

WYKORZYSTANIE ZBILANSOWANEGO ODCIEKU Z REAKTORA BEZTLENOWEGO DO HODOWLI GLONÓW *CHLORELLA VULGARIS* NA CELE BIOMASOWE

Karolina Szwarz¹, Dawid Szwarz¹, Magdalena Rokicka¹, Marcin Zieliński¹

¹ Uniwersytet Warmińsko Mazurski w Olsztynie, Katedra Inżynierii Środowiska, ul. Warszawska 117a, 10-719 Olsztyn, e-mail: karolina.kupczyk@uwm.edu.pl

STRESZCZENIE

Przedmiotem podjętego zagadnienia badawczego było określenie możliwości wykorzystania odcieku, powstającego w procesie beztlenowego rozkładu substancji organicznych, jako pożywki w procesach namnażania biomasy glonów *Chlorella vulgaris* wraz z charakterystyką efektywności i szybkości ich wzrostu. Zakres badań obejmował zbilansowanie odcieku w taki sposób aby zapewnić glonom odpowiedni poziom składników pokarmowych potrzebnych do ich wzrostu. Testowano rozcieńczenia odcieku 25%, 50%, 75% oraz 100% wraz z suplementacją na wzór pożywki syntetycznej. Wykazano, iż testowane ścieki mogą zostać wykorzystane w procesie intensywnej hodowli biomasy mikroglonów z gatunku *Chlorella vulgaris*. Najlepsze wyniki uzyskano w wariancie z 75% udziałem odcieku.

Słowa kluczowe: glony, *Chlorella vulgaris*, zbilansowany odciek, hodowla, suplementacja

USE OF A BALANCED EFFLUENT FROM THE ANAEROBIC REACTOR FOR ALGAE *CHLORELLA VULGARIS* GROWTH FOR BIOMASS PRODUCTION

ABSTRACT

The aim of the study was to determine the possible use of the effluent, produced in the process of the anaerobic decomposition of organic substances, as a medium in the cultivation of microalgae *Chlorella vulgaris*. The characteristics of efficiency and kinetic of algae growth rate was determined. The scope included balancing of the effluent so as to provide an adequate level of nutrients required for algae growth. The effluent dilutions of 25%, 50%, 75% and 100% was tested. The effluent was supplemented with nutrients to create the same conditions as in the synthetic medium. The tested effluent can be used in the intensive cultivation of biomass of microalgae *Chlorella vulgaris*. The best results were obtained with the effluent dilution of 75%.

Keywords: algae, *Chlorella vulgaris*, balanced effluent, growth, supplementation

WSTĘP

Glony to duża i różnorodna grupa organizmów wodnych zwykle samożywne, począwszy od jednokomórkowe do form wielokomórkowych. Zaletami glonów na tle innych dostępnych surowców to szybkie tempo wzrostu – algi mogą wytwarzać 50 razy więcej biomasy w porównaniu do roślin wyższych [Li et al 2008, Apt et al 1999]. Nie są one również konkurentami jeśli chodzi o grunty uprawowe. Różne rodzaje alg są w stanie rozwijać się w różnych warunkach środowiskowych, nawet na obszarach zdegra-

dowanych bądź zanieczyszczonych. [Mata et al 2010]. Wydajność oleju z mikroalg może przekroczyć 75% wagowych suchej biomasy [Christi, 2007; Hu 2008, Shenk 2008]. Ponadto algi mogą zmniejszać zawartości CO₂ w spalinach, minimalizować zanieczyszczenie poprzez oczyszczanie ścieków głównie z azotu i fosforu [Mata et al 2010; Rodolfi et al 2009]. Niektóre gatunki mogą produkować komercyjnie wartościowe związki, takie jak pigmenty i środki farmaceutyczne [Carlsson et al. 2007].

Mikroglony stosują się również przy trzecim stopniu oczyszczania ścieków komunalnych oraz

przemysłowych. Glony pobierają duże ilości substancji biogenych zawartych w ściekach, ponieważ wymagają znacznych ilości azotu i fosforu. Stosunek molowy głównych składników biomasy glonów został zaproponowany przez z Grobbelara [2004], jej skład przedstawia się następująco $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$. Wraz z produkcją biomasy glonowej możliwe jest więc wyeliminowanie ze ścieków znacznych ilości biogenów.

Celem podjętego zagadnienia badawczego było określenie możliwości wykorzystania odcieku, powstającego w procesie beztlenowego rozkładu serwatki, jako pożywki w procesach namnażania biomasy glonów *Chlorella vulgaris* wraz z charakterystyką efektywności i szybkości ich wzrostu. Badania skupiły się na odpowiednim zbilansowaniu odcieku w taki sposób aby zapewnić glonom odpowiedni zestaw składników pokarmowych potrzebnych do ich wzrostu.

