ORIGINAL ARTICLE

Biofixation of Carbon Dioxide from Kerosene Combustion and Biomass Production by Spirulina

Ramasanali Dianati Tilaki[1],
Morteza Jafarsalehi[2],
Alireza Movahedi[3]

[1] Associate Professor, Department of Environmental Health, Faculty of Health, Mazandaran University Medical Sciences, Sari, Iran
[2] MSc in Environmental Health, Chalous Taleghani Hospital, Mazandaran University Medical Sciences, Chalous, Iran
[3] MSc in Environmental Engineering, Mazandaran University Medical Sciences, Sari, Iran

(Received September 17, 2018 ; Accepted March 6, 2019)

Abstract

Background and purpose: CO_2 is the main cause of greenhouse effect. Previous studies have shown that CO_2 in methane and coal flue gas can lead to microalgae growth. The aim of this research was to study the CO_2 biofixation by Spirulina and injecting kerosene flue gas.

Materials and methods: A photo bioreactor was fabricated in which kerosene flue gas and air were separately injected. The photo bioreactor was filled by growth medium without carbon source. Light source was four fluorescent lamps (10 Klux intensity) operated in continuous and intermittent modes. The concentration of CO_2 was chosen in the range of 580 to 6000 ppm that was measured by NDIR CO_2 detector. The initial concentration of algae was 20 mgL^{-1}. The algal biomass production was measured during the experiment.

Results: The maximum production of algae by air and kerosene flue gas containing 5500 ppm CO_2 using artificial intermittent light was 0.07 and 0.41 gL^{-1} d^{-1} and maximum concentrations of biomass were 0.25 and 1.63 gL^{-1}, respectively. CO_2 biofixation rates were between 2.27% and 4.03% at different runs. Biomass productivity with intermittent light was 15% less than continuous light and it reached 1.91 gL^{-1} with 5500 ppm CO_2 using continuous light.

Conclusion: In this study, the ability of a photo bioreactor was confirmed in the removal of CO_2. Also, increase in CO_2 contributes to increase in biomass production.

Keywords: Carbon dioxide, spirulina microalgae, flue gas, biomass, kerosene, photobioreactor

J Mazandaran Univ Med Sci 2019; 29 (172): 67-79 (Persian).

* **Corresponding Author: Morteza Jafarsalehi -** Chalous Taleghani Hospital, Chalous, Iran
(E-mail: Salehi_env@yahoo.com)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره بیست و نهم شماره ۱۷۲ اردیبهشت سال ۱۳۹۸ (۷۹-۶۷)

تثبیت زیستی دی اکسیدکربن حاصل از احتراق نفت سفید و تولید همزمان زیست توده توسط ریزجلبک اسپیرولینا

رمضانعلی دیانتی تیلکی[۱]
مرتضی جعفرصالحی[۲]
علیرضا موحدی[۳]

چکیده

سابقه و هدف: دی‌اکسیدکربن عامل اصلی اثر گلخانه‌ای است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف گاز طبیعی و زغال‌سنگ موجب رشد ریزجلبک‌ها می‌شود. در این مطالعه به تعیین میزان حذف دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق نفت سفید پرداخته شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش‌ها با ساخت فتوبیوراکتور و تزریق هوا و گاز احتراق به‌صورت جداگانه به محیط کشت فاقد منبع کربن، انجام شد. جریان گاز عبوری (از راکتور) ۱/۵ لیتر بر دقیقه بود. منبع نور با چهار عدد لامپ فلورسنت با شدت روشنایی ۱۰ کیلولوکس در دو حالت دائم و متناوب تامین شد. غلظت دی‌اکسیدکربن ورودی به راکتور در محدوده ۵۸۰ تا ۶۰۰۰ قسمت در میلیون انتخاب و به روش NDIR اندازه‌گیری شد. غلظت اولیه جلبک ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بود. میزان تولید زیست توده در مراحل مختلف آزمایش اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: میزان تولید جلبک با دی‌اکسیدکربن هوا و احتراق نفت سفید حاوی ۵۵۰۰ قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن پس از ۸ روزبا تابش نور متناوب به‌ترتیب به ۰/۰۷ و ۰/۴۱ گرم در لیتر در روز و غلظت زیست توده به‌ترتیب به ۰/۲۵ و ۱/۶۳ گرم در لیتر رسید. فاکتور تثبیت دی‌اکسیدکربن در غلظت ۵۸۰ تا ۵۵۰۰ قسمت در میلیون با تابش نور متناوب در دامنه ۲/۲۷ تا ۴/۰۳ درصد ثبت شد. غلظت زیست توده در نور متناوب نسبت به نور دائم ۱۵ درصد کمتر بود و در غلظت دی‌اکسیدکربن ۵۵۰۰ قسمت در میلیون و نور دائم به ۱/۹۱ گرم در لیتر رسید.

استنتاج: در این مطالعه توانایی فتوبیوراکتور در حذف دی‌اکسیدکربن تایید شد. هم چنین افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز احتراق، در افزایش تولید زیست توده نقش دارد.

واژه های کلیدی: دی‌اکسیدکربن، ریزجلبک اسپیرولینا، زیست توده، گاز احتراق، نفت سفید، فتوبیوراکتور

مقدمه

با افزایش غلظت گازهای آلاینده به ویژه دی‌اکسیدکربن در اتمسفر تعادل اثر گلخانه‌ای به هم خورده است و موجب گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی شده است. غلظت دی‌اکسیدکربن که قبل از انقلاب صنعتی ۲۸۰ قسمت در میلیون بود در سال۲۰۱۷ به بیش از ۴۰۷ قسمت در میلیون رسید و پیش‌بینی می‌شود

مولف مسئول: مرتضی جعفر صالحی- چالوس: بیمارستان آیت الله طالقانی چالوس E-mail: Salehi_env@yahoo.com
۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت ، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، بیمارستان آیت الله طالقانی چالوس، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، چالوس، ایران
۳. کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
تاریخ دریافت : ۱۳۹۷/۶/۲۶ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات :۱۳۹۷/۶/۲۶ تاریخ تصویب : ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

در سال ۲۱۰۰ به ۵۷۰ قسمت در میلیون برسد که موجب افزایش دمای سطح کره زمین به میزان ۱/۹ درجه سانتی‌گراد می‌شود و باعث ذوب شدن یخچال‌ها و بالارفتن سطح آب دریاها به‌میزان ۳/۸ متر خواهد شد. این تغییرات موجب انقراض برخی گونه‌های حیوانی و گیاهی، تغییر الگوی بارش، کاهش صنعت گردشگری و کاهش تولیدات کشاورزی خواهد شد. از دیگر پیامدهای گرمایش جهانی می‌توان به اثرات بر سلامت انسان نظیر افزایش بیماری‌های گرمسیری، افزایش ازن در تروپوسفر، بروز بیماری‌های مرتبط با کمبود و یا آلودگی آب، سوءتغذیه، آلودگی هوا و افزایش گرد و غبار اشاره کرد(۱).

