

Proces usuwania i zagospodarowania CO₂ z gazów spalinowych w reaktorze glonowym z pożywką w postaci ścieków

The process of removing and managing CO₂ from flue gases in an algae reactor with a nutrient solution in the form of sewage

Hubert Kowalski, Mirosław Krzemieniewski^{*)}

Słowa kluczowe: glony, sekwestracja, dwutlenek węgla, ścieki, gazy spalinowe

Streszczenie

Proces sekwestracji CO₂ z gazów spalinowych można przeprowadzić przy udziale glonów lub sinic. Celem badań była analiza działania autorskiej konstrukcji reaktorów z glonami i sinicami pod kątem sprawności usuwania dwutlenku węgla z gazów spalinowych. Wykonano badania w skali laboratoryjnej stosując czysty CO₂, jego mieszaninę z powietrzem oraz spaliny odprowadzane z generatora prądotwórczego. Uzyskano wysoką, sięgającą 95% sprawność zmniejszania ilości CO₂ w oczyszczanych spalinach. Jako pożywkę zastosowano także ścieki miejskie. Przedstawiono autorską propozycję wymiarowania reaktora w skali technicznej.

Key words: algae, sequestration, carbon dioxide, sewage, exhaust gases

Summary

The process of sequestration of CO₂ from exhaust gases can be carried out with the use of algae or cyanobacteria. The aim of the research was to analyze the operation of the proprietary design of reactors with algae and cyanobacteria in terms of the efficiency of carbon dioxide removal from flue gases. Laboratory scale tests were carried out using pure CO₂, its mixture with air and exhaust gases discharged from the power generator. A high efficiency of up to 95% in reducing the amount of CO₂ in the flue gas being cleaned was achieved. Municipal sewage was also used as a medium. An original proposal for dimensioning the reactor on a technical scale was presented.

1. Wstęp

Emisja dwutlenku węgla do atmosfery jest tematem poruszającym nie tylko przez naukowców, ale również jest modnym tematem dla polityków i publicystów. Najczęściej podkreśla się znaczący wpływ CO₂ na zmiany klimatyczne [15]. Wiele państw przyjęło w swoich programach gospodarczych ograniczenie emisji tego gazu na przykład poprzez wykorzystanie energii odnawialnej. Wykorzystanie słońca, wiatru lub energii wodnej na pewno jest przyjazne dla środowiska. Natomiast komory fermentacyjne, stosowane w oczyszczalniach ścieków lub w biogazowniach, nie rozwiązują w pełni problemu emisji gazów cieplarnianych. Założenie, że wytworzony w wymienionych obiektach biogaz, po spaleniu w generatorach prądotwórczych, jest ekologiczny, a kotły spalające węgiel stanowią zagrożenie dla środowiska, jest z punktu widzenia na klimat niewłaściwym założeniem. Należy dążyć do usunięcia CO₂ bez względu gdzie jest wytworzony. Jednak jak dotychczas nie opracowano oryginalnych rozwiązań, pozwalających efektywnie ograniczyć emisję dwutlenku węgla do atmosfery. Szczególnie kontrowersyjna okazała się metoda gromadzenia usuniętego CO₂ w górotworach lub w oceanach [4]. W tym przypadku, zatrzymanie ogromnych ilości CO₂, szczególnie w głębi ziemi, grozi katastrofą ekologiczną. Należy więc dążyć do zagospodarowania wychwyconego CO₂ i można to uczynić wykorzystując wyjątkowe właściwości glonów i sinic.

Niebieska technologia

Glony do życia i rozwoju potrzebują przede wszystkim wody, dwutlenku węgla, światła słonecznego oraz soli mineralnych. W dogodnych warunkach potrafią w bardzo szybkim tempie się namnażać, a co z tego wynika, wytwarzają ogromną ilość biomasy [7].

Dzięki właśnie tym zdolnościom, glony znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach naszego życia, a biotechnologię opartą na wykorzystaniu glonów i sinic określa się jako niebieską biotechnologię [19]. Wykorzystuje się je w produkcji żywności, paszy dla zwierząt, jako suplementy diety, kosmetyki i barwniki. W wielu krajach na dużą skalę wytwarza się olej z glonów, z przeznaczeniem jako paliwo do silników [6]. Jednak obecnie ten kierunek wykorzystania glonów wymaga weryfikacji, ponieważ najważniejszym zagadnieniem jest zmniejszenie emisji dwutlenku węgla. Produkcja biooleju z glonów powoduje duże nakłady energetyczne, a jednocześnie stosując ten nośnik energii w silnikach spalinowych, wytwarzamy ponownie dwutlenek węgla. Należy podkreślić, że niekontrolowany rozwój glonów w środowisku naturalnym stwarza również wiele problemów. Na przykład masowy rozwój fitoplanktonu w wodach powierzchniowych pogarsza jakość wody i z punktu widzenia systemów zaopatrzenia w wodę niemożliwe jest spełnienie podstawowego celu w Planach Bezpieczeństwa Wody, jakim jest dostarczenie konsumentom wody o odpowiedniej jakości zdrowotnej [5]. Są także przykłady pozytywnej roli glonów przy oczyszczaniu wody [13].