METODYKA

Prace badawcze podzielono na trzy etapy, których kryteriami wyodrębnienia był rodzaj zastosowanej pożywki. Podczas pierwszego etapu hodowla *Chlorella vulgaris* prowadzona była z wykorzystaniem pożywki syntetycznej. Etap drugi dotyczył zastosowania odcieku pofermentacyjnego. W etapie trzecim prowadzona hodowla zasilana była zbilansowanym odciekiem na wzór pożywki syntetycznej. W etapie drugim i trzecim wyodrębniono cztery warianty badawcze, gdzie kryterium podziału dotyczyło rozcieńczenia odcieku:

- wariant 1 (W_1) – 25% odcieku + 75% wody destylowanej
- wariant 2 (W_2) – 50% odcieku + 50% wody destylowanej
- wariant 3 (W_3) – 75% odcieku + 25% wody destylowanej
- wariant 4 (W_4) – 100% odcieku + 0% wody destylowanej

W doświadczeniu testowano odciek pozyskiwany z modelowego reaktora beztlenowego zasilanego ściekami preparowanymi na bazie serwatki. Reaktor beztlenowy pracował w warunkach mezofilowych przy obciążeniu utrzymującym się na poziomie $A = 2,6 \text{ kgBZT}_5/\text{m}^3$, hydraulicznym czasie zatrzymania 15 dni oraz temperaturze procesu $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Wartości podstawowych wskaźników odcieku i pożywki syntetycznej zaprezen-

towano w tabeli 1. Odciek pofermentacyjny poddawano każdorazowo mikrofiltracji próżniowej, a następnie sterylizacji w autoklawie przez 15 minut w temperaturze $121 \text{ }^\circ\text{C}$.

Testowany szczep *Chlorella vulgaris* pochodził z hodowli własnej, która została zapoczątkowana poprzez wykorzystanie kultury pozyskanej z kolekcji Kultur Glonów Bałtyckich (Culture Collection of Baltic Algae). Hodowlę prowadzono w reaktorach szklanych o objętości czynnej $1,0 \text{ dm}^3$ umieszczonych na mieszadłach magnetycznych wraz z zestawem lamp doświetlających. Temperatura hodowli utrzymywana była na poziomie $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Każdy reaktor wyposażony był w system napowietrzania składający się z pomp membranowych oraz z dyfuzorów rozpraszających wtłaczane powietrze. Początkowe stężenia biomasy mikroglonów charakteryzowane zawartością suchej masy organicznej w eksploatowanych bioreaktorach zapewniono na poziomie $200 \text{ mg s.m.o./dm}^3$. W etapie I hodowlę *Chlorella vulgaris* prowadzono przez okres 20 dni, a w pozostałych etapach czas ten wynosił 14 dni. Próbkę do analiz pobierano co 48 godzin. W etapie I wykorzystywano pożywkę syntetyczną 3N-BBM+V (Bold Basal Medium with 3-fold Nitrogen and Vitamins; modified), której skład przedstawia tabela 2. W etapie drugim zastosowano odciek pofermentacyjny uzupełniony wodą destylowaną każdorazowo do 1 dm^3 . Natomiast w etapie trzecim wykorzystywano również odciek, jednak podlegał on suplementacji za pomocą związków K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , $NaNO_3$, $MgSO_4$. Suplementacja polegała na uzupełnieniu odcieku o związki, na wzór pożywki syntetycznej.

Tabela 1. Parametry odcieku i pożywki syntetycznej
Table 1. The parameters of the effluent and synthetic medium

Parametr	Jednostka	Wartość	
		Odciek	Pożywka
ChZT	mg/dm ³	2295	-
N _{og}	mg N/dm ³	266	110
PO ₄ ³⁻ -P _{całk}	mg P/dm ³	34,36	54
Mn	mg/ dm ³	0,931	0,0145
K	mg/ dm ³	1860	98,9
Zn	mg/ dm ³	0,134	0,002
Mo ⁶⁺	mg/ dm ³	9,8	0,139
Fe	mg/ dm ³	1,06	0,124
Mg ²⁺	mg/ dm ³	6,05	6,1
SO ₄ ²⁻	mg/ dm ³	55,45	7,31
NH ₄ ⁺ -N	mg/ dm ³	250	-
pH	-	7,86	7,79

Tabela 2. Skład pożywki syntetycznej stosowanej do hodowli *Chlorella vulgaris*

Table 2. The composition of the synthetic medium used to grow *Chlorella vulgaris*

