

قابلیت تولید سوخت‌های زیستی از ریز جلبک‌های دریایی

خانمناز عبادی^{۱*}، احمد شادی^۲

Khanomnaz.ebadi@gmail.com

۱- کارشناسی ارشد زیست فناوری دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

۲- استادیار گروه زیست فناوری دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر

چکیده

سوخت‌های فسیلی بخش چشمگیری از مصرف انرژی را تشکیل می‌دهند، اما نگرانی‌های فزاینده‌ای در مورد کاهش ذخایر و آسیب‌های شدید زیست محیطی آنها مانند آلودگی هوا، تولید گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه گرمایش جهانی وجود دارد. سوخت‌های زیستی دارای بار آلودگی کمتری هستند و از منابع تجدیدپذیر تولید می‌شوند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشند. در این میان، سوخت‌های ریزجلبکی دارای اهمیت هستند زیرا ریزجلبک‌ها دارای نرخ رشد بالا هستند، در زمین‌های غیر قابل کشت با میزان کم آب و در آب‌های شور کشت می‌شوند. همچنین در برابر گیاهان خشکی زی توانایی بالاتری در تثبیت کربن دی‌اکسید دارند. شناخته‌شده‌ترین سوخت‌های جلبکی بیواتانول و بیودیزل می‌باشند که می‌تواند جایگزین دیزل نفتی شود. بیودیزل با عنوان کربن خنثی شناخته می‌شود زیرا میزان انتشار کربن دی‌اکسیدی را به شدت کاهش می‌دهد. بهینه‌سازی شرایط کشت جلبکی، روش‌های برداشت و فراوری توده جلبکی، به بیشترین میزان ماده اولیه سوخت‌های زیستی (لیپید یا قند) می‌انجامد. روغن استخراجی مستقیماً به عنوان سوخت مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد و باقی مانده زی‌توده جلبکی توسط هضم بی‌هوازی به بیوگاز یا بیواتانول تبدیل می‌شود و باقیمانده آن به عنوان کود و یا تغذیه حیوانات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بررسی، انواع روش‌های کشت جلبک و تولید سوخت‌های زیستی استفاده شده در سال‌های اخیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

واژگان کلیدی: سوخت‌های زیستی، ریزجلبک، بیودیزل، بیواتانول

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۸/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۲/۱۰

۱ - مقدمه

سوخت‌های فسیلی ۸۸ درصد از میزان مصرف انرژی را تشکیل می‌دهند که شامل نفت ۳۵ درصد، زغال سنگ ۲۹ درصد، گاز طبیعی ۲۴ درصد می‌باشد، در حالی که انرژی هسته‌ای و نیروی برق آبی به ترتیب ۵ و ۶ درصد از مصرف انرژی را تشکیل می‌دهند. متأسفانه تغییرات آب و هوا موجب گرم شدن کره زمین شده است و بخش عمده آن مربوط به گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوخت‌های فسیلی است. از جمله معایب استفاده از مواد نفتی، آلودگی هوا بر اثر استفاده از نفت دیزلی می‌باشد و سوختن نفت دیزلی منبع اصلی گازهای گلخانه‌ای است. علاوه بر نفت دیزلی، منابع عمده آلاینده‌های هوا CO_2 ، SO_x ، NO_x و ذرات و ترکیبات آلی فرار هستند. به دلیل صنعتی شدن و افزایش جمعیت، نیاز مداوم به انرژی افزایش یافته است و میزان آلودگی روز به روز بیشتر می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از سوخت‌های زیستی مایع در بخش حمل و نقل رشد سریعی داشته است که هدف آن دستیابی به انرژی سالم و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای بوده است. انواع زیتوده^۱ از منابع مختلف مانند منابع کشاورزی و آبیان به عنوان مواد خام برای تولید سوخت‌های زیستی مختلف از جمله بیودیزل، بیواتانول، بیوهیدروژن، بیوگاز و نفت زیستی مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی اقتصادی نشان می‌دهد که تولید سوخت‌های زیستی با هزینه مناسب دست یافتنی می‌باشد. با این وجود، استفاده از زیتوده‌های خاص مانند چوب بدون جایگزینی مناسب مانند کاشتن درختان مورد استفاده، می‌تواند موجب مشکلات زیست محیطی جدی (جنگل‌زدایی) گردد. افزون بر آن مطالعات اخیر نشان می‌دهد که NO_2 موجود در کودهای نیتروژنی که برای تولید محصولات کشاورزی برای سوخت‌های زیستی استفاده می‌شود، وارد محیط می‌شود که به نوبه خود موجب آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود. این نگرانی‌ها منجر به استفاده از گونه‌های ریزجلبکی با رشد سریع برای تولید سوخت‌های زیستی شده است.

وقتی زیتوده در شرایطی با دمای بالا و نبود اکسیژن تولید می‌شود، محصولات تولید شده در سه فاز بخار، مایع و

جامد قرار دارند. فاز مایع مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات است که نفت زیستی^۲ نامیده می‌شود. ترکیب روغن‌های زیستی به طور قابل توجهی با انواع مواد خام و شرایط پردازش متفاوت است. به عنوان مثال نفت زیستی تولید شده از زیتوده تجاری چوب (چوب راش) عمدتاً حاوی فنل‌ها، الکل‌ها و کربونیل با غلظت متفاوت است. در حالی که روغن‌های زیستی به دست آمده از پوسته برنج از فرمیک‌اسید، بتاهیدروکسی‌بوتریک‌اسید، تولوئن، بنزوئیک‌اسید، ۳-فنیل و ۱-بنزن‌دی‌کربوکسیلیک‌اسید و ترکیبات آلی دیگر است. زیتوده معمول مورد استفاده در تولید سوخت‌های زیستی از منابع کشاورزی و جنگلی هستند اما تولید روغن‌های زیستی از ریزجلبک‌ها با کیفیت‌تر از روغن‌های زیستی به دست آمده از چوب هستند [۱، ۲].

معمول‌ترین سوخت‌های زیستی بیودیزل و بیواتانول هستند که می‌توانند جایگزین دیزل و گازوئیل شوند. این سوخت‌ها عمدتاً از زیتوده یا منابع تجدیدپذیر انرژی به دست می‌آیند. اگرچه سوخت‌های زیستی نسبت به سوخت‌های فسیلی هنوز گران هستند، اما تولید آن‌ها در سراسر دنیا در حال افزایش است. مهم‌ترین جایگزین سوخت دیزلی در اروپا بیودیزل است که ۸۲ درصد از کل تولید سوخت زیستی را تشکیل می‌دهد و در برزیل و ایالات متحده نیز در حال رشد می‌باشد [۳].

۲- بیولوژی ریزجلبک‌ها

جلبک‌ها یکی از قدیمی‌ترین اشکال حیات می‌باشند که فاقد ریشه، ساقه و برگ هستند. دارای کلروفیل a به عنوان رنگدانه اولیه فتوسنتزی هستند و فاقد هرگونه توسعه فراساختاری سلولی بوده و سامانه ساده آن‌ها برای سازگاری با شرایط محیطی مناسب می‌باشد. ریزجلبک‌ها شامل همه تک‌سلولی‌ها و میکروارگانیسم‌های چند سلولی ساده دربردارنده ریزجلبک‌های پروکاریوت مانند سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های یوکاریوت مانند جلبک‌های سبز، قرمز و دیاتومه‌ها هستند [۴، ۵]. سلول‌های پروکاریوت فاقد اندامک‌های پوشیده در غشا مانند پلاستید، میتوکندری، هسته، دستگاه گلژی و فلاژل

شرایط محیطی حاکم شده و نسبت به گونه‌های وارداتی متمایز شود. مهندسی ژنتیکی و متابولیکی در عملکرد سویه جلبکی برای تولید سوخت نیز موثر است و تولید ریزجلبک‌های تراریخته که قادر به تولید سوخت بیشتر و محصولات جانبی دیگر مانند پروتئین و متابولیت‌ها هستند، به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد، اما هنوز در مراحل اولیه تحقیق و بررسی هستند.