^{*)} Hubert Kowalski, Mirosław Krzemieniewski – Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Dotyczy to także oczyszczania ścieków. W ubiegłym wieku bardzo popularnymi obiektami do oczyszczania ścieków były stawy, w których rozwijały się glony. Bardzo często stosowano je jako urządzenia zabezpieczające odbiornik, do którego odprowadzono ścieki po mechanicznym lub po mechaniczno-biologicznym oczyszczeniu [12]. Niestety, wymagają one dużych powierzchni, a przy niewłaściwej eksploatacji stają się uciążliwe dla otaczającego środowiska. Wady te wyeliminowano w nowoczesnych urządzeniach Algaewheel [14]. Wykorzystano w nich symbiozę pomiędzy glonami i bakteriami zawartymi w ściekach. Glonom dostarczana jest energia słoneczna. Promienie słoneczne padają na zbiornik i na powierzchnie tarcz.

Sekwestracja ditlenku węgla przez glony

Szukając metod zmniejszenia ilości dwutlenku w gazach emitowanych do atmosfery, podjęto również próby wykorzystania właściwości glonów i sinic. Liczne badania potwierdziły możliwość sekwestracji ditlenku węgla przez glony w reaktorach z glonami. [17], [11]. Jednak konwencjonalne metody, polegające na wykorzystaniu zbiorników wodnych, wymagają bardzo dużych powierzchni terenów, nawet wtedy gdy zostaną włączone do układu technologicznego dodatkowe urządzenia w postaci fotobioreaktorów. Na przykład badania przeprowadzone w okresie trzech lat w elektrowni opalanej węglem brunatnym w Niemczech w miejscowości Bergheim-Niederaussem potwierdziły, że można uzyskać bardzo dużą sprawność usuwania dwutlenku węgla z gazów, ale jednocześnie podano, że zapotrzebowanie na teren zajęty przez eksperymentalne urządzenia z glonami wynosiło 0,5 m² na 1,0 kg CO₂ usuwanego w ciągu roku [16]. Autorzy publikacji nie przedstawili założeń dla obiektów w skali technicznej, ale przyjmując wartości z eksperymentu, przy rocznej emisji 27 mln. ton CO₂, zbiorniki z glonami i sinicami zajęłyby powierzchnię wręcz niewyobrażalną, bo w wysokości 1350 tys. ha. W podobnym układzie technologicznym przeprowadzono eksperyment w Australii w Malbourne, a oczyszczaniu poddano gazy spalinowe pochodzące z generatorów prądowców zasilanych biogazem z oczyszczalni ścieków [9]. Autor badań wykazał, że oczyszczając gazy spalinowe z generatorów prądowców emitujących w ciągu doby 96,4 t CO₂, otwarte zbiorniki z glonami zajmą powierzchnię w wysokości 75 ha. Jednocześnie należy zaznaczyć, że warunki klimatyczne w Melbourne są bardzo dobre dla takich układów technologicznych. Występuje wyjątkowo dobre nasłonecznienie powierzchni zbiorników a także sprzyjają dobre warunki termiczne powietrza atmosferycznego. Wykonano również badania w USA w elektrowni o mocy 600 MW opalanej węglem. Zastosowano reaktory zamknięte i otwarte zbiorniki. Wykazano, że powierzchnia stawów z glonami wyniesie 3000 ha. Prawdopodobnie na podstawie uzyskanych wyników oraz pod presją mieszkańców podjęto decyzję o zamknięciu kotłów opalanych węglem [20]. Podejmowano również próby zastosowania reaktorów rurowych, opisanych w naukowej literaturze pod nazwą Tubular Photobioreactors. Konstrukcje i prowadzone technologie posiadają zastrzeżenia patentowe np. DE 29706379,0 ; EP 0968273. Głównym elementem tych urządzeń są przezroczyste rury, najczęściej ułożone w poziomie, wewnątrz których znajdują się glony lub sinice zawieszona w roztworze pożywki. Do rur dozowany jest CO₂, natomiast zewnętrzne powierzchnie rur są oświetlane przede wszystkim naturalnym światłem słonecznym. Jednak nawet w niewielkich instalacjach należało zamontować rury o długości od kilkuset metrów do kilkuset kilometrów [18].

