

Research system for modeling biotechnological methods for removing biogenic components from industrial post-use liquids

System badawczy do modelowania biotechnologicznych metod usuwania składników biogenych z przemysłowych cieczy użytkowych

DOI: 10.15199/62.2024.4.6

A four-section tubular photobioreactor for the removal of biogenic compds. from dairy industry wastewater using *Chlorella sp.* algae culture was developed and constructed. The efficiency of algae multiplication was monitored based on the content of biogenic elements (N and P) and optical d. measurements. During the experiment, the algae absorbed 36.6% of total N and 98% of total P from dairy wastewater. The proposed soln. allowed to increase the scale of algae biomass prodn. and managing a larger amt. of dairy wastewater.

Keywords: algae, bioreactor, dairy wastewater, treatment

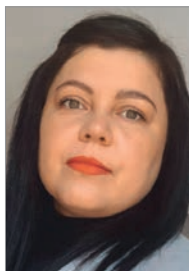
Prezentowano koncepcję oraz budowę fotobioreaktora rurowego do hodowli glonów. Zbudowany system składa się z czterech reaktorów rurowych, układu mieszania barbotażowego, modułu doświetlającego oraz modułu pomiarowo-sterującego. W ramach przeprowadzonych prac przygotowano testową hodowlę glonów *Chlorella sp.* w zbudowanym reaktorze. W czasie trwania eksperymentu z produkcyjnych ścieków mleczarskich, które stanowiły podłoże hodowlane, glony przyswoiły 36,6% N ogólnego oraz 98% P ogólnego. Przyrost komórek glonów monitorowany na podstawie pomiarów gęstości optycznej na koniec hodowli wynosił 1,046. Zaproponowane rozwiązanie pozwoli na zwiększenie skali produkcji biomasy glonów oraz zagospodarowanie większej ilości ścieków mleczarskich.

Słowa kluczowe: glony, bioreaktor, ścieki mleczarskie, oczyszczanie

Problem postępującej degradacji środowiska naturalnego spowodowany dużymi ilościami odpadów komunalnych i przemysłowych stał się obecnie jednym z głównych priorytetów polityki europejskiej. Odpady przemysłowe są bardzo trudne do utylizacji lub zagospodarowania, nie wspominając o możliwości ekonomicznego ich wykorzystania. Odprowadzanie ścieków do kanalizacji pociąga za sobą ryzyko nałożenia na zakład przemysłowy wysokich kar pieniężnych, a większość sposobów ich utylizacji i składowania jest kosztowna i nieoptymalna¹⁾. Problemy ochrony środowiska w przedsiębiorstwach związane są głównie z gospodarką wodno-ściekową. Aby im sprostać, Unia Europejska opracowała plan działania pod hasłem Europejski Zielony Ład (*European Green Deal*), którego

zadaniem jest stworzenie nowoczesnej, oszczędnej gospodarki umożliwiającej przeciwdziałanie utracie różnorodności biologicznej i zmniejszenie poziomu zanieczyszczeń oraz bardziej efektywne wykorzystanie zasobów dzięki przejściu na czystą gospodarkę o obiegu zamkniętym (GOZ)^{1, 2)}. Model GOZ stawia za cel zminimalizowanie zużycia wody, nowych surowców oraz jak największe zmniejszenie ilości wytwarzanych odpadów poprzez ich powtórne użycie. Wielokrotne wykorzystanie wody w zamkniętym obiegu technologicznym staje się ważne nie tylko ze względu na unormowania prawne, korzyści ekonomiczne, ale także wpływa na konkurencyjność przedsiębiorstwa na rynkach krajowych oraz międzynarodowych.

Jedną z branż przemysłu w Polsce i Europie, która wytwarza duże ilości odpadów i zużywa duże ilości wody jest przemysł mleczarski. Ze względu na unormowania prawne narzucone przedsiębiorcom przez Unię Europejską w ostatnich latach działania tego sektora są ukierunkowane na ponowne wykorzystywanie zasobów na wszystkich etapach procesu produkcyjnego³⁾. W raporcie „Sektor mleczarski i Zielony Ład” opracowanym przez Europejskie Stowarzyszenie Przetwórców Mleka EDA (European Dairy Association) przedstawiono, że przedsiębiorstwa z tego sektora pracują nad rozwiązaniami mającymi na celu nawet kilkakrotne wykorzystanie większości materiałów i zasobów w cyklu produkcyjnym lub opracowanie sposobu ich



Dr inż. Karolina DZIOSA (ORCID: 0000-0002-9759-3193) ukończyła studia na kierunku technologia chemiczna na Politechnice Radomskiej (obecnie Uniwersytet Radomski). W 2023 r. uzyskała stopień doktora w dziedzinie inżynieria materiałowa na Wydziale Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Od ponad 14 lat jest związana z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Instytutem Technologii Eksploatacji w Radomiu, gdzie obecnie pracuje na stanowisku starszej specjalistki w Centrum Biogospodarki i Ekoinnowacji. Specjalność – wytwarzanie biomasy różnych szczepów mikroglonów oraz jej zrównoważone zagospodarowanie.

