

Mateusz K. Świątek

Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach
e-mail: mswiatek98@gmail.com

Magdalena Zabochnicka-Świątek

Politechnika Częstochowska
e-mail: mzabochnicka@is.pcz.pl

**OPTIMALIZACJA PRODUKCJI BIOMASY
MIKROGLONÓW NA CELE ENERGETYCZNE
W PRZEBIEGU RÓŻNYCH SPOSOBÓW ODŻYWIANIA***

**OPTIMIZATION OF MICROALGAL BIOMASS
PRODUCTION IN DIFFERENT METHODS
OF NUTRITION FOR ENERGETIC PURPOSES**

DOI: 10.15611/pn.2018.542.13

JEL Classification: Q15

Streszczenie: Mikroglony mają bardzo dobrze rozwinięte mechanizmy adaptacyjne do różnych środowisk. Mikroglony z gatunku *Chlorella vulgaris* mogą rosnąć w warunkach odżywiania auto-, jak też mikro- i heterotroficznego, a ich biomasa może stanowić doskonały surowiec do wykorzystania na cele energetyczne. Głównym celem pracy była ocena efektywności produkcji biomasy mikroglonów z gatunku *Chlorella vulgaris* na cele energetyczne w przebiegu różnych sposobów odżywiania. Badania prowadzono z wykorzystaniem hodowli okresowej, w systemach zamkniętych. W pracy dokonano oceny przyrostu biomasy mikroglonów w czasie. Przeanalizowano przebieg intensywności fotosyntezy poprzez pomiary zawartości tlenu rozpuszczonego w medium hodowlanym, pomiary zawartości chlorofilu *a* w komórkach i odczynu środowiska. Badania wykazały, że najkorzystniejszym sposobem hodowli mikroglonów na cele energetyczne była hodowla, w której zastosowano mikсотroficzny sposób odżywiania.

Słowa kluczowe: hodowla mikroglonów, biomasa, sposoby odżywiania.

Summary: Microalgae are relatively easy to cultivate because they have great mechanisms of adaptation to various environments. Microalgal biomass can be used as a feedstock for energy purposes. The widespread green microalgae *Chlorella vulgaris* can be cultivated in autohetero- and mixotrophic conditions. The main aim of the present study was an assessment of the efficiency of the *Chlorella vulgaris* biomass production in different methods of nutrition

* Źródło finansowania BS/PB -401-301/11.

for energetic purposes. In this work, microalgae were cultivated in a periodic culture in closed systems. The analysis of the growth rate was examined. The rate of photosynthesis was determined by the measurements of: concentration of dissolved oxygen in culture medium, content of chlorophyll *a*, and the analysis of changes in pH during the cultivation. The results from the present study demonstrate that the mixotrophic conditions of microalgal cultivation were the most efficient for energetic purposes.

Keywords: cultivation of microalgal, biomass, methods of nutrition.

1. Wstęp

Od wielu lat prowadzone są poszukiwania nowych źródeł energii, które będą stanowiły alternatywę dla paliw kopalnych. Biomasa roślin lądowych jest często stosowana jako źródło tzw. zielonej energii. Biomasa roślin wodnych, jak np. biomasa mikroglonów, może być z powodzeniem wykorzystywana do produkcji biopaliw ciekłych (biodiesel, bioetanol) lub gazowych (biogaz, biowodór), bądź może stanowić paliwo stałe wykorzystywane bezpośrednio do spalania [Zabochnicka-Świątek, Rygał 2017]. Kaloryczność lądowej biomasy roślinnej wynosi od 14 do 19 MJ/kg [Chrapka 2008], a kaloryczność biomasy mikroglonów jest wyższa i wynosi od 18 do 21 MJ/kg [Bei i in. 2008]. Mikroglony mają małe wymagania środowiskowe, co sprawia, że można je łatwo hodować [Zabochnicka-Świątek i in. 2018]. Hodowlę mikroglonów można prowadzić w systemach otwartych (stawy hodowlane) lub zamkniętych (fotobioreaktory). Cechą pozwalającą wzrastać mikroglonom w różnych warunkach środowiska jest zdolność do wykorzystywania różnych sposobów odżywiania, przy czym rodzaj odżywiania może się różnić w zależności od gatunku [Dobrowolski i in. 2017; Zabochnicka-Świątek 2017]. Sposób namnażania glonów ma wpływ na opłacalność wykorzystania biomasy na cele energetyczne [Dębowski i in. 2013].

