

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

Ramasanali Dianati Tilaki¹,
Morteza Jafarsalehi²,
Alireza Movahedi³

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: CO₂ is the main cause of greenhouse effect. Previous studies have shown that CO₂ in methane and coal flue gas can lead to microalgae growth. The aim of this research was to study the CO₂ 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 CO₂ was chosen in the range of 580 to 6000 ppm that was measured by NDIR CO₂ 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 CO₂ 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. CO₂ 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 CO₂ using continuous light.

Conclusion: In this study, the ability of a photo bioreactor was confirmed in the removal of CO₂. Also, increase in CO₂ 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)

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

رمضانعلی دیانتهی تیلکی^۱

مرتضی جعفر صالحی^۲

علیرضا موحدی^۳

چکیده

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

مواد و روش‌ها: آزمایش‌ها با ساخت فتوبیوراکتور و تزریق هوا و گاز احتراق به صورت 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 دی اکسیدکربن ورودی به راکتور در محدوده ۵۸۰ تا ۶۰۰۰ قسمت در میلیون انتخاب و به روش NDIR اندازه‌گیری شد. غلظت اولیه جلبک ۲۰ میلی گرم در لیتر بود. میزان تولید زیست توده در مراحل مختلف آزمایش اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: میزان تولید جلبک با دی اکسیدکربن هوا و احتراق نفت سفید حاوی ۵۵۰۰ قسمت در میلیون دی اکسیدکربن پس از ۸ روز با تابش نور متناوب به ترتیب به ۰/۰۷ و ۰/۴۱ گرم در لیتر در روز و غلظت زیست توده به ترتیب به ۰/۲۵ و ۱/۶۳ گرم در لیتر رسید. فاکتور تثبیت دی اکسیدکربن 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 دی اکسیدکربن ۵۵۰۰ قسمت در میلیون و نور دائم به ۱/۹۱ گرم در لیتر رسید.

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

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

مقدمه

با افزایش غلظت گازهای آلاینده به ویژه دی اکسیدکربن در اتمسفر تعادل اثر گلخانه‌ای به هم خورده است و موجب گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی شده است. غلظت دی اکسیدکربن که قبل از انقلاب صنعتی ۲۸۰ قسمت در میلیون بود در سال ۲۰۱۷ به بیش از ۴۰۷ قسمت در میلیون رسید و پیش‌بینی می‌شود

با افزایش غلظت گازهای آلاینده به ویژه دی اکسیدکربن در اتمسفر تعادل اثر گلخانه‌ای به هم خورده است و موجب گرمایش جهانی و تغییرات آب و

E-mail: Salehi_env@yahoo.com

مؤلف مسئول: مرتضی جعفر صالحی - چالوس: بیمارستان آیت الله طالقانی چالوس

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

در سال ۲۱۰۰ به ۵۷۰ قسمت در میلیون برسد که موجب افزایش دمای سطح کره زمین به میزان $1/9$ درجه سانتی گراد می شود و باعث ذوب شدن یخچال ها و بالا رفتن سطح آب دریاها به میزان $3/8$ متر خواهد شد. این تغییرات موجب انقراض برخی گونه های حیوانی و گیاهی، تغییر الگوی بارش، کاهش صنعت گردشگری و کاهش تولیدات کشاورزی خواهد شد. از دیگر پیامدهای گرمایش جهانی می توان به اثرات بر سلامت انسان نظیر افزایش بیماری های گرمسیری، افزایش ازن در تروپوسفر، بروز بیماری های مرتبط با کمبود و یا آلودگی آب، سوء تغذیه، آلودگی هوا و افزایش گرد و غبار اشاره کرد (۱).

احتراق سوخت های فسیلی، بیش ترین سهم را در انتشار دی اکسید کربن دارند. با افزایش غلظت دی اکسید کربن در اتمسفر تمایل به جذب زیستی توسط ریز جلبک ها افزایش یافته است (۲). با وجود توسعه شبکه گازرسانی ۶۰۰ شهر در کشور وجود دارند که به سبب محدودیت های عملیاتی تاکنون گازرسانی به آنجا فراهم نشده و نفت سفید اصلی ترین منبع انرژی در بخش خانوار است. علاوه بر آن به دلیل ناهماهنگی در عرضه و تقاضای گاز طبیعی، بسیاری از مناطق کشور با وجود بهره مندی از گاز، در زمان بروز سرمای شدید برای گرمایش از نفت سفید استفاده می کنند (۳). فاکتور انتشار دی اکسید کربن در اثر احتراق نفت سفید ۲۵۷۷ گرم بر لیتر می باشد (۴). هر چند تاکنون روش اقتصادی برای جذب دی اکسید کربن شناخته نشده است، روش های موجود انرژی زیادی مصرف می کنند و یا در مقیاس بزرگ مقرون به صرفه نیستند. جذب دی اکسید کربن در زمین روشی قابل انجام برای حجم های زیاد این گاز است. تزریق دی اکسید کربن در مخازن نفتی موجب کاهش ویسکوزیته و سهولت استخراج آن می شود اما پایش منظم سیستم به منظور جلوگیری از نشت مخازن هزینه های زیادی در بردارد. برای جذب در زمین ابتدا باید دی اکسید کربن از گاز احتراق جداسازی شود.