Składnik	Wartość	Jednostka
NaNO ₃	750	mg/dm ³
CaCl ₂ ·2 H ₂ O	25	mg/dm ³
MgSO ₄ ·7 H ₂ O	75	mg/dm ³
K ₂ HPO ₄ ·3 H ₂ O	75	mg/dm ³
KH ₂ PO ₄	175	mg/dm ³
NaCl	25	mg/dm ³
B ₁₂	1,0	ml/dm ³
B ₁	1,0	ml/dm ³
Mikroelementy		
Na ₂ EDTA	0,0045	mg/dm ³
FeCl ₃ ·6 H ₂ O	0,582	mg/dm ³
MnCl ₂ ·4 H ₂ O	0,26	mg/dm ³
ZnCl ₂	0,03	mg/dm ³
CoCl ₂ ·6 H ₂ O	0,012	mg/dm ³
NaMoO ₄ ·2 H ₂ O	0,24	mg/dm ³

Analizy odcieku i pożywki wykonywano za pomocą testów kuwetowych Hach-Lange (Niemcy). W trakcie badań wykonywano oznaczenie zawartości suchej masy (s.m.), zawartości suchej masy organicznej (s.m.o.), zawartości suchej masy mineralnej (s.m.m.), koncentracji związków organicznych charakteryzowanych wskaźnikiem ChZT, stężenia azotu ogólnego, stężenia fosforu ogólnego, manganu, potasu, cynku, molibdenu (VI), żelaza, magnezu (II), siarczanów, jonów amonowych, odczynu oraz temperatury.

Dodatkowo wykonano analizę aktywności fotosyntetycznej hodowli za pomocą bbeMoldanke. Urządzenie to przeznaczone jest do ciągłego monitorowania glonów, a dokładniej chlorofilu a. Określa on całkowitą ilość chlorofilu, stężenia do 5 grup glonów – zróżnicowanie kultury, aktywność lub poziom produktywności tych grup, transmisję do 5 długości fali a także wykrywa rozpuszczoną substancję organiczną. Zasada pomiaru oparta jest na określeniu spektrum fluorescencji glonów.

Analizę statystyczną uzyskanych wyników oraz współczynniki determinacji R² wykonano w oparciu o pakiet STATISTICA 10.0 PL. Wszystkie analizy fizyko-chemiczne zostały wykonane w trzech powtórzeniach. Weryfikację hipotezy dotyczącej rozkładu każdej badanej zmiennej określono na podstawie testu W Shapiro-Wilka. W celu stwierdzenia istotności różnic między zmiennymi przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Sprawdzenie

jednorożności wariancji w grupach dokonano z wykorzystaniem testu Levene'a. W celu określenia istotności różnic między analizowanymi zmiennymi test RIR Tukeya. W testach przyjęto poziom istotności $p = 0,05$.

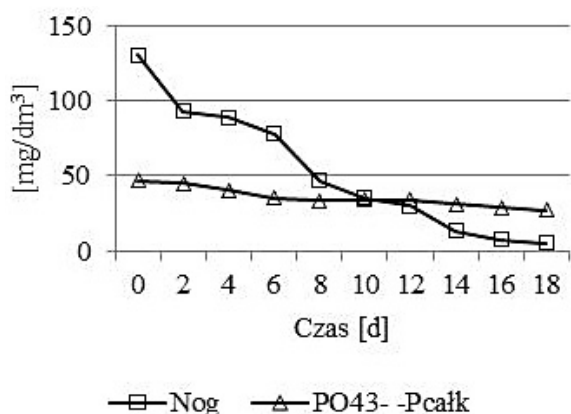
WYNIKI I DYKUSJA

Kluczową rolę w przydatności glonów jako surowca w różnych gałęziach przemysłu odgrywają: intensywne tempo przyrostu ich biomasy, stosunkowo małe wymagania hodowlane (pokarmowe i powierzchniowe). W ciągu niecałej doby w optymalnych warunkach mikroalgi mogą podwoić swoją liczebność, a zatem również podwoić masę [Posten, Shaub 2009].

Literatura dość szeroko opisuje możliwości wykorzystania hodowli glonów w procesach oczyszczania ścieków. Rozwiązania technologiczne oparte na wykorzystaniu glonów stosuje się jako trzeci stopień oczyszczania ścieków. Bardzo istotnym jest dobór odpowiedniego gatunku glonów stosowanych do oczyszczania ścieków. Pod uwagę należy brać nie tylko tempo wzrostu ale również odporność na specyficzne zanieczyszczenia, zdolność szybkiej adaptacji do nowych warunków oraz sprawność wiązania zanieczyszczeń. Proponowane i szeroko zbadane i opisane przez wielu naukowców to glony jednokomórkowe [Hoffman, 1998], np. *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Chlamydomonas sp.* [Lee 2001].