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych gatunków mikroglonów jest należąca do zielenic *Chlorella vulgaris*. Mikroglony z rodzaju *Chlorella sp.* można spotkać w glebach, wodach słodkich i słonych [Podbielkowski 1996]. Gatunek *Chlorella vulgaris* charakteryzuje bardzo szybki przyrost biomasy, co jest niezwykle korzystne w przypadku potrzeby wyprodukowania biomasy na cele energetyczne. Ponadto mikroglony z gatunku *Chlorella vulgaris* mogą być hodowane w warunkach odżywiania auto-, hetero- i miksotroficznego. W przypadku dwóch ostatnich sposobów odżywiania niezbędne jest dostarczenie do hodowli dodatkowego źródła węgla organicznego.

Obecnie brakuje badań nad wpływem sposobów odżywiania mikroglonów przeznaczonych do produkcji biomasy na cele energetyczne. Głównym celem pracy była ocena efektywności produkcji biomasy mikroglonów z gatunku *Chlorella vulgaris* na cele energetyczne w przebiegu różnych sposobów odżywiania.

2. Materiał badawczy i metody badań

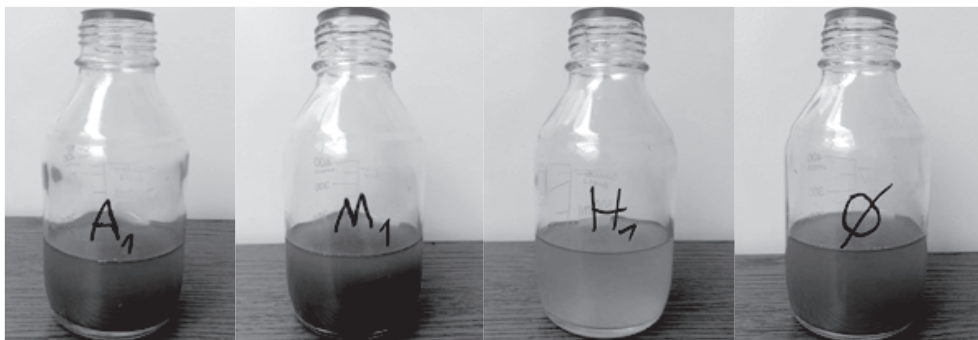
Materiałem badawczym wykorzystanym w pracy były mikroglony z gatunku *Chlorella vulgaris* pochodzące z hodowli własnej prowadzonej w Politechnice Częstochowskiej. Prowadzono trzy równoległe hodowle w warunkach odżywiania autotroficznego (A), mikso- (M) i heterotroficznego (H). Badania prowadzono w szklanych reaktorach butelkowych o poj. 500 ml (rys. 1). Do hodowli w warunkach autotroficznych (A) zastosowano standardowe podłoże o nazwie BG-11 służące do namnażania glonów. Do hodowli w warunkach mikso- (M) i heterotroficznych (H) wykorzystano podłoże BG-11 oraz roztwór melasy o stężeniu 150 mg/l, stosując dawki melasy zalecane w literaturze [Becker 2008]. Próbkę kontrolną „Ø” (K) stanowiła hodowla mikroglonów w wodzie, bez dodatku podłoża hodowlanego.

W analizowanych hodowlach oznaczono takie parametry, jak: stężenie biomasy glonów wyrażone jako sucha pozostałość, pH, stężenie tlenu rozpuszczonego, stężenie chlorofilu *a*. Suchą pozostałość oznaczano wg PN-C-04541:1978 [PN-C-04541:1978]. Badania pH hodowli dokonywano z użyciem pH-metru Cyberscan pH11 – Eutech Instrument, a stężenie tlenu rozpuszczonego z użyciem tlenomierza CO-401 – Elmetron. Oznaczenia stężenia chlorofilu *a* dokonano wg PN-ISO 10260:1992 [PN-ISO 10260:1992]. W celu obliczenia zawartości chlorofilu *a* zastosowano wzór (1):

$$C_{chl.a} = 11,61 A_{664} - 2,34 A_{647} \text{ [mg/dm}^3\text{]} \quad (1)$$

gdzie: $C_{chl.a}$ – stężenie chlorofilu *a*; A – absorbancja przy danej długości fali.

Oceny ilości i sposobu aglomeracji komórek w poszczególnych hodowlach dokonano z wykorzystaniem mikroskopu optycznego NIKON Eclipse E200 z kamerą cyfrową DS-Fi1 i oprogramowaniem NIS Basic Research. Do napowietrzania hodowli użyto pompek akwaryistycznych o przepływie 250 ml/h.



Rys. 1. Reaktory badawcze. Hodowla w warunkach: A – autotroficznych, M – mikstotroficznych, H – heterotroficznych, Ø – próbka kontrolna

Źródło: zdjęcia własne.

Na rys. 1 przedstawiono zdjęcia reaktorów badawczych z zawartością hodowli uzyskane w ostatniej dobie eksperymentu.