هزینه جداسازی هر تن دی اکسید کربن از گاز احتراق در سال ۲۰۱۱، ۲۰ تا ۳۰ یورو بود. در صورتی که انتقال هر تن دی اکسید کربن تا محل ذخیره سازی در همان سال، $1/5$ تا $5/4$ یورو به ازای هر ۱۸۰ کیلومتر، هزینه داشت. هزینه ذخیره سازی 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 نیروگاه ها برای تولید زیست توده است (۵). سایر روش های فیزیکی شیمیایی جذب دی اکسید کربن از گاز احتراق شامل جذب به وسیله محلول جاذب، جذب سطحی، روش های غشائی، پمپ های الکتروشیمیایی، تقطیر برودتی و احتراق با استفاده از اکسیدهای فلزی می باشند (۶). یکی از معایب جذب دی اکسید کربن بر روی مواد جاذب سطحی، تخریب شدن آن ها 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 دی اکسید کربن در صنایع است اما هم اکنون تنها ۲ درصد از دی اکسید کربن منتشر شده در آمریکا در صنایع مصرف می شود. در سال های اخیر به جذب دی اکسید کربن توسط گروه های تحقیقاتی مختلف با ریز جلبک ها توجه ویژه ای شده است (۵).

سرعت فتوسنتز ریز جلبک ها ۱۰ تا ۵۰ برابر گیاهان خشکی است (۸، ۹). ریز جلبک ها با امکان تکثیر در فضای گلخانه ای نه تنها به آب شیرین نیاز ندارند بلکه می توانند با فاضلاب شهری تصفیه شده به خوبی تکثیر شوند. ۵۰ درصد وزن ریز جلبک از کربن تشکیل شده است و بنابراین رشد یک کیلو گرم جلبک معادل جذب $1/8$ کیلو گرم دی اکسید کربن است در نتیجه می توان از یک سیستم زیستی کوچک برای جذب حجم زیادی از دی اکسید کربن هوا استفاده کرد. در حالی که کارایی گیاهان در حذف این گاز ۳ تا ۶ درصد است (۱۰). اسپیرولینا گونه ای از جلبک های سبز آبی و از خانواده سیلاتوریا است. طول آن به ۵۰ تا ۳۰۰ میکرون و عرض

آن حدود ۱۰ میکرون است. این ریزجلبک توانایی رشد در گستره وسیعی با غلظت دی اکسیدکربن 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 طیف ۰/۳۳ تا ۰/۹۲ گرم در لیتر در روز می باشد (۱۲). این ریز جلبدک به علت این که حاوی مقادیر بیش تری از پروتئین، بتاکاروتن و امگا تری و هم چنین مقادیری اسیدهای چرب است از ارزش تغذیه ای بالایی به ویژه برای حیوانات و هم چنین 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 ریزجلبدک به علت دارا بودن ترکیبات آنتی اکسیدان در درمان ضد سرطان و ارتقای سیستم ایمنی کاربرد دارد. علاوه بر این توانایی بالایی در تثبیت ازت و امکان رشد در آب های شور و قلیایی را نیز دارد (۱۳). در بررسی های گذشته، محققین مختلفی حذف زیستی دی اکسیدکربن را مورد بررسی قرار داده اند. Zhao و همکاران رشد سه گونه ریز جلبدک کلرلا، ایزو کرایسیس و آمفیدینیوم کارترا را تحت تاثیر گاز احتراق شبیه سازی شده حاوی ۱۵۰ هزار قسمت در میلیون دی اکسیدکربن و هم چنین دی اکسیدکربن خالص مقایسه کردند. در این غلظت بالا از دی اکسیدکربن، میزان تولید جلبدک با تزریق گاز احتراق به علت وجود ترکیبات بازدارنده رشد ریزجلبدک ها کم تر از تزریق با دی اکسیدکربن خالص بود (۱۴). رابطه افزایش غلظت دی اکسیدکربن از احتراق زغال سنگ و تولید زیست توده توسط ریزجلبدک کلرلا سندسموس توسط Lee و Guruvaiah بررسی شد (۱۵). در مطالعات Chiu و همکاران از گاز احتراق کک در کوره فولاد سازی برای تولید زیست توده و حذف دی اکسیدکربن استفاده شد (۱۶). تثبیت دی کسیدکربن حاصل از احتراق گاز طبیعی با ریزجلبدک های کلرلا، سینکوسیستیس و تتراسلمیس توسط Tang و همکاران مطالعه شد (۱۰).

