

بررسی حذف دی‌اکسیدکربن از احتراق متان و تولید زیست‌توده در فتوبیوراکتور با استفاده از ریزجلبک اسپیرولینا

رضانعلی دیانتی تیلکی^۱، مرتضی جعفرصالحی^۲، رضا صفری^۳ و علیرضا موحدی^۴

۱- دانشیار، مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، dianati.tilaki@gmail.com

۲- کارشناس ارشد، مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری (نویسنده مخاطب)، salehi_env@yahoo.com

۳- استادیار، بیوتکنولوژی، پژوهشکده اکولوژی و شیلات دریای خزر، ساری، safari1351@gmail.com

۴- کارشناس ارشد، مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، movahedi_43@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۲۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۲۳)

چکیده: هدف از این مطالعه تعیین میزان حذف دی‌اکسیدکربن و تولید زیست‌توده در فتوبیوراکتور با استفاده از ریزجلبک اسپیرولینا با تزریق گازهای حاصل از احتراق متان بود. آزمایش‌ها با ساخت فتوبیوراکتور و تزریق مداوم هوا و گاز احتراق، به‌صورت جداگانه، به راکتورهای حاوی محیط کشت فاقد هرگونه منبع کربن انجام شد. دی‌اکسیدکربن مورد نیاز در راکتور کنترل، از هوا و در راکتورهای آزمایش، از گاز احتراق تامین می‌شد. دبی جریان گاز عبوری از راکتور ۱/۵ لیتر بر دقیقه بود. منبع نور به دو صورت مصنوعی و طبیعی بود. نور مصنوعی با چهار عدد لامپ فلورسنت با شدت روشنایی ۱۰ کیلوولکس در سطح مماس بر فتوبیوراکتور و در دو حالت پیوسته و متناوب آزمایش شد. غلظت دی‌اکسیدکربن ورودی به راکتورها در محدوده ۵۸۰ تا ۵۰۰۰ قسمت در میلیون انتخاب شد و به‌وسیله دستگاه CO₂ سنج اندازه‌گیری شد. میزان تولید زیست‌توده جلبک و همچنین تغییرات pH محلول اندازه‌گیری شد. حداکثر میزان تولید جلبک با دی‌اکسیدکربن هوا و جریان احتراق گاز متان حاوی ۴۱۰۰ قسمت در میلیون دی‌اکسیدکربن، پس از هشت روز، تحت تابش نور متناوب به‌ترتیب به ۰/۰۷ و ۰/۲ گرم در لیتر در روز و حداکثر غلظت زیست‌توده به‌ترتیب به ۰/۲۵ و ۱/۰۴ گرم در لیتر رسید. میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با غلظت ۳۳۰۰ و ۴۱۰۰ قسمت در میلیون تحت تابش نور متناوب به‌ترتیب به ۲/۵ و ۳/۱۳ درصد رسید. تولید زیست‌توده در نور مصنوعی متناوب ۳۵ درصد کمتر از آزمایش با نور ثابت بود. با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز احتراق، میزان تولید زیست‌توده افزایش یافت. گاز حاصل از احتراق متان بدون پیش‌تصفیه در فتوبیوراکتور تزریق شد و حذف دی‌اکسیدکربن و تولید جلبک صورت گرفت.

کلیدواژگان: دی‌اکسیدکربن، اسپیرولینا، گاز احتراق، متان

مقدمه

در چند دهه اخیر، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر چشم‌گیر بوده است، به‌طوری که غلظت دی‌اکسیدکربن، که قبل از انقلاب صنعتی ۲۸۰ قسمت در میلیون بود، در سال ۲۰۱۶ به بیش از ۴۰۲ قسمت در میلیون افزایش یافته است و روند افزایش غلظت آن به‌طور نگران‌کننده‌ای ادامه دارد. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در جو زمین موجب گرمایش جهانی شده است، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، به ویژه دی‌اکسیدکربن، باید به‌عنوان یک هدف جدی مدنظر قرارگیرد [۲، ۱]. گرمایش جهانی منجر به بروز اثرات سوئی بر محیط زیست و سلامت انسان، منابع آب، کشاورزی، اقتصاد، ذوب‌شدن یخ‌های قطبی، بالآمدن سطح آب دریاها، آب‌گرفتگی برخی مناطق کم‌ارتفاع و همچنین از بین رفتن بعضی از گونه‌های حیات در جهان شده است [۳، ۴]. نیروگاه‌ها، صنایع سیمان و کارخانجات ذوب فلزات و پالایشگاه‌ها، به‌دلیل مصرف سوخت‌های فسیلی، از منابع اصلی

انتشار دی‌اکسیدکربن اند [۵،۶]. حتی دودکش نیروگاه‌های گازسوز با سیستم احتراق توربین گازی و سیکل ترکیبی حاوی ۳/۵ تا ۵/۵ درصد دی‌اکسیدکربن است [۷].

روش‌های مختلفی برای جذب دی‌اکسیدکربن از هوا وجود دارد که عبارت‌اند از: تولید سوخت‌های زیستی، ساخت زغال بیولوژیکی، جذب مستقیم از هوا، تغذیه اقیانوس‌ها و فرسایش مصنوعی. روش‌های جذب دی‌اکسیدکربن از جریان گاز حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی شامل جذب به‌وسیله محلول جاذب، جذب سطحی، روش‌های غشائی، پمپ‌های الکتروشیمیایی، تقطیر برودتی، احتراق با استفاده از اکسیدهای فلزی و استفاده از فتوبیوراکتورهاست [۸]. یکی از معایب جذب دی‌اکسیدکربن بر روی مواد جاذب سطحی گران‌قیمت، تخریب شدن آن‌ها بر اثر تماس با اکسیدهای گوگرد و ازت است. در صورت تزریق گاز احتراق در اقیانوس‌ها و مخازن طبیعی نیز خطر انتشار دوباره و نشت به جو وجود دارد [۹]. روش‌های نام‌برده عمدتاً روش‌های پرهزینه‌ای هستند [۱۰].

یکی از روش‌های جذب دی‌اکسیدکربن از گاز احتراق، استفاده از فتوبیوراکتور^۱ است. جذب دی‌اکسیدکربن در فتوبیوراکتور به‌منظور استفاده از این گاز برای رشد ریزجلبک‌ها^۲ و تولید زیست‌توده^۳ صورت می‌گیرد [۱۱]. ریزجلبک‌ها میکروارگانیسم‌های فتوسنتزکننده‌اند. زمان تقسیم سلولی آن‌ها کمتر از چند ساعت است [۱۲]. سرعت فتوسنتز ریزجلبک‌ها ۱۰ تا ۵۰ برابر گیاهان خشکی است [۱۳،۱۴]. جرم زیست‌توده ریزجلبک‌ها در کمتر از یک روز دوبرابر می‌شود [۱۵]. کارایی استفاده از انرژی خورشیدی در فتوبیوراکتور ۵ درصد است، اما این میزان در گیاهان خشکی تنها ۰/۰۵ درصد است [۱۶]. ۵۰ درصد وزن ریزجلبک‌ها از کربن تشکیل شده است و 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. این در حالی است که گیاهان خشکی تنها قادر به تثبیت ۳ تا ۶ درصد از دی‌اکسیدکربن منتشرشده در جو هستند [۱۷]. از زیست‌توده جلبکی برای تولید محصولات شیمیایی، کود و غذای حیوانات و سوخت‌های زیستی استفاده می‌شود. با فروش این محصولات می‌توان بخشی از هزینه‌های سیستم را جبران کرد [۱۸]. یکی از کاربردهای زیست‌توده جلبکی تولید سوخت زیستی^۴ است. در برخی نواحی جنوبی ایران (استان فارس) گونه خاصی از ریزجلبک کلامیدوموناس^۵ شناسایی شد که پتانسیل تولید زیست‌سوخت را دارد. در تحقیقی که توسط امیر امیدوار و الهام امینی صورت گرفت، خواص فیزیکی و مشخصات قطره‌سازی^۶ زیست‌سوخت تولیدشده از ریزجلبک کلامیدوموناس بررسی شد و نتایج نشان داد که زیست‌سوخت به‌دست آمده از این ریز جلبک خواص بسیار مشابهی با سوخت دیزل دارد [۱۹].

