

SYSTEM FOR TEMPERATURE MONITORING OF THE COMPOSTED MATERIAL BASED ON ARDUINO PLATFORM

Summary

Composting is one of the ways of natural neutralization and management of different types of bio-wastes. In recent years much attention has been paid to researches on composting of variety of materials, including those containing sewage sludge. Due to the perceived need to automate and improve the implementation of researches on composting processes with the use of the bioreactor located in the Ecotechnology Laboratory of Poznań University of Life Sciences, the objective of the presented study was to develop a hardware-software system for monitoring the temperature of composted material placed in the chambers of the bioreactor. This system is based on the Arduino platform. The system allows to monitor the temperature in 6 bioreactor's chambers and the ambient temperature, using for this purpose 13 digital temperature sensors Maxim DS18B20. The paper includes exemplary results of changes of composted material's temperature obtained using the system, which were the basis of its validation. It was found that this system works properly and meets the assumptions, thus it may help to automate researches on composting.

Key words: Arduino platform, temperature monitoring, composting

SYSTEM DO MONITOROWANIA TEMPERATURY KOMPOSTOWANEGO MATERIAŁU BAZUJĄCY NA PLATFORMIE ARDUINO

Streszczenie

Kompostowanie jest jednym ze sposobów naturalnego unieszkodliwiania i zagospodarowania różnego rodzaju odpadów pochodzenia biologicznego. W ostatnich latach wiele uwagi poświęca się badaniom procesów kompostowania różnych materiałów, w tym zawierających osad ściekowy. W związku z dostrzeganą koniecznością dążenia do automatyzacji i usprawnienia realizacji badań nad procesami kompostowania prowadzonymi z wykorzystaniem bioreaktora znajdującego się w Laboratorium Ekotechnologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, celem prowadzonych badań było opracowanie sprzętowo-programowego systemu do monitorowania temperatury kompostowanego materiału znajdującego się w komorach tego bioreaktora. Rozwiązanie bazuje na platformie Arduino. Pozwala ono na monitorowanie temperatury pracy 6 komór bioreaktora oraz temperatury otoczenia, z wykorzystaniem do tego celu 13 cyfrowych czujników temperatury Maxim DS18B20. W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki zmian temperatury kompostowanego materiału uzyskane z wykorzystaniem wytworzonego systemu pomiarowego, które stanowiły podstawę jego walidacji. Uznano, że system działa w sposób poprawny i spełnia przyjęte założenia, przez co może wspomagać automatyzację badań nad procesami kompostowania.

Słowa kluczowe: platforma Arduino, monitorowanie temperatury, kompostowanie

1. Wprowadzenie

Istotą procesu kompostowania jest tlenowy rozkład materii organicznej przez mikroorganizmy. Rozkładowi temu towarzyszy nagrzewanie się kompostowanej biomasy. Względnie wysoka temperatura, dochodząca nawet do 80°C, sprzyja higienizacji materiału, gdyż powoduje zniszczenie mikroorganizmów patogennych i jaj pasożytów. Produkt uzyskany w wyniku takiego rozkładu może znaleźć zastosowanie do nawożenia i użyźniania gleby. Coraz częściej jako substraty w procesie kompostowania stosuje się nawet tak uciążliwe materiały, jak komunalne osady ściekowe. Biorąc pod uwagę możliwość późniejszego rolniczego wykorzystania przyjmuje się, że adekwatne do poddania temu procesowi są osady ściekowe o obniżonej zawartości metali ciężkich, czyli takiej, żeby zawartość metali ciężkich w końcowym produkcie nie przekraczała wartości dopuszczalnych do nawożenia gleb uprawnych. Zwykle są to osady pochodzące z małych i średnich oczyszczalni ścieków zlokalizowanych na terenach pozbawionych nadmiernego przemysłu.