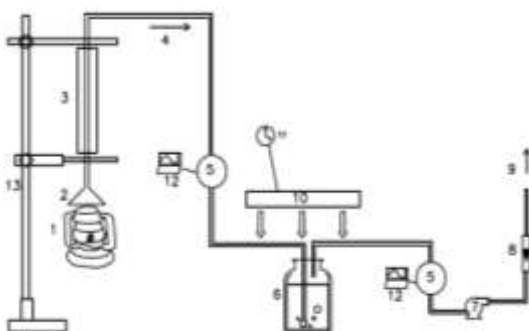
دیانتی و همکاران اثر گاز حاصل از احتراق گاز طبیعی را بر رشد ریز جلبدک اسپیرولینا بررسی کردند. در این مطالعه مشخص شد گاز احتراق اثر سوئی بر رشد ریزجلبدک ندارد (۱۷). اثر گاز حاصل از احتراق نفت سفید بر رشد ریزجلبدک یوگلنا گراسیلیس در فتوبیوراکتور توسط Chae و همکاران در غلظت ۱۱۰ هزار قسمت در میلیون دی اکسیدکربن، ۲۶ قسمت در میلیون اکسیدهای ازت و ۵ قسمت در میلیون اکسیدهای گوگرد و ۱۲۶ قسمت در میلیون ذرات معلق بررسی شد. نتایج، حاکی از رشد خوب جلبدک با این میزان دی اکسیدکربن و مواد آلاینده بود (۱۸). با توجه به ماهیت وجود اکسیدهای ازت و گوگرد در گاز احتراق، این آلاینده ها می توانند به عنوان ماده مغذی در رشد جلبدک استفاده شوند. تاکنون مطالعات اندکی درباره جذب کربن حاصل از احتراق نفت سفید به وسیله ریزجلبدک ها صورت گرفته است نوآوری مطالعه حاضر در آن است که به جای استفاده از گاز شبیه سازی شده، مستقیماً از گاز احتراق و بدون پیش تصفیه برای تولید جلبدک استفاده شد (۱۹، ۱۶، ۳). در مطالعه حاضر با توجه به خطرات گازهای گلخانه ای و مصرف نفت سفید در کشور به بررسی میزان تولید زیست توده و تعیین اثر متغیرهایی نظیر غلظت دی اکسیدکربن، اثر منبع نور و زمان تماس بر میزان رشد جلبدک پرداخته شد.

مواد و روش ها

مطالعه حاضر به روش تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. بذر ریزجلبدک اسپیرولینا از پژوهشکده اکولوژی شیلات دریای خزر در شهر ساری تهیه شد. آزمایش ها در بهار و تابستان ۱۳۹۵ و به مدت شش ماه صورت گرفت. از محیط کشت مصنوعی زاروک (Zarrouk) مطابق جدول شماره ۱ برای تکثیر ریزجلبدک اسپیرولینا استفاده شد. از یک ارلن یک لیتری برای نگهداری جلبدک ذخیره استفاده شد. ارلن در فاصله ۲ سانتی متر از لامپ



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



تصویر شماره ۲: طرح واره دستگاه‌های مورد استفاده در سیستم فتویوراکتور:

(۱) فانوس نفت سوز (۲) قیف فلزی (۳) کندانسور (۴) لوله انتقال گاز احتراق (۵) آنالیز دی اکسید کربن (۶) فتویوراکتور (۷) پمپ مکنده (۸) اندازه‌گیری جریان گاز (۹) مسیر خروج گاز (۱۰) لامپ فلورسنت (۱۱) تایمر (۱۲) کامپیوتر (۱۳) پایه فلزی

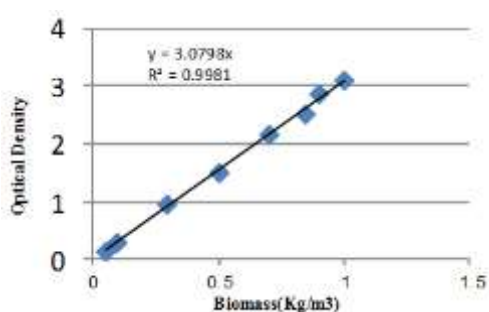
در این آزمایش از منبع نور مصنوعی برای تامین روشنایی استفاده شد. منبع نور از چهار عدد لامپ فلورسنت کم مصرف سفید (۳۵ وات نما نور) استفاده شد که بر روی پایه چوبی در چهار طرف راکتور ثابت شدند و مساحت جانبی راکتور در معرض نور برابر با 0.18 مترمربع بود. تابش نور به دو صورت پیوسته و متناوب (۱۴ ساعت روشن و ۱۰ ساعت خاموش) بود که به وسیله تایمر آنالوگ تنظیم می شد. شدت روشنایی در سطح خارجی فتویوراکتور بر اساس تجربیات آزمایشگاهی و مطالعات قبلی 10 کیلولوکس (معادل با 120 میکرومول فوتون در مترمربع در ثانیه) تنظیم

