

BIOREACTORS CONSTRUCTION IN THE CONTEXT OF MODELING COMPOSTING PROCESS

Summary

Composting of organic matter is a complex process characterized by many physical and chemical parameters. The studies investigated in a real scale need lots of labour and financial sources. The experiments in field conditions are difficult to control and their repeatability is low. The usage of scientific set-up is limited because of heap dimensions, weather conditions and work time limitations. The modeling of organic matter decomposition in laboratories makes easier better control and survey of parameters which influence on a process. The paper presents review of bioreactors used for modeling of composting process. The application of different constructions, techniques of measurement and data registration has an important impact on projection of field conditions in a laboratory scale. The examples of usage of the artificial neural networks during experiments with bioreactors were also presented.

KONSTRUKCJA BIOREAKTORÓW W KONTEKSCIE ZAGADNIENIA MODELOWANIA PROCESU KOMPOSTOWANIA

Streszczenie

Kompostowanie materii organicznej jest złożonym procesem, który charakteryzuje wiele parametrów chemiczno-fizycznych. Badanie procesu kompostowania w pryzmach w skali rzeczywistej wymaga nakładu środków i pracy. Doświadczenia tego typu w warunkach terenowych są trudne do kontrolowania i brak jest pewności co do powtarzalności warunków pomiarowych. Wykorzystanie rozbudowanej aparatury pomiarowej w badaniach polowych jest bardzo utrudnione m.in. ze względu na wpływ zmiennej pogody, ograniczenia czasowe (częstotliwość wykonywania pomiarów) itp. Modelowanie procesu rozkładu substancji organicznych w laboratoriach umożliwia jego dokładniejsze poznanie i kontrolę nad czynnikami mającymi wpływ na jego przebieg. W pracy przedstawiono przegląd bioreaktorów wykorzystywanych do modelowania procesu kompostowania. Zastosowanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych, sprzętu pomiarowego i rejestracyjnego ma istotny wpływ na odwzorowanie warunków terenowych w doświadczeniach laboratoryjnych. Przedstawiono również przykłady wykorzystania sztucznych sieci neuronowych podczas doświadczeń z użyciem bioreaktorów, jako narzędzia do modelowania zjawisk związanych z procesami przemiany materii w aspekcie biologicznym, chemicznym i fizycznym.

Wstęp

Kompostowanie jest naturalnym procesem przemiany materii organicznej, w czasie którego substraty będące często odpadami czy też odchodami zwierzęcymi (osady ściekowe, odpady z zieleni miejskiej, komunalne, odpady poprodukcyjne z przemysłu rolno-spożywczego, obornik, gnojowica itp.) są waloryzowane, czyli przetwarzane w kompost wysokiej jakości ekologicznej i nawozowej [Mustin 1987, Dach i Sęk 1996]. Stąd też coraz silniejsze tendencje do powszechnego wdrażania kompostowania jako technologii przyjaznej środowisku i ekonomicznie opłacalnej [ACSI-BIOREX 1989, EEA 2005, Dach i in. 2007]. Kompostowanie jest jednak bardzo złożonym procesem mikrobiologicznym, którego przebieg jest uzależniony od wielu parametrów. Stąd też wiele ośrodków naukowych prowadzi badania nad optymalizacją przebiegu procesu dla szeregu materiałów organicznych. Jednakże ze względu na trudności występujące w badaniach w skali rzeczywistej na dużych pryzmach (wpływ zmiennych czynników pogodowych, wysoki koszt oraz mała powtarzalność procesu), w ostatnich latach następuje coraz szersze wykorzystywanie do badań procesu kompostowania różnego typu bioreaktorów. Należy przy tym podkreślić, iż wykonywane powszechnie przez wiele ośrodków naukowych badania w mikroskali w pojemnikach bez izolacji nie mają większej

wartości porównawczej dla kompostowania w warunkach rzeczywistych, gdyż ze względu na niekorzystny stosunek powierzchni do objętości następuje w nich bardzo szybka utrata ciepła. Stąd też uzyskiwana temperatura jest stosunkowo niska, a faza termofilna trwa co najwyżej kilkadziesiąt godzin zamiast kilka tygodni, jak w skali rzeczywistej. Dlatego uzyskane w takich doświadczeniach wyniki nie są w żadnym stopniu reprezentatywne dla rzeczywistego przebiegu procesu kompostowania w pryzmach.

