

**Daniel Borowiak¹, Piotr Pietruszka¹, Michał Grzebyk²,
Magdalena Luboińska², Klaudia Marcinkowska²,
Przemysław Seruga¹, Monika Kucharczyk¹,
Małgorzata Krzywonos¹, Marta Wilk¹**

¹ Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

² AlgaeLabs Sp. z o.o.

e-mails: daniel.borowiak@ue.wroc.pl; piotr.pietruszka@o2.pl; m.grzebyk@algaelabs.pl;
m.luboińska@algaelabs.pl; k.marcinkowska@algaelabs.pl; przemyslaw.seruga@
ue.wroc.pl; monika.kucharczyk@ue.wroc.pl; malgorzata.krzywonos@ue.wroc.pl;
marta.wilk@ue.wroc.pl

KOMPUTEROWY SYSTEM STEROWANIA HODOWLĄ BIOMASY MIKROALG *HAEMATOCOCCUS PLUVIALIS* DO PRODUKCJI ASTAKSANTYNY*

THE COMPUTER CONTROL BIOMASS CULTIVATION SYSTEM OF MICROALGA *HAEMATOCOCCUS* *PLUVIALIS* FOR THE PRODUCTION OF ASTAXANTHIN

DOI: 10.15611/pn.2016.461.03

Streszczenie: Astaksantyna jest jednym z karotenoidów coraz chętniej wykorzystywanych w przemyśle farmaceutycznym, nutraceutycznym i spożywczym. Warunkiem uzyskania odpowiednio wysokiej wydajności hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis* jest zapewnienie wszystkim komórkom właściwej ilości pożywienia, dostępu światła, optymalnej temperatury i wartości pH podłoża hodowlanego. Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie komputerowego systemu kontrolowania warunków hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis*, działającego zdalnie, z wykorzystaniem sieci Internet i pozwalającego na sterowanie pracą wielu fotobioreaktorów, ulokowanych w różnych miejscach, za pomocą jednego komputera. Weryfikację poprawności działania zaproponowanego systemu pomiarowo-sterującego przeprowadzono, wykonując hodowle mikroalg *Haematococcus pluvialis*, w trakcie których osiągnięto wyniki porównywalne z danymi prezentowanymi przez innych autorów.

Słowa kluczowe: komputerowe sterowanie, *Haematococcus pluvialis*, zdalne sterowanie, sterowanie procesami, LabVIEW.

* Pracę zrealizowano w ramach projektu dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w III konkursie Programu Badań Stosowanych (umowa numer PBS3/B8/25/2015) pod tytułem: „Pozyskiwanie metabolitów wtórnych z mikroalg i cyjanobakterii w oparciu o zautomatyzowany system fotobioreaktorów”.

Summary: Astaxanthin is a carotenoid used in the pharmaceutical, nutraceutical, and food industry. In order to obtain a high biomass yield of the microalgae, it is necessary to provide the proper amount of feed, light source, the optimum temperature and pH of the medium. The aim of the work was to design and implement a computerized system to control remotely the culture of microalgae *Haematococcus pluvialis*. The system was based on the Internet and allowed to control multiple photobioreactors, at different locations, using a single computer. For the verification of the proposed system the cultures of *Haematococcus pluvialis* were carried out. Results obtained (biomass growth) were similar to the data presented by other authors.

Keywords: computer control, *Haematococcus pluvialis*, remote control, process control, LabVIEW.

1. Wstęp

Astaksantyna jest karotenoidem, który zyskał w ostatnich latach na popularności dzięki zastosowaniu w przemyśle farmaceutycznym, nutraceutycznym oraz spożywczym. W przemyśle farmaceutycznym astaksantyna jest stosowana ze względu na swoje właściwości antyoksydacyjne. Poprawia odporność immunologiczną oraz zmniejsza ryzyko powstawania komórek nowotworowych [Kaewpintong i in. 2007]. W przemyśle spożywczym, ze względu na atrakcyjny kolor, stosuje się ją jako barwnik. Jest wykorzystywana także jako suplement diety [Galvão i in. 2013]. Astaksantyna naturalna pozyskiwana jest głównie z mikroalg *Haematococcus pluvialis* ze względu na jej wysoką zawartość w suchej masie tych mikroorganizmów, która w zależności od szczepu wynosi od 2,7% do 3,8%. Dla porównania aerobowe, Gram-ujemne bakterie *Paracoccus carotinifaciens* zawierają 2,2% astaksantyny, a algi *Neochloris wimmeri* jedynie 0,6%. Astaksantyna pozyskiwana jest komercyjnie także z drożdży *Phaffia rhodozyma* (0,3%) [Stachowiak, Czarnecki 2006] oraz przez syntezę chemiczną. Można ją również znaleźć w łososiu, krylu, krewetkach, którym nadaje czerwonawą barwę, ale jej zawartość jest śladowa [Ambati i in. 2014]. Naturalna astaksantyna została zatwierdzona jako suplement diety do spożycia przez ludzi w USA, Japonii i kilku krajach europejskich. Amerykańska Agencja Żywności i Leków FDA (Food and Drug Administration) przyznała naturalnej astaksantynie z mikroalg *Haematococcus pluvialis* status GRAS (*Generally Recognized as Safe*), czyli substancji uznanej za bezpieczną do stosowania w żywności [Shah i in. 2016].