فلورسنت کم مصرف سفید (۶۰ وات نما نور) در دمای 25°C درجه سانتی گراد نگهداری می شد. محتویات ارلن ذخیره ریزجلبک هفته‌ای یک بار تخلیه و مجدداً تکثیر جلبک صورت می گرفت. دی اکسید کربن لازم برای تثبیت جلبک در راکتور کنترل از هوا و در راکتورهای آزمایش از احتراق نفت سفید تامین می شد. هر مرحله آزمایش حداکثر ۹ روز به طول می انجامید. با شکوفایی جلبک و شروع فاز رشد ثابت، هر مرحله آزمایش به پایان می رسید. پایلوت استفاده شده در مطالعه از جنس طلق شفاف با ضخامت 0.5 میلی متر، حجم ناخالص $5/6$ لیتر و حجم مفید 3 لیتر بود. مخزن به شکل مکعب مستطیل با عرض 15 ، طول 15 و ارتفاع 25 سانتی متر بود. با افزودن 20 میلی لیتر از جلبک موجود در فتویوراکتور ذخیره به هر لیتر محیط کشت جدید، غلظت جلبک در آغاز کشت 20 میلی گرم بر لیتر تنظیم می شد (۲۰). با استفاده از پمپ مکش هوا، گاز حاصله از احتراق نفت سفید در فانوس پس از عبور از یک خنک کن که با آب شیر خنک می شد بدون عبور از محیط قلیایی مستقیماً به داخل راکتور حاوی محیط کشت بدون بی کربنات سدیم تزریق می شد (۱۷). در فتویوراکتور با عبور هوا یا گاز احتراق از یک دیفیوزر (سنگ هوای آکواریومی) و با تشکیل حباب، دی اکسید کربن در تماس با محیط کشت قرار می گرفت. در تصویر شماره ۱ پایلوت فتویوراکتور 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)
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$13/61$
NaNO_3	$2/5$
K_2HPO_4	$0/5$
K_2SO_4	1
NaCl	1
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$0/2$
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$0/08$
FeSO_4	$0/01$
EDTA	$0/08$

اچ آر ۲۰۰ (AND, HR200) با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین می‌شد (۲۵). در نمودار شماره ۱ رابطه بین غلظت زیست توده تولید شده در طول زمان کشت و میزان دانسیته نوری به صورت منحنی کالیبراسیون نشان داده شده است. مقدار کربن موجود در جلبک تولیدی به وسیله دستگاه آنالیزر CHNS پرکین المر ۲۴۰۰ (PERKIN-ELMER, 2400) اندازه گیری شد.



نمودار شماره ۱: رابطه غلظت زیست توده و دانسیته نوری در منحنی کالیبراسیون

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

$$P = \frac{X_t - X_0}{t - t_0} \quad \text{رابطه شماره ۱}$$

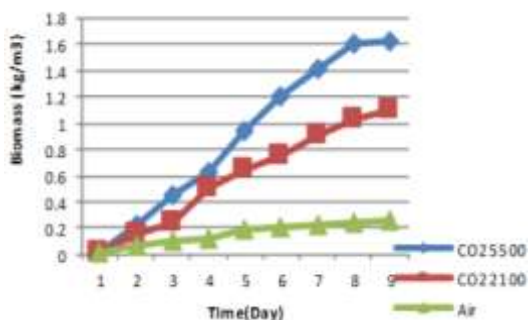
در این رابطه P تولید جلبک (گرم)، X_t غلظت جلبک در روز پایان آزمایش (گرم بر لیتر) و X_0 غلظت جلبک در روز آغاز کشت (گرم بر لیتر) است. t زمان (روز) در پایان کشت و t_0 زمان (روز) در ابتدای آزمایش است (۲۶). دی اکسیدکربن تثبیت شده در فتوبیوراکتور از رابطه شماره ۲ محاسبه شده است:

$$F = (X_t - X_0) m \times V \times \left(\frac{44}{12}\right) \quad \text{رابطه شماره ۲}$$