به طور کلی در تولید سوخته‌های زیستی از ریزجلبک‌ها دو راهبرد دنبال می‌گردد: راهبرد نخست، بیشینه کردن تولید لیپید به منظور تولید بیودیزل است و راهبرد دوم تولید بیشینه کربوهیدراتها برای تولید بیواتانول است. تولید لیپید توسط ریزجلبک‌ها با بهینه‌سازی شرایط رشد مانند کنترل سطح نیتروژن، شدت نور، دما، شوری، غلظت CO_2 و فرایند برداشت می‌تواند افزایش یابد. اولین یافته‌ها نشان می‌دهد که تجمع روغن در سلول‌های جلبکی در کمبود نیتروژن افزایش می‌یابد. محدودیت نیتروژن نه تنها منجر به تجمع چربی می‌شود بلکه موجب تغییر ترکیب لیپید از اسیدهای چرب آزاد به تری‌آسیل‌گلیسرول می‌شود که برای تبدیل به بیودیزل مناسب هستند. تجمع لیپید در ریزجلبک‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که مواد مغذی (معمولا نیتروژن در ریزجلبک‌ها و سیلیکون در دیاتومه‌ها) در محیط کشت کم باشد. در این شرایط تکثیر سلولی اتفاق نمی‌افتد اما کربن توسط سلول‌ها جذب می‌شود و به تری-آسیل‌گلیسرول تبدیل می‌شود که در بین سلول‌ها ذخیره می‌شود و غلظت سلولی را افزایش می‌دهد [۱]. همچنین با تغییر در شرایط کشت می‌توان میزان کربوهیدرات تولیدی توسط جلبک را به منظور تولید اتانول افزایش داد. یکی از مزیت‌های عمده استفاده از ریزجلبک‌ها برای تولید سوخته‌های زیستی، توانایی برخی از گونه‌های ریزجلبکی برای تحمل میزان بالای CO_2 در بخار هوای تغذیه است که اجازه می‌دهد به طور کارآمد CO_2 را از بخار موجود به دام بیاندازد (دودکش‌های گازی و بخارهای سوزان). این در حالی است که گیاهان خشکی به طور معمول CO_2 را از اتمسفر حاوی حدود ۰/۰۶-۰/۰۳ درصد CO_2 جذب می‌کنند. توانایی ریزجلبک‌ها در کاهش CO_2 بسیار روشن است. گزارش شده است که کشت جلبک *Chlorella* در سامانه کشت باز در ۵۵ متر مکعب فتوبیوراکتور و دودکش گازی حاوی ۸-۶ درصد CO_2 ،

هستند و بیشتر خویشاوند باکتری‌ها هستند تا این که وابسته به جلبک‌ها باشند. سلول‌های یوکاریوت شامل بیشتر انواع جلبک‌ها هستند و دارای اندامک‌هایی هستند که عملکردهای سلولی را کنترل می‌کنند. سلول‌های یوکاریوت شامل گروه‌های متنوعی هستند که بر اساس رنگدانه‌ها، چرخه سلولی و ساختار سلولی طبقه بندی می‌شوند و مهمترین آن‌ها جلبک‌های سبز، قرمز و دیاتومه‌ها هستند. جلبک‌ها اتوتروف یا هتروتروف هستند. جلبک‌های اتوتروف تنها به مواد آلی مانند CO_2 ، نمک و نور خورشید نیاز دارند. در حالی که جلبک‌های هتروتروف، تنها فتوسنتز کننده نیستند و نیاز به منابع خارجی از ترکیبات آلی و مواد مغذی به عنوان منبع انرژی هستند. برخی از جلبک‌های فتوسنتز کننده میکسوتروف^۱ هستند؛ یعنی توانایی انجام فتوسنتز و به دست آوردن مواد مغذی آلی خارجی را دارا هستند. در جلبک‌های اتوتروف، فتوسنتز راه حل کلیدی برای بقاست که در آن نور خورشید و CO_2 جذب شده توسط کلروپلاست را به ATP و O_2 تبدیل می‌کند. ATP انرژی مورد استفاده در سطح سلولی است و برای تنفس و تولید انرژی استفاده می‌شود [۶، ۷].

۳- تولید سوخت زیستی از ریزجلبک‌ها

برای تولید سوخته‌های زیستی از ریزجلبک‌ها، مهمترین عوامل تعیین کننده، اقتصادی بودن آن‌ها شامل: بهره‌وری (انتخاب سویه، کارایی فتوسنتز، تولید لیپید یا قند) هزینه تولید و برداشت می‌باشد. انتخاب سویه جلبکی مناسب یک عامل مهم در تولید سوخت زیستی است. سویه جلبکی باید دارای میزان تولید لیپید بالایی باشد و قادر به بقا در شرایط استرسی فتوبیوراکتور، توانایی غلبه بر سویه‌های وحشی در حوضچه‌های باز، قابلیت رشد در CO_2 بالا و نیازهای تغذیه‌ای محدود داشته و بتواند تغییرات وسیع دمایی را تحمل کند (چرخه‌های روزانه و تغییرات فصلی). همچنین سویه جلبکی مورد نظر باید دارای محصولات جانبی ارزشمند، چرخه تولید مثلی سریع و کارایی بالایی در فتوسنتز داشته باشد [۸].

سازگاری ویژه منطقه‌ای نیز در تولید سوخت از جلبک‌ها مهم می‌باشد، زیرا موجب می‌شود جلبک مورد نظر در

1 Mixotrophic

استخراج روغن می‌تواند برای تغذیه حیوانات، کود (به علت نیتروژن و فسفر بالا)، تخمیر برای تولید اتانول و متانول و یا برای سوزاندن و تولید انرژی الکتریسیته و گرما مورد استفاده قرار بگیرد [۱].

۴- عوامل موثر در رشد توده جلبکی

برای رشد توده ریزجلبکی چندین عامل نقش دارد. عوامل غیرزیستی مانند نور، دما، غلظت مواد مغذی، اکسیژن، دی‌اکسیدکربن، pH، شوری و مواد شیمیایی سمی، عوامل زیستی مانند عوامل بیماری‌زا (باکتری، قارچ، ویروس) و رقابت با سایر جلبک‌ها، عوامل کاربردی مانند عمق استخر، برداشت مکرر توده، میزان رقت توده و غیره دخیل می‌باشند. پس از نور، دما مهمترین عامل محدود کننده در کشت جلبکی در سامانه‌های باز و بسته است. بیشتر ریزجلبک‌ها به راحتی تا ۱۵ درجه دمای پایین‌تر از دمای بهینه خود را تحمل می‌کنند، اما افزایش دما ۲-۴ درجه بالاتر از دمای بهینه، ممکن است موجب کاهش رشد در کشت شود. افزایش دما در سامانه‌های کشت بسته در روزهای گرم سال اتفاق می‌افتد که دما به ۵۵ درجه نیز می‌رسد. در این گونه موارد باید از سامانه‌های خنک کننده برای کاهش دما تا حدود ۲۶-۲۰ درجه استفاده شود.

شوری هم در سامانه‌های بسته و باز در رشد و ترکیب ریزجلبکی تاثیر دارد. هر گونه جلبکی محدوده شوری متفاوتی دارد و در آب و هوای گرم به علت تبخیر، شوری افزایش می‌یابد. تغییرات شوری به ۳ صورت استرس اسمزی، استرس یونی (نمک) و تغییر میزان یون‌های سلول به علت نفوذپذیری انتخابی غشا صورت می‌گیرد. راحت‌ترین روش برای کنترل شوری، افزودن آب شیرین یا نمک مورد نیاز می‌باشد.

هم زدن توده جلبکی از عوامل مهم دیگر برای رشد است زیرا توزیع سلولی، گرما و متابولیت‌ها را یکنواخت می‌کند و انتقال گازها را تسهیل می‌کند. به منظور جلوگیری از آلودگی زیستی با باکتری، قارچ، مخمر و غیره و بهبود محصول، می‌توان از تغییرات اکستریم موقتی مانند دما، pH یا نور استفاده کرد تا میکروارگانیسم‌ها نتوانند در آن رشد کنند [۱۰].

pH نیز با بیشتر فرایندهای بیوشیمیایی، رشد جلبکی و متابولیتی مرتبط است که شامل دسترسی زیستی CO₂

حدود ۵۰-۱۰ درصد از CO₂ را کاهش می‌دهد. کاهش بالاتر CO₂ بین ۵۰ درصد در هوای ابری و ۸۲ درصد در هوای آفتابی توسط گونه‌های جلبکی دیگر در تحقیقات مشابه نیز گزارش شده است [۲].

از میان انواع مختلف زیتوده مورد استفاده برای تولید سوخت‌های زیستی، جلبک‌ها معمولا کارایی فتوسنتز بالایی نسبت به انواع دیگر دارند و بر اساس گزارشات یکی از بهترین منابع برای تولید بیودیزل هستند و ۲۵۰ برابر روغن بیشتر در هر هکتار در مقایسه با سویا تولید می‌کنند. تولید بیودیزل از ریزجلبک‌ها یک روش مناسب برای تولید سوخت کافی برای جایگزینی استفاده از بنزین می‌باشد زیرا ریزجلبک‌ها قادر به فتوسنتز بوده، کمتر از ۲ میلی‌متر اندازه دارند و نسبت به درشت‌جلبک‌ها مقدار بیشتری روغن تولید می‌کنند [۹].