Produkcję astaksantyny naturalnej, o odpowiedniej jakości i czystości, przeznaczonej do wytwarzania nutraceutyków i suplementów diety, łatwiej jest prowadzić w zamkniętych zbiornikach (fotobioreaktorach). Pozwalają one na zapewnienie wyższego stopnia kontroli przebiegu procesu i oferują wyższą wydajność w porównaniu z systemami otwartymi, które wymagają większej powierzchni, następuje w nich odparowanie wody, dyfuzja CO₂ do atmosfery. Dodatkowo fotobioreaktory zmniejszają ryzyko zakażenia oraz pozwalają na zachowanie powtarzalności warunków procesowych [Griffiths i in. 2011]. Warunkiem uzyskania odpowiednio wysokiej

wydajności hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis* jest zapewnienie wszystkim komórkom wymaganej ilości pożywienia, dostępu światła, optymalnej temperatury i wartości pH środowiska [Panis i in. 2016]. Wysoki plon biomasy mikroalg ma decydujący wpływ na opłacalność przemysłowego procesu pozyskiwania astaksantyny z ich udziałem.

Optymalna temperatura dla rozwoju mikroalg *Haematococcus pluvialis* w hodowlach komercyjnych mieści się w przedziale 20-27°C [Klochkova i in. 2013] i ma decydujący wpływ na przebieg wszystkich reakcji enzymatycznych (zwłaszcza fotosyntezę) [Tamburic i in. 2014]. O ile komórki mikroalg łagodnie reagują na spadek temperatury nawet o 15°C poniżej przedziału optymalnego, o tyle przekroczenie temperatury optymalnej choćby o 2-4°C może być o wiele groźniejsze i spowodować całkowitą utratę hodowli [Moheimani, Borowitzka 2006].

Jednym z głównych czynników wpływających na wzrost alg jest światło. W zależności od długości fal, zasięgu i intensywności światła wzrost alg oraz ich skład biochemiczny są mocno zróżnicowane [Carvalho i in. 2011]. Najkorzystniejsze dla mikroalg długości fal światła (ze względu na proces fotosyntezy) mieszczą się w przedziale od 400-700 nm i zawierają światło pochłaniane przez karotenoidy i chlorofil. Zakres ten określany jest mianem promieniowania fotosyntetycznie czynnego PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) [Suh, Lee 2003]. Do oświetlenia fotobioreaktorów bardzo często stosuje się diody elektroluminescencyjne LED – ze względu na to, że emitują wąski zakres długości fal promieniowania. Na wzrost alg wpływa przede wszystkim światło czerwone, które sprzyja rozmnażaniu komórek i wzrostowi stężenia biomasy, oraz światło niebieskie, wpływające na rozrost komórek i stymulowanie akumulacji astaksantyny [Chen i in. 2009].

Dla prawidłowego rozwoju mikroalg istotny jest również przepływ powietrza przez fotobioreaktor, który powoduje mieszanie się biomasy i równomierny dostęp komórek do światła. Zapobiega również osiadaniu biomasy na dnie zbiornika i jej gniciu. Rozwój komórek mikroalg ulega spowolnieniu, gdy prędkość gazu w fotobioreaktorze przekracza 12 mm × s⁻¹. Przy wyższych prędkościach przepływu gazu komórki będą ulegały niszczeniu [Vega-Estrada i in. 2005].

Jednym z przewijających się pomysłów na przemysłową hodowlę mikroalg jest zamknięcie całego procesu w typowych kontenerach do transportu towarów [Algae. Tec 2016; AlgaeLabs 2016; Complete Container Technology 2016; Paul Scherrer Institut 2016]. Kontenerowe moduły przewidziane są do pracy w różnych lokalizacjach, często bardzo odległych od siebie, jako niezależne jednostki. Dlatego bardzo ważna jest możliwość zdalnego monitorowania i kontrolowania sposobu ich pracy.

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie komputerowego systemu kontrolowania warunków hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis*, działającego zdalnie, z wykorzystaniem sieci Internet i pozwalającego na sterowanie pracą wielu fotobioreaktorów, ulokowanych w różnych miejscach, za pomocą jednego komputera.

2. Materiały i metody

Mikroalgi i warunki hodowli

W trakcie eksperymentów stosowano szczep *Haematococcus pluvialis* G1002, zakupiony w CAUP (The culture collection of algae of Charles University in Prague, Czechy). W eksperymentach wykorzystano pożywkę Bold's Basal Medium (BBM) poddaną autoklawowaniu w temperaturze 121°C przez 15 minut. Eksperymenty przeprowadzono w prototypowym fotobioreaktorze szklanym typu *air-lift* o objętości 35 dm³ (AlgaeLabs). Fotobioreaktor sterylizowano z wykorzystaniem 4-procentowego roztworu perhydrolu, którym napełniano fotobioreaktor na dwie godziny. Po wypłukaniu fotobioreaktora wodą dejonizowaną napełniano go pożywką, inokulatem mikroalg (dziesięciodniowe inokulum kultury mikroalg o objętości 5 dm³, co stanowiło 14% objętości roboczej fotobioreaktora) i uzupełniano wodą dejonizowaną (dejonizator RL-300, z lampą UV 254 nm i końcowym filtrem 0,22 μm) do objętości 35 dm³. Eksperymenty prowadzono w temperaturze 23-25°C i przy pH utrzymywanym automatycznie na poziomie 7,0 z histerezą 0,2 za pomocą ditlenku węgla doprowadzanego do wnętrza fotobioreaktora.