Ogólna koncepcja budowy bioreaktorów

W literaturze światowej przedstawiono wiele rozwiązań budowy bioreaktorów do badania procesu kompostowania różnych substancji organicznych [Bari i in. 2001, Korner i in. 2003, Ahn i in. 2007, Yamada i in. 2006, Smars i in. 2002, Weppen 2001, Mason i in. 2005, Chang i in. 2006]. Przy konstrukcji każdego z nich autorzy dążyli do zachowania realiów kompostowania w warunkach naturalnych. W literaturze znaleźć można różne kategorie bioreaktorów. Mason i in. [2005] przyjęli podział reaktorów ze względu na dwa kryteria: wielkości i właściwości termodynamicznych (tab. 1). Biorąc pod uwagę wielkość reaktory można podzielić na reaktory w skali pilotażowej i laboratoryjnej (*pilot scale* i *laboratory scale*). Różnią się one między sobą objętością i stosunkiem powierzchni do objętości (P/V).

Tab. 1. Podział bioreaktorów ze względu na powierzchnię i objętość [Manson 2005]
 Table 1. Division of bioreactors with regard on surface and volume [Manson 2005]

Sposób kompostowania	Objętość V [l]	Stosunek powierzchni do objętości (P/V) [m ² /m ³]	Przykłady przyjmowanych wartości	
			V [l]	P/V [m ² /m ³]
Bioreaktory w skali laboratoryjnej	< 100	> 10:1	0,4 7,7 15,6	88,0 32,6 23,5
Bioreaktory w skali pilotażowej	100 – 2000	od 5 do 12,7	985 2000 840	6,0 5,0 6,5
Kompostowanie na przyzłmie („Full scale”)	ok. 5000	od 0,4:1 do 3,8:1	-	1,4 - 3,5

Tab. 2. Podział bioreaktorów ze względu na parametry termodynamiczne [Manson 2005]
 Table 2. Division of bioreactors with regard on thermodynamic parameters [Manson 2005]

Typ bioreaktora	Opis
Stałotemperaturowy	Pożądana temperatura jest narzucana i utrzymywana za pomocą zewnętrznego chłodzenia i ogrzewania
Samonagrzewający się	Aby uzyskać i utrzymać odpowiednią temperaturę procesu wykorzystuje się jedynie ciepło uzyskane w trakcie rozkładu mikrobiologicznego. Wykorzystuje się jedynie izolację zewnętrzną.
Z kontrolowaną różnicą temperatur	Aby uzyskać i utrzymać odpowiednią temperaturę procesu wykorzystuje się jedynie ciepło uzyskane w trakcie rozkładu mikrobiologicznego. Straty ciepła są kontrolowane przez dostarczanie ciepła do zewnętrznej powierzchni komory w celu utrzymania ustalonej z góry różnicy temperatur pomiędzy kompostowanym materiałem a ścianami komory
Z kontrolowanym przepływem ciepła	Aby uzyskać i utrzymać odpowiednią temperaturę procesu wykorzystuje się jedynie ciepło uzyskane w trakcie rozkładu mikrobiologicznego. Straty ciepła są kontrolowane przez dostarczanie ciepła do zewnętrznej powierzchni komory w celu utrzymania ustalonego z góry przepływu ciepła przez ściany komory