احتراق سوخت‌های فسیلی، بیش‌ترین سهم را در انتشار دی‌اکسیدکربن دارند. با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در اتمسفر تمایل به جذب زیستی توسط ریزجلبک‌ها افزایش یافته است(۲). با وجود توسعه شبکه گازرسانی ۶۰۰ شهر در کشور وجود دارند که به‌سبب محدودیت‌های عملیاتی تاکنون گازرسانی به آنجا فراهم نشده و نفت سفید اصلی‌ترین منبع انرژی در بخش خانوار است. علاوه بر آن به‌دلیل ناهماهنگی در عرضه و تقاضای گازطبیعی، بسیاری از مناطق کشور با وجود بهره‌مندی از گاز، در زمان بروز سرمای شدید برای گرمایش از نفت سفید استفاده می‌کنند(۳). فاکتور انتشار دی‌اکسیدکربن در اثر احتراق نفت‌سفید ۲۵۷۷ گرم بر لیتر می باشد(۴). هر چندتاکنون روش اقتصادی برای جذب دی‌اکسیدکربن شناخته نشده است، روش‌های موجود انرژی زیادی مصرف می‌کنند و یا در مقیاس بزرگ مقرون به‌صرفه نیستند. جذب دی‌اکسیدکربن در زمین روشی قابل انجام برای حجم‌های زیاد این گاز است. تزریق دی‌اکسیدکربن در مخازن نفتی موجب کاهش ویسکوزیته و سهولت استخراج آن می‌شود اما پایش منظم سیستم به‌منظور جلوگیری از نشت مخازن هزینه‌های زیادی در بردارد. برای جذب در زمین ابتدا باید دی‌اکسیدکربن از گاز احتراق جداسازی شود.

هزینه جداسازی هر تن دی‌اکسیدکربن ازگاز احتراق در سال ۲۰۱۱، ۲۰ تا۳۰ یورو بود. در صورتی که انتقال هر تن دی‌اکسیدکربن تا محل ذخیره‌سازی در همان سال، ۱/۵ تا ۵/۴ یورو به ازای هر ۱۸۰ کیلومتر، هزینه داشت. هزینه ذخیره‌سازی نیز در سال ۲۰۱۴، طبق گزارش وزارت انرژی آمریکا ۷ تا ۱۳ دلار به ازای هر تن بود. یکی از مزایای تثبیت بیولوژیکی، تزریق مستقیم گازهای منتشر شده در نیروگاه‌ها برای تولید زیست توده است(۵). سایر روش‌های فیزیکوشیمیایی جذب دی‌اکسیدکربن از گاز احتراق شامل جذب به وسیله محلول جاذب، جذب سطحی، روش‌های غشائی، پمپ‌های الکتروشیمیائی، تقطیر برودتی و احتراق با استفاده از اکسیدهای فلزی می‌باشند(۶). یکی از معایب جذب دی‌اکسیدکربن بر روی مواد جاذب سطحی، تخریب شدن آن‌ها بر اثر تماس با اکسیدهای گوگرد و ازت است. در صورت تزریق گاز احتراق در مخازن طبیعی نیز خطر انتشار دوباره و نشت به جو وجود دارد(۷). روش دیگر، جذب مصرف دی‌اکسیدکربن در صنایع است اما هم اکنون تنها ۲ درصد از دی‌اکسیدکربن منتشر شده در آمریکا در صنایع مصرف می‌شود. در سال‌های اخیر به‌جذب دی‌اکسیدکربن توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلف با ریزجلبک‌ها توجه ویژه‌ای شده است(۵).

سرعت فتوسنتز ریز جلبک‌ها ۱۰تا ۵۰ برابر گیاهان خشکی است(۹،۸). ریزجلبک‌ها با امکان تکثیر در فضای گلخانه‌ای نه تنها به آب شیرین نیاز ندارند بلکه می‌توانند با فاضلاب شهری تصفیه شده به خوبی تکثیر شوند. ۵۰ درصد وزن ریز جلبک از کربن تشکیل شده است و بنابراین رشد یک کیلوگرم جلبک معادل جذب ۱/۸ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن است در نتیجه می‌توان از یک سیستم زیستی کوچک برای جذب حجم زیادی از دی‌اکسیدکربن هوا استفاده کرد. در حالی که کارایی گیاهان در حذف این گاز ۳ تا ۶ درصد است(۱۰). اسپیرولینا گونه‌ای از جلبک‌های سبزآبی و از خانواده اسیلاتوریا است. طول آن به ۵۰ تا ۳۰۰ میکرون و عرض

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

آن حدود ۱۰ میکرون است. این ریزجلبک توانایی رشد در گستره وسیعی با غلظت دی‌اکسیدکربن از ۳۸۰ قسمت در میلیون در هوا تا ۱۲۰ هزار قسمت در میلیون در گاز احتراق را دارد(۱۱). سرعت تولید زیست توده اسپیرولینا در طیف۰/۳۳ تا ۰/۹۲ گرم در لیتر در روز می باشد(۱۲). این ریز جلبک به علت این که حاوی مقادیر بیش‌تری از پروتئین، بتاکاروتن و امگاتری و هم‌چنین مقادیری اسیدهای چرب است از ارزش تغذیه‌ای بالایی به ویژه برای حیوانات و هم‌چنین سفرهای فضایی برخوردار است. از این رو در بسیاری از کشورهای گرمسیری و مناطق معتدله به منظور تغذیه انسان و حیوانات به صورت تجاری کشت داده شده است. این ریزجلبک به علت دارابودن ترکیبات آنتی‌اکسیدان در درمان ضد سرطان و ارتقای سیستم ایمنی کاربرد دارد. علاوه بر این توانایی بالایی در تثبیب ازت و امکان رشد در آب‌های شور و قلیایی را نیز دارد(۱۳). در بررسی‌های گذشته، محققین مختلفی حذف زیستی دی‌اکسیدکربن را مورد بررسی قرار داده‌اند. Zhao و همکاران رشد سه گونه ریز جلبک کلرلا، ایزوکرایسیس و آمفیدینیوم کارترا را تحت تاثیر گاز احتراق شبیه‌سازی شده حاوی ۱۵۰ هزار قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن و هم‌چنین دی‌اکسیدکربن خالص مقایسه کردند. در این غلظت بالا از دی‌اکسیدکربن، میزان تولید جلبک با تزریق گاز احتراق به‌علت وجود ترکیبات بازدارنده رشد ریزجلبک‌ها کم‌تر از تزریق با دی‌اکسیدکربن خالص بود(۱۴). رابطه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از احتراق زغال‌سنگ و تولید زیست توده توسط ریزجلبک کلرلاسندسموس توسط Guruvaiah و Lee بررسی شد(۱۵). در مطالعات Chiu و همکاران از گاز احتراق کک درکوره فولادسازی برای تولید زیست توده و حذف دی‌اکسیدکربن استفاده شد(۱۶). تثبیت دی‌کسیدکربن حاصل از احتراق گاز طبیعی با ریزجلبک‌های کلرلا، سینکوسیستیس وتتراسلمیس توسط Tang و همکاران مطالعه شد(۱۰).