Do oświetlenia fotobioreaktora wykorzystano diody elektroluminescencyjne LED koloru czerwonego, model 5050R120R-12-IP20 (Konnine Technology Co., Ltd, Chiny), zasilane napięciem 12 VDC, o mocy 28,8 W/metr taśmy LED i strumieniu świetlnym 2160 lm/metr taśmy LED. Diody zamocowano na czterech profilach aluminiowych o długości 1,8 m każdy, pod kątem prostym w stosunku do fotobioreaktora, w odległości 90 mm [Glemser i in. 2016].

System pomiarowo-sterujący

Do monitorowania temperatury w fotobioreaktorze wykorzystano czujnik termorezystancyjny STPt-100 (Hydromet), który współpracował z przetwornikiem temperatury MAS PT100 0...100°C (Weidmüller), działającym w zakresie 0-100°C i przetwarzającym temperaturę na standardowy sygnał napięciowy 0-10 V.

Monitorowanie wartości pH zrealizowano, opierając się na przetworniku pH PPS 2000 (TEL-EKO PROJEKT), współpracującym z czujnikiem pH ERH-13X2 (Hydromet). Zmierzona wartość pH była zamieniana na standardowy sygnał prądowy 4-20 mA.

Do pomiarów temperatury i realizacji algorytmu regulacji dwustawnej pH wykorzystano moduł Mini Modbus MOD-1AI (SFAR), komunikujący się urządzeniami komputerowymi za pomocą interfejsu RS485 i protokołu Modbus RTU lub ASCII. Urządzenie to ma jedno wejście napięciowe i jedno wejście prądowe, pozwalające na dokonywanie pomiarów temperatury i pH w fotobioreaktorze. Dodatkowo moduł ten ma wyjście cyfrowe, pozwalające na sterowanie pracą jednego urządzenia elektrycznego. Moduł skonfigurowano tak, aby załączanie wyjścia cyfrowego na-

stępowało automatycznie, po przekroczeniu wartości zadanej przez sygnał z wejścia prądowego (pomiar pH). Do wyjścia cyfrowego podłączono przekaźnik elektromagnetyczny, sterujący pracą dwóch zaworów elektromagnetycznych, odpowiedzialnych za dozowanie powietrza (zawór typu NO – *Normally Open*) i ditlenku węgla (zawór typu NC – *Normally Closed*). W momencie osiągnięcia wartości zadanej pH, zgodnie z algorytmem regulacji dwustawnej z histerezą, moduł MOD-1AI powodował zamknięcie dopływu powietrza i otwarcie przepływu ditlenku węgla. Skutkowało to obniżeniem wartości pH w fotobioreaktorze, po czym oba zawory elektromagnetyczne wracały do stanu początkowego.

Sterowanie natężeniem oświetlenia zrealizowano z wykorzystaniem sterownika diod i pasków LED RGB SPL-3CM (DAGON), mającego 3 kanały wyjściowe o obciążalności 4 A każdy i umożliwiającego sterowanie natężeniem oświetlenia z rozdzielczością 8 bitów (256 poziomów jasności) za pomocą interfejsu RS-485 i protokołu komunikacyjnego MODBUS RTU.

Rolę urządzenia nadrzędnego w systemie sterowania hodowlą mikroalg *Haematococcus pluvialis* odgrywał moduł ethernetowy MOD-ETH (SFAR), który jest urządzeniem konwertującym dane przesyłane według protokołu komunikacyjnego Modbus TCP/IP do protokołu Modbus RTU/ASCII. Moduł ten pełnił funkcję bramy (*gateway*) pomiędzy komunikacją z wykorzystaniem sieci Ethernet i urządzeniami podłączonymi przez interfejs szeregowy RS-485.

Aplikację przeznaczoną do sterowania pracą komputerowego systemu wspomagającego prowadzenie eksperymentów przygotowano w graficznym środowisku programistycznym LabVIEW 2013 (National Instruments).