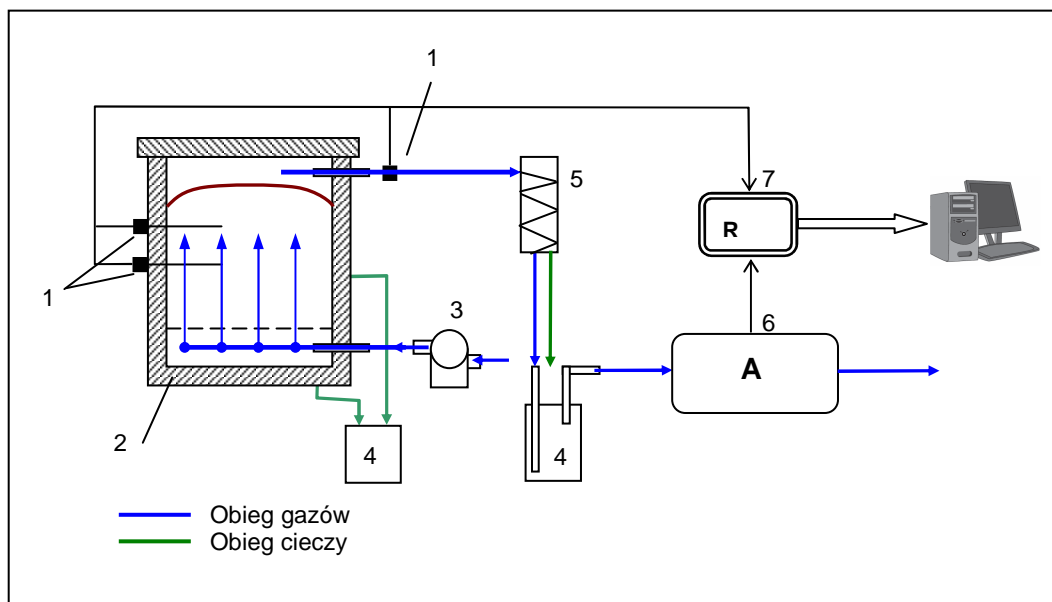
Ze względu na parametry termodynamiczne bioreaktory można podzielić na stałotemperaturowe, samonagrzewające się [Finstein 1983], z kontrolowaną różnicą temperatur i z kontrolowanym przepływem ciepła [Manson 2005] (tab. 2).

Mimo różnic w wielkościach i rozwiązaniach termodynamicznych wszystkie typy bioreaktorów mają takie same elementy składowe (rys. 1). Systemy te są niezbędne do przeprowadzenia kompostowania w laboratorium przy maksymalnym odwzorowaniu warunków polowych. Szczególnie istotne przy kompleksowym badaniu procesu jest zapewnienie kontroli nad obiegiem wody, gazów oraz bilansu ciepła w stanowisku badawczym.

Temperatura osiągnięta podczas procesu ma istotny wpływ na jego przebieg oraz jakość uzyskanego kompostu. W celu ograniczenia wpływu środowiska zewnętrznego oraz strat ciepłych (przez kondukcję, konwekcję i radiację) komory bioreaktorów izolowane są z wykorzystaniem różnego typu materiałów. Najczęściej stosuje się poliuretan [Ahn i in. 2007, Bari i in. 2001], gumę piankową [Smars i in. 2002], styropian [Dach i in. 2003], wełnę mineralną [Mason i in. 2005] i watę szklaną [Yamada i in. 2006]. Przykład bioreaktora z kontrolowaną różnicą temperatur przedstawił Korner i in. [2003] oraz Yamada i in. [2006]. W pierwszym przypadku komora jest otoczona podwójną ścianą wypełnioną wodą. Ogrzewanie wody regulowane jest automatycznie lub manualnie i zależy od temperatury

kompostowanej materii. W celu skompensowania strat ciepła do otoczenia przy samonagrzewaniu się wkładu woda w ściankach podgrzewana jest do odpowiedniej temperatury. W drugim przypadku zastosowano taśmę grzejną, którą otoczono reaktor. Jej celem jest utrzymanie temperatury ścian na poziomie 50°C przez okres trwania doświadczenia.