مزایای دیگر استفاده از ریزجلبک‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

ریزجلبک‌ها قادر هستند در تمام طول سال تولید شوند، بنابراین تولید سوخت از ریزجلبک‌ها بیشتر از دانه‌های روغنی می‌باشد. ریزجلبک‌ها در محیط‌های آبی رشد می‌کنند اما نسبت به دانه‌های روغنی خشکی به آب کمتری نیاز دارند و مشکل استفاده زیاد از منابع آب شیرین را حل می‌کند. ریزجلبک‌ها می‌توانند در آب‌های شور، بدمزه و زمین‌های غیرقابل کشت تولید شوند و موجب کاهش رقابت در تولید غذا می‌شوند. ریزجلبک‌ها رشد سریعی دارند و بیشتر گونه‌های آن میزان ۵۰-۲۰ درصد از وزن خشکشان را روغن تشکیل می‌دهد و نرخ رشد نمایی در زیتوده آن‌ها در زمان کوتاه ۳/۵ ساعت دو برابر می‌شود. در ارتباط با کیفیت هوا، تولید زیتوده ریزجلبکی در تثبیت CO₂ اهمیت دارد (۱ کیلوگرم از زیتوده خشک جلبکی حدود ۱/۸۳ کیلوگرم CO₂ جذب می‌کند).

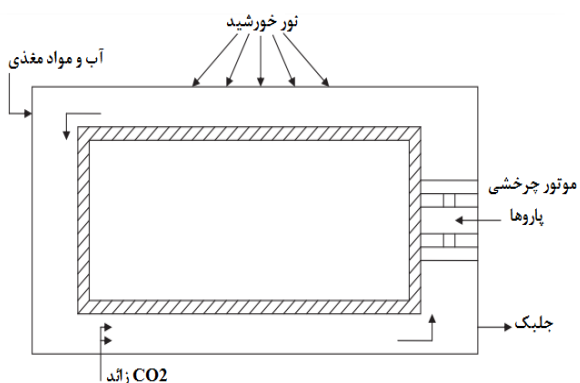
مواد مغذی برای کشت ریزجلبک‌ها به ویژه نیتروژن و فسفر از مواد زائد می‌تواند به دست بیاید. بنابراین قسمتی از محیط کشت از تصفیه فاضلاب‌های آلی از صنایع غذایی و کشاورزی به دست می‌آید. وقتی ریزجلبک‌ها برای تولید سوخت استفاده می‌شوند انتشار اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد. جلبک‌ها همچنین محصولات جانبی ارزشمند مانند پروتئین‌ها، رنگ‌های طبیعی، قند، رنگدانه و آنتی-اکسیدان تولید می‌کنند و باقی‌مانده زیتوده پس از

۵- تولید فتوتروفیک زیتوده جلبکی

۱-۵ استخرهای باز

در حال حاضر تولید فتوتروفیک تنها روشی است که امکان تولید اقتصادی در مقیاس بزرگ را فراهم می‌کند. دو سامانه کشت جلبکی وجود دارد که شامل استخرهای باز و فتوبیوراکتورهای بسته است. استخرهای باز از سال ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار می‌گیرند و به دو صورت دارای آب طبیعی (دریاچه، برکه، لاگون) و استخرهای مصنوعی می‌باشند. به طور معمول در کشت مصنوعی سامانه‌های پرورشی آبراهه‌ای استفاده می‌شوند که از حلقه‌های بسته بیضی شکل و کانال‌های چرخشی تشکیل شده‌اند، بین ۰/۵ - ۰/۲ متر عمق دارند و معمولاً جنس بتنی دارند.

در تولید پیوسته، هم جلبک و هم مواد مغذی توسط پاروهای چرخشی با هم مخلوط می‌شوند. این پاروها به صورت دائم برای جلوگیری از رسوب عمل می‌کنند. سامانه‌های کشت باز ارزان‌تر بوده و در مقایسه با کشت بسته ظرفیت تولید بیشتری دارد. اما این سامانه به تغییرات آب و هوا حساس است و نمی‌توان تبخیر، نوردی و دمای آن را کنترل کرد. نسبت به آلودگی نیز حساس بوده، نیاز به سطح زیاد دارد و مخلوط کردن آن مشکل است. با وجود این میزان زیادی از ریزجلبک‌ها را با این روش تولید می‌کنند. به طور مثال بر اساس مطالعات انجام شده هزینه تولید جلبک *Dunaliella salina* که از جلبک‌های معمول کشت شده در سامانه کشت باز است، حدود ۲/۵۵ دلار در هر کیلوگرم از زیتوده خشک برآورد شده است که برای تولید سوخت زیستی مورد توجه است [۱، ۱۲].



شکل (۱) سامانه کشت باز

برای فتوسنتز و دسترسی یون‌های مغذی است. افزایش حذف آمونیاک از استخرها از طریق تبخیر و حذف فسفر از طریق رسوب فسفات با یون‌های آهن، کلسیم و منیزیم کی‌لیت نشده، در تغییرات pH تاثیر دارد و تغییر در تعادل غلظت آمونیوم آزاد در pH بالا به طور چشمگیری رشد جلبکی را مهار می‌کند. به طور مثال در کشت جلبک *Scenedesmus obliquus* غلظت آمونیوم آزاد ۵۱ و ۳۴ گرم در متر مکعب در pH=۹ و دمای ۲۵-۲۰ درجه، فتوسنتز جلبکی را به ترتیب تا ۵۰ و ۹۰ درصد کاهش می‌دهد [۱۱].

در شرایط رشد طبیعی، جلبک‌های فتوتروف نور خورشید و CO₂ را از هوا و مواد مغذی را از زیستگاه‌های آبی جذب می‌کنند. بنابراین در شرایط کشت مصنوعی باید تا حد ممکن شرایط رشد طبیعی را شبیه‌سازی کرد. استفاده از شرایط طبیعی رشد برای تولید تجاری جلبک‌ها دارای مزایایی مانند استفاده از نور خورشید به عنوان منبع طبیعی نور است، با این وجود به علت چرخه‌های روزانه و تغییرات فصلی محدود می‌شود. برای غلبه بر این مشکل از لامپ‌های فلورسنت استفاده می‌شود که تقریباً به طور انحصاری برای پرورش جلبک‌های فتوتروف استفاده می‌شود. برای انتخاب منبع نور مصنوعی دانستن طیف جذبی رنگدانه‌های جلبکی مهم می‌باشد. به عنوان مثال دیاتومه‌ها دارای رنگدانه فتوسنتزی شامل کلروفیل a و c و فوکوزانتین هستند در حالی که جلبک‌های سبز حاوی کلروفیل a، b و زئزانترین^۱ هستند.

ریزجلبک‌ها CO₂ را از ۳ منبع مختلف شامل CO₂ اتمسفر، حاصل از تخلیه گازها از صنایع سنگین و CO₂ کربنات محلول به دست می‌آورند. مواد مغذی آلی نیز شامل فسفر، نیتروژن و سیلیکون هستند. جلبک‌ها نیتروژن را از هوا تثبیت می‌کنند و بیشتر ریزجلبک‌ها نیازمند شکل محلول آن به صورت اوره هستند. فسفر به میزان کمتری مورد نیاز است اما باید بیش از میزان مورد نیاز عرضه شود زیرا یون‌های فسفات با یون‌های فلزات پیوند می‌شوند و از دسترس خارج می‌شوند. بنابراین همه فسفر اضافه شده در دسترس نمی‌باشد [۱].

فتوبیوراكتور است که قابل کنترل است و آلودگی را کاهش می‌دهد. مرحله دوم تولید به صورت قرار گرفتن در شرایط استرس مواد غذایی است که موجب افزایش تولید لیپیدهای مطلوب می‌شود. این مرحله در استخرهای باز مناسب است زیرا استرس محیطی فرایند تولید لیپید را تحریک می‌کند. همچنین استفاده از بیوراكتورهای پیوسته نسبت به کشت مرحله‌ای چندین مزیت دارد. زیرا کنترل آن آسان بوده، میزان رشد به مدت طولانی حفظ و تنظیم می‌شود و غلظت زیئوده کنترل می‌شود. چون بیوراكتورهای پیوسته حالت پایدار دارند، برای تولید، قابل اطمینان و راحت هستند. کیفیت مطلوب محصولات به دست می‌آید و عملکرد پیوسته فرصت بررسی را فراهم می‌کند [۳].

۶- تولید هتروتروف

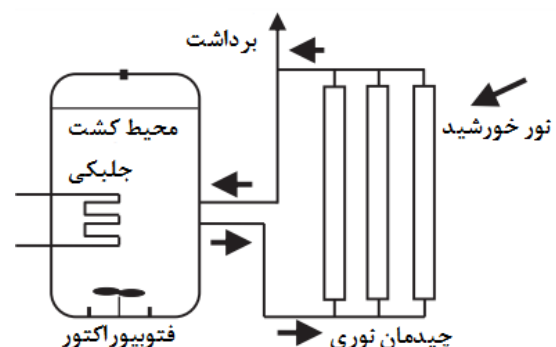
این کشت به طور موفقی برای تولید زیئوده جلبکی و متابولیت‌ها استفاده می‌شود. در این روش ریزجلبک‌ها بر روی سوسترای کربن آلی مانند گلوکز رشد می‌کنند و رشد جلبکی در بیوراكتورهای مخلوط کننده یا تخمیر کننده‌ها و مستقل از انرژی نوری صورت می‌گیرد. به علت این که سطح راکتور نسبت به حجم کوچک است، امکانات ساده‌تری نیاز است. این سامانه‌ها درجه بالایی از کنترل را دارا هستند و به علت غلظت سلولی بالا، هزینه برداشت پایین است. میو^۱ و وو^۲ مطالعه‌ای بر روی جلبک *Chlorella protothecoides* انجام دادند و نتایج نشان داد که میزان لیپید در سلول‌های هتروتروف بیشتر از ۵۵ درصد است که ۴ برابر بیشتر از سلول‌های اتوتروف در شرایط مشابه است [۱].