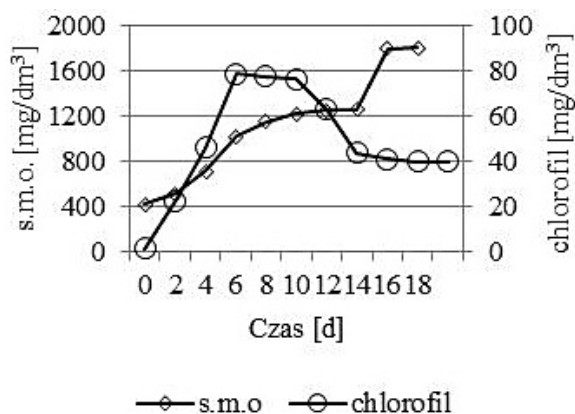
ETAP I

Dla etapu pierwszego, w którym zastosowano pożywkę syntetyczną preparowaną na bazie wody dejonizowanej oraz reagentów chemicznych uzyskano maksymalne stężenie biomasy na poziomie $1804 \pm 34,54$ mg_{s.m.o.}/dm³, co stanowiło 70% suchej masy. Średnia szybkość przyrostu glonów kształtowała się na poziomie $90,2 \pm 5,35$ mg s.m.o./dm³·d. Zmiany stężenia chlorofilu jednoznacznie odzwierciedlały przyrost biomasy, co zaprezentowano na rysunku 2. Początkowe stężenie azotu wynosiło $130,4 \pm 10,11$ mg/dm³, natomiast fosforu $46,5 \pm 5,43$ mg/dm³. Efektywność usuwania azotu wynosiła 95,8%, natomiast fosforu 41,7%. Stężenie końcowe azotu ogólnego nie przekraczało $5,5 \pm 0,34$ mg/dm³, natomiast zawartość fosforu ogólnego wynosiła średnio $27,11 \pm 1,11$ mg/dm³ (rys. 1).



Rys. 1. Efektywność usuwania azotu ogólnego i fosforu ogólnego przez *Chlorella vulgaris*

Fig. 1. Removal efficiency of total nitrogen and total phosphorus by *Chlorella vulgaris*



Rys. 2. Zmiany koncentracji biomasy i chlorofilu glonów w trakcie trwania eksperymentu

Fig. 2. Changes of the algae biomass and chlorophyll concentration during the experiment

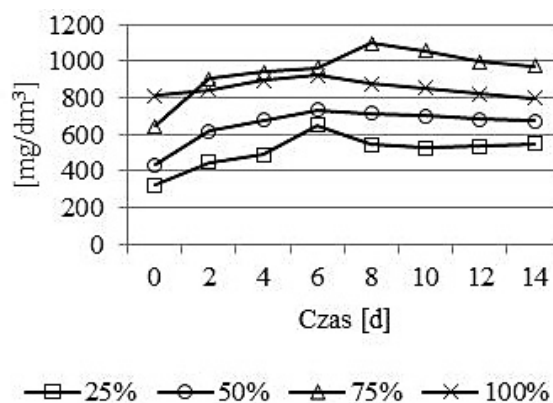
ETAP II

Zastosowano cztery dawki użytego odcieku pofermentacyjnego, który stanowił odpowiednio 25%, 50%, 75% i 100% objętości pożywki (resztę stanowiła woda destylowana). Wykonywany zabieg technologiczny miał na celu określenie wpływu dawki odcieku na tempo przyrostu biomasy glonowej oraz oszacowania maksymalnej możliwej do wprowadzenia dawki odcieku, która nie wpłynie negatywnie na efektywność procesu oczyszczania.

Naukowcy Sunjin Kimi inni [2013] badali tempo wzrostu biomasy i usuwania azotu i fosforu, wprowadzając do inokulum azotany i amoniak jako źródła azotu, wykorzystując *Chlorella sorokiniana*. Początkowe stężenie azotu ustalili na poziomie 10, 20, 40, 80 i 160 mg N/dm³.

Produkcja biomasy różniła się w poszczególnych wariantach i wynosiła od 1100 do 2300 mg s.m./dm³. Najwyższy przyrost biomasy stwierdzono przy stężeniu 80 mgN/dm³. Przy wyższych stężeniach produkcja biomasy wykazywała tendencję spadkową. W przypadku amoniaku jako źródła azotu, produkcja biomasy była niższa i w zależności od wariantu wynosiła 600–2100 mg s.m./dm³. Maksymalna uzyskana redukcja azotu i fosforu na dobę w przypadku wariantu z 80 mg N/dm³ azotanów wynosiła 0,48/d, 32,6 mg-N i 5,9 mg-P. Wykorzystując amoniak jako źródła azotu, badacze uzyskali redukcję azotu i fosforu na dobę 0,6/d oraz 79,2 mg-N i 5,9 mg-P, w wariacie z 160 mg amoniaku.