Do pomiaru temperatury na stanowiskach badawczych rozkładu materii organicznej wykorzystuje się różnego rodzaju czujniki temperatury. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w komorze bioreaktora zależy ściśle od jego budowy. Smars i in. [2002] umieścili 17 czujników temperatury na różnych głębokościach w kompostowanym materiale oraz pomiędzy materiałem izolacyjnym i ścianą komory. Podobne rozwiązanie zastosowali Korner i in. [2003], przy czym dodatkowo mierzyli jeszcze temperaturę wody w podwójnej ścianie otaczającej komorę. Umiejscowienie punktów pomiarowych wzdłuż osi pionowej bioreaktora zastosowali Bari i in. [2001], Ahn i in. [2007] oraz Yamada i in. [2006]. W pierwszym przypadku termopary umieszczone są na sześciu głębokościach: 10, 30, 50, 70, 90 i 110 cm od dna komory. Yamada i in. [2006] ułokowali piętnaście sztuk czujników w trzech plastikowych prętach na pięciu głębokościach. Pręty te były następnie równomiernie rozmieszczane wewnątrz kompostowanej masy. W trzecim przypadku zastosowano tylko jedną sondę z sensorami umieszczoną dokładnie na osi pionowej komory.



Rys. 1. Zasadnicze elementy składowe bioreaktorów do badania rozkładu substancji organicznych w warunkach tlenowych: 1. zespół czujników pomiarowych, 2. izolacja, 3. układ doprowadzania powietrza, 4. system gromadzenia odcieków i skroplin, 5. chłodnica gazów wylotowych, 6. układ analizy gazów, 7. rejestrator danych.

Fig. 1. Basic component elements of bioreactors for investigation of decomposition of organic substances in oxygenic conditions: 1. measuring sensors system, 2. isolation, 3. air inlet system, 4. reflux and condensate water system, 5. outlet gases cooler 6. gas analyzers, 7. registration unit

Prawidłowy rozkład materii organicznej w czasie kompostowania w bioreaktorach przebiega tylko w warunkach aerobowych. Ważne jest więc zapewnienie odpowiedniego stopnia natlenienia. Na stanowiskach laboratoryjnych stosuje się w tym celu wymuszone napowietrzanie. Powietrze tłoczone jest przez pompy do dolnej części komory, która najczęściej wyposażona jest w perforowaną podłogę w celu równomiernego rozprowadzenia gazów w kompostowanym materiale. Powietrze przemieszcza się od podstawy w kierunku górnej części komory. Inną metodą zastosowali Ahn i in. [2007], wykorzystano tam „odwrotną aerację” – powietrze jest zasysane z komory bioreaktora poprzez pompy podłączone do jego podstawy. Bardzo rzadko stosuje się napowietrzanie naturalne. Do kontroli ilości przepływającego powietrza używa się m.in. regulatorów przepływu i automatycznych zaworów. Aby uniknąć zbyt szybkiego wyschnięcia kompostowanej materii wykorzystuje się nawilzacze w celu wstępnego zwiększenia wilgotności powietrza tłoczonego do komory [Yamada i in. 2006, Mason i in. 2005].

Gołące powietrze wychodzące z komory kierowane jest do chłodnicy gdzie za pomocą różnych mediów doprowadza się do obniżenia jego temperatury i wilgotności. Jako medium chłodzące wykorzystuje się najczęściej wodę [Smars i in. 2002] lub zimne powietrze [Korner i in. 2003]. Zgromadzone skropliny przeznaczają się do dalszych badań lub przepompowuje z powrotem do komory.

Analizy gazów wylotowych wykonuje się ręcznie lub z wykorzystaniem różnego rodzaju automatycznych analizatorów gazowych [Ahn i in. 2007, Chang i in. 2006, Weppen 2001, Dach i in. 2003]. Najczęściej mierzy się zawartość: CO_2 , O_2 , N_2 i CH_4 . Prócz tego określa się również wilgotność gazów wylotowych oraz ich temperaturę. Bari i in. [2001] przedstawili stanowisko badawcze wyposażone dodatkowo w biofiltr składający się z warstwy żwiru i dojrzałego kompostu. Gazy wychodzące z komory reaktora są przepuszczane są przez niego przed emisją do atmosfery.