Obiecującą konstrukcją jest fotobioreaktor do biosekwestracji CO₂ z unieruchomioną biomasa glonów lub sinic, zastrzeżony w Polsce, w Unii Europejskiej oraz w kilku innych krajach [8]. Wynalazek, dzięki swojej konstrukcji, zakłada uzyskanie bardzo wysokiej koncentracji biomasy glonów czy sinic, poprzez jej unieruchomienie w kapsułkach. Rozwiązanie, według wynalazku, pozwala na skuteczne usuwanie ditlenku węgla z gazów o wysokim stęże-

niu CO₂, przy jednoczesnej, mniejszej kubaturze obiektów. Badania zakończono na etapie badań w skali laboratoryjnej.

W publikacjach naukowych podkreśla się także zalety reaktorów z wypełnieniem do którego przytwierdzone są glony. Autorzy przedstawili schemat stanowiska badawczego, który posłużył do przeprowadzenia badań technologicznych [3]. Powołali się oni na wcześniejsze opisy reaktorów z przytwierdzoną do wypełnienia biomasa glonów [1] [2]. Według ich konstrukcji, w szklanej komorze, nachylonej w stosunku do płaszczyzny poziomej, znajduje się płaska szklana płyta, a na niej położona jest bibuła filtracyjna. Na wyżej położoną krawędź szklanej płyty dozowana jest pożywka dla glonów. Jednocześnie cała powierzchnia jest oświetlona lampami fluorescencyjnymi oraz wprowadzany jest gaz zawierający CO₂. Glony zaszczipione na powierzchni wilgotnej bibuły filtracyjnej przytwierdzały się do jej powierzchni i w czasie trwania eksperymentu zwiększały swoją objętość. Zaprezentowano również zmodyfikowany reaktor [10]. W szklanej komorze umieszczony jest moduł wypełnienia, składający się z pionowo ustawionych płytek z przytwierdzonymi do nich bibułami filtracyjnymi. Pożywka dostarczana jest na górne krawędzie płytek i sączy się przez bibułę filtracyjną. Cała górna powierzchnia szklanej komory jest oświetlona lampami fluorescencyjnymi oraz wprowadzany jest do jej wnętrza gaz zawierający CO₂.

2. Badania własne

Celem badań była analiza działania autorskiej konstrukcji reaktorów z glonami i sinicami, pod kątem sprawności usuwania dwutlenku węgla z gazów spalinowych oraz przedstawienie założeń dla reaktorów w skali technicznej.

Badania przeprowadzono w reaktorach w skali laboratoryjnej. Zastosowano dwie konstrukcje reaktorów z glonami. Ich wspólną cechą były wypełnienia wykonane z tworzywa sztucznego, na powierzchni których mogła rozwijać się warstwa glonów i sinic, zarówno słodkowodnych.

Modele reaktorów

Pierwsza zastosowana konstrukcja reaktora z glonami, nazwana jako Reaktor 1, miała wypełnienie w postaci płaskich dysków o średnicy 200 mm, wykonanych z przezroczystego plastiku. Dyski ułożono jeden nad drugim w obudowie w postaci plastikowej przezroczystej rury. W każdym dysku znajdował się otwór z króćcem przelewowym o wysokości 5 mm. W ten sposób każda półka zawiera warstwę wody z glonami, Pomiędzy półkami była wolna przestrzeń o wysokości 5 mm. Od góry reaktor miał zadaszenie wyposażone w króciec wylotu powietrza i w króciec dozowania pożywki. Natomiast dno Reaktora 1 zakończono w postaci stożka, o wysokości 200 mm, wykonanego z blachy stalowej. Zamontowano w nim dwa króćce, jeden połączony z pompką recyrkulacyjną pożywki, którą uruchamiano co 5 minut na okres 15 sekund. Drugim króćcem dopływał gaz, który poddawano oczyszczaniu. Dozowany był pompką membranową. W ten sposób powietrze atmosferyczne lub jego mieszanina z dwutlenkiem węgla płynęło od dołu do góry Reaktora 1, a pożywka w przeciwnym kierunku.

Wokół obudowy po jego zewnętrznej stronie umieszczono diody led tak, aby światło wnikało głównie do wolnych przestrzeni pomiędzy półkami. Zainstalowano diody led emitujące światło czerwone w liczbie 200 sztuk o całkowitej mocy 20 W (fot. 1).

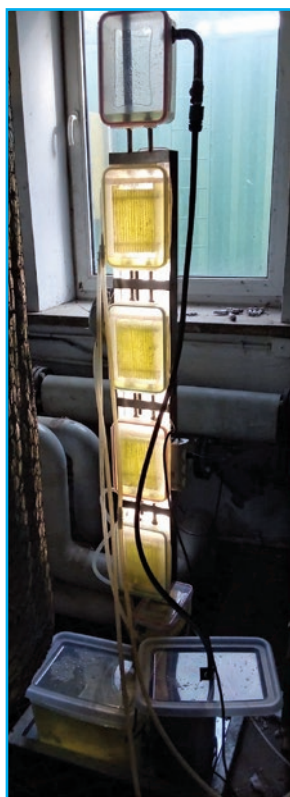
Założono, że temperatura wewnątrz reaktora wyniesie 25°C. Jeżeli temperatura w pomieszczeniu laboratoryjnym była na tyle niska, aby uzyskać wymaganą temperaturę, to podwyższano temperaturę pożywki. Realizowano to w ten sposób, że przewód którym pompowano pożywkę znajdował się w oddzielnym zbiorniku z wodą podgrzewaną przez grzałkę elektryczną.