* Adres do korespondencji:

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, ul. Putaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel.: (48) 364-93-71, e-mail: karolina.dziosa@itee.lukasiewicz.gov.pl

recyklingu, aby mogły być wykorzystane do innych celów³⁾. Do metod oczyszczania ścieków mleczarskich należą technologie membranowe, oczyszczanie biologiczne oraz metoda osadu czynnego. Poszukuje się coraz nowszych i bardziej skutecznych metod oczyszczania i zagospodarowania powstających ścieków w przemyśle mleczarskim, które jednocześnie wpisują się w koncepcję GOZ²⁻⁵⁾.

Jedną z nowatorskich metod oczyszczania ścieków mleczarskich jest zastosowanie hodowli glonów. Ścieki produkcyjne powstające w zakładach mleczarskich charakteryzują się dużą zawartością biogenów (azotu i fosforu), które są niezbędne do życia dla tych mikroorganizmów, a są trudne do usunięcia ze ścieków przy zastosowaniu metod tradycyjnych⁴⁻⁶⁾. Glony tak samo jak rośliny wytwarzają identyczne substancje zapasowe i korzystają ze zbliżonych metod ochronnych. Jednak w odróżnieniu od roślin glony nie wykształciły tkanek, nie mają kwiatów, korzeni, łodyg, liści ani nasion. W komórkach glonów znajdują się barwniki pochłaniające światło na użytek procesu fotosyntezy⁶⁻⁹⁾. Ilość światła, które otrzymują przesądza o ich charakterystycznym zabarwieniu. Jednym z gatunków glonów, które charakteryzują się szybkim tempem przyrostu biomasy i gromadzeniem w swoich komórkach dużej ilości metabolitów są mikroglony z gromady zielenic *Chlorella* sp.

Fotobioreaktory do hodowli glonów

Na skalę przemysłową hodowlę glonów przeprowadza się w systemach otwartych (stawy hodowlane) oraz zamkniętych (fotobioreaktory)^{10,11)}. Oba systemy różnią się od siebie pod względem wydajności produkcji i kosztami budowy. Wybierając system hodowli, należy uwzględnić czynniki (zewnątrzne, wewnętrzne i procesowe) limitujące ich wzrost. Wśród czynników zewnętrznych wyróżniane są światło, pH, temperatura, dostęp do składników pokarmowych i wymiana gazów. Czynniki wewnętrzne to zawartość barwników asymilacyjnych i budowa chloroplastów. Do czynników procesowych należy zaliczyć mieszanie, stężenie biomasy, głębokość oraz częstość odbierania biomasy^{11, 12)}.

Stawy hodowlane otwarte można podzielić na naturalne zbiorniki wodne (jeziora, laguny) oraz sztuczne. Najczęściej do tego typu hodowli wykorzystuje się płytkie, sztuczne zbiorniki lub stawy w kształcie pętli recykulacyjnej. Hodowla w tego typu zbiornikach zwykle wymaga mieszania za pomocą pompy turbinowej, w celu ograniczenia procesu sedymentacji. Biomasa glonów jest odprowadzana za turbiną na końcu pętli recykulacyjnej. Zaletą prowadzenia hodowli w zbiornikach otwartych jest ich nieskomplikowana konstrukcja, łatwość oczyszczenia oraz względy ekonomiczne. Jednak przy prowadzeniu tego typu hodowli należy się liczyć z zagrożeniem ich zakażenia, trudnościami z ich długoterminowym utrzymaniem oraz niewystarczającą wydajnością produkcji biomasy¹³⁻¹⁵⁾.

W warunkach klimatycznych charakterystycznych dla Polski do hodowli glonów stosowane są głównie fotobioreaktory zamknięte. Umożliwiają one prowadzenie hodowli



Fig. 1. Microscopic image of the *Chlorella* sp. inoculum (40× magnification)

Rys. 1. Obraz mikroskopowy inokulumu *Chlorella* sp. (powiększenie 40×)

o wysokiej produktywności biomasy oraz dają możliwość kontrolowania i sterowania parametrami hodowli. Możliwy jest również odpowiedni dobór stężenia gazów O_2 i CO_2 . Jest to istotne, gdyż przy zbyt dużym stężeniu O_2 może dojść do zahamowania procesu fotosyntezy, natomiast nadmierne zużywanie CO_2 przez glony może doprowadzić do zmian pH, a tym samym do zahamowania wzrostu biomasy. W zależności od konstrukcji fotobioreaktory zamknięte do hodowli glonów dzieli się na kolumnowe, panelowe i spiralne¹⁶⁾.