Istotny wpływ na parametry fizykochemiczne oraz jakość otrzymanego kompostu ma czas utrzymywania się wysokiej temperatury w przyzmy. Temperatura na poziomie 60°C utrzymywana przez dłuższy czas sprzyja mineralizacji materii organicznej oraz likwidacji mikroorganizmów chorobotwórczych, nasion chwastów czy larw owadów. Dach i in. [2001] wykazali, że w warunkach rzeczywistych zwiększenie liczby napowietrzeń przyzmy z wykorzystaniem ciągnikowego aeratora wpływa na wydłużenie czasu trwania fazy termofilnej.

W warunkach laboratoryjnych aerację wykonuje się najczęściej manualnie [Yamada i in. 2006, Bari i in. 2001, Weppen 2001] lub poprzez wykorzystanie mieszalników umieszczonych w komorze, napędzanych silnikami elektrycznymi [Chang i in. 2006] lub ręcznie [Ahn i in. 2007]. Ciekawe rozwiązanie zastosowali w swoich badaniach Smars i in. [2001]. Konstrukcja ich bioreaktora umożliwiała obrót komory o 90° do pozycji horyzontalnej i rotacje po osi poziomej w obu kierunkach.

Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do modelowania procesu kompostowania

Procesy biologiczne charakteryzują się dużą złożonością i nieliniowością oraz skomplikowanymi do określenia współzależnościami pomiędzy czynnikami wpływającymi na ich przebieg. Ma to istotne znaczenie dla dokładnego ich poznania. Jednym z narzędzi pomocnych w rozwiązaniu omawianych problemów są sztuczne sieci neuronowe (SNN). Zdolność SNN do nauki oraz generalizacji czy możliwość rozwiązywania niedokładnie zdefiniowanych zadań są niewątpliwymi atutami przy tworzeniu semantycznych modeli badanych procesów biologicznych [Kosiński 2002].

Sztuczne sieci neuronowe są z powodzeniem wykorzystywane w badaniach procesu przemiany odpadów organicznych. Ozkaya i in. [2007] zastosowali SNN do predykcji

emisji metanu podczas rozkładu odpadów komunalnych w bioreaktorze polowym. Wykorzystano tam sieci typu perceptron wielowarstwowy, które uczone były na podstawie różnych wariantów algorytmu wstecznej propagacji błędów. Założeniem działania sieci była predykcja procentowej zawartości metanu w gazach wylotowych na podstawie ośmiu parametrów opisujących proces.

Kombinację czujników i sieci neuronowych do identyfikacji zapachów pojawiających się w trakcie kompostowania odpadów organicznych w warunkach polowych przedstawili Bockreis i in. [1999]. Sztuczna sieć neuronowa opierała się na danych dostarczanych z czujników gazowych oraz z metody olfaktometrii. Dane te pozwoliły nauczyć sieć wyznaczać stężenie zapachów w próbce gazów.

W literaturze światowej brak jest do tej pory wzmianki dotyczącej zastosowania sztucznych sieci neuronowych w bioreaktorach laboratoryjnych. Badania takie podjęto w Instytucie Inżynierii Rolniczej Akademii Rolniczej w Poznaniu. W 2006 roku zbudowano tam czterokomorowy bioreaktor do badania procesu kompostowania materiałów organicznych (rys. 2). Jest to reaktor samonagrzewający się. Każda z komór ma 165 l pojemności a stosunek P/V wynosi $10,85 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Ściany komór zaizolowane są za pomocą styropianu oraz tworzywa PCV. Powietrze do każdej z komór doprowadzane jest za pomocą pomp, które tłoczą je od strony podstawy. W celu lepszego rozprzeczania powietrza po kompostowanej masie komory wyposażone są w ażurową podłogę. Zastosowanie tego rozwiązania pozwala również na gromadzenie odcieków spływających do zbiorników pod komorą. Do obniżenia temperatury gazów wylotowych oraz usunięcia z nich pary wodnej stosuje się szklane kolumny z wężownicą, w których medium chłodniczym

jest zimne powietrze. Skroplona para wodna gromadzona jest w zbiornikach umożliwiających pomiar jej objętości i pobranie próbek do dalszych analiz chemicznych (zwłaszcza na zawartość N-NH_4).