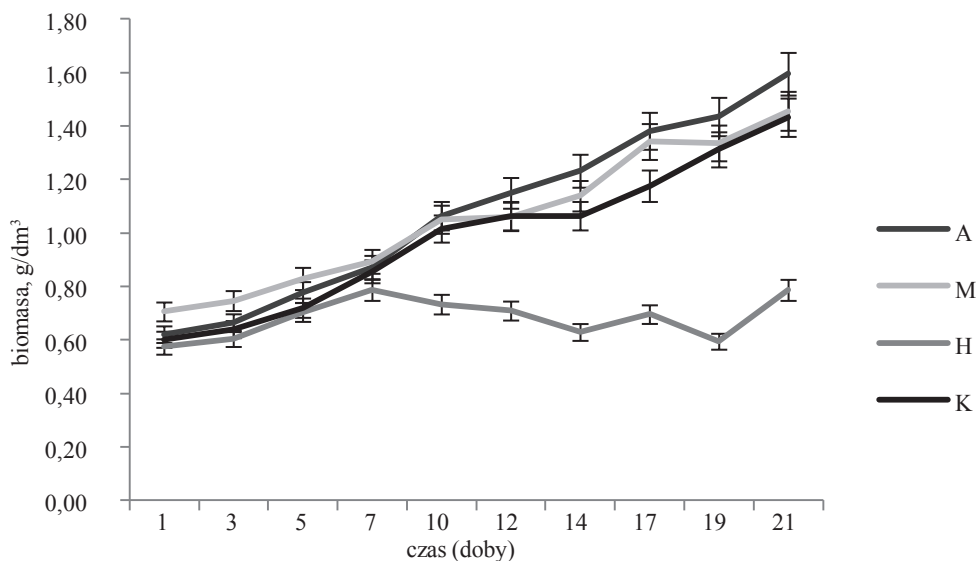
Do reaktorów wprowadzono po 450 ml wody destylowanej i 50 ml zawiesiny mikroglonów, pobranej w fazie logarytmicznego wzrostu, stanowiącej zaszczerp. Badania prowadzono z wykorzystaniem hodowli okresowej. Do hodowli A dodano po 25 ml podłoża hodowlanego BG-11. Do hodowli M i H codziennie na początku fazy nocnej dodawano po 2,5 cm³ melasy, stanowiącej źródło zewnętrznego węgla organicznego. Wszystkie próby wykonano w trzech powtórzeniach, a przedstawione w pracy wyniki stanowią ich średnią arytmetyczną. Badania prowadzono w warunkach temperatury pokojowej. Hodowle napowietrzano przez 1 h dziennie. Hodowle A i M prowadzone były w warunkach naturalnego nasłonecznienia, a hodowla H znajdowała się w warunkach zaciemnienia przez 24 godziny. Badania prowadzono w ciągu 21 dób. Co 2 lub 3 doby pobierano próbki do badań. W analizowanych próbkach dokonywano następujących pomiarów: zawartość suchej pozostałości, pH, zawartość tlenu rozpuszczonego i stężenie chlorofilu *a*. Ponadto w 21. dobie dokonano oceny mikroskopowej komórek w hodowlach.

3. Wyniki badań

Uzyskane rezultaty badań umożliwiły ocenę wpływu różnych sposobów odżywiania mikroglonów na efektywność produkcji biomasy (rys. 2), co jest niezwykle istotne w przypadku oceny opłacalności ekonomicznej wykorzystania biomasy na cele energetyczne.

Wzrost populacji mikroglonów w hodowli okresowej przebiega w kilku fazach, takich jak: adaptacyjna, wykładnicza (logarytmiczna), spowolnienia, stacjonarna i zamierania [Kozieł, Włodarczyk 2011]. Na cele energetyczne wykorzystuje się biomasę w fazie wzrostu wykładniczego. Dalsze prowadzenie hodowli byłoby nieopłacalne ze względów ekonomicznych. Zastosowane różne sposoby odżywiania wpłynęły w różnym stopniu na przyrost biomasy. Do 3. doby przyrosty biomasy mikroglonów we wszystkich próbkach były niewielkie, co świadczyło o występowaniu fazy adaptacyjnej.