Druga instalacja do usuwania CO₂ to Reaktor 2, którego głównym elementem są pionowo ustawione płytki jako wypełnienie. Zastoso-



Fot. 1. Reaktor 1

Fig. 1. Reaktor 1



Fot. 2. Reaktor 2

Fig. 2. Reaktor 2

wano plastikowe płytki o wymiarach – szerokość 80 mm, wysokość 150 mm. Odstęp pomiędzy płytkami wynosił 7 mm. Umieszczono je w 4 plastikowych pojemnikach o pojemności 2,4 l każdy. Nad górnymi krawędziami każdego wypełnienia znajdowała się perforowana płytka, która pozwalała równomiernie rozprowadzić pożywkę na górnych krawędziach płytek. Pojemniki ułożone były jeden nad drugim, a nad ostatnim umieszczono zbiornik również o pojemności 2,4 l, który pełnił funkcję komory rozprężnej dla dozowanej pożywki. W jego górnej części zamontowany był także króciec do odprowadzania oczyszczonych gazów oraz w części dolnej dwa króćce połączone z ostatnim górnym reaktorem, którymi przepływały zarówno oczyszczane gazy jak i pożywka. Wypełnienia oświetlane były dwiema świetlówkami, które emitowały światło białe o barwie 6500K. Moc obu świetlówek wynosiła 36 W. Gaz dostarczany był pompką membranową i wprowadzany był do ostatniego dolnego pojemnika z wypełnieniem, który miał

również połączenie z odstojnikiem o pojemności 500 ml. W odstojniku wypłukiwana biomasa glonów i sinic oddzielała się od pożywki i sukcesywnie ją usuwano. Z odstojnika sklarowana pożywka spływała do plastikowego zbiornika o pojemności 15 l, w którym zainstalowano pompę zatapialną do dozowania pożywki, która włączała się cyklicznie co 5 minuty i pracowała przez 15 sekund (Fot. 2).

3. Metodyka badań

Do Reaktora 1, który umieszczono w pomieszczeniu laboratoryjnym, dozowano dwutlenek węgla w postaci gazu czystego technicznie lub wymieszanego w różnych proporcjach z powietrzem at-

mosferycznym. Niezbędną objętość badanego gazu magazynowano w workach z tworzywa sztucznego o dużej gęstości o pojemności 250 l każdy i nową próbę gazu przygotowywano raz na dobę. Natomiast do Reaktora 2 wprowadzano gazy spalinowe z generatora prądowórczego zasilanego biogazem z ZKF oczyszczalni ścieków. Zapewniono stały dopływ gazów spalinowych.

W badaniach wykorzystano biomasę glonów i sinic słodkowodnych z własnej hodowli. Pożywki dla glonów i sinic w Reaktorze 1 przygotowywano według receptury dla glonów i sinic słodkowodnych CCAP [21]. Natomiast w eksperymencie z Reaktorem 2 jako pożywkę zastosowano ścieki miejskie, oczyszczone w osadniku wstępnym.

Dla Reaktora 2 zastosowano własną autorską metodę umieszczenia biomasy glonów i sinic na powierzchni pionowo ustawionych wypełnień. Celem tej metody jest równomierne rozmieszczenie testowanej biomasy na powierzchni wypełnień. Jednocześnie, w ten sposób skracają się czas niezbędny do uzyskania odpowiedniej ilości przytwierdzonej do wypełnienia biomasy. Metoda opiera się na doświadczeniach z immobilizacją glonów i sinic w kapsułkach alginianowych. Powierzchnię wypełnienia pokrywa się warstwą pożywki z dodatkiem CaCl_2 . Zabieg ten powtarza się trzykrotnie w takich odstępach czasowych, aby przed nałożeniem następnej warstwy powierzchnia wypełnienia była sucha. Następnie przygotowuje się roztwór pożywki, który miesza się z biomasą glonów lub sinic oraz z alginianem sodu. Konsystencja powstałego roztworu powinna być tak płynna, aby można było pokryć powierzchnię wypełnienia urządzeniami do spryskiwania roztworów. Powstałą cienką warstewkę natychmiast pokrywa się wcześniej przygotowanym roztworem CaCl_2 z pożywką. Ten zabieg powtarza się trzykrotnie, w odstępach czasowych takich, aby nie pojawiło się zjawisko płynięcia nałożonego roztworu. W Reaktorze 2 zastosowano glony i sinice słodkowodne, które pobrano z Reaktora 1.