Metody analityczne

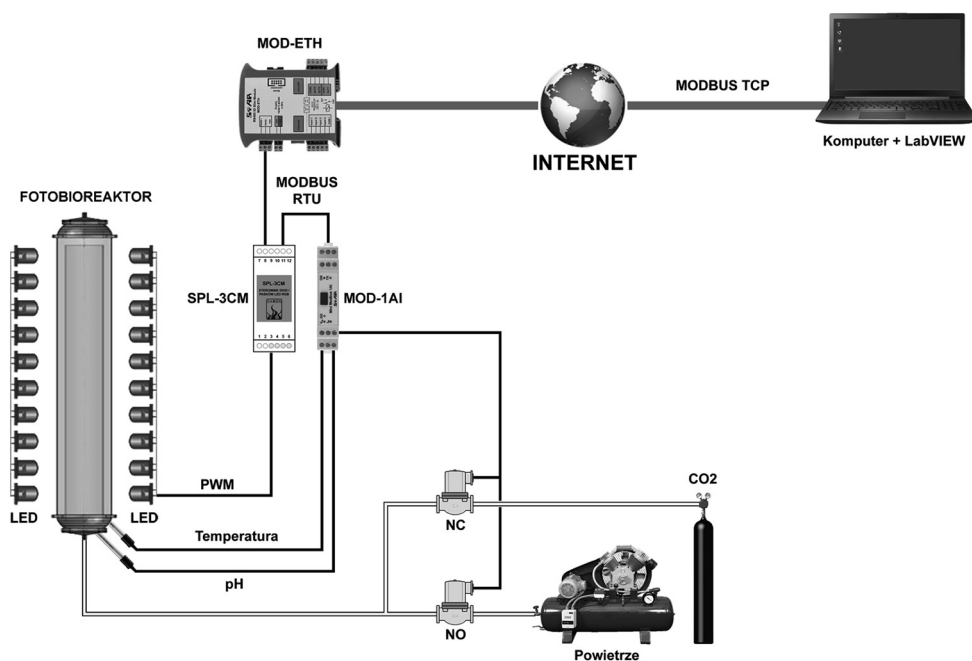
Przyrost biomasy mikroalg *Haematococcus pluvialis* w trakcie eksperymentów (wyrażony jako przyrost suchej masy) oznaczano spektrofotometrycznie, przy długości fali $\lambda = 620$ nm, względem wody destylowanej, z użyciem spektrofotometru DR5000 (Hach). Pobraną próbę wirowano przez 10 minut (13 131 g) i rozcieńczano wodą destylowaną. Krzywą standardową przygotowano z wykorzystaniem wagosuszarki OHAUS MB25 i jest ona opisana równaniem: $C_b = 0,1204 \times OD_{620} - 0,0404$, przedstawiającym zależność pomiędzy absorbancją (OD_{620}) a zawartością suchej masy mikroalg (C_b [$g \times dm^{-3}$]), ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,9923$. Do oznaczeń spektrofotometrycznych pobierano próbę o objętości 5 cm^3 , którą wirowano przez 10 minut (9000 g) i rozcieńczano w 2 cm^3 wody destylowanej.

3. Wyniki i dyskusja

W zaproponowanym rozwiązaniu komputer sterujący (ze specjalnie przygotowanym programem) komunikuje się z dowolnego miejsca przez sieć Internet z modułem MOD-ETH, opierając się na protokole Modbus TCP (rys. 1) [Salonen i in. 2007].

W trakcie konfiguracji modułu MOD-ETH wprowadzono odpowiednie ustawienia związane z komunikacją ethernetową (adres IP, *mask*, *gateway*, *modbus port*, HTTP *port*, *connection timeout*) ze stanowiskiem z fotobioreaktorem.

Z drugiej strony do modułu MOD-ETH, za pomocą interfejsu RS-485, podłączono urządzenia przeznaczone do realizacji pomiarów i sterowania, czyli moduł MOD-1AI oraz sterownik diod i pasków LED RGB SPL-3CM. Urządzenia te komunikują się, opierając się na protokole Modbus RTU, który jest chętnie stosowany w przemyśle i rozwiązaniach laboratoryjnych [Skjånes i in. 2016]. W module MOD-ETH skonfigurowano parametry komunikacji szeregowej (*baudrate*, *parity*, *bits*, *stop bits*, *modbus configuration*, *device address*, RS485 *timeout*) oraz listę współpracujących urządzeń (*devices*).



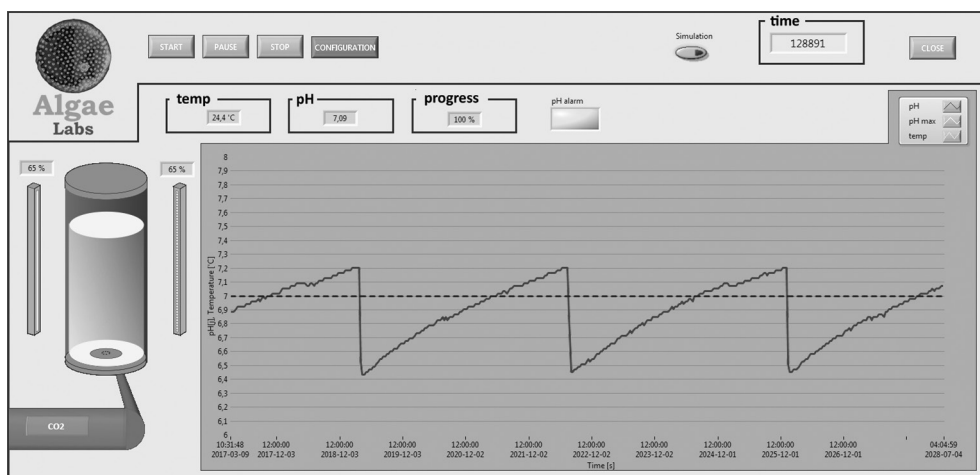
Rys. 1. Schemat komputerowego systemu sterowania warunkami hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis*

Źródło: opracowanie własne.