Bioreaktory kolumnowe to jedne z pierwszych typów bioreaktorów do hodowli glonów. Zbudowane są z pionowych lub poziomych rur ze szkła lub tworzywa sztucznego. W czasie hodowli cyrkulacja odbywa się za pomocą pomp powietrznych lub systemu napowietrzania. Ze względu na swój kształt bioreaktory tego typu są łatwe w czyszczeniu, zachowują sterylność, zmniejszone jest zjawisko fotoinhibicji i fotoutleniania oraz mają dużą powierzchnię naświetlania. Ograniczeniem, które wynika z prowadzenia hodowli jest utrudniona kontrola temperatury procesu¹⁷⁾.

Bioreaktory panelowe wykonane są z przezroczystych tworzyw PCV lub szkła dającego możliwość maksymalnego wykorzystania energii słonecznej, która umożliwia osiągnięcie wysokowydajnej fotosyntezy. Charakteryzują się dużym stosunkiem powierzchni do objętości. W tego typu systemach mieszanie może odbywać się poprzez przepływające powietrze lub mechaniczny obrót modułu. Wadą tego typu zbiorników jest występowanie w czasie hodowli stresu hydrodynamicznego oraz trudna kontrola temperatury. Produkcja na dużą skalę wymaga wielu modułów panelowych oraz konstrukcji podtrzymujących^{18, 19)}.

Głównymi elementami bioreaktorów spiralnych są zwinione giętkie rurki o małej średnicy, elementy odgazowujące oraz pompa odśrodkowa. Zaletą tego typu rozwiązania jest utrzymanie równowagi pomiędzy energią zużytą a wydajnością fotosyntezy, mniejsze wymagania energetyczne oraz mniejszy stopień narażenia hodowanych mikroorganizmów na stres mechaniczny^{20, 21)}.

Prowadzenie hodowli glonów w bioreaktorach zamkniętych cechuje znacznie wyższa wydajność niż w systemach otwartych. Szacuje się, że produkcja biomasy jest prawie

40 razy większa w bioreaktorach niż stawach hodowlanych. Ponadto w systemach zamkniętych hodowla jest prowadzona w kontrolowanych warunkach, dzięki czemu można łatwiej rozwiązać problemy zmian wartości pH oraz temperatury^{21, 22}).

Hodowle glonów w reaktorach prowadzi się w sposób okresowy, ciągły lub półciągły. Hodowle okresowe polegają na tym, że podczas wzrostu glonów nie doprowadza się świeżej porcji pożywki ani nie odprowadza się biomasy aż do zakończenia procesu. Utrzymywane są tylko optymalne warunki wzrostu, takie jak temperatura, pH i natlenienie. Tego typu hodowla trwa do momentu wyczerpania składników odżywczych z podłoża lub zatrucia komórek toksycznymi produktami własnego metabolizmu. Hodowle ciągłe polegają na początkowym namnożeniu mikroorganizmów, a następnie odbieraniu w sposób ciągły biomasy do zewnętrznego zbiornika i dostarczaniu świeżej pożywki wraz z inokulum do zbiornika hodowlanego. W tego typu hodowlach ustalona jest równowaga pomiędzy ilością zużytych substancji odżywczych a nowo dostarczonych. W hodowli półciągłej po namnożeniu biomasy jej część zostaje odebrana, a do zbiornika hodowlanego dostarczana jest odpowiednia ilość pożywki, tak aby otrzymać początkowe stężenie substancji odżywczych oraz taką samą objętość hodowli^{21–23}).

Hodowle glonów prowadzone w fotobioreaktorach wymagają naświetlania sztucznego, z zachowaniem okresów światła i ciemności (tzw. fotoperiodu). W przypadku zbyt intensywnego oświetlenia może dojść do zjawiska fotoinhibicji, które doprowadza do zahamowania wzrostu komórek w hodowli, natomiast zbyt mała intensywność

światła powoduje spowolnienie ich wzrostu. Dla komórek glonów *Chlorella* sp. najbardziej korzystny fotoperiod wynosi 16 h światła na 8 h ciemności. Dla tego gatunku najkorzystniejsza temperatura hodowli mieści się w granicach 20–30°C. Innym czynnikiem warunkującym odpowiedni rozwój glonów jest pH, którego wartość powinna mieścić się w zakresie 7–9. Bardzo ważnym czynnikiem jest także mieszanie, zapobiegające sedymentacji i utrzymujące jednakowe warunki w całym zbiorniku hodowlanym. Mieszanie jest procesem zapewniającym wszystkim komórkom porównywalny dostęp do światła i pożywki w czasie prowadzenia hodowli oraz poprawę wymiany gazowej pomiędzy powietrzem a cieczą hodowlaną. Komórki glonów do wzrostu potrzebują składników mineralnych bogatych w pierwiastki biogenne, makro- i mikroelementy. Skład pożywki do hodowli glonów został opracowany przez Grobbelaara i można opisać go formułą cząsteczkową: $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}^{19, 24, 25}$.