در بررسی‌های گذشته، محققان مختلفی حذف دی‌اکسیدکربن در فتوبیوراکتور را بررسی کرده‌اند. تثبیت دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق گاز متان با ریزجلبک‌های کلرلا^۷، سینکوسیستیس^۸ و تتراسلمیس^۹ توسط اینجی تانگ مطالعه شده است [۱۷]. در تحقیق تانگ، گاز احتراق، پس از جداسازی ذرات معلق توسط صافی و پیش‌تصفیه به‌کمک محلول آب آهک، وارد راکتور شد. در مطالعه‌ای، اثر گاز احتراق بر تولید زیست‌توده با ریزجلبک‌های کلرلا ولگاریس^{۱۰}، دونالیلا تریولکتا^{۱۱} و سندسموس اوبلیکوس^{۱۲} توسط حنیف‌زاده و همکاران بررسی شد [۲۰]. در این مطالعه، گاز احتراق شبیه‌سازی شده، که مخلوطی از NO_x ، CO_2 و SO_x بود، به فتوبیوراکتور تزریق شد. همچنین، امکان استفاده از گازهای احتراق در نیروگاه حرارتی برای تولید

1. Photo Bioreactor
2. Micro Algae
3. Biomass
4. Biofuel
5. Clamydomonas
6. Atomization
7. Chlorella
8. Synechocystis
9. Tetraselmis
10. Chlorella Vulgaris
11. Dunaliella Tertiolecta
12. Scenedesmus Obliquus

ریزجلبک توسط ناکامورا و همکاران بررسی شد [۲۱]. رابطه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق زغال‌سنگ در تولید زیست‌توده توسط ریزجلبک کلرلاسنده موس توسط لی و گرو وایاها بررسی شد [۲۲]. در تحقیقات شنگ وی چیو و همکاران، از گازهای احتراق کوره کک در کوره فولادسازی برای تولید زیست‌توده و حذف دی‌اکسیدکربن استفاده شد [۲۳]. در یک بررسی، که توسط لیندبلوم و لارسون انجام شد، فاضلاب شهری حاوی مواد مغذی در فتوبیوراکتور برای تثبیت دی‌اکسیدکربن موجود در گاز حاصل از احتراق بیوگاز مورد استفاده قرار گرفت [۲۴].

تاکنون مطالعات اندکی درباره جذب دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق گاز متان به‌وسیله ریزجلبک اسپیرولینا صورت گرفته‌است. در مطالعه حاضر، به‌جای استفاده از گاز شبیه‌سازی‌شده، مستقیماً از گاز احتراق شعله متان برای تولید جلبک استفاده شد. نوآوری این پژوهش در آن است که برخلاف مطالعات قبلی [۱۹، ۱۷، ۱] گاز احتراق بدون پیش‌تصفیه وارد راکتور شد و از صافی و آب‌آهک عبور داده نشد. همچنین، به‌علت مناسب بودن غلظت دی‌اکسیدکربن در جریان ورودی، تزریق گاز به محیط کشت به‌صورت مداوم صورت گرفت. هدف از این تحقیق تعیین میزان تولید زیست‌توده جلبکی اسپیرولینا و جذب دی‌اکسیدکربن در فتوبیوراکتور با تزریق گاز احتراق متان به‌عنوان تنها منبع کربن مورد نیاز فتوسنتز و تعیین اثر متغیرهایی نظیر غلظت گاز ورودی، اثر منبع نور و زمان تماس بر میزان تولید زیست‌توده جلبکی و جذب دی‌اکسیدکربن بود.

مواد و روش‌ها

بذر ریزجلبک اسپیرولینا، که از پژوهشکده اکولوژی آبیان دریای خزر تهیه شده بود، در آزمایشگاه آلودگی هوای دانشکده بهداشت ساری در محیط‌کشت زاروک^۱ فاقد منبع کربنی (NaHCO_3) کشت داده شد. ترکیب محیط‌کشت مورد استفاده عبارت عبارت بود از: NaNO_3 (۲/۵ گرم بر لیتر)، NaCl (۱ گرم بر لیتر)، K_2SO_4 (۱ گرم بر لیتر)، K_2HPO_4 (۰/۵ گرم بر لیتر)، $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (۰/۲ گرم بر لیتر)، FeSO_4 (۰/۰۱ گرم بر لیتر)، $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (۰/۰۸ گرم بر لیتر) و EDTA (۰/۰۸ گرم بر لیتر) بود [۲۵]. در این تحقیق، از دی‌اکسیدکربن موجود در هوا یا گاز احتراق، به‌عنوان منبع کربن در محیط‌کشت جلبک، استفاده شد. کشت جلبک در یک فتوبیوراکتور به حجم مفید ۳ لیتر انجام شد. با افزودن ۲۰ میلی‌لیتر از محلول حاوی جلبک به هر لیتر محیط‌کشت جدید، غلظت جلبک در آغاز کشت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر تنظیم می‌شد [۲۶]. هر مرحله آزمایش ۸ تا ۱۲ روز به‌طول می‌انجامید. با استفاده از پمپ مکش هوا گاز حاصل از احتراق متان، پس از عبور از یک خنک‌کن، به‌وسیله یک پخش‌کننده هوا^۲ به‌داخل فتوبیوراکتور تزریق می‌شد. در راکتور شاهد، هوا به‌وسیله یک پمپ هوای آکواریوم به‌داخل فتوبیوراکتور دمیده می‌شد. به‌وسیله یک پمپ‌خلا، گاز حاصل از احتراق متان از سیستم مورد آزمایش عبور داده می‌شد. در فتوبیوراکتور، با عبور گاز از یک پخش‌کننده هوا (سنگ هوای آکواریومی)، با تشکیل حباب، گاز احتراق در تماس با محلول قرار می‌گرفت. در شکل ۱، تصویر نمونه آزمایشگاهی و در شکل ۲ طرحواره سیستم مورد استفاده نشان داده شده است.