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

شد) (۲۱). شدت روشنایی به وسیله نورسنج تی ای اس ۱۳۳۵ (TES, 1335) اندازه گیری می‌شد. دمای راکتور روی ۲۷ درجه سانتی گراد 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 ریز جلبک اسپرولینا ۹ تا ۹/۵ تنظیم می‌شد (۲۳-۲۱). جریان گاز ورودی به راکتور براساس تجربیات آزمایشگاهی برای اختلاط مناسب در محیط کشت، به ازای هر لیتر از حجم مفید محیط کشت 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 به وسیله جریان سنج ویزیت جی ۱/۶ (WIZIT, G1.6) اندازه گیری و کنترل شده بود. برای ایجاد تهویه در راکتور از شیر گازی با قطر داخلی ۶ میلی متر استفاده شد (مطابق تصویر شماره ۱). غلظت دی اکسیدکربن در گاز احتراق به وسیله آنالیزر CO₂ تی ای اس ۱۳۷۰ (TES, ۱۳۷۰) به روش قرائت مستقیم و با اتصال به کامپیوتر هر دو ثانیه ثبت می‌شد. غلظت دی اکسیدکربن ورودی به راکتور با توجه به محدوده قابل اندازه گیری به وسیله دستگاه، کم تر از ۶۰۰۰ قسمت در میلیون تنظیم شد. برای اندازه گیری pH و دانسیته نوری (Optical Density_OD)، نمونه برداری از محتویات راکتور هر ۲۴ ساعت یک بار صورت می گرفت. اسیدیته محیط کشت به وسیله pH متر سانا اس ال ۹۰۱ (SANA, SL-901) و اندازه گیری دانسیته نوری به وسیله اسپکتروفتومتر هک دی آر ۲۸۰۰ (HACK, DR2800) در طول موج ۶۹۰ نانومتر انجام می‌شد. برای اندازه گیری جرم کل جلبک تولیدی، محتویات راکتور در پایان هر مرحله آزمایش به وسیله فیلتر فایبر گلاس GF/C غشائی صاف می‌شد و پس از شستشو با آب مقطر (به منظور جداسازی نمک های باقیمانده) در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲ ساعت خشک و سپس به وسیله ترازوی آزمایشگاهی اند

و ۲۲۵/۰ گرم در لیتر در روز بود. در مطالعه حاضر حداکثر سرعت تولید جلبک در غلظت دی اکسید کربن ۵۵۰۰ قسمت در میلیون در روز چهارم بود و به ۳۲۵/۰ گرم در لیتر در روز رسید. در این مطالعه مشخص شد با افزایش غلظت دی اکسید کربن تا ۶۰۰۰ قسمت در میلیون، رشد تولید زیست توده افزایش می یابد (نمودار شماره ۲). با افزایش غلظت دی اکسید کربن در بالاتر از ۶۰۰۰ قسمت در میلیون، به علت محدودیت در اندازه گیری غلظت دی اکسید کربن در گاز ورودی، تولید زیست توده اندازه گیری نشد. همان طور که در نمودار شماره ۲ نشان داده شده است در غلظت دی اکسید کربن 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 شماره ۲: رابطه غلظت دی اکسید کربن حاصل از احتراق نفت سفید تزریق شده به راکتور و تغییرات غلظت زیست توده

اثر منبع نور بر رشد ریز جلبک

در این مرحله رشد ریز جلبک تحت تابش نور مصنوعی متناوب و دائم قرار گرفت. غلظت دی اکسید کربن ورودی در هر دو آزمایش ۵۵۰۰ میلی گرم 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 کم تر 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).

می شود) و ۷ حجم محیط کشت در راکتور بر حسب لیتر می باشد (۲۶-۲۸). برای محاسبه درصد کربن تثبیت شده در مقایسه با کل کربن تزریق شده به راکتور از پارامتر کارایی مصرف کربن (Carbon Uptake Efficiency) استفاده می شود که از رابطه شماره ۳ محاسبه شد:

$$\text{رابطه شماره ۳: } CUE = \frac{\text{تولید جلبک } (\%C)}{\text{کل کربن تزریق شده}}$$

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

یافته ها

برای محاسبه دی اکسید کربن تثبیت شده با توجه به فرمولاسیون ریز جلبک به دست آمده از آنالیز CHNS، و نسبت جرم مولکولی دی اکسید کربن و کربن، رابطه شماره ۳ به رابطه شماره ۴ بدیل می شود:

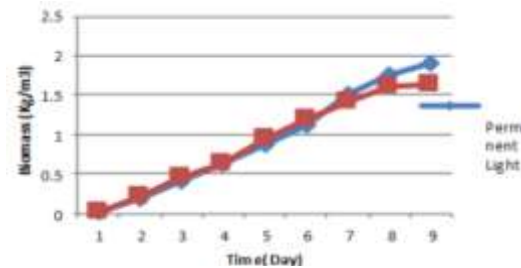
$$\text{رابطه شماره ۴: } C_f = 1.1 B_p$$

C_f جرم دی اکسید کربن تثبیت شده و B_p جرم زیست توده تولید شده است.