W prezentowanym etapie badań najwyższą koncentracją biomasy na zakończenie procesu hodowli charakteryzował się wariant 3, w którym jako medium hodowlane zastosowano 75% udziału odcieku. Końcowa koncentracja populacji *Chlorella vulgaris* kształtowała się na średnim poziomie 975,12 ± 28,13 mg s.m.o./dm³, gdzie początkowo odnotowano 645 ± 17,32 mg s.m.o./dm³ (rys. 3). Natomiast najwyższa uzyskana koncentracja w tym wariacie wynosiła 1097,62 ± 12,68 mg s.m.o./dm³. Istotnie niższe różnice uzyskano w pozostałych wariantach. W wariacie I uzyskano maksymalny przyrost biomasy na poziomie 652 ± 11,5 mg s.m.o./dm³, co stanowiło zaledwie 59% w stosunku do wariantu 3. W wariacie II, w którym zastosowano dodatek ścieków w ilości 50% objętości medium hodowlanego odnotowano koncentrację biomasy na poziomie około 735 ± 18,45 mg s.m.o./dm³, czyli o 33% niższą niż w wariacie 3. Wariant 4, w którym ilość testowanych ścieków wynosiła 100% objętości bioreaktora,

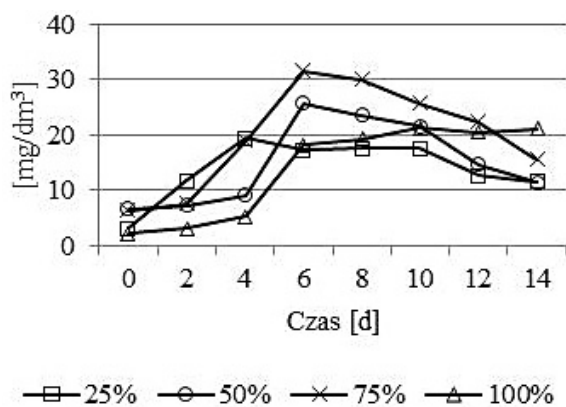


Rys. 3. Zmiany koncentracji biomasy glonów w zależności od wariantu eksperymentu

Fig. 3. Changes of the algae biomass concentration depending on the variant of the experiment

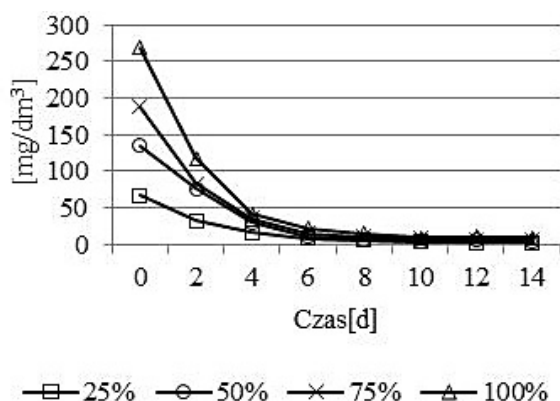
zawartość suchej masy organicznej mikroglonów *Chlorella vulgaris* była o ok. 16% niższa w stosunku do wariantu 3 (rys. 3). Stężenie chlorofilu również uzyskało najwyższy poziom w wariantcie 3 wynosząc $30,01 \pm 5,12 \text{ mg/dm}^3$ co odzwierciedla rysunek 4.

Efektywność eliminowania zanieczyszczeń z odcieku pochodzącego z beztlenowego oczyszczania ścieków mleczarskich w okresie objętym badaniami była bardzo wysoka. W przypadku azotu ogólnego było to średnio 97% we wszystkich wariantach (rys. 5). Z początkowych wartości wynoszących kolejno dla każdego z wariantów $67,375 \pm 4,21$; $134,75 \pm 3,87$; $188,65 \pm 3,22$; $269,5 \pm 4,23 \text{ mg/dm}^3$ po 14 dniach uzyskano stężenia na poziomie $2,083 \pm 0,12$; $4,64 \pm 0,14$; $5,88 \pm 0,21$; $9,41 \pm 0,23 \text{ mg/dm}^3$. Nie stwier-



Rys. 4. Zmiany koncentracji chlorofilu glonów w trakcie trwania eksperymentu

Fig. 4. Changes of the chlorophyll concentration depending on the variant of the experiment



Rys. 5. Efektywność redukcji azotu ogólnego przez *Chlorella vulgaris* w zależności od wariantu eksperymentu