Koncentrację CO_2 w gazie dopływających i odpływających z reaktorów określano przy wykorzystaniu Chromatografu Agilent Technologies 7890A GC System i przenośnego analizatora GAS DATA GFM Series.

Mierzono temperaturę otoczenia, dopływających gazów, a także temperaturę pożywki pompowanej do reaktora jak i odpływającej z reaktorów. Kontrolowano odczyn pożywki oraz jej zasolenie. W próbkach biomasy pobranej z wnętrza reaktorów określano suchą masę i pozostałość po prażeniu.

4. Omówienie wyników badań

Reaktor 1.

Badania przeprowadzono w czterech etapach z glonami słodkowodnymi. Każdy etap powtarzano trzykrotnie. Dozowano gaz jako mieszaninę gazu, składającego się z powietrza atmosferycznego i CO_2 oraz czystego CO_2 . Udział CO_2 w objętości gazu był następujący: etap pierwszy – 4%, etap drugi 14%, etap trzeci 40% i w ostatnim czwartym 100%. Każdy etap rozpoczynał się od wpracowania reaktora, po którym proces usuwania CO_2 stał się stabilny. Ten czas wynosił on od 7 do 10 dni.

W pierwszym etapie dozowano gaz w ilości 0,279 Nm^3/d . W czasie 40 dni trwania eksperymentu, oczyszczony gaz zawierał w swojej objętości średnio 2% CO_2 . Stwierdzono, że pożywka sporządzana według receptury i wymieniana co 1 tydzień, zawierała zawiesinę w postaci glonów odpływających z powierzchni wypełnienia. Szczególnie w dwóch pierwszych tygodniach badań zawierała ona duże ilości glonów wolnoptywających *Chlorella vulgaris*. Natomiast po 40 dobach badań zauważono szybkie tworzenie się biofilmu z glonów na wewnętrznych ściankach obudowy reaktora, zarówno na części zanurzonej w cieczy jak i później na części wynurzonej. Zjawisko to utrudniło dotarcie światła do powierzchni znajdujących się bliżej środka reaktora. Z tego powodu

po 10 następnym dobach gaz oczyszczony miał w swojej objętości większe ilości CO₂ – do 3–3,5% CO₂. Należy zaznaczyć, że w czasie eksperymentu z powierzchni wypełnień nie usuwano powstającej biomasy. Wykonano tę czynność dopiero po zakończeniu badań i wtedy stwierdzono, że dolne powierzchnie wypełnień nie były pokryte biomasą, jedynie powstała ona na niewielkiej dolnej powierzchni przy króćcach przelewowych.

W czasie drugiego etapu dozowano gaz w ilości 0,079 Nm³/d. W okresie 35 dni, który nazwano czasem stabilnego procesu oczyszczania gazu, oczyszczony gaz na wylocie z reaktora zawierał 5% CO₂ w objętości gazu. Po tym czasie zauważono również szybkie zarastanie powierzchni wewnętrznych obudowy reaktora. Towarzyszył temu wzrost CO₂ w gazie oczyszczonym i po tygodniu oczyszczony gaz swojej objętości zawierał 5% do 8% CO₂. Po tym czasie wyjęto wypełnienie z obudowy reaktora i zauważono, że i w tym eksperymencie na dolnej powierzchni wypełnienia nie wytworzyła się warstwa glonów, z wyjątkiem dolnej powierzchni przy króćcach przelewowych. Na podstawie badań mikroskopowych próbek biomasy pobranej z powierzchni wypełnienia, stwierdzono zwiększoną ilość sinic.

W etapie trzecim zmniejszono ilości gazu do 0,028 Nm³/d. Czas stabilnego procesu oczyszczania gazu trwał przez 40 dni i gaz oczyszczony zawierał w swojej objętości 5% CO₂. Po tym okresie, podobnie jak w poprzednich etapach badań, na ściankach bocznych reaktora pojawiało się coraz więcej biomasy. Procentowy udział CO₂ w gazie zwiększał się, ale nie było to gwałtowne zjawisko i trwało przez 15 dni. Na wypełnieniu powstała grubsza warstwa biomasy z dużym udziałem sinic. Na dolnej powierzchni wypełnienia nie wytworzyła się warstwa glonów i sinic, z wyjątkiem dolnej powierzchni przy króćcach przelewowych.