منبع تامین نور چهار عدد لامپ فلورسنت کم‌مصرف سفید ۳۵ وات بود که در چهار طرف فتوبیوراکتور ثابت شدند. تابش نور به سه صورت نور طبیعی، نوردهی مصنوعی پیوسته و نوردهی متناوب برای شبیه‌سازی با نور طبیعی (۱۴ ساعت روشن و ۱۰ ساعت خاموش) تنظیم شده بود. شدت روشنایی در سطح خارجی فتوبیوراکتور ۱۰ کیلولوکس تنظیم شد [۱۸]. شدت روشنایی به‌وسیله نورسنج (تی ای اس ۱۳۳۵)^۳ اندازه‌گیری می‌شد. pH اولیه محیط‌کشت، به‌وسیله محلول یک مولار هیدروکسید سدیم، برای ایجاد شرایط رشد بهینه ریزجلبک اسپیرولینا، ۹ تا ۹/۵ تنظیم می‌شد [۲۸، ۱۸، ۲۷].

در راکتور کنترل، دی‌اکسیدکربن از هوا و در راکتورهای آزمایش، از احتراق گاز متان تامین می‌شد [۱۸]. منبع تامین گاز متان در این آزمایش گاز لوله‌کشی شهری بود. جریان گاز ورودی به راکتور برای هوادهی و اختلاط مناسب در محیط‌کشت،

1. Zarrouk
2. Diffuser
3. TES, 1335

به ازای هر لیتر از حجم مفید راکتور ۰/۵ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. حجم هوای عبور داده شده به وسیله جریان سنج (ویزیت جی ۱/۶) اندازه گیری شده بود. غلظت دی اکسید کربن در گاز احتراق به وسیله آنالیزر CO₂ (تی ای اس ۱۳۷۰) متصل به رایانه به روش قرائت مستقیم ثبت می شد. غلظت دی اکسید کربن ورودی به راکتور، با توجه به محدوده قابل اندازه گیری به وسیله دستگاه، کمتر از ۶۰۰۰ قسمت در میلیون تنظیم شد.



Figure 1- View of the Photo bioreactor by Methane Flue Gas

شکل ۱- نمایی از نمونه فتوبیوراکتور با احتراق گاز متان

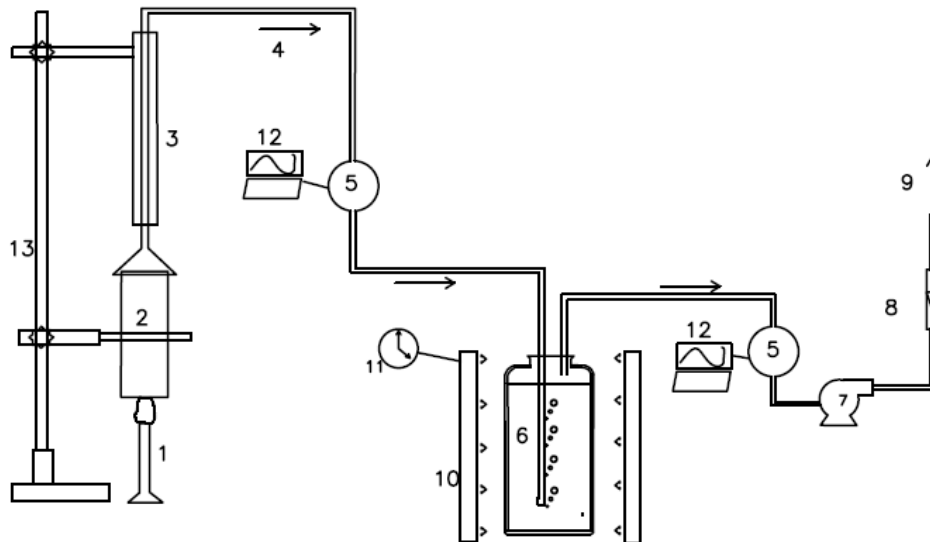


Figure 2- Diagram component used in photo bioreactor

1- burner, 2- metal cone, 3- condenser, 4- combustion gas transmission line, 5- carbon dioxide analyzer, 6- photobioreactor, 7- suction pump, 8- flow measuring device, 9- gas exit, 10- Fluorescent lamp, 11- timer, 12- computer, 13- metal base

شکل ۲- طرحواره دستگاه‌های مورد استفاده در سیستم فتوبیوراکتور

۱- شعله متان، ۲- قیف فلزی، ۳- کندانسور، ۴- لوله انتقال گاز احتراق، ۵- آنالیزر دی اکسید کربن، ۶- فتوبیوراکتور، ۷- پمپ مکنده، ۸- اندازه گیری جریان گاز، ۹- مسیر خروج گاز، ۱۰- لامپ فلورسنت، ۱۱- تایمر، ۱۲- رایانه، ۱۳- پایه فلزی

1. WIZIT, G1.6
2. TES, 1370

برای اندازه‌گیری pH و دانسیته نوری^۱، نمونه‌برداری از محتویات راکتور هر ۲۴ ساعت یک‌بار صورت می‌گرفت. اسیدیته محیط کشت به وسیله pH متر (سانا اس ال ۹۰۱)^۲ و اندازه‌گیری دانسیته نوری به وسیله اسپکتروفوتومتر (هک دی آر ۲۸۰۰)^۳ در طول موج ۶۹۰ نانومتر انجام می‌شد. برای اندازه‌گیری جرم کل جلبک تولیدی، محتویات راکتور در پایان هر مرحله آزمایش به وسیله فیلتر فایبرگلاس GF/C غشایی صاف می‌شد و پس از شستشو با آب مقطر (به منظور جداسازی نمک‌های باقی مانده) در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت خشک و سپس به وسیله ترازوی آزمایشگاهی (اندچ آر ۲۰۰)^۴ با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین می‌شد [۲۹]. در شکل ۳، رابطه بین غلظت زیست‌توده 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^۵ (پرکین المر ۲۴۰۰)^۶ اندازه‌گیری شد.

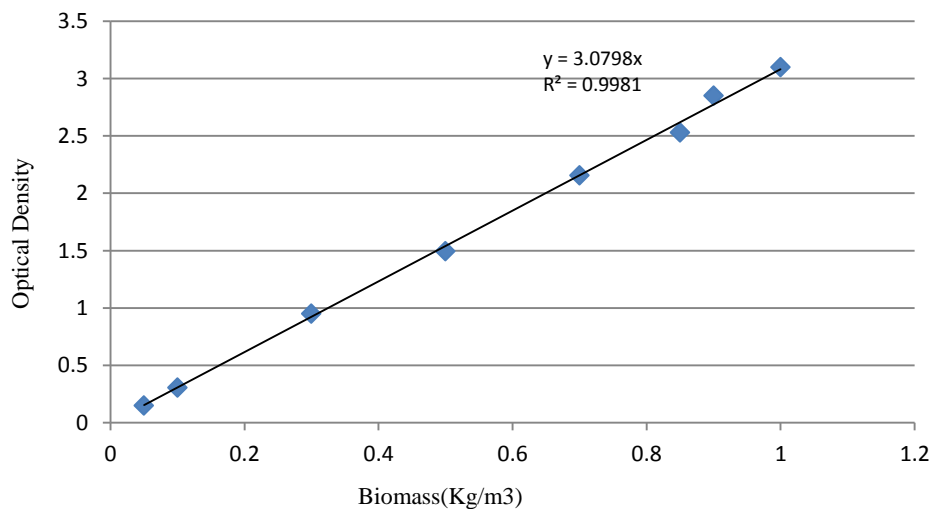


Figure 3- Calibration Curve to Relation between Optical Density and Biomass Concentration

شکل ۳- رابطه غلظت زیست‌توده و دانسیته نوری در منحنی کالیبراسیون

میزان تولید جلبک^۷ به صورت گرم بر لیتر در روز از رابطه (۱) تعیین شد:

$$P = \frac{X_t - X_0}{t - t_0} \quad (1)$$

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.