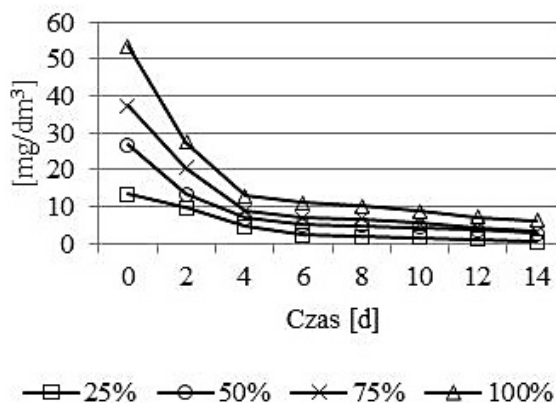
Fig. 5. Removal efficiency of total nitrogen by *Chlorella vulgaris* depending on the variant of the experiment

dzono zatem statystycznych różnic pomiędzy wariantami. Stężenie fosforu ogólnego zostało ograniczane w sposób równie wydajny kształtujący się na poziomie średnio 89% wariantcie 2 i 4 oraz około 94% w wariantcie 1 i 3 (rys. 6). Początkowe wartości wynosiły dla wariantu 2 – $26,75 \pm 0,23 \text{ mg/dm}^3$ i $53,5 \pm 0,21 \text{ mg/dm}^3$ dla wariantu 4. Stwierdzono, iż zwiększanie ładunku zanieczyszczeń w postaci udziału procentowego odcieku pofermentacyjnego nie miało wpływ na efektywność usuwania zanieczyszczeń w postaci azotu ogólnego, natomiast stwierdzono istotne różnice pomiędzy wariantami w przypadku redukcji fosforu ogólnego.

Sawayama i in. [1995] prowadzili badania nad zastosowaniem w procesie oczyszczania glonów *Botryococcus brauni*. Zastosowane przez nich rozwiązanie technologiczne wykazało usunięcie azotu i fosforu ze ścieków skutkując uzyskiem biomasy o wysokiej koncentracji węglowodanów. Inni badacze pracując nad możliwością zastosowania *Scenedesmus obliquus* w procesie oczyszczania ścieków prowadzili hodowlę w systemach otwartych [Martinez et al. 2000]. Wykorzystując te glony udało im się uzyskać sprawność usunięcia związków fosforu na poziomie 98%. W prezentowanych badaniach przy wykorzystaniu *Chlorella vulgaris* uzyskano 84% sprawności.

ETAP III

W etapie trzecim prowadzona hodowla zasilana była zbilansowanym odciekiem na wzór



Rys. 6. Efektywność redukcji fosforu ogólnego przez *Chlorella vulgaris* w zależności od wariantu eksperymentu

Fig. 6. Removal efficiency of total phosphorus by *Chlorella vulgaris* depending on the experimental variant

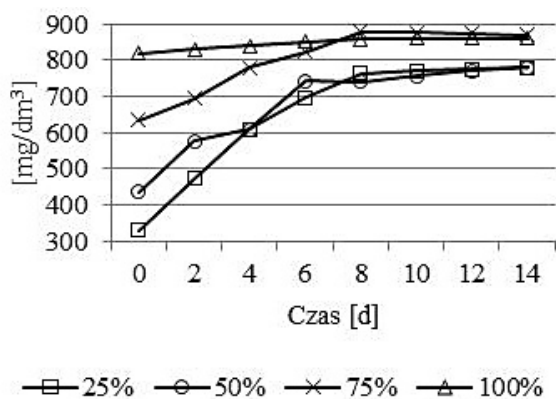
pożywki syntetycznej. Po przeprowadzeniu szczegółowych analiz odcieku stwierdzono, iż wymagana jest suplementacja o związki azotu, fosforu i magnezu. W zależności od rozcieńczenia różniła się dawka dozowanych substancji. Uzupełnienie polegało na dostarczeniu takiej ilości odczynników, aby uzyskać analogiczne stężenia do pożywki syntetycznej.

Z wyników przedstawionych na rysunku 7 dotyczącego zmian koncentracji biomasy glonów w zależności od wariantu eksperymentu wynika, że ilość biomasy powstałej zależała bezpośrednio od zastosowanego wariantu eksperymentu. Najwyższą koncentracją charakteryzował się wariant 3, gdzie maksymalny przyrost biomasy *Chlorella vulgaris* wynosił $880 \pm 10,76$ mg s.m.o./dm³, gdzie początkowo stężenie wynosiło $635 \pm 9,56$ mg s.m.o./dm³. Najniższą zaś charakteryzowały się warianty 1 i 2 z około 89% koncentracją biomasy. Szybkość przyrostu glonów kształtowała się na poziomie $62,85 \pm 5,15$ mg s.m.o./dm³·d w wariantcie 3 będąc jednocześnie najwyższym uzyskanym wynikiem pośród pozostałych wariantów (rys. 7).

