilizowanych osadów ściekowych oraz słomy i zrębek drzewnych w proporcji wagowej 1:1:1.

W trakcie badań kontrolowano temperaturę i stężenie tlenu wewnątrz przyzmy kompostowej na głębokości ok. 1,0 m. Zawartość procentową tlenu w porach kompostu oznaczano za pomocą detektora gazów QRAE II, wyposażonego w sondę do poboru gazu glebowego i czujnik tlenu w zakresie 0÷30% (% obj.). Do badań laboratoryjnych pobierano próbki reprezentatywne kompostu o masie ok. 1,5 kg, stosując metodykę zgodną z normą PN-Z-15011-1 *Kompost z odpadów komunalnych - pobieranie próbek*. W próbkach oznaczano: s.m. (105°C), s.o. jako straty prażenia w 510°C, zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego metodą analizy elementarnej vario MAX CN (Elementar Analysensysteme GmbH) oraz wartość wskaźnika AT-4 w teście respiracyjnym przy wykorzystaniu systemu pomiarowego Oxi Top Control.

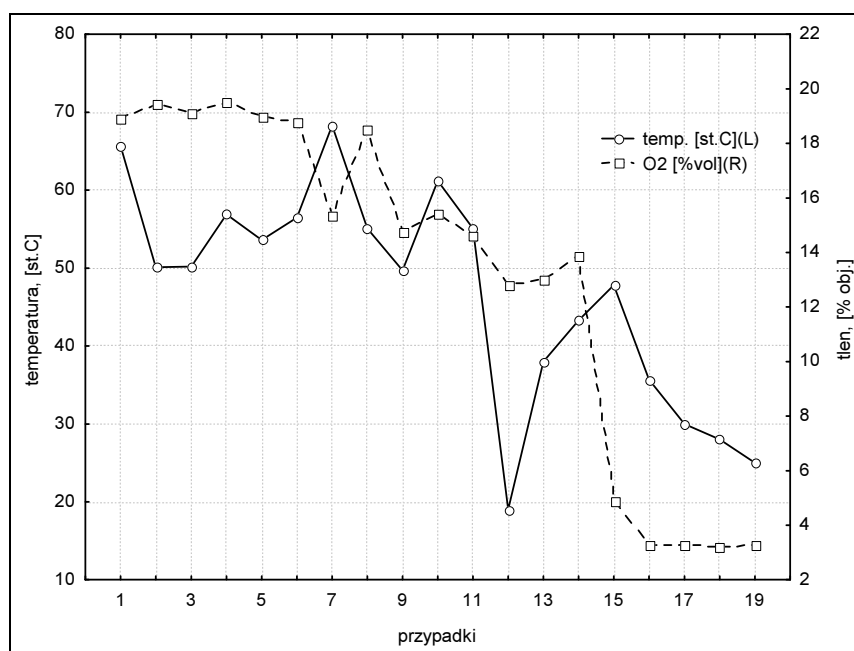
2. Analiza wyników badań

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1. W części związanej z badaniami terenowymi umieszczono dane obrazujące zmiany temperatury i procentowej zawartości tlenu w trakcie procesu kompostowania. Graficzną ilustrację zmian obu parametrów w całym okresie badań przedstawiono na rysunku 1. Stwierdzona w pierwszym 4-tygodniowym etapie kompostowania średnia temperatura wewnątrz przyzmy zmieniała się od 50,1 do 68,3°C. Pod koniec tego etapu, określanej mianem fazy gorącej, temperatura obniżyła się do 19°C, przy czym przeniesienie kompostu do boksów spowodowało okresowy wzrost temperatury nawet do 47,8°C. Początek trzeciego tygodnia trwania fazy gorącej to stopniowe obniżenie procentowego udziału tlenu w powietrzu wypełniającym wolną przestrzeń pomiędzy granulami kompostu do 12,8% pod koniec tej fazy. Zmniejszenie ilości dostępnego tlenu było wynikiem stopniowego ograniczania częstotliwości przrzuceń przyzmy, która w pierwszych dwóch tygodniach wynosiła dwa przrzucenia tygodniowo i spadła do jednego w dwóch ostatnich tygodniach fazy gorącej. W etapie drugim, określanym jako dojrzewanie kompostu, zawartość tlenu utrzymywała się na stosunkowo niskim poziomie, który po ok. dwóch tygodniach spadł znacznie poniżej 5%, co mogło oznaczać deficyt tlenowy i ostatecznie limitować szybkość przemian biochemicznych. Obniżenie aktywności biologicznej, i w konsekwencji spadek temperatury z 38 do 25°C, mogło być skutkiem, po pierwsze, oddziaływania czynnika limitującego, jakim była zawartość tlenu w porach kompostu, a po drugie - wyczerpania się związków organicznych stanowiących tzw. łatwo dostępne źródło węgla (RWO) wykorzystywanego w procesie mineralizacji.