دی‌اکسیدکربن تثبیت شده در فتوبیوراکتور از رابطه (۲) محاسبه شده است:

$$F = (X_t - X_0) m \times V \times \left(\frac{44}{12}\right) \quad (2)$$

در این رابطه، F دی‌اکسیدکربن 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 کربن موجود در یک گرم جلبک خشک که از دستگاه آنالیزر CHNS به دست می‌آید و V حجم محیط کشت در راکتور بر حسب لیتر است [۳۰-۳۲].

1. Optical Density(OD)
2. SANA ,SL-901
3. HACK, DR2800
4. AND, HR200
5. CHNS Analyzer, Perkin-Elmer, 2400(Carbon, Hydrogen, Nitrogen, Sulfur Analyser)
6. PERKIN-ELMER , 2400
7. Productivity

برای محاسبه دی‌اکسیدکربن تثبیت‌شده، با توجه به فرمولاسیون ریزجلبک به‌دست‌آمده از دستگاه آنالیز CHNS و نسبت جرم مولکولی دی‌اکسیدکربن (۴۴) و کربن (۱۲)، رابطه (۲) به رابطه (۳) تبدیل می‌شود:

$$C_f = 1.1 B_p \quad (3)$$

C_f جرم دی‌اکسیدکربن تثبیت‌شده و B_p جلبک تولیدشده است.

برای محاسبه درصد کربن تثبیت‌شده در مقایسه با کل کربن تزریق‌شده به راکتور از پارامتر کارایی مصرف کربن^۱، که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود، استفاده شد:

$$CUE = \frac{\text{تولید جلبک } (\%C)}{\text{کربن کل تزریق شده}} \quad (4)$$

در این رابطه، C درصد جرمی کربن در زیست‌توده جلبک است.

یافته‌ها و بحث

ریزجلبک اسپیرولینا در ظرف تکثیر به‌سرعت در محیط‌کشت زاروک، که حاوی ۱۳/۶۱ گرم در لیتر بی‌کربنات سدیم بود، رشد کرد و در روز پنجم به حداکثر رشد رسید. هوادهی، به‌منظور اختلاط محتویات راکتور و خروج گاز اکسیژن تولیدشده در فتوسنتز، همواره باید صورت می‌گرفت. برای جایگزینی منبع کربن معدنی در راکتور کنترل، ابتدا، از دی‌اکسیدکربن هوا (با غلظت ۵۸۰ قسمت در میلیون) استفاده شد. ریزجلبک در شرایط کنترل‌شده قادر به جذب دی‌اکسیدکربن موجود در هوا بود. آزمایش کشت ریزجلبک اسپیرولینا در دو محیط خنثی و قلیایی با تزریق هوا انجام شد. در شرایط pH برابر ۷، با استفاده از هوا (بدون اضافه‌کردن منبع کربن معدنی به محیط‌کشت) رشد تولید ریزجلبک بسیار آهسته بود. با افزایش pH تا ۹/۵ در کشت مجدد، سبزشدن محیط‌کشت و تولید زیست‌توده آشکار شد [۱۸]. تحقیقات ناکام‌ورا نیز حاکی از رابطه مستقیم تولید زیست‌توده با افزایش pH بود [۲۱]. در بررسی حاضر، حداکثر غلظت زیست‌توده با تزریق هوا در روزهای نهم و دوازدهم به‌ترتیب به ۰/۲۵ و ۰/۵۳ گرم در لیتر رسید. pH اولیه محیط کشت ۹/۵ بود و به‌تدریج، در پایان دوره کشت جلبک (روز دوازدهم)، به ۸/۵ رسید. با توجه به ایجاد شرایط بافری مربوط به بی‌کربنات (HCO_3) در محیط‌کشت [۳۳]، ظرفیت بافری ایجادشده موجب جذب و انحلال دی‌اکسیدکربن و مصرف آن به‌وسیله گیاه طی فتوسنتز شده و pH محیط تا پایان دوره کشت (شکوفایی جلبک) ثابت مانده است.

در این آزمایش، شکوفایی جلبک در روز دوازدهم مشاهده شد. سرعت رشد تا روز چهارم کند بود و پس از آن با آهنگ بیشتری ادامه یافت. در این تحقیق، که به‌صورت جریان منقطع انجام شد، هوادهی راکتور تا زمان رسیدن به فاز ثابت انجام می‌شد. در نتیجه، مشخص شد، مشابه آزمایش‌های سایر محققین، کشت ریزجلبک در فتوبیوراکتور در فاز رشد توجیه اقتصادی دارد [۳۴، ۳۵]. برای تعیین امکان تولید زیست‌توده در شرایط آب‌وهوایی سرد، آزمایش کشت جلبک بدون افزودن منبع کربن معدنی، صرفاً با استفاده از دی‌اکسیدکربن در هوای آزاد محیط و در ماه اسفند با شدت روشنایی ۲ تا ۴ کیلو لوکس در شرایط ابری و بارندگی و حداکثر دمای ۱۵ درجه و حداقل ۴ درجه سانتی‌گراد انجام شد. تولید جلبک در چنین شرایط آب‌وهوایی صورت نگرفت.

کشت ریزجلبک با گاز احتراق

برای بررسی تولید زیست‌توده با احتراق متان، گاز دودکش، که در کندانسور شیشه‌ای خنک می‌شد، مستقیماً به راکتور تزریق شد. فتوبیوراکتور تحت تابش نور مصنوعی متناوب قرار گرفت و ریزجلبک به‌خوبی با دی‌اکسیدکربن موجود در گاز احتراق رشد کرد. شکوفایی جلبکی (در این تحقیق شکوفایی به رشد زیاد جلبک و سبزشدن کامل محیط‌کشت گفته می‌شود)، در

1. Carbon Uptake Efficiency

آزمایش‌های متعدد، با غلظت دی‌اکسیدکربن بین ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ قسمت در میلیون در روز پنجم آشکار شد. سرعت زیاد رشد جلبک و کوتاه‌بودن فاز تاخیری را می‌توان به میکروارگانیزم‌های تطبیق‌یافته با گازهای احتراق در طول آزمایش‌های مکرر نسبت داد [۳۱]. در این گستره از غلظت دی‌اکسیدکربن، در طی آزمایش‌های متعدد اثر سوئی بر رشد ریزجلبک به صورت تزریق مداوم گاز احتراق مشاهده نشد. با توجه به اینکه در این تحقیق، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در محیط کشت، سایر متغیرهای مستقل مانند pH، دمای گاز ورودی و دمای محیط، شدت روشنایی، سرعت هوادهی و غلظت محیط‌کشت ثابت ماند، غلظت دی‌اکسیدکربن به‌عنوان متغیر مورد آزمایش قرار گرفت و تنها افزایش غلظت این گاز سرعت تولید جلبک را افزایش داد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که فتوبیوراکتور می‌تواند موجب کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن شود [۲۱].