Celem pracy było zaprojektowanie, wykonanie oraz przeprowadzenie testów weryfikacyjnych systemu badawczego do modelowania biotechnologicznych metod usuwania składników biogenych z przemysłowych cieczy pożytkowych.

Część doświadczalna

Materiały

Jako podłoże hodowlane zastosowano pochodzące z lokalnej mleczarni ścieki mleczarskie o odczynie zasadowym, charakteryzujące się dużą zawartością zawieszin oraz substancji organicznych. Obecność w ściekach azotu ogólnego pochodziła głównie z białek mleka lub związków jonowych, takich jak NH_4^+ , NO_2^- i NO_3^- . W tabeli 1 przedstawiono właściwości fizyczno-chemiczne zastosowanych ścieków mleczarskich. Hodowle były zaszczepiane przez glony *Chlorella* sp. Inokulum pochodziło z kolekcji własnej (rys. 1), przeszczepionej z macierzystej Kolekcji Kultur Glonów Bałtyckich (Instytut Oceanografii w Gdyni, Uniwersytet Gdański).

Metodyka badań

Aparatura

Na podstawie opracowanych założeń konstrukcyjnych w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu zaprojektowano (rys. 2) oraz zbudowano fotobioreaktor do hodowli glonów (rys. 3). Fotobioreaktor tworzyły cztery zbiorniki rurowe o orientacji pionowej wykonane z PVC-U. Każdy ze zbiorników mógł pracować oddzielnie. Wymiary każdego ze zbiorników to: średnica 160 mm, wysokość 1450 mm oraz objętość 24 L. Zbiorniki hodowlane zostały zakończone osłoną, w której znajdowały się zawory kulowe motylkowe, umożliwiające pobór próbek biomasy glonów do badań oraz opróżnianie zbiorników po zakończeniu procesu hodowlanego. W zbudowanym układzie zastosowano napowietrzającą

Table 1. Physicochemical properties of dairy wastewater

Tabela 1. Właściwości fizyczno-chemiczne ścieków mleczarskich

Parametr	Wartość
Zawartość tłuszczu, % mas.	0,07
Zawartość białka, % mas.	0,27
Zawartość laktozy, % mas.	0,40
Zawartość minerałów, % mas.	0,95
Azot ogólny, mg/L	121
Fosfor ogólny, mg/L	5,58
pH	7
Mętność, NTU	1800

Table 2. List of parameters determined using cuvette tests

Tabela 2. Wykaz parametrów oznaczanych za pomocą testów kuwetowych

Parametr	Zakres pomiarowy, mg/L	Test kuwetowy	Metoda/norma ^{26, 27}
Azot ogólny	20–100	LCK 338	PN-EN-ISO 11905-1
	1–16	LCK 138	
Fosfor ogólny	0,5–5,0	LCK 348	PN-EN ISO 6878-1
	0,05–1,5	LCK 349	
	2–20	LCK 350	