دیانتی و همکاران اثر گاز حاصل از احتراق گاز طبیعی را بر رشد ریز جلبک اسپیرولینا بررسی کردند. در این مطالعه مشخص شد گاز احتراق اثر سوئی بر رشد ریزجلبک ندارد(۱۷). اثر گاز حاصل از احتراق نفت سفید بر رشد ریزجلبک یوگلنا گراسیلیس در فتوبیوراکتور توسط Chae و همکاران در غلظت ۱۱۰ هزار قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن، ۲۶ قسمت در میلیون اکسیدهای ازت و ۵ قسمت در میلیون اکسیدهای گوگرد و۱۲۶ قسمت در میلیون ذرات معلق بررسی شد. نتایج، حاکی از رشد خوب جلبک با این میزان دی‌اکسیدکربن و مواد آلاینده بود(۱۸). با توجه به ماهیت وجود اکسیدهای ازت و گوگرد در گاز احتراق، این آلاینده‌ها می‌توانند به عنوان ماده مغذی در رشد جلبک استفاده شوند. تاکنون مطالعات اندکی درباره جذب کربن حاصل از احتراق نفت سفید به‌وسیله ریزجلبک‌ها صورت گرفته است نوآوری مطالعه حاضر در آن است که به‌جای استفاده از گاز شبیه‌سازی شده، مستقیما از گاز احتراق و بدون پیش‌تصفیه برای تولید جلبک استفاده شد(۱۹،۱۶،۳). در مطالعه حاضر با توجه به خطرات گازهای گلخانه‌ای و مصرف نفت سفید در کشور به بررسی میزان تولید زیست توده و تعیین اثر متغیرهایی نظیر غلظت دی‌اکسیدکربن، اثر منبع نور و زمان تماس بر میزان رشد جلبک پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر به روش تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. بذر ریزجلبک اسپیرولینا از پژوهشکده اکولوژی شیلات دریای خزر در شهر ساری تهیه شد. آزمایش‌ها در بهار و تابستان ۱۳۹۵ و به مدت شش ماه صورت گرفت. از محیط کشت مصنوعی زاروک(Zarrouk) مطابق جدول شماره ۱ برای تکثیر ریزجلبک اسپیرولینا استفاده شد.

از یک ارلن یک لیتری برای نگهداری جلبک ذخیره استفاده شد. ارلن در فاصله ۲ سانتی‌متر از لامپ

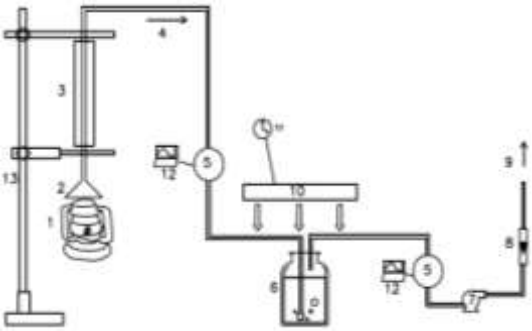
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

فلورسنت کم مصرف سفید (۶۰ وات نمانور) در دمای ۲۵درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شد. محتویات ارلن ذخیره ریزجلبک هفته‌ای یک بار تخلیه و مجددا تکثیر جلبک صورت می‌گرفت. دی‌اکسیدکربن لازم برای تثبیت جلبک در راکتور کنترل از هوا و در راکتورهای آزمایش از احتراق نفت سفید تامین می‌شد. هرمرحله آزمایش حداکثر ۹ روز به‌طول می‌انجامید. با شکوفایی جلبک و شروع فاز رشد ثابت، هر مرحله آزمایش به پایان می‌رسید. پایلوت استفاده شده در مطالعه از جنس طلق شفاف با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، حجم ناخالص ۵/۶ لیتر و حجم مفید ۳ لیتر بود. مخزن به شکل مکعب مستطیل با عرض ۱۵، طول ۱۵ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر بود. با افزودن ۲۰میلی‌لیتر از جلبک موجود در فتوبیوراکتور ذخیره به هر لیتر محیط کشت جدید، غلظت جلبک در آغاز کشت ۲۰میلی‌گرم بر لیتر تنظیم می‌شد(۲۰). با استفاده از پمپ مکش هوا، گاز حاصله از احتراق نفت سفید در فانوس پس از عبور از یک خنک‌کن که با آب شیر خنک می‌شد بدون عبور از محیط قلیایی مستقیما به‌داخل راکتور حاوی محیط کشت بدون بی‌کربنات سدیم تزریق می‌شد(۱۷). در فتوبیوراکتور با عبور هوا یا گاز احتراق از یک دیفیوزر (سنگ هوای آکواریومی) و با تشکیل حباب، دی‌اکسیدکربن در تماس با محیط کشت قرار می‌گرفت. در تصویر شماره ۱ پایلوت فتوبیوراکتور و در تصویر شماره ۲ طرح واره اجزای به کار رفته در مطالعه حاضر نشان داده شده است.

جدول شماره ۱: ترکیب ماکروالمنت در محیط کشت زاروک (۲۰)

نام ماده شیمیایی	غلظت(گرم در لیتر)
$Ca(HCO_3)_2$	۱۳/۶۱
$NaNO_3$	۲/۵
K_2HPO_4	۰/۵
K_2SO_4	۱
NaCl	۱
$MgSO_4.7H_2O$	۰/۲
$CaCl_2.2H_2O$	۰/۰۸
$FeSO_4$	۰/۰۱
EDTA	۰/۰۸

تصویر شماره ۱: ریزجلبک تولید شده در فتوبیوراکتور (راست) و قیف جمع‌آوری گاز حاصل از احتراق نفت سفید (چپ).