در این مطالعه مشخص شد، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تا ۵۰۰۰ قسمت در میلیون، رشد تولید زیست‌توده جلبکی افزایش می‌یابد (شکل ۴). با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در بالاتر از ۵۰۰۰ قسمت در میلیون، به‌علت محدودیت در اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز ورودی، تولید زیست‌توده اندازه‌گیری نشد. مطالعه‌ای که توسط اینجی تانگ و همکاران بر روی تثبیت دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق گاز متان توسط سه گونه ریزجلبک کلرلا، سینکوسیستیس و تتراسلمیس سوسیکا^۱ صورت گرفت نیز حاکی از رابطه مستقیم افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن با تولید زیست‌توده در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۰،۰۰۰ قسمت در میلیون بود، اما با افزایش غلظت بیش از حد، اثرات بازدارندگی و سمیت دی‌اکسیدکربن بر رشد جلبک مشاهده شد [۱۷]. در مطالعه لی و همکاران، مشخص شد افزایش دی‌اکسیدکربن حاصل از احتراق زغال سنگ تا ۲۰ هزار قسمت در میلیون منجر به افزایش تولید زیست‌توده کلرلا سندسموس می‌شود و اثرات بازدارندگی افزایش غلظت گاز در ۴۰ هزار قسمت در میلیون بروز می‌کند [۲۲].

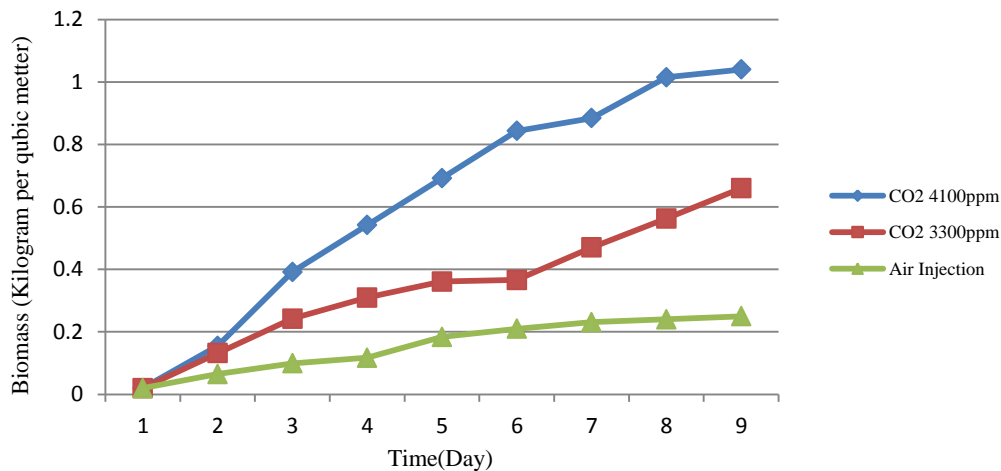


Figure 4- Relation between Carbon Dioxide and Spirulina Biomass Concentration

شکل ۴- رابطه غلظت دی‌اکسیدکربن و رشد تولید ریزجلبک اسپیرولینا

در تحقیق تانگ و همکاران، گاز احتراق قبل از تزریق به فتوبیوراکتور از محیط قلیایی (آب آهک) عبور داده شد [۱۷]. اما در تحقیق حاضر گاز احتراق با جریان متان بدون هیچ‌گونه تغییری مستقیماً وارد راکتور شد. در مطالعه مشابهی که توسط وانگ سنکاری و همکاران صورت گرفت، مشخص شد، پس از ۱۲ روز هوادهی، حداکثر غلظت جلبک اسپیرولینا به ۱/۰۲ گرم در لیتر رسید. در تحقیق سنکاری از محیط‌کشت زاروک و نور مصنوعی متناوب (۱۴ ساعت روشن و ۱۰ ساعت خاموش) با شدت روشنایی ۱۰ کیلولوکس استفاده شد [۳۵]. در تحقیق دیگری که توسط مورایس و همکاران انجام شد، از گاز احتراق شبیه‌سازی شده با ترکیب دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد و اکسیدنیترژن به میزان به ترتیب ۱۲۰۰۰، ۱۰۰ و ۶۰ قسمت در

1. *Tetraselmis suecica*

میلیون برای تولید ریز جلبک اسپیرولینا استفاده شد. حداکثر غلظت جلبک ۱/۴۲ گرم در لیتر، حداکثر رشد تولید جلبک ۰/۱ گرم در لیتر در روز و حداکثر تثبیت دی‌اکسید کربن ۰/۱۴ گرم در لیتر روز اندازه‌گیری شد. در این بررسی، از نور مصنوعی با تناوب ۱۲ ساعت روشن و ۱۲ ساعت خاموش و هوادهی متناوب (۱۵ دقیقه در هر ۲ ساعت) استفاده شد [۳۲]. در مطالعه باربارا لاروسیرا و همکاران از غلظت ۲۰,۰۰۰ قسمت در میلیون دی‌اکسید کربن برای کشت ریز جلبک کلرلا استفاده شد. طبق گزارش لاروسیرا و همکاران، ۲/۶ گرم در لیتر زیست‌توده در روشنایی ۱۰ کیلو لوکس تولید شد [۲۵]. در تحقیق حاضر، حداکثر غلظت زیست‌توده تولید شده در غلظت ۴۱۰۰ قسمت در میلیون با نور متناوب ۱/۰۵ گرم در لیتر بود که با یافته‌های لی و همکاران (۱/۲ گرم بر لیتر) و نتایج سنکاری (۱/۰۲ گرم در لیتر) قابل مقایسه است [۲۲].

در تحقیق چی یو و همکاران، جریان هوادهی، به‌ازای هر لیتر حجم مفید راکتور، ۰/۲۵ لیتر بر دقیقه بود [۱]. در بررسی سولتو و همکاران، علاوه بر شدت جریان ۰/۲۲ لیتر بر دقیقه، از همزن مغناطیسی با ۲۰۰ چرخه در ثانیه استفاده شد [۱۸]. در تحقیق تانگ و همکاران، میزان جریان هوادهی ۱ لیتر در دقیقه بود [۱۷]. در مطالعه مورایس، شدت جریان هوا ۰/۳ لیتر بر دقیقه تنظیم شد [۳۲]. در بررسی حاضر، از جریان هوای ۰/۵ لیتر بر دقیقه به‌ازای هر لیتر حجم راکتور برای تزریق گاز و اختلاط در محیط کشت استفاده شد.