W ostatnim czwartym etapie dozowano gaz w ilości 0,011 Nm³/d. Czas wpracowania reaktora był dłuższy, ponieważ w tym okresie wprowadzano co 4 doby gaz, zawierający w swojej objętości coraz większe ilości CO₂ i udział ten wynosił 40%, 60%, 80%, 100%. Czas stabilnego procesu pojawił się po 25 dobach. Osiągnięto bardzo wysoką sprawność usuwania CO₂. Na wylocie gaz oczyszczony zawierał w swojej objętości od 2 do 5% CO₂. Po 40 dobach zwiększono trzykrotnie koncentrację substratów w przygotowywanej pożywce i uzyskano na wylocie jeszcze mniejsze ilości CO₂ i przez 2 tygodnie zanotowano wartości w wysokości 0,5% do 1%. Po zakończeniu procesu oczyszczania gazu stwierdzono, że na górnych powierzchniach wypełnienia powstała gruba warstwa biomasy, która sięgała górnej krawędzi króćca przelewowego. W tym etapie pojawiła się na dolnych powierzchniach wypełnienia bardzo cienka warstwa biomasy, na którą składały się zarówno glony jak i sinice.

Badania z Reaktorem 2 przeprowadzono w Oczyszczalni ścieków Łyna w Olsztynie. Stanowisko badawcze umieszczono w budynku z agregatorami prądotwórczymi, zasilanych biogazem z komory fermentacyjnej.

Badania trwały 3 miesiące. Gazy spalinowe z agregatu prądotwórczego doprowadzono do instalacji przewodem o średnicy 10 mm. Gaz płynąc przewodem ulegał schłodzeniu i jego temperatura wynosiła 35°C. Natomiast temperatura gazu odprowadzanego z Reaktora 2 wynosiła 25°C i była zbliżona do temperatury dozowanej pożywki. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w gazach spalinowych odprowadzanych z generatora prądotwórczego nie zmieniała się zawartość CO₂. W ciągu trzech miesięcy pobrane próbki gazów spalinowych w swojej objętości zawierały 14% CO₂. Parametrem, którego wartości zmieniano w czasie badań, była ilość dozowanych gazów spalinowych. Badania rozpoczęto od przepływu 0,093 Nm³/d – etap 1. Po 30 dobach zwiększono ilości gazów do 0,186 Nm³/d – etap 2. Następnie po 20 dobach zwiększono przepływ do 0,371 Nm³/d – etap 3 i po 20 dobach zwiększono do wartości 0,650 Nm³/d – etap 4. Pożywką były ścieki sklarowane



Fot. 3. Pionowo ułożone płytki z przytwierdzoną biomasą glonową
Fig. 3. Vertically arranged plates with attached algal biomass

w osadniku wstępnym miejskiej oczyszczalni ścieków. Powierzchnie wypełnień były oczyszczane z nadmiernej biomasy co tydzień oraz w takim samym odstępie czasu wymieniano ścieki. Należy podkreślić, że w przeciwieństwie do Reaktora 1, przy zmianie parametrów procesu oczyszczania gazów nie wyłączano instalacji, dotyczy to również momentu zwiększania ilości dopływających gazów. W czasie badań wykazano, że zastosowany autorski sposób przytwierdzenia biomasy do pionowych płytek wypełnienia spowodował, że Reaktor 2 wpracowano po 4 dobach (fot. 3).

Ponadto stwierdzono, że każdy wzrost ilości dozowanych gazów spalinowych, powodował wzrost ilości CO₂ w odpływie. Udział objętościowy CO₂ w gazach odprowadzanych z Reaktora 2 kształtował się w sposób następujący: 0,5–1,0% w etapie 1; 1,9–2,2% w etapie 2; 2,5–3,2% w etapie 3 i 5,5–7,0 w etapie 4. Biomasa przytwierdzona była do powierzchni wszystkich płytek. Jednak w czasie eksperymentu zauważono, że większe ilości biomasy tworzyły się na dwóch górnych wypełnieniach, a także na krawędziach płytek, znajdujących się przy ściankach zbiorników, które były oświetlone przez świetlówki. Nawet stałe czyszczenie wewnętrznych powierzchni tych ścianek nie zlikwidowało tego zjawiska. Ponieważ systematycznie wymieniano ścieki jako pożywkę, to nie stwierdzono w nich znaczących zmian wartości odczynu.

5. Propozycja techniczno-technologiczna dla modułowego bioreaktora

Określono zasady funkcjonowania bioreaktora z przytwierdzoną do wypełnienia biomasą, składającą się z glonów i sinic w miejskiej oczyszczalni ścieków, która posiada zamknięte komory fermentacyjne i wytworzony gaz spalany jest w generatorach prądotwórczych. Na podstawie własnych prac studialnych autorzy zaproponowali następujące podstawowe parametry dla reaktora z glonami.

Jest to urządzenie wielosekcyjne. Objętość CO₂ w gazach odprowadzanych z bioreaktora jest o 80% mniejsza, w stosunku do gazów odprowadzanych z generatorów prądotwórczych. Jednostkowa objętość reaktora, w stosunku do ilości wprowadzanych gazów spalinowych w ciągu doby, wynosi 0,06 m³ obj. reaktora/m³ gazu/d, naświetlanie diodami led o jednostkowej zainstalowanej mocy, w stosunku do objętości reaktora, wynosi 0,2 kW/m³ obj. reaktora.