۷- تولید میکسوتروف

بیشتر جلبک‌ها قادر به استفاده از فرایندهای متابولیکی اتوتروف و هتروتروف هستند، به این معنی که آن‌ها هم می‌توانند فتوسنتز انجام دهند و هم از مواد آلی استفاده کنند. توانایی میکسوتروف‌ها به این معنی است که رشد سلولی به شدت وابسته به فتوسنتز نیست، بنابراین انرژی نوری عامل کاملاً محدود کننده برای رشد نیست و نور یا

۲-۵ فتوبیوراكتورهای بسته

فتوبیوراكتورهای بسته به منظور حل برخی از مشکلات سامانه‌های باز طراحی شده‌اند و محیط کشت بسته‌ای را فراهم می‌کنند که رشد توده جلبکی را از ذرات ریز و میکروارگانیسم‌ها محافظت می‌کند و امکان کشت گونه تک جلبکی به مدت طولانی با خطر آلودگی کمتر وجود دارد. سامانه‌های بسته شامل لوله‌ها، صفحه مسطح و ستون فتوبیوراكتور است. این سامانه‌ها برای گونه‌های حساس بسیار مناسب هستند و هزینه برداشت توده جلبکی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این وجود هزینه این سامانه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از سامانه‌های باز است. کارایی این سامانه‌ها بالا بوده و غلظت زیئوده ۲-۵ گرم در لیتر، زمان برداشت کوتاه ۲-۴ هفته و نسبت حجم به سطح بالایی دارند. تنظیم کربن دی‌اکسید و اکسیژن حل شده در فتوبیوراكتور از عوامل مهم است و بیشترین هزینه سامانه بسته در ارتباط با فرایند مخلوط کردن کشت جلبک است. فتوبیوراكتورها شامل چیدمانی از لوله‌های شیشه‌ای یا پلاستیکی هستند که به صورت افقی، عمودی، مایل یا مارپیچ قرار می‌گیرند و نور خورشید را به دام می‌اندازند. قطر لوله‌ها معمولاً ۰/۲-۰/۱ متر یا کمتر است تا نفوذ نور راحت‌تر صورت بگیرد. کشت‌های جلبکی در سامانه بسته با پمپ‌های ویژه مخلوط می‌شوند تا اکسیژن و کربن دی‌اکسید تعویض شده و هوادهی گازی برای مخلوط کردن استفاده می‌شود. برای به دام انداختن حداکثر نور خورشید، لوله‌های فتوبیوراكتور در جهت شمال به جنوب قرار می‌گیرند [۱۳-۱۵].



شکل (۲) سامانه کشت بسته

سامانه‌های دوگانه تولید نیز روشی است که از فتوبیوراكتور و استخرهای باز استفاده می‌کند. مرحله اول رشد در

ریزجلبکی که ۵-۰/۳ گرم در لیتر است و اندازه کوچک برخی از ریزجلبک‌ها که حدود ۲-۴۰ میکرومتر است، بازیافت توده را مشکل می‌سازد. انتخاب روش برداشت توده جلبکی از مراحل ضروری برای تولید سوخت جلبکی است. در این باره انتخاب سویه جلبکی از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا برخی از سویه‌های جلبکی برای برداشت راحت‌تر هستند. به طور مثال سیانوباکتری *Spirulina* شکل مارپیچی بلند دارد (۱۰۰-۲۰ میکرومتر) و به لحاظ برداشت و هزینه کارآمد است. انتخاب روش برداشت وابسته به ویژگی‌های ریزجلبکی مانند اندازه، غلظت و میزان محصول مورد نظر می‌باشد. معمولاً برداشت در ۲ مرحله انجام می‌شود: برداشت توده- ای به منظور جداسازی زیتوده از سوسپانسیون که در آن غلظت عامل مهم و تعیین کننده است و از روش‌هایی مانند لخته‌سازی، شناورسازی و گرانروی رسوب استفاده می‌کنند. مرحله دوم تغلیظ کردن توده از طریق روش‌هایی مانند سانتریفیوژ، فیلتر کردن و تجمع فراصوت است و نسبت به مرحله اول نیاز به انرژی بیشتری دارد [۱].

۹-۱-۹ تجمع فراصوت و تشکیل لخته

این مرحله اولین مرحله در فرایند برداشت توده‌ای است که موجب تجمع سلول‌های جلبکی می‌شود. تشکیل لخته مرحله مقدماتی قبل از روش‌های دیگر برداشت مانند فیلتر کردن، شناورسازی و گرانروی رسوب است. به علت این که سلول‌های ریزجلبکی دارای بار منفی هستند از تجمع سلولی جلوگیری به عمل می‌آید. کاتیون‌های چند ظرفیتی و بسپارهای کاتیونی بار منفی را خنثی یا کاهش می‌دهند. همچنین ممکن است به لحاظ فیزیکی یک ذره یا بیشتر از طریق فرایندهای که پل زدن نامیده می‌شود به هم متصل شوند و تجمع سلولی را تسهیل کنند. نمک‌های فلزی چند ظرفیتی مانند فریک کلرید (FeCl_2)، آلومینیوم سولفات ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) و فریک سولفات ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$) لخته کننده‌های مناسبی هستند.

چندین روش برداشت با استفاده از تشکیل لخته مورد بررسی قرار گرفته است. ناک^۲ و همکاران با استفاده از سدیم هیدروکسید pH محیط را در حدود ۱۰ تنظیم

کربن آلی موجب رشد می‌شود. جلبک‌هایی مانند سیانوباکتری *Spirulina platensis* و جلبک سبز *Chlamydomonas reinhardtii* نمونه‌ای از جلبک‌های میکسوتروف هستند. فرایند فتوسنتز برای رشد از نور استفاده می‌کند در حالی که تنفس هوازی از منابع کربن آلی استفاده می‌کند. رشد متاثر از مواد محیط کشت یا گلوکز در طول مرحله تاریکی و نوری است. بنابراین زیتوده در طول مرحله تاریکی کاهش می‌یابد [۱].

۸- کشت ریزجلبک‌ها با استفاده از فاضلاب

بیشتر گونه‌های ریزجلبکی قادر به رشد در فاضلاب هستند و این یک مزیت مهم برای تولید سوخت‌های زیستی در کشورهای خشک و پر جمعیت است که نیاز به آب شیرین را کاهش می‌دهد. مطالعات گسترده‌ای برای امکان استفاده از ریزجلبک‌ها برای تصفیه فاضلاب به منظور حذف نیتروژن و فسفر انجام شده است. زیرا رهاسازی فاضلاب بدون تصفیه آن موجب خوراک‌وری^۱ دریاچه‌ها و رودخانه‌ها می‌شود. همچنین سطوح مختلف از فلزات سنگین نیز توسط کشت جلبکی کاهش می‌یابد. استفاده از ریزجلبک‌ها برای تصفیه فاضلاب از مدت‌ها پیش توسعه یافته است اما استفاده آن محدود بوده و در مقیاس کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین عامل در تصفیه فاضلاب حذف مواد مغذی به خصوص نیتروژن و فسفر می‌باشد. حذف فسفر در فاضلاب‌ها مشکل است زیرا فسفر با استفاده از مواد شیمیایی به صورت جامد ته نشین می‌شود یا توسط فعالیت میکروبی به لجن فعال تبدیل می‌شود. ریزجلبک‌ها در حذف موثر فسفر و نیتروژن کارآمد هستند و به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه هستند. همچنین نیاز به فناوری خاصی ندارد که آن را برای توسعه جذاب‌تر می‌کند [۱۶].