Tabela 1. Wyniki badań terenowych i laboratoryjnych próbek kompostu

Table 1. Results of field studies and analyses of physical and chemical parameters of compost samples

Nr próbki - przypa- dek	Czas, doba	Badania terenowe						Badania laboratoryjne						C:N		
		temperatura, °C			tlen, % obj.			AT-4 mg O ₂ /g s.m.	W, %	s.m. %	s.o. %	C mg/kg s.m.	N mg/kg s.m.			
		1	2	3	średnia	1	2								3	średnia
kompost na przymie pod wiatą	1	62,0	65,0	70,0	65,7	20,1	19,2	17,5	18,93	26,29	66,50	33,50	75,40	36,73	3,53	10,39
	2	50,0	53,4	47,0	50,1	19,9	18,7	19,7	19,43	15,97	61,64	38,36	75,10	36,97	3,18	11,64
	3	50,0	57,6	43,0	50,2	20,9	18,2	18,3	19,13	13,56	60,71	39,29	75,95	37,98	2,96	12,84
	4	49,8	58,5	62,5	56,9	19,5	19,6	19,4	19,5	17,89	59,17	40,83	74,20	36,37	3,25	11,19
	5	47,0	58,0	55,7	53,6	20,2	18,3	18,4	18,97	12,93	58,95	41,05	73,40	36,68	3,30	11,10
	6	59,0	63,5	47,0	56,5	18,1	18,6	19,7	18,8	12,1	58,27	41,73	72,95	36,77	3,39	10,83
	7	71,2	70,0	63,6	68,3	16,9	14,3	14,9	15,37	5,33	55,77	44,23	73,31	36,38	3,50	10,40
	8	64,5	50,5	50,3	55,1	15,5	20	20	18,5	10,52	55,99	44,01	71,74	36,11	3,39	10,66
	9	56,0	49,0	44,2	49,7	15,5	13,9	14,9	14,77	10,02	56,48	43,52	71,20	35,81	3,42	10,49
	10	61,8	62,7	59,2	61,2	14,3	14,9	17	15,4	1,82	53,19	46,81	71,37	35,01	3,46	10,11
	11	49,1	60,4	55,7	55,1	11,8	17,4	14,6	14,6	9,69	51,24	48,76	70,12	35,49	3,51	10,12
	12	19,7	18,3	19,0	19,0	13,8	11,8	12,8	12,8	6,67	49,86	50,14	68,45	34,98	3,88	9,01
	13	38,0	38,0	38,0	38,0	-	-	-	-	6,11	-	-	-	-	-	-
	14	37,0	49,6	43,3	43,3	13,2	14,6	13,9	13,9	4,99	52,54	47,46	65,34	32,20	3,99	8,07
	15	40,6	55,0	47,8	47,8	2,6	7,2	4,9	4,9	3,86	51,71	48,29	63,78	32,26	3,72	8,67
	16	32,9	38,4	35,7	35,7	3,8	2,8	3,3	3,3	3,46	50,40	49,60	64,44	32,95	3,98	8,28
	17	30,0	30,0	30,0	30,0	3,3	3,3	3,3	3,30	3,25	48,83	51,17	67,13	32,67	3,98	8,20
	18	28,0	28,0	28,0	28,0	3,2	3,2	3,2	3,20	3,51	48,99	51,01	64,10	31,05	4,03	7,70
	19	25,0	25,0	25,0	25,0	3,3	3,3	3,3	3,30	3,05	47,88	52,12	64,41	32,46	4,01	8,10
dojrzewanie w boksie																
ok. 6 tygodni																
4 tydzien																
3 tydzien																
2 tydzien																
1 tydzien																