W module MOD-ETH wybrano tryb pracy *device table*, który pozwala na zdefiniowanie własnych zapytań w standardzie Modbus RTU [SFAR 2016]. Dzięki temu w zadanych odstępach czasu (*device table refresh normal* = 2000 ms) następowało automatyczne odpytywanie urządzeń współpracujących i zapisywanie wyników w specjalnej tabeli rejestrów modułu MOD-ETH. Do realizacji wszystkich zadań związanych z pomiarami i sterowaniem wykorzystano 6 rejestrów modułu

MOD-ETH, w których zapisywane były wartości pochodzące lub przeznaczone dla modułu MOD-1 AI: rejestr 1000 – wynik pomiaru temperatury, rejestr 1001 – wynik pomiaru pH, rejestr 1020 – wartość zadana pH, rejestr 1030 – wartość zadana histerezy regulacji pH) oraz sterownika diod LED SPL-3CM (rejestr 1010 i 1011 – wartość natężenia oświetlenia LED dla dwóch kanałów sterownika).

Odczytanie i zmiana wartości rejestrów modułu MOD-ETH są możliwe za pomocą strony internetowej, gdyż moduł ten odgrywa rolę serwera stron internetowych [SFAR 2016]. Jednakże w ramach tej pracy przygotowano specjalną aplikację w LabVIEW do zdalnego monitorowania wszystkich parametrów procesu hodowli mikroalg i sterowania nimi (rys. 2). Środowisko programistyczne LabVIEW jest bardzo często stosowane do tworzenia aplikacji do prowadzenia eksperymentów i ma bibliotekę funkcji obsługujących protokół komunikacyjny Modbus TCP [Rao 2014].



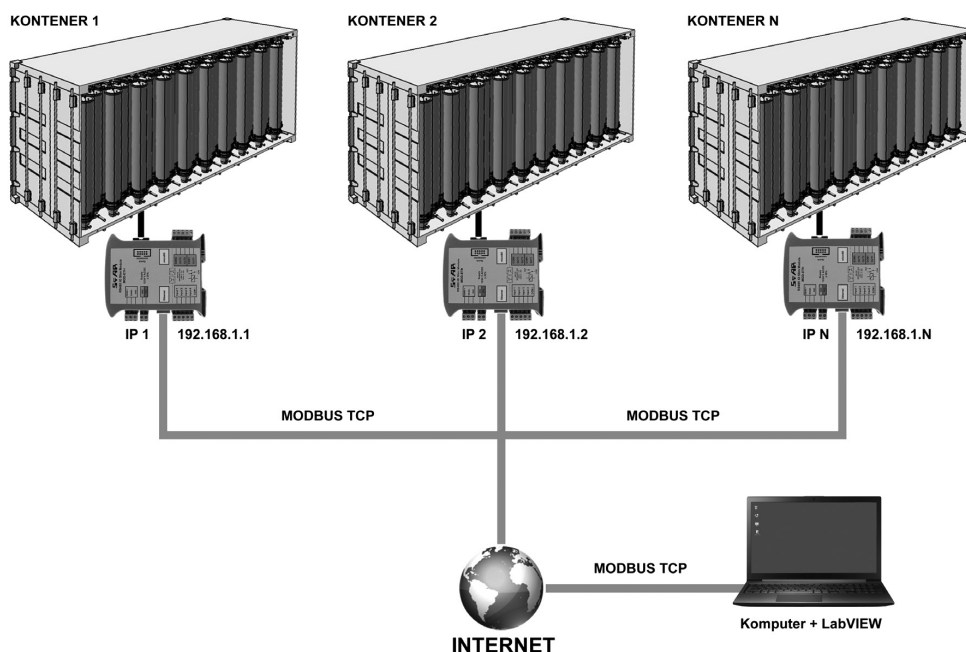
Rys. 2. Interfejs użytkownika aplikacji sterującej

Źródło: opracowanie własne.

Aplikacja sterująca komunikowała się, opierając się na protokole Modbus TCP z modułem ethernetowym MOD-ETH i odczytywała z odpowiednich komórek tabeli rejestrów wyniki pomiarów temperatury i pH oraz modyfikowała wartości parametrów sterujących (wartość zadana pH, histereza pH, natężenie świecenia diod LED dla poszczególnych kanałów). Po nawiązaniu połączenia program wyświetla dane na ekranie w postaci numerycznej oraz prezentuje ich zmianę na wykresie. Wszystkie dane mogą być również zapisywane do pliku na dysku komputera w celu późniejszej analizy.