Woda w postaci skroplin usuwana jest również ze środka bioreaktora z wykorzystaniem systemu okapów i ryniek. Jest to niezbędne dla uniknięcia efektu skraplania się pary wodnej na pokrywie i jej powrotu do kompostowanej masy, bowiem zaburza to w znaczący sposób bilans energetyczny kompostowania (ciepło zużywane jest na wielokrotnie odparowywanie tej samej wody, co nie występuje w warunkach rzeczywistych). Analiza gazów wylotowych dokonywana jest z wykorzystaniem automatycznych głowic pomiarowych MG-72: CO_2 , NH_3 , O_2 , SH_2 i CH_4 . System komór wyposażony jest poza tym siatkę czujników:

- temperatury (gazów wlotowych i wylotowych, kompostowanej masy i otoczenia),
- wilgotności (gazów wlotowych i wylotowych),
- szybkości przepływu gazów wlotowych i wylotowych.

Wszystkie dane pomiarowe czytywane są automatycznie i zapisywane w pamięci 32 – kanałowego rejestratora danych zbudowanego całkowicie według koncepcji opracowanej przez Dacha i in. [2003]. Dane są zapisywane w cyklach ustawionych przez użytkownika. Automatyzacja zapisu pomiarów umożliwia monitorowanie przebiegu procesu niezależnie od obecności człowieka na stanowisku badawczym. Realistyczne odtworzenie warunków naturalnych oraz zastosowanie aparatury pomiarowej umożliwiają na zgromadzenie bazy danych empirycznych opisujących proces. Reprezentatywne pomiary uzyskiwane w powtarzalnych warunkach są istotne z punktu widzenia uczenia sieci neuronowej.



Rys. 2. Czterokomorowy bioreaktor do badania procesów rozkładu substancji organicznych
Fig. 2. Four-chamber bioreactor for investigation of processes of organic substances decomposition

W Instytucie Inżynierii Rolniczej sztuczne sieci neuronowe wykorzystywane są m.in. do modelowania procesów cieplnych [Olszewski i in. 2005] oraz do predykcji emisji amoniaku zachodzących w trakcie kompostowania. Wytworzony neuronowy model do prognozowania ilości energii cieplnej uzyskiwanej z masy konkretnego bioodpadu będzie przydatny w podejmowaniu decyzji dotyczących wykorzystania energii odnawialnej przy okazji projektowania inwestycji typu kompostownie i oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów itp. Wiedza o przewidywanej ilości wygenerowanego ciepła, będącego do dyspozycji, wspomaga również planowanie ewentualnej dodatkowej inwestycji, która mogłaby zagospodarować produkowane ciepło (np. szklarnie, lokalne sieci ciepłownicze).

Podsumowanie

1. Laboratoryjne wyniki badań procesów biologicznych, uzyskane z wykorzystaniem skonstruowanych bioreaktorów, są ważnym elementem wspomagającym oraz uzupełniającym właściwe doświadczenia terenowe.
2. Należy podkreślić, że w bioreaktorach możliwe jest uzyskanie długotrwałej i intensywnej fazy termofilnej. Można zatem adekwatnie odwzorowywać i symulować procesy biologiczne fazy kompostowania, zachodzące w warunkach rzeczywistych.
3. Sztuczne sieci neuronowe sprawdzają się jako efektywne narzędzie wykorzystywane w trakcie modelowania złożonych procesów biologicznych zachodzących w czasie kompostowania.
4. Układy pomiarowo-rejestrujące bioreaktorów pozwalają na pozyskanie dużej liczby danych empirycznych, niezbędnych do tworzenia neuronowych modeli predykcyjnych.