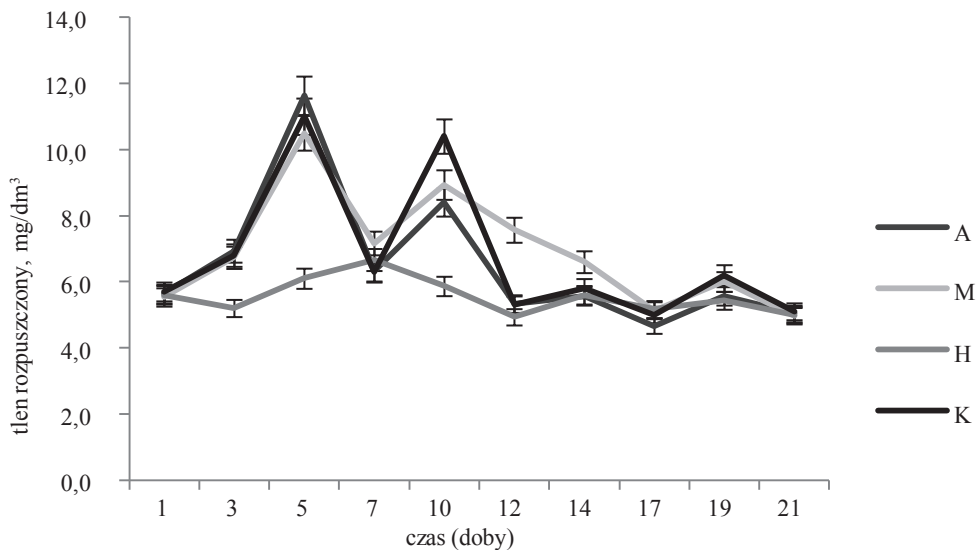
Zasadniczo w próbkach pochodzących z hodowli A od 10. do 21. doby przyrosty biomasy były nieco wyższe niż w przypadku próbek M i K. Od 3. do 21. doby populacje mikroglonów we wszystkich hodowlach znajdowały się w fazie logarytmicznego wzrostu, osiągając w 21. dobie najwyższe stężenia biomasy, na poziomie: 1,59 g/dm³ (A), 1,45 g/dm³ (M) i 1,43 g/dm³ (K). W hodowli H między 3. a 7. dobą zaobserwowano występowanie fazy logarytmicznego wzrostu i odczytana maksymalna wartość stężenia biomasy w 7. dobie wynosiła 0,78 g/dm³. Od 7. doby wystąpiła pierwsza faza zamierania, trwająca do 14. doby, a druga faza zamierania trwała od 17. do 19. doby. W 21. dobie w próbce H odczytano stężenie takie samo jak w 7. dobie, tj. 0,78 g/dm³.



Rys. 2. Zmiany stężenia biomasy mikroglonów *C. vulgaris*. Hodowla w warunkach: A – autotroficznych, M – miksotroficznych, H – heterotroficznych i K – próba kontrolna

Źródło: opracowanie własne.

W hodowli monitorowano stężenie tlenu rozpuszczonego (rys. 3).



Rys. 3. Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w hodowli mikroglonów *C. vulgaris*

Źródło: opracowanie własne.

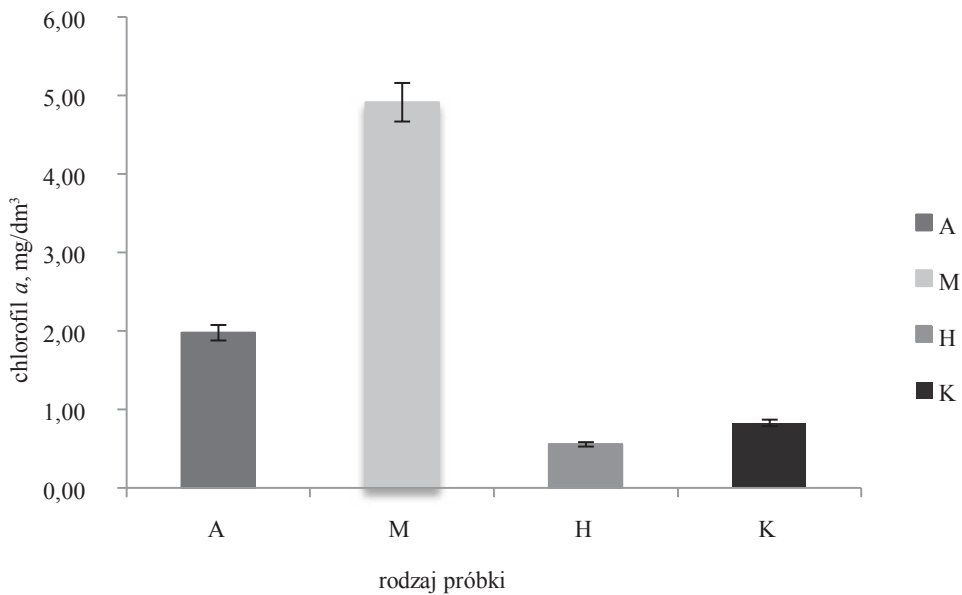
W pierwszej dobie badań stężenie tlenu rozpuszczonego wynosiło $\sim 5,6$ – $5,7$ mg/dm³ we wszystkich próbkach. Następnie we wszystkich próbkach od 3. doby zawartość tlenu rozpuszczonego stale wzrastała.