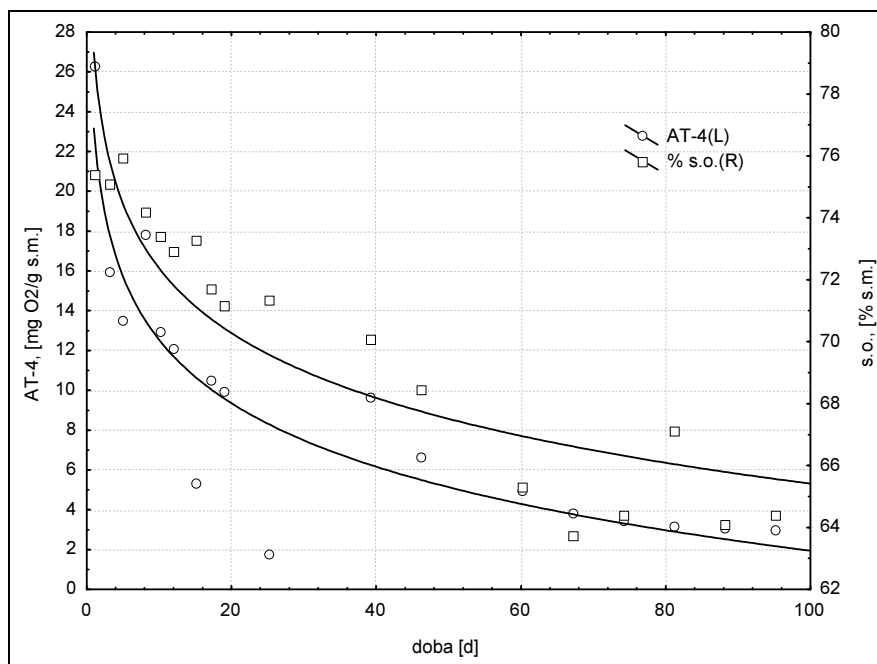
Rys. 1. Zmiana temperatury i zawartości tlenu w porach kompostu podczas badań terenowych

Fig. 1. Change of temperature and oxygen content in free air space of compost over field studies

Biologiczne utlenianie materii organicznej, które z natury jest procesem egzotermicznym, skutkuje wzrostem temperatury w przypadku dużej koncentracji RWO. Przebieg procesu warunkuje odpowiednia ilość tlenu, którego zawartość w porach kompostu nie powinna być mniejsza niż 12% [5]. Jeżeli zasoby RWO obniżają się, to bez względu na intensywność napowietrzania temperatura pryzmy stopniowo spada. Z tego względu ciągła ocena potencjału w kierunku rozkładu biologicznego, między innymi poprzez pomiar AT-4, jest niezmiernie istotna, gdyż umożliwia korygowanie parametrów technologicznych w trakcie kompostowania.

Wartość parametru AT-4 w ciągu całego okresu badań systematycznie obniżała się od 26,29 do 3,05 mg O₂/g s.m. Poziom bliski 10 mg O₂/g s.m. stwierdzono już w kompoście po 17 dniach od momentu rozpoczęcia procesu kompostowania. Ostateczny spadek wartości AT-4 w całym okresie badań wyniósł blisko 85% i znacznie przewyższył ten, który uzyskano w badaniach pilotażowych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych, gdzie po 90 dniach kompostowania efekt końcowy nie przekroczył 73% [9]. Stopniowemu zmniejszaniu wartości AT-4 odpowiadał spadek wartości temperatury oraz zawartości substancji organicznej z 76,4 do 64,41% s.m. Wykresy aproksymacji danych opisujących zmiany zarówno AT-4, jak i s.o. w całym okresie badań przedstawiono na rysunku 2. Uzyskane krzywe wyraźnie wskazują na podobny trend spadkowy, co sugeruje istnienie dodatniej korelacji pomiędzy AT-4 i s.o. Ostatecznie stwierdzona w tym przypadku siła współzależności, określona wartością współczynnika korelacji r , wyniosła 0,88743