۹- بازیابی توده جلبکی

بازیافت توده ریزجلبکی معمولاً نیاز به چندین مرحله جداسازی دارد و ۲۰-۳۰ درصد از هزینه کل را شامل می‌شود. این مراحل شامل: تشکیل لخته، فیلتر کردن، شناورسازی و سانتریفیوژ می‌باشد. به علت غلظت

زیاد تصفیه و میزان ارزش پایین زیتوده تولید شده در آن مطرح است. این روش برای ریزجلبک‌هایی با اندازه بزرگتر از ۷۰ میکرومتر مانند *Spirulina* مناسب است. استفاده از سانتریفیوژ برای برداشت متابولیت‌های با ارزش بالا ترجیح داده می‌شود. سانتریفیوژ روش سریع و متمرکزی است و بازیافت زیتوده وابسته به ویژگی‌های ته نشینی سلول‌ها، زمان استقرار دوغاب در سانتریفیوژ و عمق ته نشینی می‌باشد. از معایب عمده این روش، میزان نیاز به انرژی بالا است اما کارایی برداشت بیشتر از ۹۵ درصد است و تا ۱۵۰ بار غلظت را افزایش می‌دهد [۱].

۳-۹ فیلتر کردن زیتوده

فرایند فیلتر کردن برای برداشت ریزجلبک‌هایی با اندازه بزرگتر از ۷۰ میکرومتر مانند *Spirulina* و *Coelastrum* مناسب است و برای برداشت ریزجلبک‌های کوچکتر از ۳۰ میکرومتر مانند *Chlorella*، *Dunaliella*، *Scenedesmus* مناسب نمی‌باشد. فیلترهای معمول تحت فشار یا مکش انجام می‌شوند و از سطح سیلیسی یا سلولزی برای بهبود کارایی استفاده می‌شود. برای بازیافت سلول‌های جلبکی کوچکتر از ۳۰ میکرومتر از غشای میکروفیلتر یا الترافیلتر استفاده می‌شود که با فشار هیدروستاتیک انجام می‌شود و برای سلول‌های شکننده که نیازمند فشار پایین و سرعت پایین هستند، مناسب می‌باشند. برای توده‌هایی با حجم پایین (کمتر از ۲ متر مکعب) در روز، فیلتر غشایی به لحاظ هزینه نسبت به سانتریفیوژ بسیار کارآمد است اما برای مقیاس‌های بزرگ (بیشتر از ۲۰ متر مکعب) در روز، هزینه تعویض غشا و پمپ کردن بالاست و سانتریفیوژ کارآمد است [۱].

۱۰- خالص کردن توده جلبکی و برداشت لیپید

بیشتر جلبک‌هایی مثل *Cryptocodium chlorella*، *Isochrysis*، *Dunaliella*، *Cylindrotheca*، *Nannochloris*، *Neochloris*، *Nitzschia*، *Phaeodactylum*، *Porphyridium*، *Schizochytrium*، *Tetraselmis* بین ۲۰-۵۰ درصد روغن دارند [۳]. برداشت زیتوده به صورت دوغاب معمولاً حاوی ۵-۱۵ درصد از مواد جامد است و پس از برداشت

کردند و سپس از پلی‌مر غیر یونی *MagnafloCLT25* استفاده کردند و لخته تشکیل شده را با استفاده از سیفون کردن آب، برداشت کردند. سپس برای برداشت زیتوده نهایی ۶-۷ گرم در لیتر آن را خنثی کردند. این روش به طور موفقیت آمیز برای محدوده‌ای از گونه‌ها با کارایی بیشتر از ۸۰ درصد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. دیوکرن^۱ و پیلای^۲ نیز از کیتوزان به عنوان لخته ساز زیستی استفاده کردند. کارایی این روش بسیار به pH حساس بود و حداکثر تشکیل لخته در pH=۷ برای گونه‌های آب شیرین و کمتر از آن برای گونه‌های دریایی اتفاق می‌افتاد. در روش تشکیل لخته آب باقی‌مانده نیز می‌تواند برای کشت جلبک‌های جدید استفاده شود [۱۸].

صدای آرام نیز تجمع و رسوب جلبکی را القا می‌کند که می‌تواند برای برداشت زیتوده مورد استفاده قرار بگیرد. باسما^۳ و همکاران از روش فراصوت برای بهینه سازی تجمع غلظت جلبکی استفاده کردند و ۹۲ درصد از توده جلبکی را برداشت کردند. مهمترین مزیت برداشت فراصوت این است که به صورت پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد و یک روش غیر رسوب کننده است که موجب القا استرس بر روی زیتوده نمی‌شود. زیرا استرس موجب از بین رفتن برخی از متابولیت‌های ارزشمند می‌شود [۱۹].

۲-۹ شناورسازی و سانتریفیوژ

روش شناورسازی بر اساس به دام انداختن سلول‌های جلبکی با استفاده از پراکنش حباب‌های ریز هوا می‌باشد و بر خلاف روش تشکیل لخته نیاز به افزودن هیچ گونه مواد شیمیایی نیست. برخی از سویه‌های جلبکی به علت دارا بودن محتوی لیپید به طور طبیعی در سطح آب شناور می‌شوند و این روش برداشت یک روش مناسب است اما به لحاظ اقتصادی دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد.

گرانروی و سانتریفیوژ رسوبات روشی است که بر اساس ویژگی‌های مواد جامد معلق توسط غلظت، شعاع سلول‌های جلبکی و سرعت ته‌نشینی تعیین می‌شود. گرانروی رسوبات یک روش برداشت معمول است که در تصفیه فاضلاب برای زیتوده جلبکی استفاده می‌شود زیرا حجم

1 Divakaran
2 Pillai
3 Bosma

لیپیدهاست که به صورت تنها یا ترکیب با خارج کننده- های روغن یا فشار استفاده می‌شود. پس از استخراج روغن با استفاده از خارج کننده، باقی مانده با سیکلوهگزان مخلوط می‌شود تا روغن باقی مانده خارج شود. روغن در سیکلوهگزان حل می‌شود و خمیر حاصل فیلتر می‌شود. روغن و سیکلوهگزان توسط فرایندهای تقطیر جدا می‌شوند. این دو مرحله روی هم رفته ۹۵ درصد از کل روغن جلبکی را استخراج می‌کند. در شوک اسمزی به طور ناگهانی فشار اسمزی کاهش می‌یابد و موجب می‌شود سلول‌ها ترکیبات درون سلولی خود از جمله روغن را آزاد کنند. برخی از جلبک‌های دریایی مانند *Dunaliella sp.* که دیواره سلولی خود را از دست می‌دهند، برای این فرایند مناسب هستند. این جلبک در شرایط نمک زیاد رشد می‌کند و سپس توسط رقیق سازی در آب غیر نمکی به راحتی تخریب می‌شود.

در استخراج فراصوت، امواج فراصوت حباب‌های جوشان در حلال ایجاد می‌کنند و این حباب‌ها در نزدیکی دیواره سلولی باعث ترک برداشتن دیواره بر اثر شوک امواج می‌شوند. سپس روغن موجود به حلال آزاد می‌شود. استخراج نقطه بحرانی گاز مایع احتمالاً مهمترین روش برای استخراج کامل روغن است. استفاده از CO_2 برای این هدف بسیار توسعه یافته است. CO_2 استفاده شده در این روش بازیافت می‌شود اما به انرژی بالایی نیاز دارد که آن را برای استخراج روغن نامناسب می‌سازد [۲۰].

۱۰- تکنیک‌های تبدیل سوخت‌های زیستی جلبکی

روش‌های تبدیل زیتوده جلبکی به سوخت‌های زیستی در دو گروه ترموشیمیایی و بیوشیمیایی قرار می‌گیرند. عواملی که در انتخاب فرایند تبدیل زیتوده تاثیر دارند شامل: نوع و کیفیت زیتوده، شکل مطلوب انرژی، صرفه اقتصادی و شکل مطلوب محصولات بستگی دارد. در تبدیل ترموشیمیایی ترکیبات آلی موجود در زیتوده به محصولات سوختی تجزیه می‌شوند و توسط فرایندهای مختلفی مانند تبدیل به گاز، تبدیل به مایع، پیرولیز (تجزیه شیمیایی ماده بر اثر گرما) و احتراق مستقیم به مصرف می‌رسد. فرایندهای بیوشیمیایی تبدیل زیتوده به سوخت نیز شامل هضم بی‌هوازی، تخمیر الکلی و تولید فتوبیولوژیکی هیدروژن می‌باشد [۱].

باید پردازش شود. آبیگری یا خشک کردن برای به دست آوردن دسترسی زیستی استفاده می‌شود. روش‌هایی که استفاده می‌شوند شامل: خشک کردن نوری، خشک کردن در قفسه‌ها با فشار پایین، خشک کردن به صورت پخش کردن یا اسپری کردن، خشک کردن دوار و خشک کردن به صورت فریز می‌باشند. خشک کردن نوری ارزان‌ترین روش آبیگری است اما نیاز به سطح زیاد و زمان طولانی دارد و امکان از دست رفتن برخی از مواد وجود دارد. اسپری کردن به علت گران بودن، برای استخراج محصولات با ارزش بالا استفاده می‌شود اما این روش نیز موجب از دست رفتن برخی رنگدانه‌ها می‌شود. فریز کردن در مقیاس بزرگ گران می‌باشد اما برای استخراج روغن آسان می‌باشد. مواد درون سلولی مانند روغن برای استخراج از زیتوده تر با حلال بدون از بین بردن ساختار سلولی مشکل است اما از زیتوده فریز شده به راحتی استخراج می‌شود.