Zawartość tlenu rozpuszczonego w hodowli H była dużo niższa niż w hodowlach A, M oraz K i w czasie badań utrzymywała się na względnie stałym poziomie w zakresie $5,2$ – $6,3$ mg/dm³. Maksymalną wartość stężenia tlenu rozpuszczonego w hodowli H odczytano w 7. dobie i była ona na poziomie $6,67$ mg/dm³.

Mikroglony, adaptując się do nowego środowiska, wykazują spowolnienie procesów metabolicznych w komórkach i obniżenie zdolności namnażania biomasy [Zabochnicka-Świątek 2017]. Odnotowane niskie stężenia tlenu rozpuszczonego w pierwszych dobach hodowli (1.–3. doba) wskazywały, że populacja mikroglonów w hodowlach A, M i K pozostawała w tym czasie w fazie adaptacyjnej. W kolejnych dobach wystąpiły dwa maksima produkcji tlenu (w 5. i 10. dobie). W 5. dobie stężenie tlenu rozpuszczonego osiągnęło następujące wartości maksymalne: w hodowli A – $11,6$ mg/dm³, w hodowli M – $10,5$ mg/dm³ i w hodowli K – $11,0$ mg/dm³. Obserwowane maksima produkcji tlenu świadczyły o wejściu hodowli w fazę najszybszego przyrostu biomasy (faza logarytmiczna). W kolejnych dobach nastąpił gwałtowny spadek zawartości tlenu rozpuszczonego do wartości minimalnych na poziomie $6,3$ mg/dm³ w próbce A, $7,1$ mg/dm³ w próbce M i $6,3$ mg/dm³ w próbce K odczytanych w 7. dobie. Wspomniany wcześniej drugi skok wzrostowy stężenia tlenu rozpuszczonego nastąpił w 10. dobie i w tym czasie stężenia tlenu w tych próbkach osiągały wartości maksymalne w zakresie $8,4$ – $10,4$ mg/dm³. W kolejnych dobach odnotowano spadek zawartości tlenu trwający aż do końca eksperymentu. Obniżanie zawartości tlenu w hodowli, a zatem zmniejszone jego wydzielanie przez komórki, może świadczyć o coraz mniejszej wydajności przemian metabolicznych zachodzących w komórkach mikroglonów, spowodowanej zużyciem składników odżywczych.

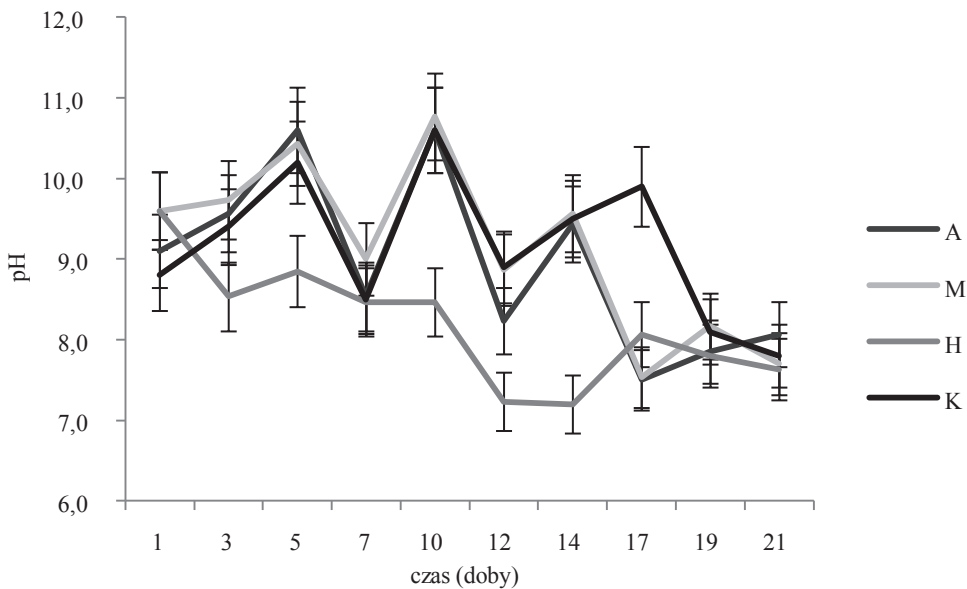
Analizując wyniki uzyskanych stężeń chlorofilu *a* (rys. 4), zaobserwowano korzystny wpływ zastosowania dodatkowego źródła węgla (melasy) na ilość wyprodukowanego chlorofilu *a* w hodowli miksotroficznej (M). W hodowli M odnotowano 2,48 razy wyższą zawartość chlorofilu *a* niż w hodowli A, 5,93 razy wyższą niż w próbce K i 8,84 razy wyższą niż w hodowli H, gdzie odnotowano najniższą produkcję chlorofilu *a*.