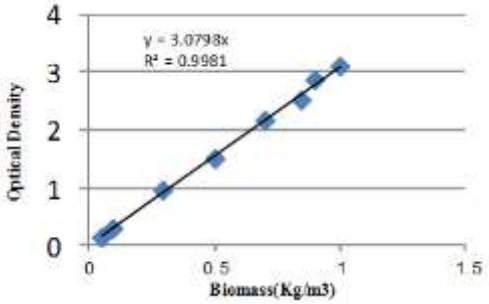


تصویر شماره ۲: طرح واره دستگاه‌های مورد استفاده در سیستم فتوبیوراکتور:
۱) فانوس نفت سوز ۲) قیف فلزی ۳) کندانسور ۴) لوله انتقال گاز احتراق ۵) آنالیزر دی اکسیدکربن ۶) فتوبیوراکتور ۷) پمپ مکنده ۸) اندازه‌گیری جریان گاز ۹) مسیر خروج گاز ۱۰) لامپ فلورسنت ۱۱) تایمر ۱۲) کامپیوتر ۱۳) پایه فلزی

در این آزمایش از منبع نور مصنوعی برای تامین روشنایی استفاده شد. منبع نور از چهار عدد لامپ فلورسنت کم‌مصرف سفید (۳۵ وات نما نور) استفاده شد که بر روی پایه چوبی در چهار طرف راکتور ثابت شدند و مساحت جانبی راکتور در معرض نور برابر با ۰/۱۸ مترمربع بود. تابش نور به دو صورت پیوسته و متناوب (۱۴ ساعت روشن و ۱۰ ساعت خاموش) بود که به‌وسیله تایمر آنالوگ تنظیم می‌شد. شدت روشنایی در سطح خارجی فتوبیوراکتور بر اساس تجربیات آزمایشگاهی و مطالعات قبلی ۱۰کیلولوکس (معادل با ۱۲۰ میکرومول فوتون در مترمربع در ثانیه) تنظیم

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

شد(۲۱). شدت روشنایی به‌وسیله نورسنج تی ای اس ۱۳۳۵ (TES, 1335) اندازه‌گیری می‌شد. دمای راکتور روی ۲۷ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. برای مقابله با کاهش دمای راکتور از پوشش نایلونی شفاف استفاده شد. pH اولیه محیط کشت به وسیله محلول یک مولار هیدروکسید سدیم برای ایجاد شرایط رشد بهینه ریزجلبک اسپیرولینا ۹ تا ۹/۵ تنظیم می‌شد(۲۳-۲۱). جریان گاز ورودی به راکتور براساس تجربیات آزمایشگاهی برای اختلاط مناسب در محیط کشت، به‌ازای هر لیتر از حجم مفید محیط‌کشت ۰/۵ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. از کمپرسور آزمایشگاهی با توان مفید ۰/۴ وات برای تزریق گاز و اختلاط راکتور استفاده شد(۲۴). حجم هوای عبور داده شده به‌وسیله جریان سنج ویزیت جی ۱/۶ (WIZIT, G1.6) اندازه‌گیری و کنترل شده بود. برای ایجاد تهویه در راکتور از شیر گازی با قطر داخلی۶ میلی‌متر استفاده شد (مطابق تصویر شماره ۱). غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز احتراق به‌وسیله آنالیزر CO_2 تی ای اس ۱۳۷۰ (TES, ۱۳۷۰) به روش قرائت مستقیم و با اتصال به کامپیوتر هر دو ثانیه ثبت می‌شد. غلظت دی‌اکسیدکربن ورودی به‌راکتور با توجه به محدوده قابل اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه، کم‌تر از ۶۰۰۰ قسمت در میلیون تنظیم شد. برای اندازه‌گیری pH و دانسیته نوری (Optical Density_OD)، نمونه‌برداری از محتویات راکتور هر ۲۴ ساعت یک بار صورت می‌گرفت. اسیدیته محیط کشت به‌وسیله pH متر سانا اس ال ۹۰۱ (SANA,SL-901) و اندازه‌گیری دانسیته نوری به‌وسیله اسپکتروفتومتر هک دی آر ۲۸۰۰ (HACK, DR2800) در طول موج ۶۹۰ نانومتر انجام می‌شد. برای اندازه‌گیری جرم کل جلبک تولیدی، محتویات راکتور در پایان هر مرحله آزمایش به‌وسیله فیلتر فایبرگلاس GF/C غشائی صاف می‌شد و پس از شستشو با آب مقطر (به‌منظور جداسازی نمک‌های باقیمانده) در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۲ ساعت خشک و سپس به‌وسیله ترازوی آزمایشگاهی‌اند اچ آر ۲۰۰ (AND, HR200) با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین می‌شد(۲۵). در نمودار شماره ۱ رابطه بین غلظت زیست توده تولیدشده در طول زمان کشت و میزان دانسیته نوری به‌صورت منحنی کالیبراسیون نشان داده شده است. مقدار کربن موجود در جلبک تولیدی به‌وسیله دستگاه آنالیزر CHNS پرکین المر ۲۴۰۰ (PERKIN-ELMER ,2400) اندازه‌گیری شد.



نمودار شماره۱: رابطه غلظت زیست توده و دانسیته نوری در منحنی کالیبراسیون

میزان تولید جلبک (Productivity) به‌صورت گرم بر لیتر در روز از رابطه شماره ۱ تعیین شد:

رابطه شماره ۱ :

$$P=\frac{Xt-X0}{t-t0}$$

در این رابطه P تولید جلبک (گرم)، X_t غلظت جلبک در روز پایان آزمایش(گرم بر لیتر) و X_0 غلظت جلبک در روز آغاز کشت (گرم بر لیتر) است. t زمان (روز) در پایان کشت و t_0 زمان (روز) در ابتدای آزمایش است(۲۶). دی‌اکسیدکربن تثبیت شده درفتوبیوراکتور از رابطه شماره ۲ محاسبه شده است:

رابطه شماره ۲ :

$$F=(X_t-X_0)\, m\times V\times\left(\frac{44}{12}\right)$$

در این رابطه F دی‌اکسیدکربن تثبیت شده (گرم)، X_t غلظت جلبک در روز پایان آزمایش (گرم برلیتر)و X_0 جلبک در روز آغاز کشت (گرم بر لیتر)، m درصدکربن موجود در یک گرم جلبک خشک (به صورت اعشاری که از آزمایش CHNS استخراج

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

می‌شود) و V حجم محیط کشت در راکتور بر حسب لیتر می‌باشد(۲۸-۲۶). برای محاسبه درصد کربن تثبیت شده در مقایسه با کل کربن تزریق شده به راکتور از پارامتر کارائی مصرف کربن (Carbon Uptake Efficiency) استفاده می‌شود که از رابطه شماره ۳ محاسبه شد:

رابطه شماره ۳ :

$$CUE=\frac{\%C(\text{تولیدجلبک})}{\text{کل کربن تزریق شده}}$$

در این رابطه C درصد جرمی کربن در زیست توده جلبک می‌باشد(۲۹).

یافته‌ها

برای محاسبه دی‌اکسیدکربن تثبیت شده با توجه به فرمولاسیون ریزجلبک به‌دست آمده از آنالیز CHNS، و نسبت جرم مولکولی دی‌اکسیدکربن و کربن، رابطه شماره ۳ به رابطه شماره ۴ بدیل می‌شود:

رابطه شماره ۴ :

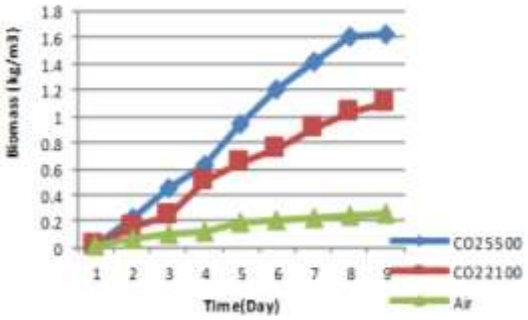
$$C_f=1.1B_p$$

C_f جرم دی‌اکسیدکربن تثبیت شده و B_p جرم زیست توده تولید شده است.