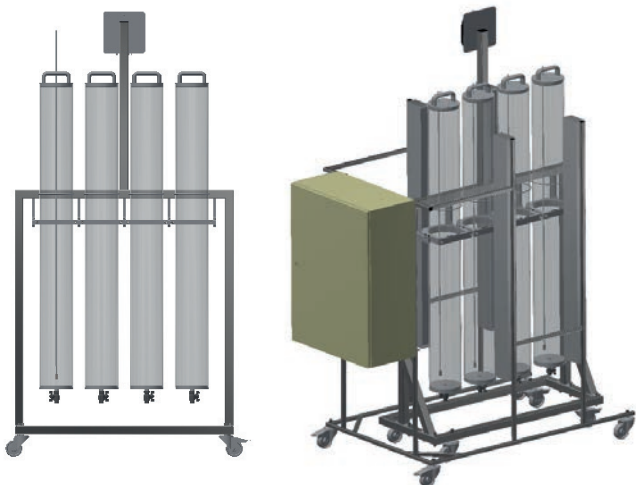


Fig. 2. Diagram of a bioreactor for algae growth

Rys. 2. Schemat bioreaktora do hodowli glonów

pompę membranową AIR 550 R Plus, zakończoną czterema zaworami umożliwiającymi wylot powietrza. Do każdego zaworu zamontowano wężyk silikonowy zakończony kamieniami napowietrzającymi zapewniającymi mieszanie oraz napowietrzanie wyhodowanej biomasy (metoda barbotażu). Nadmiar gazów z hodowli był usuwany za pomocą otworów odpowietrzających, które znajdowały się w pokrywie zbiorników. Moduł doświetlający tworzył zestaw czterech lamp firmy Neonica Growy Led Top Plus 240W, które są przeznaczone do uprawy roślin. Zaletą wytypowanych lamp jest wysoka energooszczędność (ok. 80%), specjalnie dobrana sekwencja LED: pasma 430–453 nm i 642–662 nm (dopasowanie do zapotrzebowania na chlorofil a i b) oraz brak emisji szkodliwego promieniowania ultrafioletowego. Reaktor był wyposażony w system pomiarowo-sterujący. Elementami, które podlegały sterowaniu były układ mieszania barbotażowego oraz oświetlenie fotobioreaktora. Zbudowany system pozwalał na sterowanie oświetleniem poprzez zmiany konfiguracji okresów światła i ciemności skokową regulacją

natężenia oświetlenia oraz załączaniem i wyłączaniem pompy membranowej. Wszystkie mechaniczne elementy bioreaktora zostały umieszczone na mobilnej ramie wykonanej z profili stalowych, zabezpieczonych przed korozją. Na pierwszej ramie o wymiarach $1,32 \times 1,56$ m umieszczono układ doświetlający oraz skrzynkę sterowniczą. Na drugiej ramie o wymiarach $1,00 \times 2,00$ m zostały umieszczone zbiorniki rurowe oraz pompa napowietrzająca z systemem barbotażu. Zaprojektowany i zbudowany system badawczy został sprawdzony pod względem szczelności hodowlanych zbiorników rurowych oraz zaworów kulowych stosowanych do poboru próbek. Sprawdzone wydajność pompy membranowej stosowanej do napowietrzania oraz mieszania hodowli mikroorganizmów oraz jej cykliczną pracę. Przeanalizowano poziom bezpieczeństwa pracy opracowanego systemu hodowlanego.

Testy weryfikacyjne hodowli glonów w fotobioreaktorze rurowym

Przy doborze gatunku glonów odpowiednich do zaplanowanych badań w fotobioreaktorze rurowym kierowano się przede wszystkim ich zdolnością adaptacji do specyficznych warunków środowiska, odpornością na zanieczyszczenia podłoża hodowlanego oraz szybkim tempem namnażania komórek i ich wzrostu. Hodowle były zaszczepiane przez glony *Chlorella* sp.

Objętość czynna hodowli wynosiła 24 L. Oświetlenie hodowli zmieniało się w sposób cykliczny – fotoperiod 16/8 h (światło/ciemność). Badanie prowadzono w temperaturze pokojowej ($25 \pm 1^\circ\text{C}$). Odpowiednia cyrkulacja ścieków w czasie prowadzenia hodowli była utrzymana poprzez zastosowanie napowietrzającej pompy membranowej Air 550 R Plus, co pozwalało na utrzymywanie komórek glonów w zawiesinie oraz ich przepływ do najlepiej oświetlonych obszarów, transport CO_2 , a także dystrybucję składników pokarmowych. Doświadczenie prowadzono w systemie pracy okresowej przez 52 dni w warunkach zapewniających efektywny przyrost biomasy.

Do badań laboratoryjnych zastosowano aparaturę analityczną, która wykorzystywana jest do kontroli stopnia zanieczyszczenia ścieków. Przyswajalność związków biogenych przez komórki glonów *Chlorella* sp. oceniano na podstawie zmian stężenia związków biogenych w podłożu hodowlanym. W tym celu, w odstępach kilkudniowych pobierano z reaktora rurowego próbki o objętości 20 L i poddawano je filtracji za pomocą sączka bibułowego MN 619, stosowanego do wolnej filtracji, do uzyskania bezbarwnego roztworu. W uzyskanym przesączu za pomocą testów kuwetowych firmy Hach Lange (tabela 2) określano zawartość substancji biogenych niezbędnych do wzrostu glonu, czyli azotu ogólnego i fosforu ogólnego. Pomiary wykonywano zgodnie z obowiązującymi normami^{26, 27}, wykorzystując wysokotemperaturowy termostat HT 200S 9 oraz spektrofotometr UV-VIS DR 6000 firmy Hach Lange.