برای تولید سوخت‌های زیستی، بین کارایی خشک کردن و هزینه باید تعادل وجود داشته باشد. به منظور افزایش بازده انرژی سوخت‌ها، دمای خشک کردن در طول استخراج لیپید مهم می‌باشد و بر روی ترکیب لیپید به دست آمده تاثیر دارد. به طور مثال خشک کردن در ۶۰ درجه، غلظت بالای تری‌آسیل گلیسرول را در لیپید حفظ می‌کند و فقط میزان کمی از محصول کاهش می‌یابد. اما در دمای بالا هم غلظت تری‌آسیل گلیسرول و هم محصول لیپیدی هر دو کاهش می‌یابد.

شرکت سوخت زیستی لوس آنجلس (Origin Oil) فرایند استخراج تر را توسعه داده است که از فراصوت و امواج الکترومغناطیسی برای شکستن دیواره سلولی جلبک استفاده می‌کند. سپس به محلول جلبکی CO_2 اضافه می‌شود و pH را کاهش می‌دهد و زیتوده را از روغن جدا می‌کند. روش‌های شکستن دیواره سلول که به صورت موفق مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل: هموژنیز با فشار بالا، اتوکلاو، افزودن هیدروکلریک اسید، سدیم هیدروکسید یا لیز کننده‌های قلیایی می‌باشند [۱].

به منظور استخراج لیپید از زیتوده جلبکی چندین روش وجود دارد که شامل: استخراج با حلال، شوک اسمزی، استخراج فراصوت و استخراج نقطه بحرانی CO_2 می‌باشد. هگزان مهمترین حلال مورد استفاده برای استخراج

در تبدیل مایع مستقیم، ریز جلبک‌ها و روغن آن‌ها با استفاده از دی کلرومتان استخراج می‌شود. این فرایند در محلول آبی قلیایی انجام می‌شود و همچنین می‌تواند با استفاده از اتوکلاو ضد زنگ با مخلوط کردن مکانیکی برای جدا کردن بخش روغنی مورد استفاده قرار بگیرد [۱، ۲۱].



شکل (۳) تبدیل به مایع مستقیم

۱-۱ تبدیل به گاز

این روش شامل اکسیداسیون جزئی زیتوده به مخلوط گازهای قابل احتراق در دمای بالا ۸۰۰-۱۰۰۰ درجه می‌باشد. در روش‌های معمول زیتوده با اکسیژن و بخار آب واکنش می‌دهد و گاز پیوند^۱ (مخلوطی از CO₂، H₂، CO، CH₄، N₂) تولید می‌کند. مهمترین مزیت تبدیل زیتوده به گاز این است که از محدوده متنوعی از مواد گاز پیوند تولید می‌کند. گاز پیوند یک انرژی با میزان گرمای پایین معمولاً ۴-۶ میلی ژول بر متر مکعب است که به طور مستقیم می‌سوزد یا به عنوان سوخت برای موتورهای گازی یا توربین‌های گازی استفاده می‌شود. روش تبدیل به گاز توده جلبکی توسط چندین پژوهش مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. هیوانو^۲ و همکاران به طور جزئی جلبک *Spirulina* را در دمای ۸۵۰-۱۰۰۰ درجه اکسید کردند و ترکیب گازی مورد نیاز برای تولید نظری محصول متان را تعیین کردند. آن‌ها تخمین زدند که تبدیل به گاز زیتوده جلبکی در ۱۰۰۰ درجه بالاترین محصول را تولید می‌کند که حدود ۰/۶۴ گرم متانول از ۱ گرم زیتوده می‌باشد [۱].

۱-۲ تبدیل به مایع

شامل فرایندهایی است که برای تبدیل زیتوده تر جلبکی به سوخت مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. تبدیل به مایع در دمای پایین ۳۵۰-۳۰۰ درجه و فشار بالا (۲۰-۵ میلی پاسگال) انجام می‌شود و فرایندی است که توسط کاتالیزور و در حضور هیدروژن برای به دست آوردن روغن زیستی انجام می‌شود. راکتورهای تبدیل به مایع و سامانه تغذیه سوخت پیچیده و گران هستند اما مزیت عمده آن‌ها در این است که توانایی تبدیل زیتوده تر به انرژی را دارند. این فرایند از فعالیت آب بالا برای تجزیه مواد زیتوده به مولکول‌های کوچک با انرژی بالا استفاده می‌کند. دوت^۳ و همکاران از این روش برای جلبک *Botryococcus braunii* در دمای ۳۰۰ درجه استفاده کردند و حداکثر محصول (۶۴ درصد) وزن خشک را به دست آوردند.

۱-۳ پیرولیز

این فرایند شامل تبدیل زیتوده به روغن زیستی، گاز پیوند و زغال سنگ در دمای متوسط تا بالا ۳۵۰-۷۰۰ درجه در نبود هوا می‌باشد. پیرولیز در دمای متوسط ۵۰۰ درجه یک روش مناسب برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی با زیتوده است که موجب تبدیل زیتوده به مایع می‌شود. با این وجود چندین مساله در پیرولیز وجود دارد که شامل اسیدی شدن، غیر پایدار بودن، چسبناک شدن و وجود آبی که مواد جامد و شیمیایی در آن حل شده است. بنابراین فرایند پیرولیز نیازمند پالایش هیدروژنه و کاتالیزی برای کاهش میزان اکسیژن و حذف قلیایی شرایط اسیدی است. میو و وو از روش پیرولیز سریع برای افزایش محصول روغنی ریز جلبک *Chlorella prothothecoides* استفاده کردند. آن‌ها از روش دستکاری مسیرهای متابولیکی آن به سمت رشد هتروتروف استفاده کردند و محصول به دست آمده ۵۷/۹ درصد از وزن خشک بود. بر اساس نتایج آن‌ها، کشت هتروتروف ۳/۴ برابر بالاتر از محصول به دست آمده از

1 Syngas
2 Hivano
3 Dote

مهمترین ترکیبات در ریزجلبک‌ها هستند، مواد مغذی کمی مانند آهن، کبالت و روی نیز در آن‌ها وجود دارد که متانوژن را تحریک می‌کند [۱، ۲۲].

ریزجلبک‌ها به علت نبود لیگنین و سلولز پایین برای هضم بی‌هوازی مناسب هستند. تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی تحت تاثیر pH، دما و زمان باقی ماندن در راکتور قرار می‌گیرد. در کل هضم بی‌هوازی می‌تواند در شرایط مزوفیل و یا ترموفیل انجام شود. متان تولید شده از هضم بی‌هوازی به عنوان گاز سوختی برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود و باقی‌مانده زیتوده می‌تواند به عنوان کود استفاده شود. کربن دی‌اکسید تولید شده از سوختن بیوگاز نیز می‌تواند به طور مستقیم برای تولید زیتوده مورد استفاده قرار بگیرد. میزان انرژی بیوگاز تولید شده از هضم بی‌هوازی حدود ۳۰۶۰۰-۱۶۲۰۰ کیلوژول بر متر مکعب است و وابسته به ماهیت زیتوده است [۲۳، ۲۴].

تخمین زده شده است که تبدیل زیتوده جلبکی به متان انرژی زیادی از استخراج لیپیدهای سلولی دریافت می‌کند، در حالی که ضایعات غنی از مواد مغذی می‌توانند برای رشد جلبک‌های جدید وارد چرخه شوند. ریزجلبک‌ها دارای مقدار زیادی پروتئین هستند که در عملکرد هضم بی‌هوازی تاثیر دارد. این مشکل توسط هضم همزمان با میزان بالای کربن/نیترژن (ضایعات کاغذ) برطرف می‌شود. بیون^۱ و ین^۲ با افزودن ضایعات کاغذ به زیتوده جلبکی، افزایش چشمگیری در تولید متان به دست آوردند. به گونه‌ای که تولید متان از ۰/۵۷ میلی‌لیتر در لیتر به ۱/۱۷ میلی‌لیتر در لیتر در روز رسید. این نتیجه در صورتی به دست می‌آید که ضایعات کاغذ و زیتوده به نسبت ۵۰/۵۰ مورد استفاده قرار می‌گرفتند در حالی که هضم بی‌هوازی زیتوده خالص بدون ضایعات کاغذ محصول کمتری داشت.

میزان پروتئین بالا در جلبک‌ها به علت افزایش محصولات آمونومی می‌باشد که از هضم بی‌هوازی میکروارگانسیم‌ها مانع می‌کند. همچنین یون‌های سدیم برای برخی از میکروارگانسیم‌های بی‌هوازی سمی می‌باشد. استفاده از میکروارگانسیم‌های سازگار با نمک (شورپسند) برای هضم بی‌هوازی این مشکل را برطرف می‌کند [۱].