Literatura

- [1] ACSI-BIOREX INC. 1989. Le compostage du fumier á la ferme, étude de faisabilité technico-économique et évaluation des impacts agronomiques et environnementaux. Ed. Centre Develop. Agrobiol. Québec-St. Elizabeth, ss. 274.
- [2] Ahn H.K., Richard T.L., Choi H.L., 2007 "Mass and thermal balance during composting of a poultry manure – wood shavings mixture at different aeration rates" *Process Biochemistry* 42, str. 215-223
- [3] Bari Q.H., Koenig A., 2001 „Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste“ *Resources Conservation & Recycling* 33, str. 93-111
- [4] Bockreis A., Jager J., 1999 „Odour monitoring by the combination of sensors and neural networks“ *Environmental Modelling & Software* 14, str. 421-426
- [5] Chang J.I., Tsai J.J., Wu K.H., 2006 „Thermophilic composting of food waste“, *Bioresource Technology* 97, str. 116-122
- [6] Dach J., Przybył J., Zbytek Z., Kowalik I. 2007 Comparison of Traditional Technology of Manure Management and Composting with Usage of Tractor Aera-

tor. Landtechnische Schriftenreihe, OKL Wien, 230, str. 256-262

- [7] Dach J., Sęk T. 1996 Perspektywy i możliwości wdrożenia w gospodarstwach technologii produkcji kompostu z obornika. *Postępy Nauk Rolniczych*, 5, str. 91-102
- [8] Dach J., Zbytek Z., 2001 „Wpływ intensywności mechanicznego napowietrzania na szybkość kompostowania materiałów organicznych,” *Journal of Reserch and Applications in Agricultural Engineering*, vol. 46 nr 2, str. 39-42
- [9] Dach J., Jędrus A., Adamski M., Kowalik I., Zbytek Z., 2003 „Bioreaktor do badań procesów rozkładu materiałów organicznych” *Journal of Reserch and Applications in Agricultural Engineering*, vol. 48 nr 4
- [10] EEA 2005 *The European environment - State and outlook 2005*. ISBN 92-9167-776-0. 584 pp.
- [11] Finstein M.S., Miller F.C., Strom P.F., Mac Gregor S.T., Pasarianos K.M., 1983 „Composting ecosystem management for waste treatment” *Biotechnology*, str. 274-292
- [12] Korner I., Braukmeier J., Herrenklage J., Leikam K., Ritzkowsky M., Schlegelmilch, Stegmann R., 2003 „Investigation and optimization of composting processes – test systems and practical examples”, *Waste Management* 23, str. 17-26
- [13] Kosiński R., 2002 „Sztuczne sieci neuronowe, dynamika nieliniowa i chaos”, *Wydawnictwa Naukowo – Techniczne*, Warszawa
- [14] Mason I.G., Milke M.W. 2005 “Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems” *Waste Management* 25, str. 481-500
- [15] Mason I.G., Milke M.W. 2005 “Physical modelling of the composting environment: A review. Part 2: Simulation performance” *Waste Management* 25, str. 501-509
- [16] Mustin, 1987 "Le compost, gestion de la matiere organique." Edition Francois Dubuse-Paris
- [17] Olszewski T., Dach J., Jędrus A., 2005 Modelowanie procesu kompostowania nawozów naturalnych w aspekcie generowania ciepła”, *Journal of Reserch and Applications in Agricultural Engineering*, vol. 50 nr 2, str. 40-43
- [18] Ozkaya B., Demir A., Bilgili M.S., 2007 “Neural network prediction model for the methane fraction in biogas from field-scale landfill bioreactors” *Environmental Modelling & Software* 22, str. 815-822
- [19] Smars S., Beck-Friis B., Jonsson H., Kirchmann H., 2002 “An advanced experimental composting reactor for systematic simulation studies” *Bioresource Technology* 84, str.237-241
- [20] Weppen P., 2001 “Process calorimetry on composting of municipal organic wastes”, *Biomass and Bioenergy* 21, str. 289-299
- [21] Yamada Y., Kawase Y., 2006 „Aerobic composting of waste activated sludge: kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption”, *Waste Management* 26, str. 46-61