W ostatnich latach wiele uwagi poświęca się badaniom

procesów kompostowania różnych materiałów, w tym zawierających osad ściekowy. W Polsce część takich badań jest prowadzona w Laboratorium Ekotechnologii w Instytucie Inżynierii Biosystemów Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Bazują one na wykorzystaniu sześciokomorowego bioreaktora, który został zbudowany w ramach projektu badawczego KBN (0856/P06/2001/21) [2] i zmodernizowany w ramach projektu CleanCompost (6 Program Ramowy Unii Europejskiej) [3]. Ideą budowy i rozwoju tego bioreaktora było stworzenie możliwości prowadzenia w ściśle kontrolowanych warunkach laboratoryjnych badań modelowych rozkładu materiałów organicznych, zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych. Dzięki właściwej izolacji termicznej oraz kontrolowanemu dopływowi powietrza do komór bioreaktora jest możliwe dokładne odzorowanie przemian zachodzących w składowym – w tym tlenowo – materiale, a także badanie zmian parametrów fizycznych, chemicznych i mikrobiologicznych oraz emisji gazowych będących efektem realizowanego procesu [1-4].

Niestety, aktualnie obsługa doświadczeń realizowanych z użyciem wspomnianego bioreaktora wymaga dużego na-

kładu pracy ludzkiej i czasu, nie tylko na przygotowanie, załadunek i późniejszy rozładunek kompostowanej mieszanki, ale w dużej mierze na dokonywanie częstego odczytu wielu parametrów informujących o przebiegu procesu. Przykładowo, do tej pory wykonanie odczytu aktualnej temperatury materiału z analogowych czujników umieszczonych w komorach było każdorazowo związane z koniecznością podłączenia woltomierza do wyprowadzonych z nich przewodów i odczytania wartości napięcia. Wśród istniejących rozwiązań służących do monitorowania temperatury autorzy nie znaleźli takiego, które nadawałoby się bezpośrednio do zastosowania w realizowanych badaniach. W poszukiwaniu rozwiązania brano pod uwagę przede wszystkim koszty oraz możliwości skalowania z uwzględnieniem przyszłej rozbudowy o obsługę czujników innych parametrów.

W związku z dostrzeżoną koniecznością dążenia do automatyzacji i usprawnienia realizacji badań nad procesami kompostowania prowadzonych z wykorzystaniem bioreaktora znajdującego się w Laboratorium Ekotechnologii, celem badań było opracowanie sprzętowo-programowego systemu do monitorowania temperatury kompostowanego materiału znajdującego się w komorach tego bioreaktora. Opracowany system został poddany walidacji w czasie procesów kompostowania mieszanki osadu ściekowego i słomy kukurydzianej.

2. Metodyka badań

Przed przystąpieniem do budowy systemu przyjęto szereg założeń. Uznano, że system ten powinien umożliwiać:

- cykliczny odczyt wartości temperatury z 12 czujników umieszczonych we wnętrzu 6 komór bioreaktora (przy założeniu, że na każdą komorę przypadają 2 czujniki),
- cykliczny odczyt wartości temperatury otoczenia z 1 czujnika,
- wyświetlanie odczytanych wartości temperatury na wbudowanym wyświetlaczu,
- przekazywanie odczytanych wartości temperatury do komputera za pośrednictwem interfejsu USB.

Przyjęto również założenie, że opracowywane rozwiązanie powinno być możliwie proste w budowie i programowaniu. Ostatecznie jako podstawę do budowy systemu wybrano elastyczną, otwartą platformę Arduino, która w ostatnim czasie znacznie zyskała na popularności. Obejmuje ona zarówno sprzęt w postaci tzw. płytki uruchomieniowej, jak i specyficzny język programowania wysokiego poziomu oraz kompletne środowisko programistyczne umożliwiające programowanie tej płytki. Do płytek uruchomieniowych mogą być podłączane różnego rodzaju czujniki, w tym cyfrowe i analogowe czujniki temperatury, działające chociażby z wykorzystaniem interfejsu 1-Wire czy I²C. Za pośrednictwem tych płytek można również sterować działaniem wielu urządzeń, w tym silników, siłowników, serwo mechanizmów, źródeł światła czy wyświetlaczy LCD.