اثر منبع نور بر رشد ریز جلبک

در این مرحله رشد ریز جلبک تحت تابش نور مصنوعی متناوب و دائم و همچنین نور طبیعی قرار گرفت. غلظت دی‌اکسید کربن ورودی در هر دو آزمایش ۴۱۰۰ قسمت در میلیون تنظیم شده بود. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، تولید زیست‌توده در شرایط مشابه در نور مصنوعی متناوب ۳۵ درصد کمتر از تولید جلبک در نور دائم است و غلظت زیست‌توده در نور دائم به ۱/۶ گرم در لیتر رسید. تحقیق ژاکوب لاپز نشان داد که تولید زیست‌توده در حالت نور متناوب، ۲۵ درصد کمتر از نور دائم است [۳۱]. در تحقیقی که توسط مارسل جانسن انجام شد، رشد ریز جلبک کلامیدوموناس در شدت روشنایی ۲۴۰ میکرومول بر ثانیه بر مترمربع اندازه‌گیری شد. در بررسی جانسن مشخص شد سرعت رشد ویژه در نور متناوب ۳۱ درصد کمتر از سرعت ویژه در نور دائم است [۳۶]. این مسئله می‌تواند به دلیل آن باشد که هنگامی راکتور تحت نور متناوب قرار می‌گیرد در ساعات تاریک واکنش‌های تنفس رخ می‌دهد و ۲۵ درصد از زیست‌توده تولید شده را مصرف می‌کند [۸].

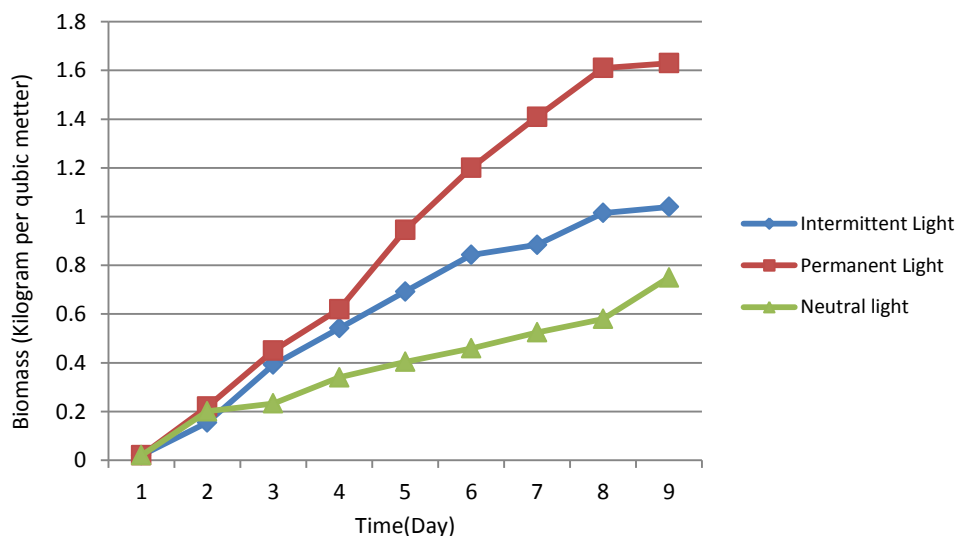


Figure 5- Relation between source of light (permanent & intermittent) and Spirulina Biomass Concentration

شکل ۵- اثر منبع نور (نور مصنوعی متناوب و دائم) بر رشد ریز جلبک اسپیرولینا

فتوسنتز که یک فرایند متابولیسم است به صورت واکنش‌های روشنایی و تاریکی انجام می‌شود. در واکنش روشنایی آدنوزین تری فسفات^۱ و نیکوتین‌آمید آدنین دی‌نوکلئوتید دهیدروژناز^۲ تولید می‌شود و در واکنش تاریکی این مواد برای تولید کربن سلولی مصرف می‌شوند.

همچنین، در این بررسی مشخص شد غلظت جلبک در شرایط نور طبیعی، که در این آزمایش به کار گرفته شد، به ۰/۷۵ گرم در لیتر رسید که این میزان کمتر از تولید جلبک در نور مصنوعی متناوب بود. این کاهش به این دلیل است که با وجود قرارگرفتن راکتور در شرایط دمایی کنترل شده، میانگین شدت نور در این مرحله کمتر از آزمایش با روشنایی مصنوعی بود. با توجه به نتایج این تحقیق در روزهای نیمه‌ابری و دمای معتدل نیز تولید جلبک صورت می‌گیرد.

دی‌اکسیدکربن 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 ۱ درصد وزنی سه عنصر مهم تشکیل دهنده ریزجلبک اسپیرولینا که به وسیله دستگاه آنالیز CHNS اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر کربن، هیدروژن و ازت در زیست توده خشک ریزجلبک اسپیرولینا

Table 1- Wehigt Percent of Carbon(C), Hydrogen(H) and Nitrogen(N) in Spirulina microalgae dry mass

Element	Carbon(C)	Hydrogen(H)	Nitrogen(N)
Weight Percent	29.78	5.1	4.51

برای بررسی درصد تثبیت دی‌اکسیدکربن یا فاکتور جذب کربن، که در جدول ۲ نشان داده شده است، مقدار دی‌اکسیدکربن تثبیت شده در فتوبیوراکتور با در دست داشتن جلبک تولید شده در غلظت‌های مختلف دی‌اکسیدکربن به کمک رابطه (۳) محاسبه شد. در این بررسی، میزان تثبیت زیستی دی‌اکسیدکربن تزریق شده به راکتور در غلظت ۳۳۰۰ و ۴۱۰۰ قسمت در میلیون به ۲/۵ و ۳/۳ درصد رسید. همان‌طور که از جدول ۲ و همچنین شکل ۴ استنباط می‌شود، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز حاصل از احتراق، علاوه بر افزایش تولید زیست توده، درصد تثبیت دی‌اکسیدکربن نیز افزایش می‌یابد. علت افزایش درصد تثبیت دی‌اکسیدکربن در این بررسی را می‌توان به کم بودن غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز احتراق نسبت داد. در تحقیق مورایس و همکاران، میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با ریزجلبک اسپیرولینا، در غلظت ۶۰ هزار قسمت در میلیون، ۳۷/۹ درصد بود [۳۲].

جدول ۲- میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن توسط تولید زیست توده در فتوبیوراکتور

Table 2- Carbon Dioxide Removal and Microalgae production

Mean Concentration of CO ₂ (inlet) ppm	Injected gas at 9 dayes (M ³ per litter)	Injected CO ₂ (gram per litter)	Biomass Production in (gram per litter)	Fixed CO ₂ By algae (gram per litter)	Fixed CO ₂ to Added CO ₂ (%)
594(Air)	9	8.5	0.25	0.275	3.23
3300 (Flue Gas)	9	29	0.66	0.726	2.5
4100(Flue Gas)	Intermittent light	9	36.5	1.144	3.13
	Permanent light	9	36.5	1.76	4.8

1. Adenosine Triphosphate(ATP)
2. Nicotinamide Adenine Dinucleotide Dehydrogenases(NADH)

بیشترین سرعت تثبیت دی‌اکسیدکربن توسط ریزجلبک در این بررسی ۰/۲۲ گرم در لیتر در روز (۰/۱۵ میلی‌گرم در لیتر در دقیقه) در نور متناوب در غلظت ورودی دی‌اکسیدکربن ۴۱۰۰ قسمت در میلیون به‌دست آمد. در تحقیق ناکامورا، میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با غلظت ۶۰ هزار تا ۲۴۰ هزار قسمت در میلیون، توسط ریزجلبک کلامیدوموناس، ۰/۱۳ میلی-گرم در دقیقه در لیتر گزارش شده است [۲۱]. در تحقیق مورایس 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 [۳۲]. در تحقیق باربارا لاروسیرا و همکاران، میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن با غلظت ۲۰ هزار قسمت در میلیون، توسط ریزجلبک کلرلا، ۰/۵۹ میلی‌گرم در دقیقه در لیتر گزارش شده است. در بررسی لاروسیرا و همکاران، از شدت نور ۱۲۰ میکرومول بر ثانیه بر مترمربع استفاده شده است [۲۵].