کشت ریزجلبک با گاز احتراق

فتوبیوراکتور تحت تابش نور مصنوعی متناوب قرار گرفت و ریزجلبک به خوبی با دی‌اکسیدکربن موجود در گاز احتراق حاصل از نفت سفید رشد کرد. شکوفایی جلبکی در آزمایش‌های متعدد با غلظت دی‌اکسیدکربن بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ قسمت در میلیون در پایان روز پنجم آشکار شد. در این گستره از غلظت دی‌اکسید کربن، در طی آزمایش‌های متعدد اثر سوئی بر رشد ریزجلبک به‌صورت تزریق مداوم گاز احتراق مشاهده نشد.

در مطالعه حاضر غلظت جلبک در تابش نور متناوب و با دی‌اکسیدکربن ۲۱۰۰ و ۵۵۰۰ قسمت در میلیون پس از ۸ روز به ترتیب به ۱/۱و ۱/۶۳ گرم در لیتر رسید. در این مدت در غلظت ۵۵۰۰ قسمت در میلیون سرعت نرخ تولید جلبک و تثبیت دی‌اکسیدکربن به ترتیب ۰/۲ و ۰/۲۲۵ گرم در لیتر در روز بود. در مطالعه حاضر حداکثر سرعت تولید جلبک در غلظت دی‌اکسیدکربن ۵۵۰۰ قسمت در میلیون در روز چهارم بود و به ۰/۳۲۵ گرم در لیتر در روز رسید. در این مطالعه مشخص شد با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تا ۶۰۰۰ قسمت در میلیون، رشد تولید زیست توده افزایش می‌یابد (نمودار شماره ۲). با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در بالاتر از ۶۰۰۰ قسمت در میلیون، به‌علت محدودیت در اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسیدکربن درگاز ورودی، تولید زیست توده اندازه‌گیری نشد. همان طور که در نمودار شماره ۲ نشان داده شده است در غلظت دی‌اکسیدکربن ۵۵۰۰ قسمت در میلیون و نور متناوب زمان دو برابر شدن غلظت جلبک (Doubling Time) بین روز دوم و سوم، ۱ روز و در فاصله روزهای سوم تا پنجم، ۲ روز بود.

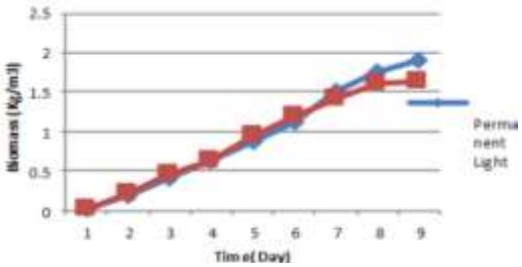


نمودار شماره۲: رابطه غلظت دی اکسیدکربن حاصل از احتراق نفت سفید تزریق شده به راکتور و تغییرات غلظت زیست توده

اثر منبع نور بر رشد ریزجلبک

در این مرحله رشد ریزجلبک تحت تابش نور مصنوعی متناوب و دائم قرار گرفت. غلظت دی‌اکسیدکربن ورودی در هر دو آزمایش ۵۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنظیم شده بود. همان طور که در تصویر شماره ۵ نشان داده شده است تولید زیست توده در شرایط مشابه در نور مصنوعی متناوب ۱۵ درصد کم‌تر از تولید جلبک در نور دائم است و غلظت زیست توده در نور مصنوعی متناوب و دائم در پایان آزمایش به ترتیب به ۱/۶۳ و ۱/۹۱ گرم در لیتر رسید (نمودار شماره ۳).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]



نمودار شماره ۳: اثر منبع نور (نور مصنوعی متناوب و دائم) بر تغییرات غلظت زیست توده

بحث

در این مطالعه، بررسی قابلیت جذب زیستی دی‌اکسیدکربن توسط ریزجلبک اسپیرولینا و تولید زیست‌توده در فتوبیوراکتور بررسی شد.

در مطالعه دیانتی و همکاران بر روی حذف دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق گاز طبیعی(متان) از غلظت کم تر از ۵۰۰۰ قسمت در میلیون برای تزریق به راکتور استفاده شد. در این بررسی در اثر تزریق مداوم گاز احتراق هیچ گونه اثر سوئی بر رشد ریزجلبک اسپیرولینا مشاهده نشد و راکتور با غلظت ۴۱۰۰ قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن در روز پنجم به شکوفایی رسید(۱۷). در مطالعه حاضر برای جایگزینی منبع کربن از احتراق نفت سفید برای تولید زیست توده استفاده شد و همانند مطالعه دیانتی و همکاران گاز احتراق در مطالعه حاضر بدون پیش‌تصفیه و فقط با خنک‌سازی به فتوبیوراکتور تزریق شد(۱۷). سرعت زیاد رشد جلبک و کوتاه بودن فاز تاخیری را می‌توان به میکروارگانیزم‌های تطبیق یافته با گازهای حاصل از احتراق نفت سفید در طول آزمایش‌های مکرر نسبت داد(۳۰).

در مطالعه‌ای که توسط Chae و همکاران بر روی تثبیت دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق نفت‌سفید با اوگلنا گراسیلیس در راکتورهای منقطع و نیمه‌پیوسته صورت گرفت، نتایج، حاکی از رشد خوب جلبک با دی‌اکسیدکربن گاز احتراق با ترکیب ۱۱۰هزار قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن، ۲۶ قسمت در میلیون اکسیدهای ازت، ۵ قسمت در میلیون اکسیدهای گوگرد و ۱۲۶ میلی‌گرم در لیتر ذرات معلق بود. در راکتور نیمه‌پیوسته با زمان ماند هیدرولیکی ۵ روز و دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و شدت نور ۳۰ کیلولوکس غلظت جلبک به ۰/۶ گرم در لیتر رسید. در راکتور منقطع پس از ۶ روز غلظت زیست توده در دمای ۲۶-۲۳ درجه سانتی‌گراد و روشنایی ۶۰ کیلولوکس به ۰/۶۳ گرم در لیتر رسید. با افزایش دما به ۳۰-۲۸ درجه و روشنایی ۶۰ کیلولوکس غلظت زیست توده ۰/۹۲ گرم در لیتر افزایش یافت. در این بررسی طی مدت ۲۱ روز تماس آلاینده‌های احتراق با محیط کشت اوگلنا گراسیلیس اثر سوئی بر رشد این ریزجلبک مشاهده نشد(۱۸).

در مطالعه Chae و همکاران به ازای هر گرم زیست توده تولید شده ۲/۵ گرم دی‌اکسیدکربن تثبیت شد و میزان حذف زیستی دی‌اکسیدکربن با زمان ماند هیدرولیکی ۸ روز به ۱۹درصد رسید(۱۸).