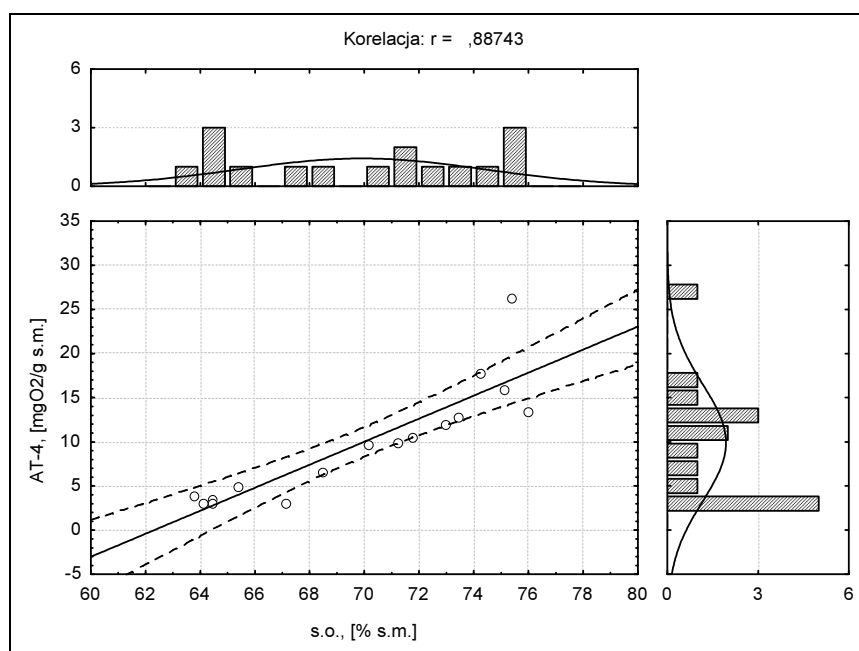
(rys. 3). Według standardu przyjętego w analizie statystycznej jest to bardzo wysoka korelacja, dla której współczynnik determinacji (R-kwadrat) wyniósł 0,7875 [11]. Obliczona wartość R-kwadrat, oznaczająca jakość dopasowania modelu liniowego do danych, pozwala wnioskować, że szacowanie wartości AT-4 (zmienna zależna) na podstawie wartości s.o. jako zmiennej niezależnej będzie obarczone niewielkim błędem.



Rys. 2. Zmiana wartości AT-4 i zawartości substancji organicznej w czasie badań

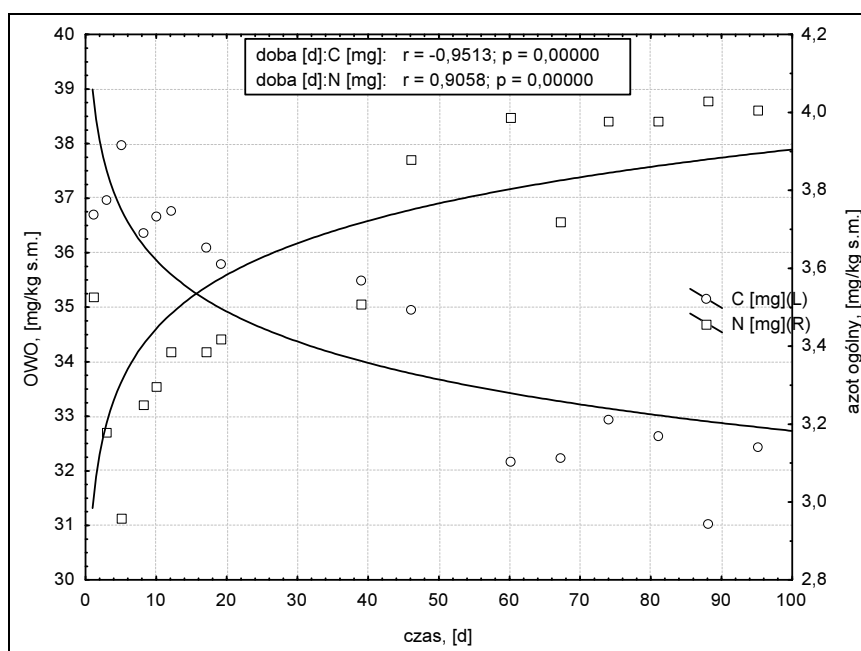
Fig. 2. Change in the value of AT-4 and the content of organic matter during tests