Przyjęto, że do budowy części sprzętowej systemu zostanie użyta jedna z oficjalnych płytek uruchomieniowych Arduino, a mianowicie Arduino UNO (rys. 1). Jest ona oparta na 8-bitowym mikrokontrolerze ATmega328 firmy Atmel, wyposażonym w 32 kB pamięci na programy, 11kB pamięci typu EEPROM i 2 kB pamięci RAM. Na płycie Arduino UNO znajduje się rezonator kwarcowy (16 MHz) oraz regulator napięcia (5 V). Do gniazda zasilania można

podłączyć źródło prądu stałego o napięciu od 6 do 20V, przy czym dla zapewnienia optymalnych warunków pracy stabilizatora napięcia zaleca się stosowanie napięcia od 7 do 12 V. Opcjonalnie Arduino UNO można zasilac przez umieszczony na nim port USB typu B. Port ten jest również wykorzystywany do wgrzywania oprogramowania, a także komunikowania się z oprogramowaniem w trakcie jego pracy. Wykorzystana płytka uruchomieniowa jest wyposażona w 14 cyfrowych złącz wejścia/wyjścia, z których 6 może wytwarzać sygnały PWM (ang. *Pulse-width modulation*), a także w 6 wejść analogowych.



Rys. 1. Płytki uruchomieniowej Arduino Uno (źródło: opracowanie własne)

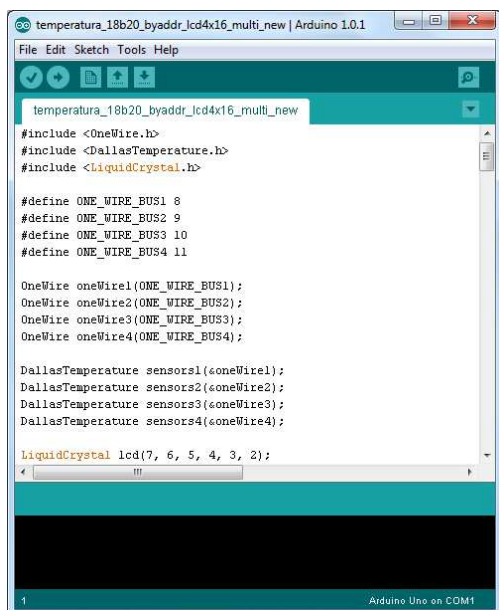
Fig. 1. Arduino Uno board (source: the authors' study)

Określono również, że do pomiaru zarówno temperatury materiału we wnętrzu komór bioreaktora, jak i temperatury powietrza na zewnątrz bioreaktora (w laboratorium) zostaną wykorzystane popularne czujniki cyfrowe DS18B20 firmy Maxim. Te niewymagające kalibracji czujniki cechują się zakresem temperatury pracy od -55 do +125°C. Dokładność realizowanego za ich pomocą pomiaru temperatury wynosi $\pm 0,5^\circ\text{C}$ w zakresie od -10 do +85°C. Czujniki te są wyposażone w trzy złącza: zasilania, uziemienia i sygnałowe. Mogą być zasilane napięciem od 3 do 5,5 V, a przy zaplanowanej liczbie 13 czujników nie ma przeszkód, żeby były one zasilane bezpośrednio z płytki uruchomieniowej Arduino UNO. Komunikacja z czujnikiem odbywa się za pośrednictwem interfejsu 1-Wire, zatem wysyłanie i odbieranie informacji następuje za pośrednictwem jednej magistrali. Co więcej, jedna magistrala może być wykorzystana do komunikowania się z większą liczbą czujników. W związku z tym w wewnętrznej pamięci ROM każdego czujnika jest zapisany unikalny 64-bitowy kod, który jest używany do jego identyfikacji w procesie komunikacji.