Zaproponowane rozwiązanie pozwala użytkownikowi systemu podłączyć się z poziomu komputera sterującego, w dowolnym momencie i z dowolnej lokalizacji, do modułu MOD-ETH o konkretnym adresie IP i prowadzić zdalny monitoring para-

metrów procesu bądź wprowadzać zmiany parametrów sterujących (rys. 3). Z kolei do rozszerzenia systemu o kolejne stanowiska z fotobioreaktorami (np. kontenery) potrzebny jest jedynie dostęp do Internetu wraz z adresem IP, czyli kontenery mogą pracować w dowolnej lokalizacji. Pozwala to na zbudowanie rozproszonego systemu produkcji z możliwością kontroli całości za pomocą jednego stanowiska nadrzędnego [Yang i in. 2004].



Rys. 3. Schemat komputerowego systemu zdalnego sterowania wieloma stanowiskami do produkcji astaksantyny

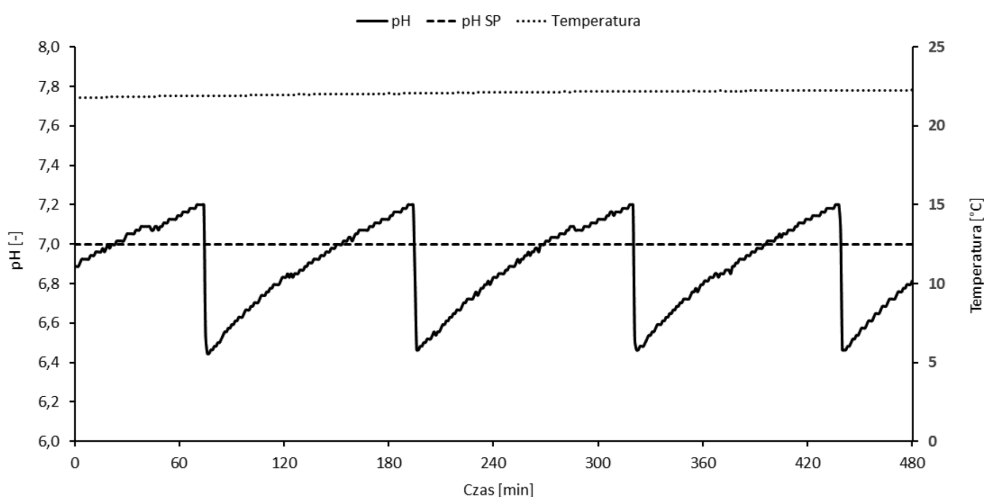
Źródło: opracowanie własne.

Zaletą systemu jest również to, że wszystkie stanowiska z fotobioreaktorami będą działały w sposób autonomiczny. Nawet jeśli wystąpią utrudnienia w komunikacji internetowej, to zadania wymagające determinizmu czasowego (regulacja pH) zostaną zrealizowane prawidłowo [Yang, Yang 2007].

W przedstawionym systemie do sterowania pracą pojedynczego fotobioreaktora wykorzystano jedynie dwa urządzenia komunikujące się za pomocą protokołu Modbus RTU i sześć rejestrów modułu MOD-ETH (ze stu dostępnych rejestrów). Protokół Modbus RTU umożliwia współpracę jednego urządzenia nadrzędnego (*master*) z trzydziestoma dwoma urządzeniami podrzędnymi (*slave*) [Suresh 2014]. Oznacza to, że do jednej bramy ethernetowej MOD-ETH można podłączyć równocześnie szesnaście fotobioreaktorów z systemem pomiaru temperatury i pH oraz sterowania

dozowaniem ditlenku węgla i natężeniem oświetlenia LED (16 stanowisk \times 2 adresy Modbus = 32 adresy Modbus, 16 stanowisk \times 6 rejestrów = 96 rejestrów). Można także rozbudować zaprojektowany system pomiarowo-sterujący o kolejne urządzenia współpracujące, np. moduły pomiarowe innych wielkości fizykochemicznych bądź dodatkowe układy sterujące (do 32 urządzeń i do 100 parametrów na jeden moduł MOD-ETH). Należy jedynie pamiętać o odpowiednim dobraniu częstotliwości odpytywania poszczególnych urządzeń z interfejsem RS-485 przez moduł MOD-ETH.

Zaproponowany komputerowy system wspomagający zdalne sterowanie warunkami hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis* przetestowano w trakcie trzech hodowli typu batch trwających 16 dni. W trakcie eksperymentów nawiązywano wielokrotnie zdalne połączenie z modułem MOD-ETH stanowiska z fotobioreaktorem w celu monitorowania przebiegu parametrów procesu. Na rysunku 4 przedstawiono wykres obrazujący zmiany temperatury, pH i wartości zadanej pH w ciągu 8 godzin w dziewiątym dniu procesu.