W pobieranych podczas badań próbkach kompostu oznaczano również zawartość ogólnego węgla organicznego (OWO) i azotu ogólnego (N_{og}). Zmiany wartości obu wskaźników przedstawiono na rysunku 4. Zgodnie z oczekiwaniami, zawartość OWO stopniowo malała, chociaż całkowity spadek w okresie badań nie przekroczył 20%. W przypadku N_{og} obserwowano wzrost zawartości z 3,53 do 4,01 mg/kg s.m., co można wiązać z ubytkiem substancji organicznej i wynikającym z tego spadkiem suchej masy, a w konsekwencji wzrostem koncentracji azotu. Na skutek przemian biochemicznych w czasie kompostowania azot jest przekształcany do amoniaku, którego formy gazowa (NH_3) i kationowa (NH_4^+) istnieją w równowadze dynamicznej. Odczyn lekko kwaśny w pierwszej fazie kompostowania oraz stopniowy wzrost pH i jego stabilizacja w granicach odczynu obojętnego w miarę upływu czasu nie sprzyjają tworzeniu formy gazowej odpowiedzialnej za straty azotu [12]. Przy pH 7 dominuje forma jonowa, której udział wynosi 99%.



Rys. 3. Wykres korelacji pomiędzy AT-4 i zawartością substancji organicznej

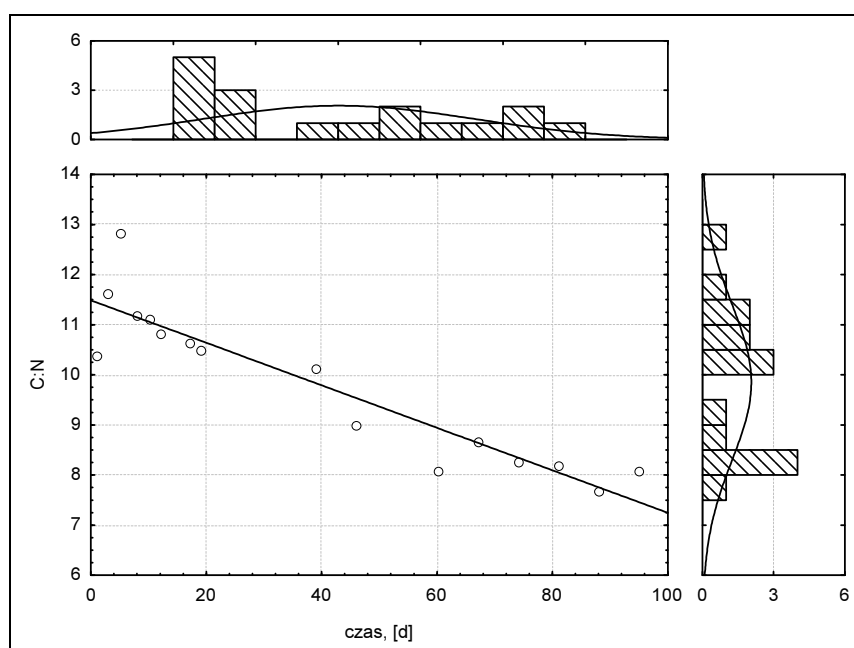
Fig. 3. Graph of the correlation between AT-4 and content of organic matter



Rys. 4. Wykresy zmian zawartości węgla organicznego i azotu ogólnego

Fig. 4. Graphs of changes in the organic carbon content and total nitrogen

Duże stężenie azotu w osadach ściekowych oraz niewielkie straty w czasie kompostowania powodują, że iloraz OWO/N_{og} (C/N) utrzymywał się w całym okresie badań na stosunkowo niskim poziomie w przedziale $10,4 \div 8,10$ (rys. 5). Podobnie jak w przypadku przeprowadzonych wcześniej badań kompostowania osadów ściekowych z wykorzystaniem reaktorów dynamicznych, niska wartość ilorazu C:N nie wpłynęła znacząco na przebieg procesu, o czym świadczą zmiany temperatury wewnątrz pryzmy kompostowej [13]. Tym samym nie potwierdzono sugerowanej w literaturze optymalnej proporcji C:N w materiale wsadowym przeznaczonym do kompostowania nie mniejszej niż 15 [5].



Rys. 5. Wykres rozrzutu wartości ilorazu C:N wraz z histogramem

Fig. 5. Scatterplot of quotient value of C:N with the histogram

Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdziły istnienie wysokiej współzależności pomiędzy parametrem AT-4 i substancją organiczną, dla których współczynnik korelacji wyniósł 0,887. Tak wysoka korelacja uzasadnia wykorzystanie równania regresji liniowej do prognozy AT-4 na podstawie wartości s.o. jako zmiennej niezależnej.