Zmiany wartości pH podczas badań przedstawiono na rys. 5. Do 17. doby we wszystkich próbkach przebieg zmian wartości pH ulegał wahaniom w zakresie od 7,2 do 10,7. Takie zmiany wartości pH świadczyły o zachodzących w tym czasie intensywnych procesach metabolicznych w komórkach, związanych z asymilacją składników pokarmowych, takich jak np. azot i fosfor. Obserwowane zmiany wartości pH były również pośrednio związane ze zmianami w ilości asymilowanego CO₂ przez mikroglony w przebiegu fotosyntezy. Od 17. doby wartości pH utrzymywały się na stałe niskim poziomie, obserwowane zmiany wartości pH w próbkach A, M i K były niewielkie i utrzymywały się w przedziale 7,5–8,1. Mogło to świadczyć



Rys. 4. Zawartość chlorofilu a w *C. vulgaris* po 21 dobach hodowli

Źródło: opracowanie własne.

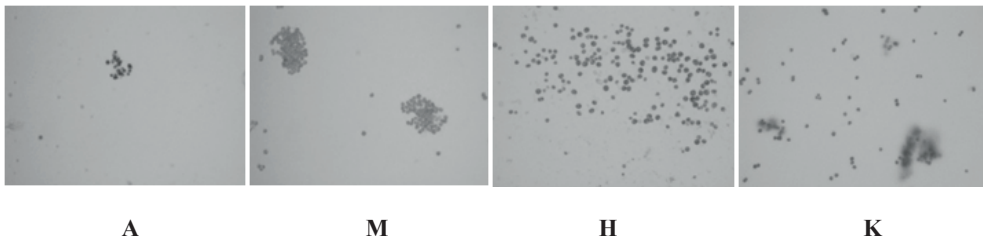


Rys. 5. Zmiany wartości pH w hodowli mikroglonów *C. vulgaris*

Źródło: opracowanie własne.

o wyczerpywaniu substancji pokarmowych w hodowlach. Dalsze prowadzenie hodowli wymagałoby dostarczenia kolejnej porcji składników odżywczych.

W hodowli prowadzonej w warunkach heterotroficznych wartości pH od 2. do 15. doby badań były niższe niż w pozostałych próbkach. W hodowli H stwierdzono spadek wartości pH od wartości początkowej równej 8,5 do wartości wynoszącej 7,2 odczytanej w 14. dobie. W kolejnych dobach zaobserwowano wzrost wartości pH do poziomu wynoszącego 8,07 odczytanego w 17. dobie badań. Następnie stwierdzono kolejny spadek wartości pH do wartości końcowych pH = 7,6. Na rys. 6 przedstawiono zdjęcia mikroskopowe mikroglonów obserwowane w ostatniej dobie eksperymentu.



Rys. 6. Obrazy mikroskopowe hodowli mikroglonów, pow. 400×

Źródło: zdjęcia własne.

Obrazy mikroskopowe wskazują, że mikroglony w hodowli A występowały w skupiskach liczących kilkadziesiąt organizmów. Duże zagęszczenie komórek mikroglonów stwierdzono również w przypadku hodowli M, gdzie skupiska komórek były bardziej liczne niż w przypadku komórek pochodzących z hodowli A. Z kolei komórki pochodzące z hodowli H pozostawały w rozproszeniu. W hodowli K mikroglony także były rozproszone. Zaobserwowano, że komórki pochodzące z hodowli M i H były nieco większe niż pochodzące z hodowli A. Komórki pochodzące z hodowli kontrolnej miały najmniejsze rozmiary.

4. Dyskusja

Zgodnie z literaturą, na wzrost i podział komórek ma wpływ metabolizm i przebieg procesów fizjologicznych, m.in. fotosynteza i oddychanie komórkowe [Kozieł, Włodarczyk 2011]. Z punktu widzenia późniejszego wykorzystania biomasy na cele energetyczne ważne jest, by zmaksymalizować produkcję biomasy w odpowiednim czasie i przy jak najniższych kosztach operacyjnych. Hodując mikroglony w warunkach odżywiania auto-, mikso- i heterotroficznego i odnosząc wyniki do wyników z hodowli kontrolnej (hodowla w warunkach autotroficznych bez dodatku podłoża hodowlanego), można było ocenić wpływ sposobu odżywiania mikroglonów na optymalizację przyrostu ich biomasy w czasie. Intensywność fotosyntezy mierzono

poprzez ocenę zawartości chlorofilu *a* w komórkach, zawartości tlenu rozpuszczonego w hodowli i pomiary odczynu (konsumpcja CO₂).