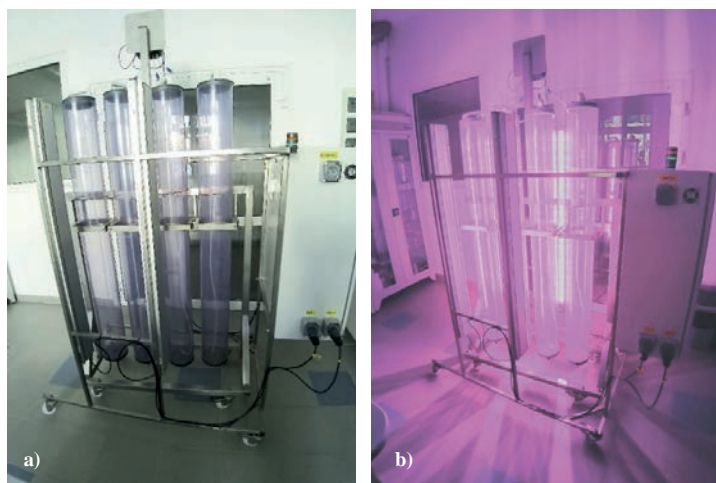


Fig. 3. Photobioreactor for growing microorganism; a) structure, b) lighting

Rys. 3. Fotobioreaktor do hodowli mikroorganizmów; a) budowa, b) oświetlenie

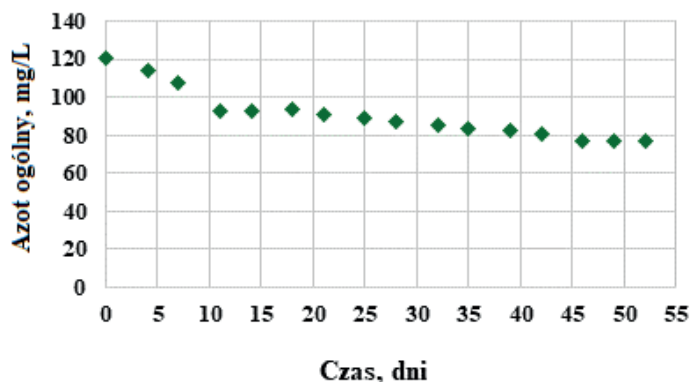


Fig. 4. Changes in the concentration of total nitrogen in the culture medium

Rys. 4. Zmiany stężenia azotu ogólnego w podłożu hodowlanym

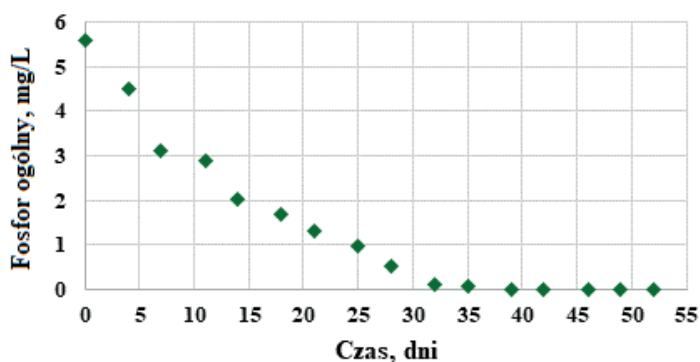


Fig. 5. Changes in the concentration of total phosphorus in the culture medium

Rys. 5. Zmiany stężenia fosforu ogólnego w podłożu hodowlanym

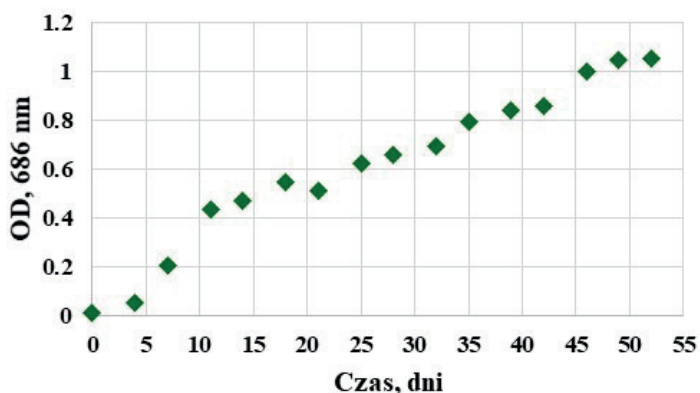


Fig. 6. Growth of algal biomass determined on the basis of optical density OD

Rys. 6. Przyrost biomasy glonów wyznaczony na podstawie gęstości optycznej OD

Efektywność przyrostu biomasy alg w podłożu hodowlanym oceniano na podstawie pomiaru gęstości optycznej (OD). W tym celu próbki o objętości ok. 3 mL pobierano i umieszczano w jednorazowych kuwetach spektrofotometrycznych. Na podstawie widma przeglądowego UV określono optymalną długość fali dla chlorofilu, która wynosiła 686 nm. Następnie za pomocą spektrofotometru UV-VIS HACH DR 6000 zmierzono absorpcję promieniowania w zakresie widzialnym. Zawartość głównych składników ścieków mleczarskich oznaczono, wykorzystując analizator Lactostar firmy Funke Gerber. Aparat ten pozwalał na

szybką analizę tłuszczu, laktozy, białka oraz minerałów. Pomiary wykonano metodą termooptyczną. Pomiar pH wykonano zgodnie z normą²⁸⁾, używając aparatu Seven Multi firmy Mettler Toledo. Mętność oceniono za pomocą przenośnego mętnościomierza 2100Q IS firmy Hach Lang. Pomiary wykonano zgodnie z normą²⁹⁾.