Ustalono, że do wyświetlania bieżących wartości temperatury kompostowanego materiału i temperatury otoczenia zostanie wykorzystany klasyczny alfanumeryczny wyświetlacz LCD, bazujący na kontrolerze zgodnym z układem Hitachi HD44780. Wykorzystano moduł wyświetlacza firmy AV-Display, wyświetlający 4 linie tekstu po 16 znaków. Zasilanie wyświetlacza może być realizowane bezpośrednio z płytki uruchomieniowej Arduino UNO z wykorzystaniem prądu stałego o napięciu 5 V.

Do programowania płytek uruchomieniowych Arduino wykorzystuje się język programowania o tej samej nazwie [5]. Bazuje on na języku C/C++ oraz otwartym środowisku dla mikrokontrolerów o nazwie Wiring. Programy tworzy się w zintegrowanym środowisku programistycznym (IDE) Arduino (rys. 2), które jest dostępne zarówno w postaci plików binarnych dla systemów operacyjnych Windows, Mac OS X oraz Linux, jak i w postaci pełnego kodu źródłowego.

Środowisko to pozwala na edycję kodu programu, jego kompilację oraz przesyłanie skompilowanej aplikacji na płytkę uruchomieniową, np. przy użyciu przewodu USB.



Rys. 2. Zintegrowane środowisko programistyczne Arduino (źródło: opracowanie własne)

Fig. 2. Arduino integrated development environment (source: the authors' study)

Struktura programu bazuje na dwóch podstawowych funkcjach: `setup()` i `loop()`. Instrukcje zawarte w pierwszej z nich są wywoływane jednorazowo po każdym uruchomieniu programu, a więc po doprowadzeniu zasilania do płytki uruchomieniowej lub jej zresetowaniu. Zwykle zawarte w niej instrukcje służą do inicjalizacji ustawień, w tym np. do określania trybów pracy cyfrowych portów wejścia/wyjścia, wyświetlaczy LCD czy portu szeregowego. Bezpośrednio po zakończeniu działania tej funkcji uruchamiane są instrukcje zawarte w funkcji `loop()`. Są one powtarzane wielokrotnie, w pętli, przez cały czas pracy płytki uruchomieniowej. Istnieje wiele bibliotek ułatwiających obsługę sprzętu podłączonego do Arduino. Aktywacja obsługi tych bibliotek odbywa się poprzez dołączenie ich plików nagłówkowych z wykorzystaniem znanej z języka C/C++ dyrektywy `#include`. W trakcie badań zostały wykorzystane następujące biblioteki:

- Dallas Temperature Control Library – wspomaga obsługę cyfrowych czujników temperatury DS18B20 [5],
- OneWire Library – wspomaga obsługę interfejsu 1-Wire, wykorzystywana przez Dallas Temperature Control Library [6],
- LiquidCrystal Library – wspomaga obsługę większości tekstowych wyświetlaczy LCD, opartych na układzie Hitachi HD44780 lub z nim zgodnych [4].