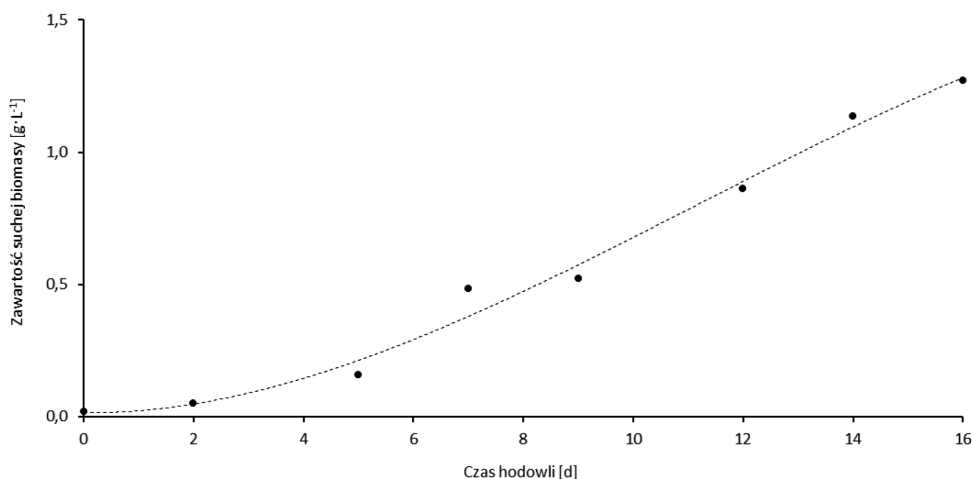


Rys. 4. Przebieg temperatury, pH i wartości zadanej pH w trakcie hodowli

Źródło: opracowanie własne.

Parametry te zostały zapisane przez program komputerowy w pliku archiwizacyjnym. Na wykresie oprócz ustabilizowanego przebiegu temperatury na poziomie 22-23°C, optymalnego dla rozwoju mikroalg *Haematococcus pluvialis* [Dos Santos Lombardi 2017], widać oscylacje pH wokół wartości zadanej pH, ustawionej w eksperymencie na poziomie 7,0 z histerezą 0,2 [Infant Santhose i in. 2014]. Oscylacje te mieszczą się w zakresie korzystnym z punktu widzenia fizjologii szczepu *Haematococcus pluvialis* [Sipaúba-Tavares i in. 2013] i świadczą o wykorzystywa-

niu przez mikroalgi źródła węgla wprowadzanego do fotobioreaktora w postaci dwutlenku węgla w trakcie realizacji algorytmu regulacji dwustawnej pH.



Rys. 5. Zmiana zawartości suchej masy mikroalg *Haematococcus pluvialis* w trakcie eksperymentu

Źródło: opracowanie własne.

Realizując eksperymenty, monitorowano przyrost biomasy mikroalg, która po 16 dniach hodowli kształtowała się na poziomie $1,27 \text{ g} \times \text{L}^{-1}$ (rys. 5) i była porównywalna z rezultatami osiągniętymi przez innych autorów w hodowlach prowadzonych w układach zamkniętych [Göksan i in. 2011; Sarada i in. 2012].

4. Podsumowanie

Zaproponowany w pracy system zdalnego sterowania warunkami hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis*, działający z wykorzystaniem sieci Internet i protokołu Modbus TCP, pozwala na zbudowanie rozproszonego, modułowego systemu do produkcji astaksantyny. System zapewnia autonomiczną pracę każdego z modułów (np. kontenerów) i centralne sterowanie i kontrolę pracy całego systemu z poziomu jednego komputera nadrzędnego, mającego zdalny dostęp do poszczególnych układów pomiarowo-sterujących za pośrednictwem Internetu. Działanie pojedynczego modułu pomiarowo-sterującego i systemu zdalnego dostępu pozytywnie zweryfikowano w hodowlach przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych.