Ideą modelu, który zostanie opracowany w kolejnym etapie badań, będzie ocena stabilności kompostu w czasie rzeczywistym, z czego wynika, że wartość zmiennej niezależnej musi być monitorowana *on-line*. Takie założenie wyklucza zastosowanie metodyki oznaczania zawartości substancji organicznej mierzonyj jako straty prażenia. Rozwiązaniem tego problemu będzie zastosowanie postaci

algebraicznej przekształconego równania kinetyki I rzędu, opisującego zmiany stężenia substratu, wyrażone ubytkiem s.o., w trakcie kompostowania. Dla ustalonych warunków początkowych przebieg funkcji $\Delta s.o. = f(t)$ zależy od wartości stałej szybkości procesu $k(1/d)$, na co zasadniczy wpływ mają zmienne o cechach determinant, tj.: wilgotność, porowatość, temperatura i natlenienie kompostu. Uwarunkowania techniczne związane z potrzebą zastosowania czujników do monitoringu ciągłego, prowadzonego wewnątrz pryzmy kompostowej, powodują, że w praktyce można zastosować przede wszystkim pomiary temperatury i zawartości tlenu.

Podziękowania

Praca badawcza finansowana ze środków statutowych Katedry Gospodarki Odpadami w 2014 r.

Literatura

- [1] Sidelko R., Seweryn K., Ocena potencjału energetycznego frakcji organicznej odpadów komunalnych poddanej procesowi fermentacji metanowej, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2013, 1, 36-38.
- [2] Garcia C., Hernandez T., Costa F., Changes in carbon fraction during composting and maturation of organic waste, *Environmental Management* 1991, 3, 433-440.
- [3] Goyal S., Dhull S.K., Kapoor K.K., Chemical and biological changes during composting of different organic waste and assessment of composting maturity, *Bioresources Technology* 2005, 96, 1584-1591.
- [4] Epstein E., *The Science of Composting*, Technomic Publishing Company, USA 1997.
- [5] Jędrzak A., *Biologiczne przetwarzanie odpadów*, WN PWN, Warszawa 2007.
- [6] Kilian E., Macedowska-Capiga A., Parametr AT-4 jako wskaźnik stopnia stabilizacji odpadów po mechaniczno-biologicznym przetwarzaniu, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* 2011, 8, 88-94.
- [7] Bożym M., Wykorzystanie testów do oceny stopnia stabilizacji odpadów, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* 2011, 7, 79-88.
- [8] Ponsá S., Gea T., Sánchez A., Different indices to express biodegradability in organic solid wastes, *Journal of Environmental Quality* 2010, 39, 706-712.
- [9] Sánchez Arias V.F.J. et al., Respiration indices and stability measurements of compost through electrolytic respirometry, *Journal of Environmental Management* 2012, 95, 134-138.
- [10] Lornage R. et al., Performance of a low cost MBT prior to landfilling: Study of the biological treatment of size reduced MSW without mechanical sorting, *Waste Management* 2007, 27, 1755-1764.
- [11] Stanisław A., *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, Tom I, Statystyki podstawowe*, StatSoft Polska, Kraków 2006.
- [12] Pagans E., Barrena R., Font X., Sanchez A., Ammonia emission from the composting of different organic waste. Dependency on process temperature, *Chemosphere* 2006, 62, 1534-1542.
- [13] Sidelko R. et al., Two composting phases running in different process conditions timing relationship, *Bioresources Technology* 2010, 101, 6692-6698.

Evaluation of Compost Stability in Real Time

The paper presents the results of analysis of compost samples collected in successive phases of compost production that relies on forming windows aerated by periodical shifting. Partially stabilized and mechanically dehydrated sludge from municipal sewage treatment plant in Slupsk was an essential raw material for composting. The presented results are related to the topic of research on the development of a mathematical model to assess the biological stability of compost during its production. The primary objective of the numerical modeling will be to create a practical tool for assessing the stability of compost in real time (on-line), based on the projected value of the indicator AT-4. Indicators treated as independent variables, monitored during the composting process, were temperature and oxygen concentration in the pores of compost, dry matter, organic matter, TOC and total nitrogen.

Keywords: composting, sewage sludge, compost digestion