W założeniach przyjęto, że w oczyszczalni wytwarza się w ciągu doby 6500 m³ biogazu, który zasila generatory prądowłórcze. Generatory wytwarzają 595,8 kWh_e energii elektrycznej, jednocześnie emitują gaz spalinowy i w nich 7453 kg CO₂/d. Przyjęto również, że zatrzymany w reaktorze CO₂ zostanie wbudowany w biomasę glonową, a powstała biomasa glonowa wykorzystana jest do dodatkowej produkcji biogazu, który zostanie skierowany do generatorów prądowłórczych. Zaproponowany układ technologiczny będzie generował dodatkowe ilości biogazu, a po spalaniu w reaktorach powstaną również dodatkowe ilości CO₂, z którego należy wytworzyć dodatkową biomasę glonową. Przy takim założeniu określono, że całkowita ilość biogazu wyniesie 8430 m³/d, i wytworzy się w ciągu doby 9670 kg CO₂, ale do atmosfery wyemituje się tylko 1934 kg CO₂/d. W tym celu należy wybudować reaktor o objętości 510 m³, a moc zainstalowanych diod led osiągnie wartość 102 kW. Energia elektryczna będzie ponadto zużywana przez pompy dostarczające ścieki do zraszaczy, przez urządzenia do zagęszczania wytworzonej biomasy glonowej. Moc tych urządzeń może osiągnąć wartość 18 kW. Natomiast nowy układ technologiczny z reaktorem glonowym pozwoli wytworzyć energię elektryczną w wysokości 772 kWh. Oznacza to, że instalując reaktor do usuwania glonów uzyska się dodatkowo niewielką nadwyżkę energii elektrycznej, ale jednocześnie uzyska się znaczące obniżenie wielkości emisji CO₂ do atmosfery. Odzyska się także substancje biogenne, które zostaną wbudowane w biomasę glonów.

Inny układ technologiczny można zastosować w rolniczej biogazowni, w którym nie wytwarza się dodatkowej ilości biogazu i w ten sposób nie emituje się do atmosfery dodatkowych ilości CO₂. Polega to na tym, że powstałą biomasę glonową należy wprowadzić do komór fermentacyjnych, ale jednocześnie o taką samą ilość zostanie zmniejszona biomasa roślinna. Na przykład w biogazowni wytwarzającej 6500 m³/d biogazu, w reaktorze glonowym w ciągu doby zatrzyma się 5962 kg CO₂ i z tej ilości powstanie 2980 kg sm. biomasy glonowej. O taką wartość zmniejszy się ilość biomasy roślinnej, która dozowana jest komór fermentacyjnych biogazowni rolniczej.

6. Podsumowanie

Wybór technologii i urządzeń do usuwania zanieczyszczeń w znaczącym stopniu zależy od ilości zanieczyszczeń i ich koncentracji. Można to zagadnienie rozpatrywać na przykładzie aglomeracji miejskich, w których powstają znaczące ilości ścieków. Obecnie ich oczyszczanie oparte jest przede wszystkim na biologicznej metodzie osadu czynnego i trudno zastosować inną technologię. To porównanie należy odnieść do problemu usuwania i zagospodarowania dwutlenku węgla. Oznacza to, że jedynym rozwiązaniem dla bardzo dużych emisji są metody wykorzystujące biologiczne procesy. W takie założenia wpisują się metody wykorzystujące glony i sinice do usuwania dwutlenku węgla. Niestety nie są one stosowane, ponieważ wykorzystując technologie oparte przede wszystkim na procesach hodowli glonów w warunkach zbliżonych do naturalnych należy przeznaczyć wyjątkowo duże powierzchnie terenu pod zbiorniki. Według autorów należy zastosować bardziej efektywne urządzenia i w tym celu podjęto próby skonstruowania takich urządzeń, w których zapewnienie odpowiednich warunków dla glonów i sinic stanowi zadanie priorytetowe.

Na podstawie przeprowadzonych badań, a także innych własnych eksperymentów oraz na podstawie danych literaturowych, określono najistotniejsze czynniki, mające wpływ na sprawność procesu usuwania CO₂ z gazów spalinowych z generatorów prądowłórczych zasilanych biogazem. Spostrzeżenia dotyczą również procesu usuwania CO₂ z gazów spalinowych, powstających w ciepłowniach opalanych węglem kamiennym, ponieważ prowadzone są badania w miejskiej ciepłowni w Olsztynie i już wykazały, że efekty usuwania CO₂ są zbliżone do zaprezentowanych wyników badań w oczyszczalni ścieków.