کشت ریز جلبک با گاز احتراق

فتویوراکتور تحت تابش نور مصنوعی متناوب قرار گرفت و ریز جلبک به خوبی با دی اکسید کربن موجود در گاز احتراق حاصل از نفت سفید رشد کرد. شکوفایی جلبکی در آزمایش های متعدد با غلظت دی اکسید کربن بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ قسمت در میلیون در پایان روز پنجم آشکار شد. در این گستره از غلظت دی اکسید کربن، در طی آزمایش های متعدد اثر سوئی بر رشد ریز جلبک به صورت تزریق مداوم گاز احتراق مشاهده نشد.

در مطالعه حاضر غلظت جلبک در تابش نور متناوب و با دی اکسید کربن ۲۱۰۰ و ۵۵۰۰ قسمت در میلیون پس از ۸ روز به ترتیب به ۱/۱ و ۱/۶۳ گرم در لیتر رسید. در این مدت در غلظت ۵۵۰۰ قسمت در میلیون سرعت نرخ تولید جلبک و تثبیت دی اکسید کربن به ترتیب ۰/۲



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

بحث

در این مطالعه، بررسی قابلیت جذب زیستی دی اکسیدکربن توسط ریزجلبک اسپیرولینا و تولید زیست توده در فتوبیوراکتور بررسی شد.

در مطالعه دیانتی و همکاران بر روی حذف دی اکسیدکربن 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 دی اکسیدکربن 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 پیش تصفیه و فقط با خنک سازی به فتوبیوراکتور تزریق شد (۱۷). سرعت زیاد رشد جلبک و کوتاه بودن فاز تاخیری را می توان به میکروارگانیزم های تطبیق یافته با گازهای حاصل از احتراق نفت سفید در طول آزمایش های مکرر نسبت داد (۳۰).

در مطالعه ای که توسط Chae و همکاران بر روی تثبیت دی اکسیدکربن حاصل از احتراق نفت سفید با اوگلنا گراسیلیس در راکتورهای منقطع و نیمه پیوسته صورت گرفت، نتایج، حاکی از رشد خوب جلبک با دی اکسیدکربن گاز احتراق با ترکیب ۱۱۰ هزار قسمت در میلیون دی اکسیدکربن، ۲۶ قسمت در میلیون اکسیدهای ازت، ۵ قسمت در میلیون اکسیدهای گوگرد و ۱۲۶

میلی گرم در لیتر ذرات معلق بود. در راکتور نیمه پیوسته با زمان ماند هیدرولیکی ۵ روز و دمای ۲۸ درجه سانتی گراد 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 سانتی گراد 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 آلاینده های 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 دی اکسیدکربن تثبیت شد و میزان حذف زیستی دی اکسیدکربن با زمان ماند هیدرولیکی ۸ روز به ۱۹ درصد رسید (۱۸).

Zhao و همکاران رشد سه گونه ریز جلبک کلرلا، ایزوکراییس و آمفیدینیوم کارترا را تحت تاثیر گاز احتراق شبیه سازی شده حاوی ۱۵۰ هزار میلی گرم در لیتر دی اکسیدکربن و هم چنین دی اکسیدکربن خالص بررسی کردند. میزان تولید جلبک کلرلا با تزریق گاز احتراق ۰/۱۹۲ گرم در لیتر در روز، سرعت رشد ویژه ۰/۳۲۸ در روز و سرعت تثبیت دی اکسیدکربن ۰/۳۵۳ گرم در لیتر در روز بود. سرعت رشد جلبک با دی اکسیدکربن اتمسفری ۰/۱۳۹ گرم در لیتر در روز، رشد ویژه ۰/۲۸۸ در روز و سرعت تثبیت دی اکسیدکربن 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 دی اکسیدکربن نسبت داده می شود (۱۴).

در مطالعه حاضر غلظت جلبک در تابش نور متناوب و با دی اکسیدکربن ۲۱۰۰ و ۵۵۰۰ قسمت در میلیون پس از ۸ روز به ترتیب به ۱/۱ و ۱/۶۳ گرم در لیتر رسید که بیش تر از غلظت جلبک در مطالعه Chae بود. علت این افزایش را می توان به کم تر بودن غلظت دی اکسیدکربن در گاز ورودی و کاهش اثر

بازدارندگی این گاز نسبت داد. در این مدت در غلظت ۵۵۰۰ قسمت در میلیون سرعت نرخ تولید جلبک و تثبیت دی اکسید کربن به ترتیب ۰/۲ و ۰/۲۲۵ گرم در لیتر در روز بود. و تقریباً 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 شد که کم تر از شدت هوادهی مطالعه حاضر (۰/۵ لیتر بر دقیقه) بود.