Zhao و همکاران رشد سه گونه ریز جلبک کلرلا، ایزوکرایسیس و آمفیدینیوم کارترا را تحت تاثیر گاز احتراق شبیه‌سازی شده حاوی ۱۵۰هزار میلی‌گرم در لیتر دی‌اکسیدکربن و هم چنین دی‌اکسیدکربن خالص بررسی کردند. میزان تولید جلبک کلرلا با تزریق گاز احتراق۰/۱۹۲ گرم در لیتر در روز، سرعت رشد ویژه ۰/۳۲۸ در روز و سرعت تثبیت دی‌اکسیدکربن ۰/۳۵۳ گرم در لیتر در روز بود. سرعت رشد جلبک با دی‌اکسیدکربن اتمسفری ۰/۱۳۹ گرم در لیتر در روز، رشد ویژه ۰/۲۸۸ در روز و سرعت تثبیت دی‌اکسیدکربن ۰/۲۶۲ گرم در لیتر در روز بود. علت اختلاف ناچیز رشد جلبک در تزریق هوا در مقایسه با گاز احتراق، به اثر بازدارندگی میزان بالای دی‌اکسیدکربن نسبت داده می‌شود(۱۴).

در مطالعه حاضر غلظت جلبک در تابش نور متناوب و با دی‌اکسیدکربن ۲۱۰۰ و ۵۵۰۰ قسمت در میلیون پس از ۸ روز به ترتیب به ۱/۱و ۱/۶۳ گرم در لیتر رسید که بیش‌تر از غلظت جلبک در مطالعه Chae بود. علت این افزایش را می‌توان به کم‌تر بودن غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز ورودی و کاهش اثر

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

بازدارندگی این گاز نسبت داد. در این مدت درغلظت ۵۵۰۰ قسمت در میلیون سرعت نرخ تولید جلبک و تثبیت دی‌اکسیدکربن به ترتیب ۰/۲ و ۰/۲۲۵گرم در لیتر در روز بود. و تقریبا برابر با سرعت تولید جلبک در مطالعه Zhao بود(۱۸،۱۴).

در مطالعه Burns از شدت هوادهی ۰/۳۲ لیتر بر دقیقه بر لیتر(۳۱) و در مطالعه Chae از شدت هوای ۰/۳ لیتر بر دقیقه(۱۸) برای تولید حداکثر زیست توده استفاده شدکه کم تر از شدت هوادهی مطالعه حاضر (۰/۵ لیتر بر دقیقه) بود.

در مطالعه Jacob-Lopes و همکاران نشان شد که تولید زیست‌توده با ریزجلبک آفانوتک میکرواسکوپیا ناگلی با استفاده از فاضلاب تصفیه شده پالایشگاه نفت و در حالت نور متناوب، ۲۰ درصد کم‌تر از نور دائم است(۳۰). در تحقیق دیگری که توسط Jacob-Lopes صورت گرفت مشخص شد میزان تولید زیست‌توده با استفاده از ریزجلبک آفانوتک میکرواسکوپیا ناگلی در محیط کشت مصنوعی با شدت روشنایی ۱۲ کیلولوکس و تناوب ۱۴ساعت، ۱۰ساعت خاموش ۷۵ درصد کم‌تر از حالت روشنایی دائم بود (۳۲). در مطالعه‌ای که توسط Janssen انجام شد رشد ریز جلبک کلامیدوموناس در شدت روشنایی ۲۴۰ میکرومول بر ثانیه بر مترمربع مورد اندازه‌گیری قرارگرفت. در بررسی Janssen مشخص شد سرعت رشد ویژه در نور متناوب ۳۱ درصد کم‌تر از سرعت ویژه در نور دائم است(۳۳). این مساله می‌تواند به‌دلیل آن باشد که هنگامی راکتور تحت نور متناوب قرار می‌گیرد در ساعات تاریک واکنش‌های تنفس رخ می‌دهد و مقداری از زیست توده تولید شده در زمان روشنایی را مصرف می‌کند(۶).

دی اکسیدکربن تثبیت شده با ریزجلبک اسپیرولینا

جذب دی‌اکسیدکربن در فتوبیوراکتور به دو شکل اتفاق می‌افتد: ۱- واکنش شیمیایی با هیدرواکسیدسدیم ۲- تثبیت در فرایند فتوسنتز توسط ریزجلبک. برای تعیین میزان دی‌اکسیدکربن تثبیت شده با ریزجلبک در فرایند فتوسنتز می‌بایست ابتدا میزان کربن تثبیت شده در ساختمان ریزجلبک اندازه‌گیری و سپس دی‌اکسیدکربن تثبیت شده محاسبه شود. جدول شماره ۲ درصد وزنی سه عنصر مهم تشکیل دهنده ریزجلبک اسپیرولینا که به‌وسیله دستگاه آنالیز CHNS اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

جدول شماره۲: درصد وزنی عناصر کربن، هیدروژن و ازت در زیست توده اسپیرولینا اندازه گیری شده با آنالیزر CHNS

عنصر	کربن(C)	هیدروژن(H)	نیتروژن(N)
درصد وزنی	۲۹/۷۸	۵/۱	۴/۵۱

برای بررسی درصد تثبیت دی‌اکسیدکربن یا فاکتور جذب کربن که در جدول شماره ۳ نشان داده شده است، مقدار دی‌اکسیدکربن تثبیت شده در فتوبیوراکتور با در دست داشتن جلبک تولید شده در غلظت‌های مختلف دی‌اکسیدکربن به کمک رابطه شماره ۳ محاسبه شد. در این بررسی میزان تثبیت زیستی دی‌اکسیدکربن تزریق شده به راکتور در غلظت ۲۱۰۰و ۵۵۰۰ قسمت در میلیون در محدوده ۲/۲۷ تا ۴/۰۳ درصد بود.

مطالعه Jacob-Lopes و همکاران حداکثر میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن بر اساس تولید زیست توده توسط ریزجلبک میکرواسکوپیا ناگلی، ۵/۶ درصد و به طور میانگین ۳/۱ درصد گزارش شد(۳۰).