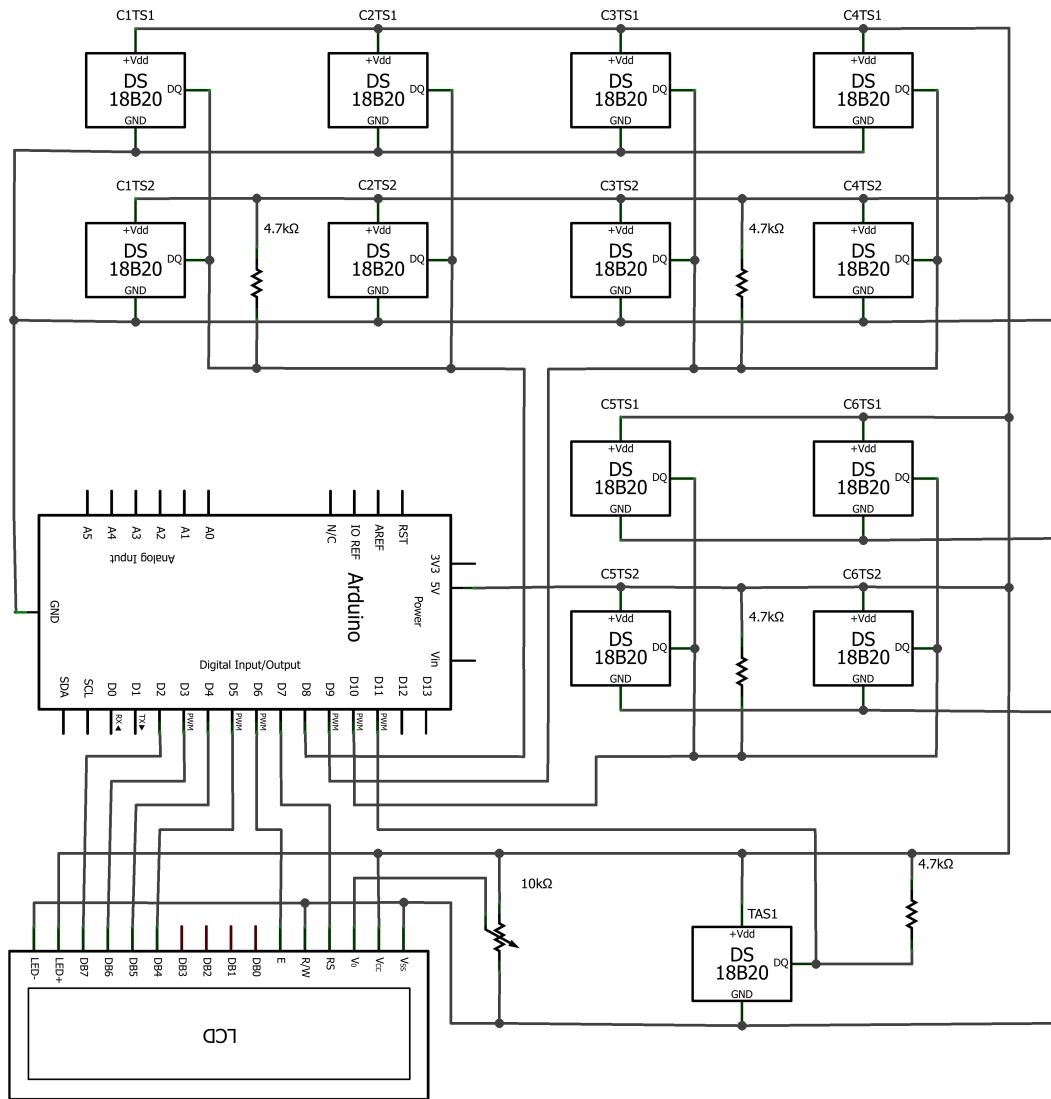
3. Opis systemu

Schemat budowy części sprzętowej systemu do monitorowania temperatury materiału kompostowanego we wnętrzu bioreaktora, opracowany z wykorzystaniem darmowego oprogramowania Fritzing, został zaprezentowany na rys. 3. Wykorzystanych zostało 10 złączy cyfrowych płytki uruchomieniowej Arduino UNO, z czego 6 złączy (D2 – D7) posłużyło do obsługi wyświetlacza LCD, a 4 złącza (D8 –

D11) do obsługi magistral 1-Wire. Do pierwszej magistrali 1-Wire uruchomionej na złączu D8 podpięte zostały czujniki temperatury obsługujące 1 i 2 komorę bioreaktora, oznaczone: C1TS1, C1TS2, C2TS1 i C2TS2. Do drugiej magistrali uruchomionej na złączu D9 podłączono czujniki obsługujące 3 i 4 komorę, czyli: C3TS1, C3TS2, C4TS1, C4TS2. Trzecia magistrala pracująca na złączu D10 jest odpowiedzialna za komunikację z czujnikami 5 i 6 komory, a więc: C5TS1, C5TS2, C6TS1 i C6TS2. Ostatnia magistrala 1-Wire, uruchomiona na złączu D11, obsługuje czujnik temperatury otoczenia TAS1. Wszystkie czujniki są zasilane napięciem 5V, pochodzącym z bezpośrednio z płytki uruchomieniowej. Pomiedzy każdą z utworzonych magistral 1-Wire a biegunem dodatnim napięcia zasilania zastosowano rezystor 4.7kΩ. W układzie został również użyty potencjometr 10kΩ, który umożliwi zmianę kontrastu znaków wyświetlanych na wyświetlaczu LCD.