Wyniki badań

W prowadzonej hodowli efektywność namnażania glonów monitorowano na podstawie zawartości pierwiastków biogennych (azotu i fosforu) oraz pomiaru gęstości optycznej. Wartość początkową OD wyznaczono po upływie 2 h od czasu przygotowania hodowli. W czasie trwania doświadczenia następowało stopniowe zmniejszenie stężenia związków biogennych w podłożu hodowlanym. W przypadku przyswajania azotu był on szczególnie wyraźny w ciągu pierwszych 11 dni, gdzie nastąpił spadek zawartości tego pierwiastka z 121 do 92,3 mg/L (o ok. 23,7%). Zawartość azotu na zakończenie hodowli w porównaniu z wartościami początkowymi została w reaktorze zmniejszona o 36,6%. Maksymalny spadek zawartości fosforu w podłożu hodowlanym zaobserwowano po 30 dniach hodowli i był to ubytek rzędu 98%. Oznacza to, że w warunkach prowadzenia eksperymentu im mniejsza była zawartość azotu w podłożu, tym większe było przyswajanie fosforu. Na rys. 4 i 5 przedstawiono wyniki przeprowadzonych testów weryfikacyjnych bioreaktora dotyczących przyswajania związków biogennych zawartych w ściekach mleczarskich.

Badanie przyrostu biomasy alg prowadzono przez 52 dni, do momentu wyczerpania składników pokarmowych z podłoża (azotu ogólnego i fosforu ogólnego), ale zarazem nie dopuszczając do negatywnych, fizjologicznych zmian zachodzących w komórkach alg w fazie zamierania, w której pogarszają się warunki tlenowe hodowli oraz dochodzi do obumierania komórek (rys. 6).

Analizując uzyskane wyniki, stwierdzono, że okres startowy hodowli trwał ok. 5 dni. W tym czasie nastąpiła adaptacja komórek alg do nowych warunków środowiska. Po upływie tego czasu obserwowano wzrost wartości OD_{686} , który trwał do ok. 50. dnia, w którym gęstość optyczna wynosiła 1,046. Po upływie tego czasu zaobserwowano spowolnienie zachodzących procesów metabolicznych, pogorszenie warunków tlenowych, obumieranie komórek, co było związane z wyczerpaniem substancji odżywczych z podłoża hodowlanego.

Podsumowanie

Opracowano koncepcję i wykonano fotobioreaktor rurowy do hodowli glonów *Chlorella* sp. oraz przeprowadzono test weryfikacyjny. Wyniki przeprowadzonych testów weryfikacyjnych potwierdziły możliwość zastosowania ścieków z przemysłu mleczarskiego (bogatych w substancje biogenne niezbędne do wzrostu alg) jako pożywki do przygotowania podłoża hodowlanego. Kontrola zawartości

azotu i fosforu w tego typu podłożu hodowlanym umożliwiła ocenę przebiegu procesów metabolicznych zachodzących w komórkach alg. Wytworzony system stanowi oryginalne rozwiązanie, które będzie wykorzystywane przy realizacji prac naukowo-badawczych oraz gospodarczych podejmowanych we współpracy z jednostkami naukowymi oraz przemysłowymi. System pozwoli również na zweryfikowanie uzyskanych dotychczas wyników hodowli alg (w skali laboratoryjnej) w większej skali oraz stworzy warunki do uzyskiwania większej ilości biomasy.