در مطالعه دیگری که توسط Chiu و همکارن صورت گرفت میزان تثبیت زیستی دی‌اکسیدکربن در

جدول شماره ۳: میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن توسط تولید زیست توده در فتوبیوراکتور

غلظت دی اکسیدکربن در جریان گاز ورودی (قسمت در میلیون)	حجم گاز تزریق شده در مدت ۹ روز (متر مکعب به ازای هر لیتر راکتور)	دی اکسیدکربن تزریق شده (گرم به ازای هر لیتر راکتور)	زیست توده تولید شده (گرم در لیتر)	دی اکسیدکربن تثبیت شده (گرم در لیتر راکتور)	کارایی حذف زیستی کربن(درصد)	زیست توده تولید شده به ازای انرژی مصرف شده در کمپرسور (گرم بر کیلووات ساعت)
۵۹۴(هوا)	۹	۸/۵	۰/۲۵	۰/۲۷۵	۳/۲۳	۱۲/۵
۲۱۰۰(نفت سفید)	۹	۳۰	۱/۱	۱/۲۱	۴/۰۳	۵۵
۵۵۰۰ (نفت سفید) تابش دائم	۹	۷۸/۷	۱/۶۳	۱/۷۹۳	۲/۲۷	۸۱/۵
۵۵۰۰ (نفت سفید) تابش متناوب	۹	۷۸/۷	۱/۹۱	۲/۱۰۱	۲/۶۷	۹۵/۵

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

غلظت ۱۵۰هزار قسمت در میلیون با ریزجلبک کلرلا به ۳/۹ درصد رسید(۱۶).

در مطالعه Morais و همکاران میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با ریزجلبک اسپیرولینا در غلظت ۶۰ هزار قسمت در میلیون، ۳۷/۹ درصد بود(۲۷).

در این بررسی تولید زیست توده به ازای هر کیلووات ساعت انرژی مصرف شده در پمپ مکنده طبق جدول شماره ۳ محاسبه شد. در غلظت‌های ۵۹۴ (غلظت در هوای آزمایشگاه)، ۲۱۰۰ و ۵۵۰۰ قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن با تابش متناوب تولید جلبک به ترتیب ۱۲/۵، ۵۵ و ۸۱/۵ گرم بر کیلووات ساعت و در نور دائم ۹۵/۵ گرم بر کیلووات ساعت بود. همان‌طور که از جدول شماره ۳ و هم‌چنین تصویر شماره ۲ استنباط می‌شود با افزایش غلظت در گاز ورودی، علاوه بر افزایش تولید زیست توده، تولید زیست توده به ازای انرژی مصرف شده در پمپ مکنده افزایش می‌یابد. علت افزایش این میزان را می‌توان به یکسان بودن مصرف انرژی در غلظت‌های مختلف دی‌اکسیدکربن در گاز احتراق نسبت داد. در این مطالعه انرژی الکتریکی مصرف شده در پمپ، معادل با کل انرژی مصرفی در نظر گرفته شد. در مطالعه حاضر توان کمپرسور ۱۳۰ میلی وات بر لیتر بود. در مطالعه Sierra از پمپ هوا با توان ۴۰ میلی‌وات بر لیتر در فتوبیوراکتور ستونی حباب دار استفاده شد(۳۴). در مطالعه‌ای که توسط Burns صورت گرفت هوادهی راکتور توسط پمپی با قدرت ۳۳۳ میلی‌وات بر لیتر با ستونی حباب دار انجام شد(۳۱). با انجام مطالعات بیش‌تر و شستشوی مداوم سنگ هوا در زمان بهره‌برداری مصرف انرژی در فتوبیوراکتور کاهش می‌یابد. در این بررسی بیش ترین سرعت تثبیت دی‌اکسیدکربن در نور متناوب توسط ریزجلبک، ۰/۴۵ گرم در روز در لیتر (۰/۳۱ میلی‌گرم در دقیقه درلیتر) در غلظت ورودی ۵۵۰۰ قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن به‌دست آمد. در مطالعه Nakamura میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با غلظت ۶۰ هزار تا ۲۴۰ هزار قسمت در میلیون توسط ریزجلبک کلامیدوموناس، ۰/۱۳ میلی‌گرم در دقیقه در لیتر گزارش شده است(۳۵). در مطالعه Morais و همکاران میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با غلظت ۱۲۰ هزار قسمت در میلیون توسط ریزجلبک کلامیدوموناس، ۰/۱ میلی‌گرم در دقیقه در لیتر ثبت شده است(۲۷).

در مطالعه Larosi`ere و همکاران میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با غلظت ۲۰هزار میلی‌گرم در لیتر توسط ریزجلبک کلرلا، ۰/۵۹ میلی‌گرم در دقیقه در لیتر گزارش شده است. در بررسی Larosi`ere و همکاران مشابه آزمایش حاضر از شدت نور ۱۰کیلولوکس (معادل با ۱۲۰ میکرومول بر ثانیه بر مترمربع) استفاده شد (۳۶). با توجه به شبیه‌سازی شعله فانوس نفتی با مشعل‌های نفت سوز بویلرهای خانگی و صنعتی، مشخص شد گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های نفتی که حاوی آلاینده‌های مختلفی از جمله دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن، اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، دوده و هیدورکربن‌های نسوخته است می‌تواند مستقیما وارد فتوبیوراکتور شود و زیست توده تولید کند(۳۴). با توجه به نتایج به‌دست آمده در این بررسی به علت مصرف بیش‌تر مازوت (نفت سیاه) نسبت به نفت سفید در نیروگاه‌های حرارتی و صنایع، ضروری به‌نظر می‌رسد تحقیقات بیش‌تری در زمینه جذب زیستی دی‌اکسیدکربن موجود در گاز حاصله از احتراق مازوت صورت گیرد. در مطالعات آینده، می‌توان با افزایش غلظت گاز ورودی به راکتور، حداکثر مقدار مجاز دی‌اکسیدکربن تزریق شده برای تولید زیست توده را تعیین کرد.

سپاسگزاری

این طرح پژوهشی در معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران با کد ۲۰۱۴ و کد اخلاق ir.mazums.rec.1395.2014 به ثبت رسیده است در ضمن نویسندگان این مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه به دلیل حمایت مالی و تامین تجهیزات این طرح کمال تشکر را دارند.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