Na płytkę uruchomieniową załadowano wytworzone w ramach badań oprogramowanie TempMonitor v1.5. W kodzie źródłowym tego programu w pierwszej kolejności zostają utworzone odpowiednie stałe i zmienne, które są wykorzystywane m.in. do przechowywania: numerów złączy cyfrowych używanych do obsługi 4 magistral 1-Wire, 64-bitowych kodów identyfikacyjnych dla 12 czujników temperatury umieszczonych w bioreaktorze i aktualnych wartości temperatury odczytywanych z poszczególnych czujników. W funkcji `setup()` następuje inicjalizacja: obsługi portu szeregowego z prędkością 9600 bodów, 4 magistral 1-Wire i wyświetlacza LCD z uwzględnieniem 4 linii tekstu po 16 znaków. Z kolei każde wykonanie funkcji `loop()` obejmuje w pierwszej kolejności odczytanie wartości temperatury z czujników. Wartości pochodzące z czujników umieszczonych w komorach bioreaktora są pobierane z wykorzystaniem funkcji `getTempC()`, której parametrem jest kod identyfikacyjny danego czujnika. Natomiast w odniesieniu do czujnika temperatury otoczenia, a więc jednego czujnika pracującego na magistrali 1-Wire uruchomionej na złączu D11, jest stosowana funkcja `getTempCByIndex()` z parametrem w postaci indeksu 0. Wykorzystanie tej funkcji eliminuje potrzebę przeprogramowywania płytki sterującej w przypadku wymiany czujnika temperatury otoczenia. Potrzeba ta występuje w przypadku wymiany któregośkolwiek z pozostałych czujników, lecz sprowadza się jedynie do wpisania nowego kodu identyfikacyjnego w stałej odpowiedzialnej za obsługę danego czujnika. Odczytane wartości temperatury zostają zapisane w odpowiednich zmiennych. Dalsze działanie funkcji `loop()` polega na wysłaniu tych wartości na port szeregowy z użyciem funkcji `println()`. Następnie są one przekazywane na wyświetlacz LCD. Z uwagi na stosunkowo niewielką liczbę znaków na wyświetlaczu, wartości temperatury z kolejnych 4 czujników umieszczonych w bioreaktorze pojawiają się co 7 sekund, przez następne 7 sekund wyświetlana jest temperatura otoczenia, a dalej przez 2 sekundy prezentowana jest krótka informacja o programie. Pojedyncze przejście funkcji `loop()` trwa zatem ok. 30 sekund, jest to równocześnie interwał czasowy z jakim odczytywane są wartości temperatury z czujników.

Jednostkę pomiarową systemu do monitorowania temperatury kompostowanego materiału umieszczono w obudowie do elektroniki wykonanej z materiału ABS (rys. 4). Z uwagi na agresywne środowisko panujące w złożu kompostowanego materiału zastosowano czujniki temperatury DS18B20 osadzone w tulejach ze stali nierdzewnej. Zostały one połączone z jednostką pomiarową za pomocą 5 m przewodów przy użyciu trójżyłkowych wtyków i gniazd typu *minijack* 3,5 mm.