کشت فتوتروف بود و یافته‌ها حاکی از آن بود که پیرولیز پتانسیل تبدیل زیتوده جلبکی به سوخت مایع را دارد [۱].

۴-۱۰ احتراق مستقیم

در این روش زیتوده در حضور هوا می‌سوزد و انرژی شیمیایی ذخیره شده در زیتوده به گازهای داغ تبدیل می‌شود. این فرایند معمولاً در کوره، دیگ بخار یا توربین بخار و در دمای بالای ۸۰۰ درجه انجام می‌شود. در این روش هر نوع زیتوده قابل احتراق است به شرطی که میزان رطوبت آن کمتر از ۵۰ درصد وزن خشک باشد. گرمای تولید شده می‌تواند در همان لحظه استفاده شود و برای ذخیره مناسب نیست. احتراق زیتوده برای گرما و انرژی در مقیاس کوچک و بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد اما دارای برخی معایب است. مثلاً نیازمند فرایندهای پیش- تیمار مانند خشک کردن، ساییدن و تکان دادن است که نیاز به انرژی اضافی دارد. کارایی تبدیل انرژی برای زیتوده گیاهان بین ۴۰-۲۰ درصد است. در مورد احتراق زیتوده جلبکی شواهد اندکی وجود دارد اما ارزیابی چرخه زغال جلبکی نشان می‌دهد که این زغال گازهای گلخانه‌ای و آلودگی کمتری ایجاد می‌کند که نیازمند مطالعات بیشتر است [۱].

۵-۱۰ هضم بی‌هوازی

باقی‌مانده‌های زیتوده جلبکی بعد از استخراج روغن می‌تواند برای تغذیه حیوانات با میزان بالای پروتئین استفاده شود. با این حال بیشتر باقی‌مانده زیتوده تحت تاثیر هضم بی‌هوازی برای تولید بیوگاز قرار می‌گیرد. هضم بی‌هوازی شامل تبدیل ضایعات آلی به بیوگاز است که شامل متان اولیه، کربن دی‌اکسید و مقدار کمی از گازهای دیگر مانند هیدروژن سولفید است. هضم بی‌هوازی برای زیتوده با رطوبت بالا ۹۰-۸۰ درصد مناسب است و در مراحل متوالی هیدرولیز، تخمیر و متانوژن انجام می‌شود. در هیدرولیز ترکیبات پیچیده به قندهای محلول شکسته می‌شوند و سپس تخمیر باکتریایی آن را به الکل، استیک اسید، اسیدهای چرب فرار و گازهای حاوی هیدروژن و کربن دی‌اکسید تبدیل می‌کند. در نهایت ۷۰-۶۰ درصد آن به متان و ۴۰-۳۰ درصد آن به کربن دی‌اکسید در فرایند متانوژن تبدیل می‌شود. علاوه بر کربن نیترژن و فسفر که

۶-۱۰ تخمیر الکلی و تولید بیواتانول

تخمیر الکلی تبدیل زیتوده حاوی قند، نشاسته یا سلولز به اتانول است. در زیتوده نشاسته به قند تبدیل می‌شود سپس با آب و مخمر مخلوط می‌شود و در تانک‌های بزرگ تخمیر گرم نگه داشته می‌شود. مخمر قندها را می‌شکند و آن‌ها را به اتانول تبدیل می‌کند. تخمیر ساکاروز با استفاده از مخمرهای تجاری مانند *Saccharomyces cerevisiae* انجام می‌شود. ابتدا آنزیم اینورتاز مخمر، ساکاروز را به گلوکز و فروکتوز هیدرولیز می‌کند. سپس زایماز آنزیم دیگری که در مخمر وجود دارد، گلوکز و فروکتوز را به اتانول تبدیل می‌کند. فرایند خالص سازی اتانول نیازمند حذف آب و دیگر ناخالصی‌ها در محصول الکلی است (محلول حاوی ۱۵-۱۰ درصد اتانول است). اتانول تغلیظ شده به حالت مایع بوده که می‌تواند به عنوان مکمل یا جایگزین بنزین مورد استفاده قرار بگیرد. ریزجلبک‌هایی مانند *Chlorella vulgaris* منبع خوبی برای تولید اتانول هستند زیرا دارای میزان بالایی از نشاسته (۳۷ درصد از وزن خشک) هستند و کارایی آن تا ۶۵ درصد ثبت شده است [۲۵, ۲۶].

منابع زیتوده مورد استفاده برای تولید بیواتانول شامل: ذرت، تراشه‌های چوب، آب سیب، آرد گندم، زایلوز و مواد قندی می‌باشد. ریزجلبک‌های دریایی حاوی کربوهیدرات بالا هستند و منبع زیتوده مناسبی برای تولید بیواتانول هستند. تولید بیواتانول از زیتوده جلبکی شامل دو فرایند تبدیل ساکاریدی و تخمیر می‌باشد. تبدیل ساکاریدی نیازمند آنزیم‌هایی است که قبل از تخمیر، کربوهیدرات‌ها را هیدرولیز کند. این مرحله توسط آنزیم‌های آمیلاز به دست آمده از منابع خشکی انجام می‌شود. زمانی که از زیتوده دریایی برای تولید بیواتانول استفاده می‌شود و آنزیم‌های خشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیتوده دریایی باید نمک زدایی شود. در این گونه موارد استفاده از آمیلازهای دریایی می‌تواند سودمند باشد. ماتسوماتو^۱ و همکاران از باکتری دریایی *Pseudoalteromonas undina* برای تولید آمیلاز استفاده کردند. برای این منظور سلول‌های ریزجلبکی سانتریفیوژ و در محیط کشت بدون نشاسته قرار داده شدند. سلول‌ها با استفاده از ورتکس به

صورت مکانیکی شکسته شدند و سپس اتوکلاو شدند. سپس باکتری فوق را در این محلول حاوی جلبک کشت و انکوبه کردند. پس از ۱۲ و ۲۴ ساعت، نمونه‌ها برداشت شدند و قندهای تولید شده اندازه‌گیری شدند. این باکتری دریایی قادر به تولید آنزیم‌های آمیلازی بود که در شرایط نمکی، کربوهیدرات‌های جلبکی را به ساکاریدهای کوچک تبدیل می‌کرد و برای تخمیر و تولید بیواتانول مناسب بود. [۲۷]

ترکیب زیتوده ریزجلبکی توسط اعمال استرس‌های گوناگون در شرایط کشت می‌تواند تغییر کند. در شرایط استرس مانند کمبود مواد مغذی و شدت بالای نور، برخی از گونه‌های ریزجلبکی کربوهیدرات‌ها را در زیتوده خود تجمع می‌دهند که تا ۶۵ درصد وزن خشک آن‌ها را تشکیل می‌دهد. چوی^۲ و همکاران و نین^۳ و همکاران جلبک سبز *Chlamydomonas reinhardtii* را در شدت بالای نور و با افزودن استیک اسید برای تنظیم pH کشت دادند و توانستند زیتوده غنی از کربوهیدرات به دست بیاورند که حدود ۶۰ درصد از وزن خشک توده جلبکی را تشکیل می‌داد. زیتوده غنی از کربوهیدرات برای تولید بیشتر اتانول مفید و کارا می‌باشد. مارکیو^۴ و همکاران از زیتوده غنی از کربوهیدرات ریزجلبک *Spirulina platensis* برای تولید بیواتانول استفاده کردند. به علت این که مخمرهای مورد استفاده در فرایند تخمیر، فقط از قندهای ساده استفاده می‌کنند، باید کربوهیدرات‌ها به قند های ساده شکسته شوند. برای این منظور از هیدرولیز اسیدی استفاده کردند و کربوهیدرات‌های سلولی را به قندهای قابل تخمیر تبدیل کردند. افزایش غلظت اسید و هیدرولیز دمایی تولید قندهای ساده و بیواتانول را بهبود می‌داد و ۱۶ درصد اتانول در هر گرم وزن خشک به دست می‌آمد [۲۸].

۷-۱۰ تولید فتوبیولوژیکی هیدروژن

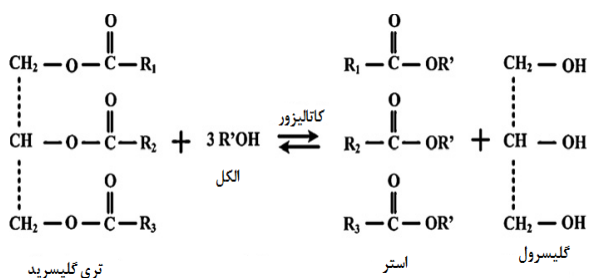
تولید هیدروژن زیستی از ریزجلبک‌ها بیشتر از ۶۵ سال است که گزارش شده است و ابتدا در جلبک سبز *Scenedesmus obliquus* دیده شده است. بیشتر

توسط جلبک‌ها تولید می‌شود که حدود ۱۹۸ کیلوگرم H_2 در هر هکتار در روز می‌باشد [۲۲، ۲۹].