در مطالعه Jacob-Lopes و همکاران نشان شد که تولید زیست توده با ریز جلبک آفانوتک میکرواسکوپیا ناگلی با استفاده از فاضلاب تصفیه شده پالایشگاه نفت و در حالت نور متناوب، ۲۰ درصد کم تر از نور دائم است (۳۰). در تحقیق دیگری که توسط Jacob-Lopes صورت گرفت مشخص شد میزان تولید زیست توده با استفاده از ریز جلبک آفانوتک میکرواسکوپیا ناگلی در محیط کشت مصنوعی با شدت روشنایی ۱۲ کیلولوکس و تناوب ۱۴ ساعت، ۱۰ ساعت خاموش ۷۵ درصد کم تر از حالت روشنایی دائم بود (۳۲). در مطالعه‌ای که توسط Janssen انجام شد رشد ریز جلبک کلایدوموناس در شدت روشنایی ۲۴۰ میکرومول بر ثانیه بر مترمربع مورد اندازه گیری قرار گرفت. در بررسی Janssen مشخص شد سرعت رشد ویژه در نور متناوب ۳۱ درصد کم تر از سرعت ویژه در نور دائم است (۳۳). این مساله می تواند به دلیل آن باشد که هنگامی راکتور تحت نور متناوب قرار می گیرد در ساعات تاریک واکنش های تنفس رخ می دهد و مقداری از زیست توده تولید شده در زمان روشنایی را مصرف می کند (۶).

دی اکسید کربن تثبیت شده با ریز جلبک اسپیرولینا جذب دی اکسید کربن در فتوبیوراکتور به دو شکل اتفاق می افتد: ۱- واکنش شیمیایی با هیدرواکسید سدیم ۲- تثبیت در فرایند فتوسنتز توسط ریز جلبک. برای تعیین میزان دی اکسید کربن تثبیت شده با ریز جلبک در فرایند فتوسنتز می بایست ابتدا میزان کربن تثبیت شده در ساختمان ریز جلبک اندازه گیری و سپس دی اکسید کربن تثبیت شده محاسبه شود. جدول شماره ۲ درصد وزنی سه عنصر مهم تشکیل دهنده ریز جلبک اسپیرولینا که به وسیله دستگاه آنالیز CHNS اندازه گیری شده را نشان می دهد.

جدول شماره ۲: درصد وزنی عناصر کربن، هیدروژن و ازت در زیست توده اسپیرولینا اندازه گیری شده با آنالیز CHNS

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

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

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

در مطالعه دیگری که توسط Chiu و همکاران صورت گرفت میزان تثبیت زیستی دی اکسید کربن در

جدول شماره ۳: میزان تثبیت دی اکسید کربن توسط تولید زیست توده در فتوبیوراکتور

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

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

در مطالعه Morais و همکاران میزان تثبیت دی اکسید کربن 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 کننده طبق جدول شماره ۳ محاسبه شد. در غلظت های ۵۹۴ (غلظت در هوای آزمایشگاه)، ۲۱۰۰ و ۵۵۰۰ قسمت در میلیون دی اکسید کربن 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. همان طور که از جدول شماره ۳ و هم چنین تصویر شماره ۲ استنباط می شود با افزایش غلظت در گاز ورودی، علاوه بر افزایش تولید زیست توده، تولید زیست توده به ازای انرژی مصرف شده در پمپ کننده افزایش می یابد. علت افزایش این میزان را می توان به یکسان بودن مصرف انرژی در غلظت های مختلف دی اکسید کربن 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 کمپوسور ۱۳۰ میلی وات بر لیتر بود. در مطالعه Sierra از پمپ هوا با توان ۴۰ میلی وات بر لیتر در فتوبیوراکتور ستونی حباب دار استفاده شد (۳۴). در مطالعه ای که توسط Burns صورت گرفت هوادهی راکتور توسط پمپی با قدرت ۳۳۳ میلی وات بر لیتر با ستونی حباب دار انجام شد (۳۱). با انجام مطالعات بیش تر و شستشوی مداوم سنگ هوا در زمان بهره برداری مصرف انرژی در فتوبیوراکتور کاهش می یابد. در این بررسی بیش ترین سرعت تثبیت دی اکسید کربن در نور متناوب توسط ریزجلبک، ۰/۴۵ گرم در روز در لیتر (۰/۳۱ میلی گرم در دقیقه در لیتر) در غلظت ورودی ۵۵۰۰ قسمت در میلیون دی اکسید کربن به دست آمد. در مطالعه Nakamura میزان تثبیت دی اکسید کربن با غلظت ۶۰ هزار تا ۲۴۰ هزار قسمت در

میلیون توسط ریزجلبک کلامیدوموناس، ۰/۱۳ میلی گرم در دقیقه در لیتر گزارش شده است (۳۵). در مطالعه Morais و همکاران میزان تثبیت دی اکسید کربن با غلظت ۱۲۰ هزار قسمت در میلیون توسط ریزجلبک کلامیدوموناس، ۰/۱ میلی گرم در دقیقه در لیتر ثبت شده است (۲۷).