Rys. 3. Schemat połączeń sprzętu do monitorowania temperatury kompostowanego materiału (źródło: opracowanie własne)
 Fig. 3. Wiring diagram of hardware for monitoring the temperature of composted material (source: the authors' study)

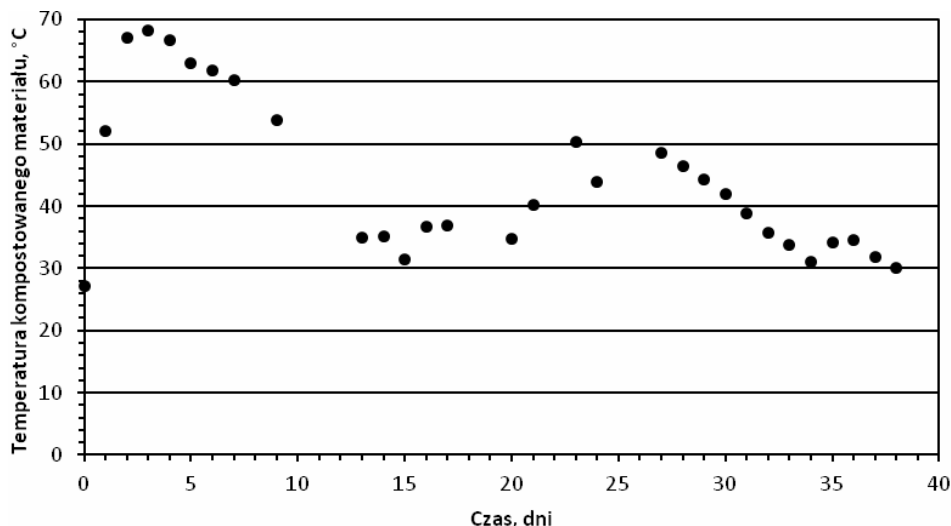


Rys. 4. Jednostka pomiarowa systemu do monitorowania temperatury kompostowanego materiału (źródło: opracowanie własne)
 Fig. 4. Measurement unit of system for monitoring the temperature of composted material (source: the authors' study)

4. Walidacja systemu

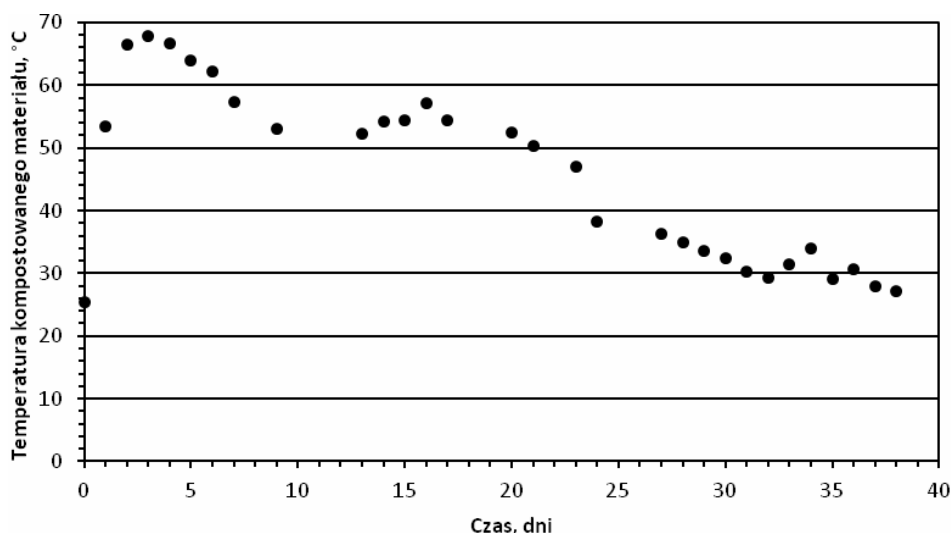
Poprawność działania opracowanego systemu pomiarowego sprawdzono w trakcie doświadczeń związanych z kompostowaniem biomasy w bioreaktorze. Na rys. 5 zaprezentowano wykres zmian temperatury otrzymany z wykorzystaniem jednego z czujników umieszczonych w wnętrzu kompostowanej przez 38 dni mieszanki zawierającej w suchej substancji 55% osadu ściekowego i 45% słomy kukurydzianej. Można zaobserwować, że temperatura mie-

szanki osiągnęła maksymalną wartość 68°C w 3. dniu kompostowania. Ostatniego dnia spadła ona do wartości najniższej, tj. 30°C. Na rys. 6 przedstawiono wykres zmian temperatury kompostowanej mieszanki z odwróconymi proporcjami obu wymienionych składników. Mieszanka ta również uzyskała najwyższą temperaturę wynoszącą 68°C w 3. dniu trwania procesu, a w ostatnim dniu wynosiła 27°C. Działanie opracowanego systemu w trakcie testowania nie budziło zastrzeżeń. Uznano, że system działa w sposób poprawny i spełnia przyjęte założenia.