نتیجه‌گیری

فتوبیوراکتور با محیط‌کشت مصنوعی زاروک در محیط قلیایی و عاری از منبع کربن می‌تواند با دی‌اکسیدکربن موجود در هوا و یا گازهای احتراق به شکوفایی جلبکی برسد. همچنین، به‌علت بیشتربودن غلظت دی‌اکسیدکربن در گاز احتراق، سرعت رشد بیشتر است و شکوفایی ریزجلبک به زمان کمتری نیاز دارد. در آزمایش کشت با گاز متان، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تا ۵۰۰۰ قسمت در میلیون منجر به افزایش سرعت رشد جلبک شد و تا این غلظت از دی‌اکسیدکربن، شکوفایی جلبکی در روز پنجم مشاهده شد. با توجه به ایجاد شرایط بافری بی‌کربنات در محیط‌کشت با تزریق گازهای احتراق از جمله اکسیدهای کربن، گوگرد و ازت، pH محیط تا پایان دوره کشت همواره بالاتر از ۸ بود و شرایط قلیایی برای رشد ریزجلبک فراهم بود. با توجه به شبیه‌سازی مشعل گاز آزمایشگاهی با مشعل‌های خانگی و صنعتی، مشخص شد گازهای حاصل از احتراق، که حاوی آلاینده‌های مختلفی از جمله دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن، اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن است، می‌تواند مستقیماً وارد فتوبیوراکتور شود و زیست‌توده تولید کند. در فصول سرد و ابری ریزجلبک رشد نمی‌کند، اما تولید جلبک در هوای معتدل، گرم و نیمه‌ابری صورت می‌گیرد. در نتیجه، از فتوبیوراکتور می‌توان در تثبیت دی‌اکسیدکربن منتشرشده از نیروگاه‌ها، صنایع، دیگ‌های بخار و مشعل‌های گازسوز استفاده کرد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این بررسی، ضروری به‌نظر می‌رسد تحقیقات بیشتری در زمینه تزریق گاز احتراق و تولید زیست‌توده در محیط‌کشت‌هایی مانند فاضلاب نیمه تصفیه‌شده خانگی، که حاوی مواد مغذی به‌ویژه ازت و فسفرند، صورت گیرد. در مطالعات آینده، می‌توان، با طراحی فتوبیوراکتورهای پیوسته با بهینه‌سازی جریان هیدرولیکی و سیستم هوادهی، مصرف انرژی را کاهش داد.

تشکر و قدردانی

از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران برای تصویب طرح تحقیقاتی و تامین منابع مالی و همچنین از آزمایشگاه جامع تحقیقات وابسته به این معاونت (خانم منا مختارپور برای اندازه‌گیری مقادیر کربن، هیدروژن و ازت در نمونه جلبک) تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

1. Y. Chiu and Etall, "Reduction of CO₂ by a High-Density Culture of Chlorella Sp in a Semicontinuous Photobioreactor," *Bioresource Technology*, 99, 2008, pp. 3389-3396.
2. www.CO2.earth, Accessed 5 Feb 2017.
3. M. Lam, k. Lee and A. Mohamed. "Current Status and Challenges on Microalgae-Based Carbon Capture," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10, 2012, pp. 456-469.