Otrzymano: 22-01-2024

LITERATURA

- [1] H. Bukowski, *W kierunku gospodarki cyrkularnej. Rekomendacje rozwoju i implementacji praktycznych rozwiązań dla biznesu*, Instytut Innowacji Gospodarczych, Warszawa 2018, ISBN 978-83-947038-7-5.
- [2] https://ekocykl.org/wp-content/uploads/2018/06/6_Marta_Wisniewska.pdf, dostęp 8.01.2024 r.
- [3] www.mlekoland.com/download/eda/Green_Deal_EDA_2019_12_internal.pdf, dostęp 8.01.2024 r.
- [4] P. Reder, I. Kruszelnicka, D. Ginter-Kramarczyk, *Przem. Spoż.* 2018, **72**, nr 10, 30.
- [5] K. Dziosa, M. Makowska, *Inż. Ekol.* 2017, **5**, 5.
- [6] M. Krzemieniewski, M. Dębowski, M. Zieliński, *Czysta Energia* 2009, **9**, 25.
- [7] D. Kępska, Ł. Olejnik, *Chemik* 2014, **68**, nr 11, 967.
- [8] S. Gumiński, *Fizjologia glonów i sinic*, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 1990.
- [9] L. Barsanti, P. Gualtieri, *Algae. Anatomy, biochemistry, and biotechnology*, CRC Taylor & Francis, Boca Raton 2006.
- [10] M. Wu, N. Horsman, Ch.Q. Lan, N. Dubois-Calero, *Biotech. Prog.* 2008, **24**, nr 4, 815.
- [11] A.P. Carvalho, L.A. Meireles, F.X. Malcata, *Biotech. Prog.* 2006, **22**, nr 6, 1490.
- [12] A. Patyna, S. Witczak, *Chemik* 2016, **70**, nr 10, 634.
- [13] J. Zambrano, I. Krustok, E. Nehrenheim, B. Carlsson, *Algal Res.* 2016, **19**, 155.
- [14] C.U. Ugwu, H. Aoyagi, H. Uchiyama, *Bioresour. Technol.* 2008, **99**, 4021.
- [15] S. Khan, P. Das, M.A. Quadir, M.I. Thaher, Ch. Mahata, M. Sayadis, H. Al-Jabir, *Fermentation* 2023, **9**, nr 3, 281.
- [16] W. Ai, S.L. Guo, Q.Y. Tang, *Adv. Space Res.* 2008, **41**, nr 5, 742.
- [17] S. Huo, Z. Wang, S. Zhu, Q. Shu, L. Zhu, L. Qin, W. Zhou, P. Feng, F. Zhu, Z. Yuan, R. Dong, *Front. Energy Res.* 2018, **6**, 00049.
- [18] J. Wang, T. Rosov, P. Wensel, J. McGowen, W.R. Curtis, *Algal Res.* 2016, **18**, 288.
- [19] J.U. Grobbelaar, [w:] *Handbook of microalgal culture. Biotechnology and applied phycology* (red. A. Richmond), Blackwell Pub. Ltd., 2004.
- [20] A. Daniłowicz, B. Drożdżik, A. Jacalska, A. Karło, J. Surmacz-Górska, *Archiv. Waste Manag. Environ. Prot.* 2016, **2**, 45.
- [21] Y. Duan, F. Shi, [w:] *Reactor and process design in sustainable energy technology* (red. F. Shi), Elsevier, 2014, ISBN 978-0-444-59566-9.
- [22] M. Kula, M. Rys, A. Skoczowski, *Eng. Life Sci.* 2014, **14**, nr 6, 651.
- [23] M. Frąc, S. Jezierska-Tys, J. Tys, *Acta Agrop.* 2009, **13**, nr 3, 627.
- [24] L. Wang, X. Wang, X. Jin, J. Xu, H. Zhang, J. Yu, Q. Sun, C. Gao, L. Wang, *J. Biol. Sci.* 2017, **24**, 556.
- [25] K. Dziosa, M. Makowska, *Probl. Eksploat.* 2016, nr 2, 197.
- [26] PN-EN ISO 11905-1:2001, *Jakość wody. Oznaczanie azotu. Cz. 1. Metoda mineralizacji nadtlenodwusiarczanem.*
- [27] PN-EN ISO 6878:2006, *Jakość wody. Oznaczanie fosforu. Metoda spektrometryczna z molibdenianem amonu.*
- [28] PN-EN ISO 10523:2012, *Jakość wody. Oznaczanie pH.*
- [29] EN ISO 7027.1:2016-09, *Jakość wody. Oznaczanie mętności. Cz. 1. Metoda ilościowa.*



Stowarzyszenie Inżynierów
i Techników Przemysłu Chemicznego
Oddział Gliwice zaprasza



XXX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna
ANTYKOROZJA
SYSTEMY - MATERIAŁY - POWŁOKI

30. Ogólnopolska Konferencja Naukowo - Techniczna

ANTYKOROZJA

Systemy - Materiały - Powłoki

14 - 16 maja 2024 r.

Ustroń - hotel JAWOR

- Materiały, powłoki, systemy i technologie,
- Elektrochemiczna ochrona przed korozją,
- Kierunki badań antykorozyjnych,
- Problemy korozyjne w budownictwie,
- Korozja mikrobiologiczna,
- Zabezpieczenie maszyn, urządzeń i środków transportu

Informacje i kontakt:
tel. 664 421 351, 664 421 349
www.gliwice.sitpchem.org.pl