Podczas eksperymentu badano również zmiany koncentracji chlorofilu zawartego w glonach. Wyniki przedstawiono na rysunku 8. Najkorzystniejszym wariantem jest wariant 3, w którym ilość testowanych ścieków wynosiła 75% objętości bioreaktora. Maksymalna ilość wytworzonego chlorofilu wynosiła $59,49 \pm 3,35$ mg/dm³, co stanowiło 50% więcej niż w etapie II tego samego wariantu. Początkowa wartość wynosiła $6,31 \pm 1,76$ mg/dm³ (rys. 8).

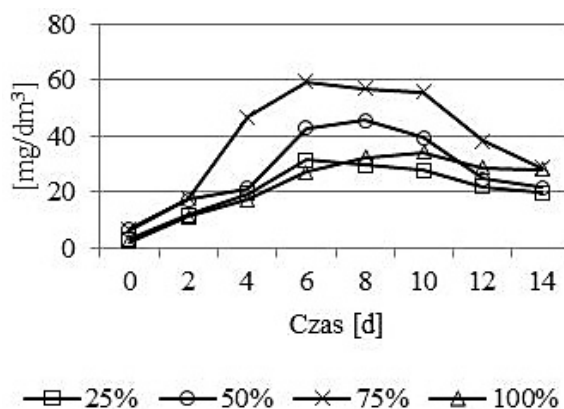
W badaniach etapu trzeciego uzyskano wysoką sprawność usuwania zarówno azotu jak i fos-

foru ogólnego. Początkowe wartości azotu wynosiły $266 \pm 6,46$ mg/dm³ dla każdego z wariantów. Zawartość związków azotu w końcowym medium hodowlanym w wariantach 2, 3 i 4 oscylowała wokół wartości $4,65 \pm 0,63$ mg/dm³, co było efektem 98% wykorzystania azotu ogólnego. Niższą sprawnością charakteryzował się wariant 1. W tym przypadku usunięto około 93%. Odnosząc się do uzyskanych wartości w etapie drugim, można stwierdzić, iż odnotowana sprawność przy suplementacji była nieco wyższa (rys. 9). Związki fosforu natomiast zostały usunięte średnio o 84%, co skutkowało uzyskaniem końcowego stężenia tego wskaźnika na poziomie $5,55 \pm 0,32$ mg/dm³. Początkowe stężenie wynosiło $34,2 \pm 4,45$ mg/dm³. Nie odnotowano istotnych różnic pomiędzy wariantami (rys. 10).



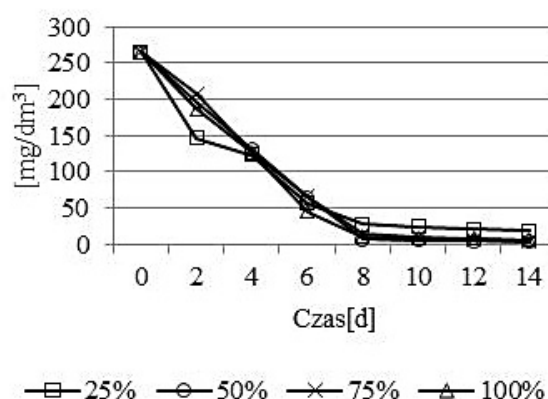
Rys. 7. Zmiany koncentracji biomasy glonów w zależności od wariantu eksperymentu

Fig. 7. Changes of the algae biomass concentration depending on the variant of the experiment



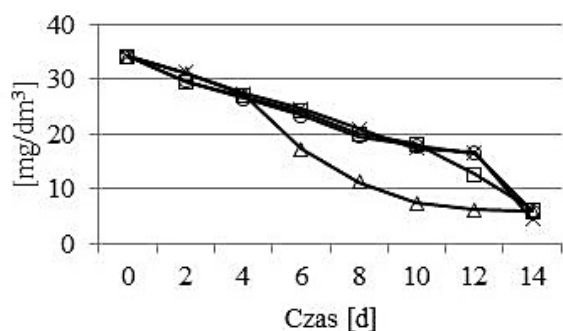
Rys. 8. Zmiany koncentracji chlorofilu glonów w trakcie trwania eksperymentu

Fig. 8. Changes of the chlorophyll concentration depending on the variant of the experiment



Rys. 9. Efektywność redukcji azotu ogólnego przez *Chlorella vulgaris* w zależności od wariantu eksperymentu