4. R. k. Richter, T. Ming and S. Caillol. "Fighting Global Warming by Photocatalytic Reduction of CO₂ using Giant Photo Catalytic Reactors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, 2013, pp. 82-106.
5. A. Toledo-Cervantes, M. Morales, E. Eberto, Novelo and S. Revah. "Carbon Dioxide Fixation and Lipid Storage by *Scenedesmus Obtusiusculus*," *Bioresource Technology*, 130, 2013, pp. 652-658.
6. S. Huo, R. Dong, Z. Wang, C. Pang, Z. Yuan, S. Zhu and L. Chen. "Available Resources for Algal Biofuel Development in China," *Energies*, 4, 2011, pp. 1321-1335.
7. O. Bolland and S. Saether, "New Concepts for Natural Gas Fired Power Plants Cultures," *Bioresource Technology*, 102, 2011, pp. 9135-9142.
8. M. Songolzadeh, M. Soleimani, M. Takht Ravanchi and R. Songolzadeh, "Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: Review Article a Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions," *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Hindawi Publishing Corporation Article Id 828131, 34 Pages.
9. H. Herzog, E. Drake and E. Adams, "CO₂ Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change," Doe Order No. De-Af22-96pc01257, Final report of White paper, 1997.
10. B. Metz, O. Davidson, H. De Coninck, M. Loos and L. Meyer, "Carbon Dioxide Capture and Storage," IPCC Special Report, Cambridge University Press, USA, 2005.
11. J. Cheng, Y. Huang, J. Feng, J. Sun, J. Zhou and K. Cen, "Improving CO₂ Fixation Efficiency By Optimizing *Chlorella Py-Zu1* Culture Conditions in Sequential Bioreactors," *Bioresource Technology*, 144, 2013, pp. 321-327.
12. P. Iancu, V. Pleșu and S. Velea, "Flue Gas CO₂ Capture by Microalgae in Photobioreactor: *Sustainable Technology*," *Chemical Engineering Transaction*, 29, 2012, pp. 799-804.
13. S. Chinnasamy, B. Ramakrishnan, A. Bhatnagar and K. Das, "Biomass Production Potential of a Wastewater Alga *Chlorella Vulgaris* Arc 1 under Elevated Levels of CO₂ and Temperature," *International Journal of Molecular Science*, 10, 2009, pp. 518-532.
14. H. Kleivdal, U. Miljo Svein and M. Nordvik, "CO₂ to Bio," Project Final Report, Nordhordland Handverk- og Industrilag (NHIL), Trond Mork-Pedersen, Nofima Anders Haugland, 2012, BTO.www.nhil.no (Accessed 20 May 2016).
15. K. Sudhakar, M. Premalatha "Techno Economic Analysis of Micro Algal Carbon Sequestration and Oil Production," *International Journal of Chemtech Research*, 4, No. 4, Oct-Dec 2012, pp. 1746-1753.
16. A. Carvalho, L. Meireles and F. Malcata, "Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances," *Escola Superior De Biotecnologia*, 22, Issue 6, pp. 1490-1506, 2006.
17. R. Lian He, J. Yinjie Tang, "Experimental Analysis and Model-Based Optimization of Microalgae Growth in Photo-Bioreactors using Flue Gas," *Biomass and Bioenergy*, 41, 2012, pp. 131-138.
18. D. Soletto and L. Binaghi "Effects of Carbon Dioxide Feeding Rate and Light Intensity on the Fed-Batch Pulse-Feeding Cultivation of *Spirulina Platensis* in Helical Photo Bioreactor," *Biochemical Engineering Journal*, 39, 2008, pp.369-375.
19. A. Omidvar and E. Amini, "Predicting of Physical Properties and Atomization Characteristics of the Biofuel Derived from *Chlamydomonas* Microalgae," *Fuel and combustion journal*, 3, No. 2, 1389, pp. 47-58. (In Persian)
20. M. Hnifzadeh, M. Sarrafzadeh and O. Tavakoli, "Carbon Dioxide Biofixation and Biomass Production from Flue Gas of Power Plant using Microalgae," *Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG)*, 6-8 March 2012. (In Persian)
21. T. Nakamura, C. Senior, M. Olaizola and S. Masutani, "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, USA, 2001.
22. M. Guruvaiiah, K. Lee. "Utilization of Flue Gas from Coal Burning Power Plant for Microalgae Cultivation for Biofuel Production," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 3, Issue 8, January 2014, p. 7-10.
23. S. Chiu, C. Kao, T. Huang, C. Lin, S. Ong, C. Chen, J. Chang, C. Sheng Lin, "Microalgal Biomass Production and On-Site Bioremediation of Carbon Dioxide, Nitrogen Oxide and Sulfur Dioxide from Flue Gas using *Chlorella* Sp.," *Bioresour Technol.*, 102, No. 19, 2011, pp. 9135-42.
24. J. Lindblom, *Algal Flue Gas Sequestration and Wastewater Treatment: An Industrial Experiment*, Master of Science Thesis, Industrial Ecology, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2011.
25. B. Larosi`ere, F. Lopes, A. Goncalves, B. Taidi, M. Benedetti, M. Minier and D. Pareau, "Carbon Dioxide Bio Fixation by *Chlorella Vulgaris* at Different CO₂ Concentrations and Light Intensities," *Engineering in Life Sciences*, 14, No. 5, 2014, pp. 1-11.
26. J. Costa1, M. de Morais, E. Radmann, F. Santana, F. Camerini, M. de Souza, A. Henrard, A. da Rosa and L. janssen, "Biofixation of Carbon Dioxide from Coal Station Flue Gas using *Spirulina* sp. LEB 18 and *Scenedesmus obliquus* LEB 22," *African Journal of Microbiology Research*, 9, No. 44, 2011, pp. 2202-2208.
27. M. Sami Ismaiel, Y. El-Ayouty, M. Normorea, "Role of pH on antioxidants production by *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis*," *Brazilian journal of Microbiology*, 47, 2016, pp. 298-304.
28. W. Cheah, P. Show, J. Chang, T. Ling and J. Juan. "Biosequestration of Atmospheric CO₂ and Flue Gas-Containing CO₂ by Microalgae," *Bioresource Technology*, 184, 2015, pp. 190-201.
29. P. Iancu, V. Pleșu and S. Velea. "Flue Gas CO₂ Capture by Microalgae in Photobioreactor: a Sustainable Technology," *Chemical Engineering Ransactions*, 29, 2012, pp. 799-804.

30. D. Mariana Anjos, Bruno A. Fernandes, Antonio, A. Vicente Jose, "Optimization of CO₂ Bio-Mitigation by Chlorella Vulgaris," *Bioresource Technology*, 139, 2013, pp. 149-154.
31. E. Jacob-Lopes and C. Gimenes Scoparo, M. Isabel Queiroz, T. Teixeira Franco, "Biotransformations of Carbon Dioxide in Photobioreactors," *Energy Conversion and Management*, 51, 2010, pp. 894-900.
32. M. Morais, J. Vieira Costa, "Biofixation of Carbon dioxide by Spirulina sp. and Scenedesmus Obliquus Cultivated in a Three-Stage Serial Tubular Photo Bioreactor," *Journal of Biotechnology*, 129, 2007, pp. 439-445.
33. A. H. G. Cents, D. W. F. Brilman and G. F. Versteeg, "CO₂ Absorption in Carbonate/Bicarbonate Solutions: The Danckwerts-Criterion Revisited," *Chemical Engineering Science*, 60, 2005, pp. 5830-5835.
34. T. M. Mata, A. A. Martins and N. S. Caetano, "Microalgae for Biodiesel Production and Other Applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2010, pp. 217-232.
35. V. Sankar, D. K. Daniel and A. Krastanov, "Carbon Dioxide Fixation by Chlorella Minutissima Batch Cultures in a Stirred Tank Bioreactor," *Biotechnol & Biotechnol*, 25, No. 3, 2011, pp. 2468-2476.
36. M. Janssen, *Cultivation of Microalgae: Effect of Light/Dark Cycles on Biomass Yield*, PhD Thesis, Wageningen University, Department of agrotechnology, 2002.

English Abstract

Carbon Dioxide Removal and Biomass Production from Methane Combustion in the Photobioreactor using Microalgae Spirulina

Ramazan Ali Dianati Tilaki¹, Morteza Jafar Salehi¹, Reza Safari² and Maasoom Ali Movahedi¹

1- Department of Environmental Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

2- Department of Biotechnology, Institute Researches of Caspian Sea Ecology, Sari, Iran

(Received: 2016.10.18, Received in revised form: 2017.03.16, Accepted: 2017.04.12)

The aim of this study was to determine the amount of carbon dioxide uptake and biomass production in a photo bioreactor containing Spirulina microalgae as growth medium by injecting the products of natural gas combustion. A photo bioreactor was fabricated and combustion products of natural gas as well as air were injected by separate diffusers. The photo bioreactor was filled by growth medium without carbon source. In the control and test reactors, carbon dioxide was supplied by air and flue gas, respectively. Light source was natural and artificial. Artificial light source was four fluorescent lamps having 10 Klux intensity, which were operated in continuous and intermittent modes. The concentration of carbon dioxide entering in the test reactor was chosen in the range of 580 to 5000 ppm. The concentration of carbon dioxide in the inlet and outlet gas of the reactor was measured by a carbon dioxide detector equipped with NDIR. The algal biomass production and also changes in pH were measured. The flue gas was used as such without any scrubbing or desulfurization. The maximum production of algae using air and combustion products of natural gas having 4100 and 3300 ppm carbon dioxide using artificial intermittent light was 0.07 and 0.2 gL⁻¹ d⁻¹, respectively. Moreover, the maximum concentration of biomass was 0.25 and 1.04 gL⁻¹, respectively. Carbon dioxide biofixation rate was 2.5 and 3.3% in the 3300 and 4100 ppm carbon dioxide runs. Natural gas combustion products can be injected in the photo bioreactor directly and without prior treatment, and it is possible to remove carbon dioxide and produce algae. Biomass productivity with intermittent light was 35% less than continuous light. With the increasing concentration of carbon dioxide in the combustion gas, algal biomass production increased.

Keywords: Carbon dioxide, Spirulina, Biomass, Biofixation, Flue gas