در مطالعه Larosi`ere و همکاران میزان تثبیت دی اکسید کربن با غلظت ۲۰ هزار میلی گرم در لیتر توسط ریزجلبک کلرلا، ۰/۵۹ میلی گرم در دقیقه در لیتر گزارش شده است. در بررسی Larosi`ere و همکاران مشابه آزمایش حاضر از شدت نور ۱۰ کیلو لوکس (معادل با ۱۲۰ میکرومول بر ثانیه بر مترمربع) استفاده شد (۳۶). با توجه به شبیه سازی شعله فانوس نفتی با مشعل های نفت سوز بویلرهای خانگی و صنعتی، مشخص شد گازهای حاصل از احتراق سوخت های نفتی که حاوی آلاینده های مختلفی از جمله دی اکسید کربن، مونواکسید کربن، اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، دوده و هیدورکربن های نسوخته است می تواند مستقیماً وارد فتوبیوراکتور شود و زیست توده تولید کند (۳۴). با توجه به نتایج به دست آمده در این بررسی به علت مصرف بیش تر مازوت (نفت سیاه) نسبت به نفت سفید در نیروگاه های حرارتی و صنایع، ضروری به نظر می رسد تحقیقات بیش تری در زمینه جذب زیستی دی اکسید کربن موجود در گاز حاصله از احتراق مازوت صورت گیرد. در مطالعات آینده، می توان با افزایش غلظت گاز ورودی به راکتور، حداکثر مقدار مجاز دی اکسید کربن 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.

References

- 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.
- Lara-Gil JA, Senés-Guerrero C, Pacheco A. Cement Flue Gas as a Potential Source of Nutrients During CO₂ mitigation by Microalgae. *Algal Research* 2016; 17: 285-292.
- European Union. Energy Balance sheet, Office of planning for Electricity and Energy, ministry of energy. 2015. Available From: <http://ec.europa.eu/eurostat/about/our-partners/copyright>. Accessed May 2, 2017.
- Chilcott R. Health Protection Agency Compendium of Chemical Hazards: Kerosene (Fuel Oil), HPA: 2006.
- Yang H, Fan S, lang X, WangY, Nie J. Economic Comparison of three gas separation for CO₂ capture from powerplant flue gas. *Chin J Chem Eng* 2011; 19(4): 615-620.
- 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.
- Herzog H, Drake E, Adams E. CO₂ Capture, Reuse, and Storage Technologies For Mitigating Global Climate Change. Doe Order No. 1997; (Cambridge: Massachuserts Institute of Technology Energy): De-Af22-96pc01257.
- Chinnasamy S, Ramakrishnan B, Bhatnagar A, Das K. Biomass Production Potential of a Wastewater Alga Chlorella Vulgaris Arc 1 Under Elevated Levels of CO₂ And Temperature. *Int J Mol Sci* 2009; 10(2): 518-532.
- Kleivdal H, Miljo Svein U, Nordvik M. CO₂ to Bio-Microalgae as an Omega-3 Rich Feedstock-Integrating CO₂ Sequestration and Aquafeed Production. Project Final Report. January 2012. (Report)
- 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.
- 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)
- Knudsen J, NJensen JN, Vilhelmsen PJ, Biede O. Experience with CO₂ capture from coal flue gas in pilot-scale: testing of different amine solvents. *Energy Procedia* 2009; 1(1): 1091-1098.
- 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.
- 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.
- 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.
- Chiu SY, Kao CY, Chen CH, Kuan TC, Ong SC, et al. Reduction of CO₂ by a High-Density Culture of Chlorella Sp in a Semicontinuous Photobioreactor. *Bioresour Technol* 2008; 99(9): 3389-3396.

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. Costa 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 Ismaïla M, El-Ayouty 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 CO₂ and Flue Gas-Containing CO₂ by Microalgae. *Bioresour Technol* 2015; 184: 190-201.
24. Iancu P, Pleșu V, Velea S. Flue Gas CO₂ Capture by Microalgae in Photobioreactor: a Sustainable Technology. *Chem Eng J* 2012; 29: Aidic Publication.
25. Iancu P, Pleșu V, Velea S. Flue Gas CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ Fixation and Biomass Production by Microalgae in Photobioreactors. *Chem Eng and Processing* 2009; 48: 306-310.

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 CO₂ Concentrations and Light Intensities. Eng Life Sci 2014; 1-11.