References

1. Ghorbani A, Rahimpour H, Ghasemi Y, Zoughi S, Rahimpour M. Carbon Capture and Sequestration in Iran: Microalgal Biofixation Potential in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 35: 73-100.
2. Lara-Gil JA, Senés-Guerrero C, Pacheco A. Cement Flue Gas as a Potential Source of Nutrients During CO_2 mitigation by Microalgae. Algal Research 2016; 17: 285-292.
3. European Union. Energy Balance sheet, Office of planning for Electricity and Energy, ministry of energy. 2015. Avalable From: http://ec.europa.eu/eurostat/about/our-partners/ copyright. Accessed May 2, 2017.
4. Chilcott R. Health Protection Agency Compendium of Chemical Hazards: Kerosene (Fuel Oil), HPA: 2006.
5. Yang H, Fan S, lang X, WangY, Nie J. Economic Comparsion of three gas separation for CO_2 capture from powerplant flue gas. Chin J Chem Eng 2011; 19(4): 615-620.
6. Songolzadeh M, Soleimani M, Takht Ravanchi M, Songolzadeh R. Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: Review Article a Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions. Sci World J 2014; Article Id 828131: 34 Pages.
7. Herzog H, Drake E, Adams E. CO_2 Capture, Reuse, and Storage Technologies For Mitigating Global Climate Change. Doe Order No. 1997; (Cambridge: Massachuserts Institute of Technology Energy): De-Af22-96pc01257.
8. Chinnasamy S, Ramakrishnan B, Bhatnagar A, Das K. Biomass Production Potential of a Wastewater Alga Chlorella Vulgaris Arc 1 Under Elevated Levels of CO_2 And Temperature. Int J Mol Sci 2009; 10(2): 518-532.
9. Kleivdal H, Miljo Svein U, Nordvik M. CO_2 to Bio-Microalgae as an Omega-3 Rich Feedstock-Integrating CO_2 Sequestration and Aquafeed Production. Project Final Report. January 2012. (Report)
10. He L, Subramanian V, TangY. Experimental Analysis and Model-Based Optimization of Microalgae Growth in Photo-Bioreactors using Flue Gas. Biomass and Bioenergy 2012; 41: 131-138.
11. Lindblom J. Algal Flue Gas Sequestration and Wastewater Treatment: An Industial Experiment, Master of Science Thesis, Industrial Ecology, Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. 2011. (Master Thesis)
12. Knudsen J, NJensen JN, Vilhelmsen PJ, Biede O. Experience with CO_2 capture from coal flue gas in pilot-scale: testing of different amine solvents. Energy Procedia 2009; 1(1): 1091-1098.
13. Arora Soni R, Sudhakar K, Rana RS. Sustainable biomass production from microalgae for food, feed and biofuels: An integrated approach. Biosci Biotech Res Comm 2016; 9(4): 729-736.
14. Zhao B, Su Y, Zhang Y, Cui G. Carbon dioxide fixation and biomass production from combustion flue gas using energy microalgae. Energy 2015; 89: 347-357.
15. Guruvaiah M, Lee K. Utilization of Flue Gas from Coal Burning Power Plant for Microalgae Cultivation for Biofuel Production. Int J Innovat Technol Expl Engin 2014; 3(8): 7-10.
16. Chiu SY, Kao CY, Chen CH, Kuan TC, Ong SC, et al. Reduction of CO_2 by a High-Density Culture of Chlorella Sp in a Semicontinuous Photobioreactor. Bioresour Technol 2008; 99(9): 3389-3396.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

17. Dianati Tilaki R, Jafarsalehie M, Safari R, Movahedi M. Carbon Dioxide Removal and Biomass Production from Methane Combustion in the Photobioreactor using Microalgae Spirulina. Fuel and Combustion Journal 2017; 10(1): 47-58 (Persian).
18. Chae SR, Hwang EJ, Shin SH. Single cell protein production of Euglena gracilis and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. Bioresour Technol 2006; 97(2): 322-329.
19. Omidvar A, Amini E. Predicting of Physical Properties and Atomization Characteristics of the Biofuel Derived from Chlamydomonas Microalgae. Fuel and Combustion Journal 2011; 3(2): 47-85 (Persian).
20. Costa1 J, Morais M, Radmann E, Santana F, Camerini F, Souza M, et al. Biofixation of carbon dioxide from coal station flue gas using Spirulina sp. LEB 18 and Scenedesmus obliquus LEB 22. Afr J of Microb Res 2011; 9(44): 2202-2208.
21. Soletto D, Binaghi L, Lodi FA, Carvalho CM, Converti ZA. Effects of Carbon Dioxide Feeding Rate and Light Intensity on the Fed-Batch Pulse-Feeding Cultivation of Spirulina Platensis in Helical Photo Bioreactor. Biochem Eng J 2008; 39(2): 369-375.
22. Sami Ismaiela M, El-Ayoutyb Y, Normorea M. Role of pH on antioxidants production by Spirulina (Arthrospira) platensis. Braz J Microbiol 2016; 47(2): 298-304.
23. Cheah WY, Show PL, Chang JS, Ling TC, Juan JC. Biosequestration of Atmospheric CO_2 and Flue Gas-Containing CO_2 by Microalgae. Bioresource Technol 2015; 184: 190–201.
24. Iancu P, PleşuV, Velea S. Flue Gas CO_2 Capture by Microalgae in Photobioreactor: a Sustainable Technology. Chem Eng J 2012; 29: Aidic Publication.
25. Iancu P, Pleşu V, Velea S. Flue Gas CO_2 Capture by Microalgae in Photobioreactor: a Sustainable Technology. Chem Eng Ransact. 2012; 29.
26. Anjos M, Fernandes BD, Vicente AA, Teixeira JA, Dragone G. Optimization of CO_2 Bio-Mitigation by Chlorella Vulgaris. Bioresour Technol 2013; 139: 149-154.
27. Morais M, Vieira Costa J. Biofixation of carbon dioxide by Spirulina sp. And Scenedesmus obliquus cultivated in a three-stage serial tubular photo bioreactor. J Biotechnol 2007; 129(3): 439-445.
28. Zheng Y, Chen Z, Lu H, Zhang W. Optimization of carbon dioxide fixation and starch accumulation by Tetraselmis subcordiformis in a rectangular airlift photobioreactor. Afr J Biotechnol 2011; 10(10): 1888-1901.
29. Binaghi L, Del Borghi A, Lodi A, Converti A, Del Borghi M. Batch and fed-batch uptake of carbon dioxide by Spirulina platensis. Process Biochemistry 2003; 38(9): 1341-1346.
30. Jacob-Lopes E, Gimenes Scoparo C, Isabel Queiroz M, Teixeira Franco T. Biotransformations of Carbon Dioxide in Photobioreactors. Management 2010; 51(5): 894-900.
31. Burns A. Photobioreactor Design For Improved Energy Efficiency Of Microalgae Production. USA: California Polytechnic State University: San Luis Obispo, 2014. (Master Thesis).
32. Jacob Lopes E, Gimenes Scoparo C, Ferreria Lacerda L, Teixeira Franco T. Effect of Light Cycles (night/day) on CO_2 Fixation and Biomass Production by Microalgae in Photobioreactors. Chem Eng and Processing 2009; 48: 306-310.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]

33. Janssen M. Cultivation of microalgae: effect of light/dark cycles on biomass yield. Thesis Wageningen University. 2002: 35-37. (Thesis).
34. Sierra E, Acien FG, Fernandez JM, Garcia JL, Gonzales C, Molina E. Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. Chem Eng J 2008; 138(1-3): 136-147.
35. Nakamura T, Senior C, Olaizola M, Masutani S. Capture and Sequestration of Stationary Combustion Systems by Photosynthetic Microalgae. Proceedings of The First National Conference on Carbon Sequestration, Department of Energy, National Energy Technology, Laboratory, USA: 2001.
36. Larosi`ere B, Lopes F, Goncalves A, Taidi B, Benedetti M, Minier M, et al. Carbon Dioxide Bio fixation by Chlorella Vulgaris at Different CO_2 Concentrations and Light Intensities. Eng Life Sci 2014; 1-11.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2025-08-03]