Literatura

- AlgaeLabs, 2016, http://www.newconnect.pl/index.php?page=get_ebi_file&id=70856 (31.10.2016 r.).
- AlgaeTec, 2016, <http://algaetec.com.au/index.php/technology/the-algae-tec-technology> (31.10.2016 r.).
- Ambati R.R., Phang S.M., Ravi S., Aswathanarayana R.G., 2014, *Astaxanthin: sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications-a review*, Marine Drugs, vol. 12, s. 128-152.
- Carvalho A.P., Silva S.O., Baptista J.M., Malcata F.X., 2011, *Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects*, Applied Microbiology and Biotechnology, vol. 89(5), s. 1275-1288.
- Chen P., Min M., Chen Y., Wang L., Li Y., Chen Q. i in., 2009, *Review of the biological and engineering aspects of algae to fuels approach*, International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 2(4), s. 1-30.
- Complete Container Technology, 2016, <http://container-tech.com/algae-farming.html> (31.10.2016 r.).
- Dos Santos A.C., Lombardi A.T., 2017, *Growth, photosynthesis and biochemical composition of Haematococcus pluvialis at various pH*, Journal of Algal Biomass Utilization, vol. 8(1), s. 1-15.
- Galvão R., Santana T., Fontes C., Sales E., 2013, *Modeling of biomass production of Haematococcus pluvialis*, Applied Mathematics, vol. 4, no. 8A, s. 50-56.
- Glemser M., Heining M., Schmidt J., Becker A., Garbe D., Buchholz R., Brück T., 2016, *Application of light-emitting diodes (LEDs) in cultivation of phototrophic microalgae: current state and perspectives*, Applied Microbiology & Biotechnology, vol. 100(3), s. 1077-1088.
- Griffiths M.J., Dicks R.G., Richardson Ch., Harrison S.T.L., 2011, *Advantages and Challenges of Microalgae as a Source of Oil for Biodiesel*, [w:] *Biodiesel – Feedstocks and Processing Technologies*, M. Stoytcheva (ed.), InTech.
- Göksan T., Ak I İ., Kılıç C., 2011, *Growth characteristics of the alga Haematococcus pluvialis flotox affected by nitrogen source, vitamin, light and aeration*, Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol. 11, s. 377-383.
- Infant Santhosh B., Elumalai S., Rajesh Kanna G., 2014, *Airlift photobioreactor cultivation of a new strain of haematococcus pluvialis collected from high altitude regions of Himalayas*, International Journal of Science and Research, vol. 3(10), s. 2289-2292.
- Kaewpintong K., Shotipruk A., Powtongsook S., Pavasant P., 2007, *Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of Haematococcus pluvialis in airlift bioreactor*, Bioresource Technology, 98, s. 288-295.
- Klochkova T.A., Kwak M.S., Han J.W., Motomura T., Nagasato C., Kim G.H., 2013, *Cold-tolerant strain of Haematococcus pluvialis (Haematococcaceae, Chlorophyta) from Blomstrandhalvøya (Svalbard)*, Algae, vol. 28(2), s. 185-192.
- Moheimani N.R., Borowitzka M.A., 2006, *The long-term culture of the coccolithophore Pleurochrysis carterae (Haptophyta) in outdoor raceway ponds*, Journal of Applied Phycology, vol. 18, s. 703-712.
- Panis G., Carreon J.R., 2016, *Commercial astaxanthin production derived by green alga Haematococcus pluvialis: A microalgae process model and a techno-economic assessment all through production line*, Algal Research vol. 18, s. 175-190.
- Paul Scherrer Institut, 2016, <https://www.psi.ch/cpe/konti-c> (31.10.2016 r.).
- Rao H., 2014, *Statistical review and control system design for photo bioreactor based production of algae biofuels in India*, International Scientific Journal on Science Engineering & Technology, vol. 17, no. 5, s. 431-437.
- Salonen K., Kiviharju K., Eerikäinen T., 2007, *Bioreactor Measurement and Simulation Environment*, 10th International IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology, Cancun, Mexico, June 4-6, s. 279-284.

- Sarada R., Ranga Rao A., Sandesh B.K., Dayananda C., Anila N., Chauhan V.S., Ravishankar G.A., 2012, *Influence of different culture conditions on yield of biomass and value added products in microalgae*, Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology, vol. 6(2), s. 77-85.
- SFAR, 2016, *Instrukcja użytkownika MOD-ETH Moduł rozszerzający – brama Modbus TCP*, Wersja 1.0, <http://modbus.sfar.pl/modeth.php> (31.10.2016 r.).
- Shah M.M.R., Liang Y., Cheng J.J., Daroch M., 2016, *Astaxanthin-producing green microalga Haematococcus pluvialis: from single cell to high value commercial products*, Front. Plant Sci. 7:531.
- Skjånes K., Andersen U., Heidorn T., Borgvang S.A., 2016, *Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field*, Journal of Applied Phycology, vol. 28, s. 2205-2223.
- Sipaúba-Tavares L.H., Millan R.N., Berchielli-Morais F.A., 2013, *Effects of some parameters in up-scale culture of Haematococcus pluvialis flotox*, Brazilian Journal of Biology, vol. 73(3), s. 585-591.
- Stachowiak B., Czarnecki Z., 2006, *Drożdże Phaffia rhodozyma jako potencjalne źródło naturalnej astaksantyny*, Żywność. Nauka. Technologia. Jakość, 2(47), s. 17-28.
- Suh I.S., Lee S.B., 2003, *A light distribution model for an internally radiating photobioreactor*, Biotechnology and Bioengineering, vol. 82(2), s. 180-189.
- Suresh N., 2014, *Implementation of wireless data logger to monitor energy in industries*, International Journal of Applied Engineering Research, vol. 9(24), s. 30187-30197.
- Tamburic B., Guruprasad S., Radford D. T., Szabó M., Lilley R. M., Larkum A.W.D., Franklin J.B., Kramer D.M., Blackburn S.I., Raven J.A., Schliep M., Ralph P.J., 2014, *The effect of diel temperature and light cycles on the growth of nannochloropsis oculata in a photobioreactor matrix*, PloS One 9(1).
- Vega-Estrada J., Montes-Horcasitas M.C., Domínguez-Bocanegra A.R., Cañizares-Villanueva R.O., 2005, *Haematococcus pluvialis cultivation in split-cylinder internal-loop airlift photobioreactor under aeration conditions avoiding cell damage*, Applied Microbiology and Biotechnology, vol. 68, s. 31-35.
- Yang L., Yang S.H., 2007, *Multirate control in internet-based control systems*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part C, Applications and Reviews, 37(2), s. 185-192.
- Yang S., Tan L., Liu G., 2004, *Architecture design for internet-based control systems*, International Journal of Automation and Computing, vol. 1, s. 1-9.