Fig. 9. Removal efficiency of total nitrogen by *Chlorella vulgaris* depending on the variant of the experiment



—■— 25% —○— 50% —×— 75% —△— 100%

Rys. 10. Efektywność redukcji fosforu ogólnego przez *Chlorella vulgaris* w zależności od wariantu eksperymentu

Fig. 10 Removal efficiency of total phosphorus by *Chlorella vulgaris* depending on the experimental variant

Badacze Fen Tan i inni [2016] również podjęli próbę hodowli glonów wykorzystując pożywkę syntetyczną zmodyfikowaną Bold Basal 3N medium. Skupili się na szczepach *C. sorokiniana*, *C. vulgaris*, *Desmodesmus sp.* Jeżeli chodzi o wyczerpanie azotanów, to *C. sorokiniana* przewyższała inne szczepy osiągając 98,4% skuteczności usuwania azotanów. Badacze zauważyli również, że do pięciodniowej hodowli minimalna wprowadzana ilość fosforu do pożywki musi wynosić około 23,2 mg/dm³.

PODSUMOWANIE

Stwierdzono, iż wykorzystywany odciek pofermentacyjny może być z powodzeniem stosowany w procesie hodowli mikroglonów z gatunku *Chlorella vulgaris*. Biorąc pod uwagę charakterystykę i skład odcieku pochodzącego z beztlenowego oczyszczania ścieków mleczarskich, stwierdzono iż najlepszym wariantem z jednoczesną suplementacją jest wariant 3 z 75% wykorzystaniem odcieku. Efektywność usuwania związków biogenych była ściśle związana z rodzajem stosowanego medium hodowlanego. Efektywności te przełożyły się na końcową zawartość biomasy oraz chlorofilu testowanych mikroglonów. Zastosowanie testowanych ścieków w znaczny sposób ogranicza konieczność użycia odczynników chemicznych. Zawartość azotu i fosforu zawarta w ściekach jest wystarczająca do prowadzenia efektywnej hodowli glonów. Z powodzeniem istnieje możliwość zastąpienia pożywki syntetycznej pożywką preparowaną na bazie odcieku.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane w ramach tematu badawczego 18.620.017–300 realizowanego w ramach działalności statutowej na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich

LITERATURA

1. Apt K. E., Behrens P. W. 1999. Commercial developments in microalgal biotechnology. *Journal of Phycology*, 35, 215–226.
2. Carlsson AS, van Beilen JB, Moeller R, Clayton D. 2007. Micro- and macro-algae: utility for industrial applications, outputs from the EPOBIO project. Newbury (UK): University of York, CPL Press; September. p. 86.
3. Chiu S. K., Kao C. Y., Tsai M. T., Ong S. C., Chen C. H., Lin C.S. 2009. Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource technology*, 100, 833–838.
4. Christi Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, 294–306.
5. Fen Tan, Zhi Wang, Siyu Zhouyang, Heng Li, Youping Xie, Yuanpeng Wang, Yanmei Zheng, Qingbiao Li. 2016. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry. *Bioresource Technology*, 221, 385–393
6. Grobbelaar, J. U. 2004. Algal Nutrition – Mineral Nutrition Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology, 95–115
7. Hoffman J.P. 1998. Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae. *J. Phycol.*, 34, 757–763.
8. Lee Y. K. 2001. Microalgal mass culture system and methods: their limitation and potential. *J. Appl. Phycol.*, 13: 307- 315.
9. Li Y., Horsman M, Wu N., Lan C.Q. and Dubois-CALero N. 2008. Biofuels from microalge. *Biotechnology Progress*, 24, 815–820.
10. Martinez M. E., Sanchez S., Jimenez J. M., El Yousfi F., Munoz L. 2001. Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*. *Bioresour. Technol.*, 73(3): 263–272
11. Mata T. M., Martins A. A., Caetano N. S., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217–232.

12. Posten C., Shaub G. 2009. Microalgae and terrestrial biomass as source for fuel – A process review. *Journal of Biotechnology*, 142, 64 – 69.
13. Rodolfi L., Zittelli G. C., Bassi N., Padovani G., Biondi N., Bonini G., Tredici M. R. 2009. Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. – *Biotechnology and Bioengineering*, 102, 100–112.
14. Sawayama S., Inoue S., Dote Y., Yokoyama S.-Y. 1955. Co₂ fixation and oil production through microalgae. *Energy Convers. Manag.*, 36(69), 729–731.
15. Sunjin Kim, Yunhee Lee, Sun-Jin Hwang. 2013. Removal of nitrogen and phosphorus by *Chlorella sorokiniana* cultured heterotrophically in ammonia and nitrate. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 511–516