Najistotniejsze wnioski to:

- w reaktorach z wypełnieniem na powierzchni którego przytwierdzone są glony i sinice, usuwa się z gazów spalinowych dwutlenek węgla, który zostaje wbudowany w biomasę,
- po właściwym wpracowaniu reaktora, można oczyszczać gaz zawierający dwutlenek węgla w swojej objętości w ilości od 4% do 100%,
- wykazano, że sprawność reaktorów z wypełnieniem jest wyższa, jeżeli wprowadza się gaz zawierający większą ilość dwutlenku węgla, a jednocześnie ilość gazu jest mniejsza, co oznacza, że w przyszłości powinno stosować się wstępne zagęszczanie dwutlenku węgla,
- jako pożywkę można zastosować ścieki miejskie, sklarowane w osadniku wstępnym i zaleca się cyklicznie dozowanie pożywki,
- należy zapewnić glonom i sinicom przytwierdzonym do powierzchni odpowiednią ilość światła, zwracając uwagę na fakt, że niewykorzystana przez glony i sinice energia świetlna powoduje w skali technicznej znaczący wzrost kosztów eksploatacyjnych.
- konstrukcja reaktora powinna umożliwić systematyczne usuwanie powstającej biomasy, aby nie pojawiło się zjawisko wtórne wprowadzania CO₂ do oczyszczanych gazów,
- zaleca się stosowanie reaktorów wielosekcyjnych.

LITERATURA

- [1] Cheng P., Ji B., Gao L., Zhang W., Wang J., Liu T. 2013. "The growth, lipid and hydrocarbon production of *Butyrococcus braunii* with attached cultivation". *Bioresour. Technol.* 138:95–100.
- [2] Cheng P., Wang J., Liu T. 2014. "Effects of nitrogen source and nitrogen supply model on the growth and hydrocarbon accumulation of immobilized biofilm cultivation of *B. braunii*". *Bioresour. Technol.* 166:527–533.
- [3] Cheng P., Wang Y., Liu T., Liu D. 2017. "Biofilm attached cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* is a developed system for swine wastewater treatment and lipid production". *Frontiers in Plant Science*, vol. 8.
- [4] Dubiński J., Wachowicz J., Koterka A. 2010. „Podziemne składowanie węgla – możliwości wykorzystania technologii CCS w polskich uwarunkowaniach”. *Górnictwo i Geologia*. Główny Instytut Górnictwa. Katowice. Tom 5, Zeszyt 1.
- [5] Kapuścińska E. 2017. „Wpływ warunków koagulacji na cechy morfologiczne agregatów organizmów fitoplanktonowych”. Rozprawa doktorska. Politechnika Częstochowska.
- [6] Khan S.A., Rashmi, Hussain M.Z., Prasad S. Banerjee U.C. 2009. „Prospects of biodiesel production from microalgae in India”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13:2361–2372.
- [7] Krzemieniewski M., Dębowski M., Zieliński M. „Glony jako alternatywa dla lądowych roślin energetycznych”. *Czysta energia*, Olsztyn 2009, tom 9.
- [8] Krzemieniewski M., Zieliński M., Dębowski M., Patent nr 229374.
- [9] Larsson M., Lindblom J. 2011. "Algal flue gas sequestration and wastewater treatment: an industrial experiment". Praca naukowa, Sztokholm. Szwecja.
- [10] Liu T., Wang J., Hu Q., Cheng P., Ji B., Liu J., Chen Z., Yhang W., Chen X., Chen L., Gao L., Ji Ch., Wang H. 2013. "Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production". *Bioresour. Technol.*, vol. 127, 216–222.
- [11] Maliga M., Składzień J., Szymków J. 2010. „Sekwestracja ditlenku węgla przez mikroalgi”. *Inżynieria i aparatura chemiczna* 49,4, 46–47.
- [12] Oswald W.J. 1995. "Ponds in the twenty-first century". *Water Science and Technology*. vol.31, 1–8.
- [13] Patent US. 1982/ 4333263. 1982. "Algal Turf Scrubber".
- [14] Patent US. 2009/0230040 A1. "Algae wheel Patent US".
- [15] Roger A. 2020. "A proposed method for estimating global warming potential (GWP*) of short-lived climate pollutants like methane". *Cady Global Dairy Platform*.
- [16] Rwe's algae project in Bergheim-Niederaussem. "Production of microalgae using power plant flue gases to bind CO₂". Nungambakkam High Road 41.
- [17] Thomas D.M., Mechery J., Sytas V.P. 2016. "Carbon dioxide capture strategies from flue gas using microalgae". *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 16926–16940.
- [18] Torzillo G., Zittelli G.Ch. 2017. "Tubular Photobioreactors". *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts* 187–212.
- [19] https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/biotechnology_pl
- [20] <https://www.opb.org/article/2020/10/16/portland-general-electric-coal-boardman-power-plant/>
- [21] www.ccap.ac.uk