Uzyskane krzywe przebiegu zależności stężenia biomasy od czasu hodowli pokazały, że przyrost biomasy był uzależniony od zastosowanego sposobu odżywiania. Maksymalne wartości stężenia biomasy we wszystkich próbkach osiągnięto w 21. dobie. Najwyższe stężenia biomasy utrzymywały się w hodowli A od 10. do ostatniej doby badań. W całym badanym okresie stężenie biomasy w hodowli M było tylko nieznacznie niższe niż w hodowli A. Krzywa przyrostu biomasy dla hodowli M miała podobny przebieg, jak dla hodowli A. Najmniej biomasy uzyskano w hodowli H w okresie od 7. do 14. i od 17. do 19. doby. Uzyskane rezultaty dowiodły, że zastosowanie różnych sposobów odżywiania wpływało znacząco na efektywność produkcji biomasy mikroglonów z gatunku *Chlorella vulgaris* w czasie, co jest niezwykle przydatne, gdy zamierzamy wykorzystać biomasę na cele energetyczne.

By fotosynteza mogła prawidłowo zachodzić, niezbędna jest obecność chlorofilu [Szymański i in. 2017]. Podaż dodatkowego źródła węgla wpłynęła na wydajność produkcji chlorofilu *a*. Większe stężenie chlorofilu *a* w hodowli M mogło być spowodowane zachodzeniem przemian metabolicznych z większą intensywnością u mikroglonów, które były dodatkowo „dokarmiane” melasą. Jak podaje literatura, zwiększona produkcja chlorofilu *a* może być spowodowana potrzebą sprostania zapotrzebowaniu na energię [Janukowicz 2006]. Potwierdzeniem tego są obserwacje mikroskopowe (zob. rys. 6), które wykazały, że komórki mikroglonów w hodowli M były większe w porównaniu z komórkami pochodzącymi z pozostałych hodowli (A, H i K). Komórki w próbce kontrolnej miały małe rozmiary z powodu braku dostępu do jakichkolwiek składników odżywczych. Większe komórki oznaczają większe stężenie (poprzez większą produkcję) związków organicznych w komórce (białka, tłuszcze, węglowodany) stanowiących o większej wartości energetycznej biomasy. Określenie, jakie to są związki, wymagałoby przeprowadzenia dalszych badań. W hodowli heterotroficznej brak dostępu światła spowodował znaczące zmniejszenie produkcji chlorofilu *a*, który nie był wykorzystywany przez komórki, ponieważ nie zachodziła fotosynteza.

Chlorella vulgaris, podobnie jak inne organizmy fotosyntetyczne, uwalnia tlen do środowiska [Chambers, Mills 1996]. Miarą prawidłowo zachodzących procesów metabolicznych w komórkach mikroglonów w hodowli autotroficznej była zdolność do wytwarzania tlenu, jak i wielkość jego produkcji. Od 7. doby w hodowli M stężenie wytwarzanego tlenu w czasie zachodzącej w dzień fotosyntezy było nieco wyższe niż w hodowli A, co dowodziło większego zapotrzebowania na energię komórek z hodowli M. W hodowli H stężenie tlenu rozpuszczonego pozostawało na podobnym poziomie w czasie całego eksperymentu, nawet wtedy gdy nastąpił największy przyrost biomasy, tj. od 19. doby. Dowodzi to, że fotosynteza nie zachodziła w tych komórkach i przyrost biomasy był związany z innym szlakiem metabolicznym, związanym tylko z przyswajaniem cukru w czasie wzrostu heterotroficznego.

Ditlenek węgla występuje w wodzie w różnych formach, wpływając na zakwaszenie środowiska. Pomiar wartości pH środowiska wskazały, że im efektywniej zachodziła konsumpcja CO₂ w procesie fotosyntezy, tym bardziej odczyn był zasadowy. W hodowli M i A w 17. dobie (zob. rys. 5) zaobserwowano najniższe wartości pH, co dowodziło, że w komórkach mikroglonów pochodzących z ww. hodowli fotosynteza zachodzi już mało wydajnie z powodu wchodzenia mikroglonów w fazy spowolnienia i zamierania. W hodowli H zaobserwowany od 1. do 14. doby spadek wartości pH świadczył o zakwaszaniu środowiska z powodu braku wiązania CO₂ w procesie fotosyntezy i zakwaszaniu z powodu zawartości cukru, który mógł ulegać rozkładowi. Po tym czasie wzrost wartości pH był skorelowany z obserwowanym w ostatniej fazie badań wzrostem stężenia biomasy, co mogło świadczyć o wzroście konsumpcji cukru przez mikroglony, i stąd zmniejszeniem zakwaszenia.