Rys. 5. Wykres zmian w czasie temperatury kompostowanego materiału zawierającego 55% osadu ściekowego i 45% słomy kukurydzianej na podstawie danych uzyskanych z wykorzystaniem opracowanego systemu (źródło: opracowanie własne)

Fig. 5. Graph of temperature changes in time for composted material containing 55% sewage sludge and 45% corn straw based on data obtained using the developed system (source: the authors' study)



Rys. 6. Wykres zmian w czasie temperatury kompostowanego materiału zawierającego 45% osadu ściekowego i 55% słomy kukurydzianej na podstawie danych uzyskanych z wykorzystaniem opracowanego systemu (źródło: opracowanie własne)

Fig. 6. Graph of temperature changes in time for composted material containing 45% sewage sludge and 55% corn straw based on data obtained using the developed system (source: the authors' study)

5. Podsumowanie

Opracowane sprzętowo-programowe rozwiązanie bazujące na platformie Arduino stanowi właściwy krok w kierunku automatyzacji i usprawnienia realizacji badań nad procesami kompostowania prowadzonych z wykorzystaniem bioreaktora znajdującego się w Laboratorium Ekotechnologii w Instytucie Inżynierii Biosystemów UP w Poznaniu. Aktualnie trwają prace zmierzające do rozbudowy wytworzonego systemu o obsługę czujników do pomiaru innych parametrów niż temperatura. Ponadto opracowywany jest system informatyczny, który posłuży do automatycznej prezentacji na wykresach oraz zapisywania do bazy danych parametrów otrzymywanych na bieżąco z wytworzonego systemu pomiarowego. W odniesieniu do treści zaprezentowanych w niniejszej pracy można sformułować następujące wnioski:

1. Opracowany system do monitorowania temperatury materiału kompostowanego w komorach bioreaktora spełnia przyjęte założenia.
2. Platforma Arduino poprzez swoją elastyczność i względną łatwość wykorzystania doskonale nadaje się do budowy sprzętowo-

wo-programowych rozwiązań wspomagających realizację badań doświadczalnych, np. w zakresie monitorowania zmian temperatury.

6. Bibliografia

- [1] Czekala J., Dach J., Wolna-Maruwka A.: Wykorzystanie bioreaktora do badań modelowych kompostowania osadu ściekowego. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 2006, 2(18), 29-40.
- [2] Dach J.: Polish experience with ammonia emission abatement for straw-based manure. In: Emissions from European agriculture. Wageningen Academic Publishers, 2005, 295-303.
- [3] Dach J., Niżewski P., Czekala J., Zbytek Z.: Porównanie emisji amoniaku z kompostowanego obornika i kompostowanych osadów ściekowych. J. Res. Appl. Agric. Engng, 2008, 53(1), 58-64.
- [4] Dach J., Niżewski P., Jędrus A., Bonieski P.: Badania wpływu aeracji na dynamikę procesu kompostowania w adiabatycznym bioreaktorze. J. Res. Appl. Agric. Engng, 2007, 52(1), 68-71.
- [5] Margolis M.: Arduino Cookbook, 2011, O'Reilly Media, Inc.
- [6] <http://arduino.cc/en/Reference/LiquidCrystal> [dostęp: 01.10.2012 r.].
- [7] http://milesburton.com/Dallas_Temperature_Control_Library [dostęp: 01.10.2012 r.].
- [8] http://www.jirc.com/teensy/td_libs_OneWire.html [dostęp: 01.10.2012 r.].

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy N N313 273939.