5. Podsumowanie

Optymalizacja produkcji biomasy mikroglonów z gatunku *Chlorella vulgaris* była możliwa poprzez dobór odpowiedniego sposobu odżywiania. Optymalna do celów energetycznych była hodowla M, w której wykorzystano miksotroficzny sposób odżywiania. W hodowli tej uzyskano tylko nieco niższe stężenie biomasy niż w hodowli A, ale za to największe komórki i największą zawartość chlorofilu *a*, co świadczyło o ich dużej wartości energetycznej. W hodowli H wyprodukowano najmniej biomasy spośród wszystkich sposobów odżywiania, co wskazuje, że taki sposób produkcji biomasy do celów energetycznych jest najmniej efektywny. W hodowli kontrolnej uzyskano finalnie podobne stężenie biomasy co w hodowli M, lecz komórki miały najmniejsze rozmiary.

Uzyskane rezultaty badań mogą zostać wykorzystane przy doborze efektywnego sposobu produkcji biomasy mikroglonów na cele energetyczne.

Literatura

- Becker E.W., 2008, *Microalgae: biotechnology and microbiology*, Cambridge Studies in Biotechnology, no. 10, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bei W., Yanqun L., Nan W., Christopher Q.L., 2008, *CO₂ biomitigation using microalgae*, Appl Microbiol Biotechnol, no. 79, s. 707–718.
- Chambers P.A., Mills T., 1996, *Dissolved oxygen, fish and nutrient relationships in the Athabasca river*, Northern River Basins Study Synthesis Report, no. 5.
- Chrapka R., 2008, *Biomasa – odnawialne źródło energii*, https://www.info-ogrzewanie.pl/artykul,id_m-69_biomasa_8211_odnawialne_zrodlo_energii.html (30.06.2018).
- Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M., Dudek M., Grała A., 2013, *Możliwość namnażania biomasy glonów na bazie odcieku pochodzącego z odwadniania osadów pofermentacyjnych*, Rocz. Ochr. Śr., nr 15, s. 1612–1622.

- Dobrowolski J.W., Bedla D., Czech T., Gambuś F., Górecka K., Kiszczak W., Kuźniar T., Mazur R., Nowak A., Śliwka M., Turunov O., Wagner A., Wieczorek J., Zabochnicka-Świątek M., 2017, *Integrated innovative biotechnology for optimization of environmental bioprocesses and a green economy*, [w:] *Optimization and Applicability of Bioprocesses*, eds. H. Purohit, V. Kalia, A. Vaidya, A. Khardenavis, Springer, Singapore, s. 27–71. DOI: 10.1007/978-981-10-6863-8_3
- Janukowicz H., 2006, *Zawartość chlorofilu a i feofityny w glonach planktonowych Zalewu Szczecińskiego jako element monitoringu środowiska*, Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, nr 6(1), s. 133–138.
- Kozieł W., Włodarczyk T., 2011, *Glony – produkcja biomasy*, Acta Agrophysica, t. 17(1), s. 105–116. PN-C-04541:1978. Woda i ścieki. Oznaczanie suchej pozostałości, pozostałości po prażeniu, straty przy prażeniu oraz substancji rozpuszczonych, substancji rozpuszczonych mineralnych i substancji rozpuszczonych lotnych.
- PN-ISO 10260:1992. Jakość wody. Pomiar parametrów biochemicznych. Spektrometryczne oznaczenie stężenia chlorofilu a.
- Podbielkowski Z., 1996, *Glony*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.
- Szymański N., Dąbrowski P., Zabochnicka-Świątek M., Panchal B., Lohse D., Kalaji H.M., 2017, *Taxonomic classification of algae by the use of chlorophyll a fluorescence*, Sci. Rev. Eng. Env. Sci., no. 26(4), s. 470–480. doi: 10.22630/PNIKS.2017.26.4.45
- Zabochnicka-Świątek M., 2017, *Usuwanie azotu amonowego ze ścieków w procesie sorpcji i biosorpcji*, Monografia nr 324, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- Zabochnicka-Świątek M., Krzywonos M., Kalaji H.M., El-Sheery N.I., Bień J.B., 2018, *Influence of clinoptilolite on the efficiency of heavy metal removal from wastewater by C. vulgaris*, Desalination and Water Treatment, no. 117, s. 49–57. doi: 10.5004/dwt.2018.22034
- Zabochnicka-Świątek M., Rygał A., 2017, *The effect of biomass (Chlorella vulgaris, Scenedesmus armatus) concentrations on Zn²⁺, Pb²⁺ and Cd²⁺ sorption from zinc smelting wastewater*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, nr 20(2), s. 211–220.