۱۱- بیودیزل

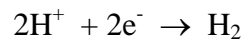
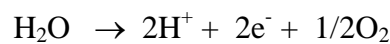
دیزل از محصولات مشتقات نفتی است که به طور مستقیم در موتورهای دیزلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیودیزل تجدیدپذیر برای محیط و اقتصاد ضروری می‌باشد. متاسفانه بیودیزل تولید شده از محصولات روغنی و چربی حیوانات نمی‌تواند جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند زیرا با عرضه غذا تداخل دارند. تولید بیودیزل با استفاده از زیتوده ریزجلبکی یک جایگزین قابل قبول است. ریزجلبک‌ها نه تنها منبع بیودیزل هستند بلکه پتانسیل جایگزینی دیزل فسیلی را نیز دارا می‌باشند. زیرا به سرعت رشد می‌کنند و غنی از روغن هستند. در بین ۲۴ ساعت زیتوده خود را دو برابر می‌کنند و زمان دو برابر شدن زیتوده در رشد نمایی کمتر از ۳/۵ ساعت است [۲۰].

بیودیزل مخلوطی از استرهای مونوآلکیل اسیدهای چرب بلند زنجیره به دست آمده از لیپیدهای تجدیدپذیر مانند روغن‌های جلبکی است. پس از استخراج، روغن جلبکی از طریق فرایندهایی که ترانس استریفیکاسیون^۳ نامیده می‌شود به بیودیزل تبدیل می‌شود. ترانس استریفیکاسیون واکنش چند مرحله‌ای و شامل ۳ مرحله برگشت‌پذیر است که تری‌گلیسیریدها به دی‌گلیسیرید و سپس دی‌گلیسیرید به مونوگلیسیرید و مونوگلیسیرید به استر (بیودیزل) تبدیل می‌شود و گلیسرول محصول جانبی آن می‌باشد. در این فرایند تری‌گلیسیریدها با یک الکل معمولاً متانول یا اتانول واکنش می‌دهد و کاتالیزور قلیایی، اسیدی یا آنزیمی (معمولاً سدیم هیدروکسید) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۰].



شکل (۴) فرایند ترانس استریفیکاسیون تری گلیسیریدها

مطالعات در تولید هیدروژن جلبکی با استفاده از جلبک سبز *Chlamydomonas reinhardtii* که یک موجود مدل در تحقیقات است، انجام می‌شود. هیدروژن مولکولی است که حامل انرژی تمیز و کارآمد است. در طول فتوسنتز ریزجلبک‌ها مولکول آب را به یون هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌کنند سپس یون هیدروژن توسط آنزیم هیدروژناز در شرایط بی‌هوازی به H_2 تبدیل می‌شود. به علت برگشت‌پذیر بودن این واکنش، هیدروژن هم می‌تواند تولید و مصرف شود. تولید اکسیژن فتوسنتزی به علت مهار سریع آنزیم‌های کلیدی از قبیل هیدروژناز، مانع تولید هیدروژن می‌شود. بنابراین کشت ریزجلبکی باید در شرایط بی‌هوازی قرار بگیرد.



در شرایط هوازی و نوری H^+ و الکترون حاصل از تجزیه آب برای سنتز ATP و NADPH استفاده می‌شود. در نبود O_2 هم تولید ATP و هم NADPH مهار می‌شود. دو روش اساسی برای تولید هیدروژن وجود دارد. در روش اول تولید اکسیژن و گاز هیدروژن فتوسنتزی از هم جدا می‌شوند. در مرحله اول جلبک‌ها به صورت فتوسنتزی و در شرایط طبیعی رشد می‌کنند. سپس در مرحله دوم جلبک‌ها از سولفور محروم می‌شوند و شرایط بی‌هوازی القا می‌شود که تحریک کننده تولید مداوم هیدروژن است. این روش با گذشت زمان محدود می‌شود و پس از ۶۰ ساعت از تولید، هیدروژن شروع به از بین رفتن می‌کند. این روش هیچ گونه محصول سمی یا مضر برای محیط تولید نمی‌کند. دومین روش به صورت تولید همزمان اکسیژن و هیدروژن فتوسنتزی است. در این روش الکترون‌هایی که از اکسایش آب فتوسنتزی آزاد می‌شوند، به طور مستقیم در فرایندهای تشکیل H_2 به واسطه هیدروژناز استفاده می‌شوند. به لحاظ تئوری تولید H_2 در این روش بالاتر از فرایند دو مرحله‌ای است اما تولید همزمان پس از مدت کوتاهی به دلیل تولید اکسیژن فتوسنتزی و مهار هیدروژناز محدود می‌شود. ملیس^۱ و هپ^۲ در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که با استفاده از روش دو مرحله‌ای تولید H_2 ، حداکثر محصول نظری هیدروژن

1 Melis
2 Happe

جنگلی، کشاورزی، دریایی یا فراوری ضایعات به دست بیابند. سوخت‌های زیستی به صورت جامد مانند چوب و زغال سنگ، مایع مانند بیواتانول، بیودیزل و روغن‌های پیرولیز و یا گاز مانند بیوگاز (متان) می‌باشند. سوخت‌های زیستی از سوخت‌های تجدیدپذیر از منابع زیستی هستند که برای گرما، الکتریسیته و سوخت استفاده می‌شوند. در سال‌های اخیر استفاده از سوخت‌های زیستی مایع در بخش حمل و نقل رشد جهانی داشته است. سوخت‌های زیستی نسل اول از محصولات روغنی و غذایی مانند روغن پالم، نیشکر، چغندر قند، گندم، جو، ذرت و چربی حیوانی به دست می‌آیند. این سوخت‌ها نیازمند فرایندهای ساده برای تولید محصولات نهایی هستند و شناخته شده‌ترین آن‌ها بیواتانول و بیودیزل است. بیواتانول توسط تخمیر قند استخراج شده از دانه‌های گیاهان و نشاسته به دست می‌آید. زیرا نشاسته راحت‌تر از سلولز به گلوکز تبدیل می‌شود و گلوکز توسط مخمر به اتانول تبدیل می‌شود. این نسل از سوخت‌ها در برخی کشورها در مقیاس تجاری تولید می‌شوند و هزینه تولید تقریباً بالایی دارند. زیرا در رقابت با تولید غذا و زمین‌های مورد استفاده هستند، نیاز به کود و آب زیادی دارند و استفاده از بخش کوچکی از زیتوده گیاهی کل، کارایی زمین مورد استفاده را کاهش می‌دهد. این محدودیت‌ها موجب شده است که جستجو برای زیتوده غیر خوراکی برای تولید سوخت‌های زیستی ترجیح داده شود. سوخت‌های زیستی نسل دوم بر اساس استفاده از باقی‌مانده زیتوده کشاورزی هستند که غیر قابل خوردن هستند (لیگنوسلولز) مانند علف‌ها یا درخت‌های ویژه‌ای که برای تولید انرژی کشت داده می‌شوند. مهمترین مزیت این نسل سوخت‌ها در این است که در رقابت با تولید غذا نیستند، میزان زیادی از مواد گیاهی برای تولید سوخت استفاده می‌شود و کارایی زمین مورد استفاده نسبت به نسل اول، کاهش نمی‌یابد. سوخت‌های زیستی نسل دوم نیز نیازمند فرایندهای پیچیده و هزینه بالا هستند. نسل سوم سوخت‌های زیستی بر اساس استفاده از ضایعات گیاهی و موجودات میکروسکوپی می‌باشند و توجه ویژه به میکروباها مانند قارچ و مخمر و ریزجلبک‌ها در آن وجود دارد. این نسل از سوخت‌ها برای جایگزینی انرژی مناسب هستند زیرا به طور مثال ریزجلبک‌ها دارای میزان زیادی از لیپید، پروتئین و

برخی از جلبک‌ها با میزان لیپید بالا می‌توانند جایگزین لیپیدی برای تولید بیودیزل باشند. شیهن^۱ و همکاران برآورد کردند که کشت ریزجلبک‌ها با استفاده از ۲۰۰۰۰۰ هکتار زمین (کمتر از ۰/۱ درصد زمین مناسب در ایالات متحده و یا ۳/۲ درصد از زمین مورد استفاده برای کشت کلزا در اروپا) می‌تواند یک چهارم از سوخت‌های دیزلی را تولید کند. یک چهارم تقریباً معادل یک هشتم از کل مصرف انرژی در کانادا در سال ۲۰۰۴ بوده است [۲].

روغن‌های جلبکی حاوی میزان بالایی از اسیدهای چرب اشباع نشده هستند اما نسبت به روغن‌های گیاهی برای اکسایش مستعد هستند که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند. با این وجود بیودیزل جلبکی به لحاظ فیزیکی و شیمیایی شبیه دیزل نفتی است و نسبت به دیزل نفتی چندین مزیت دارد: این بیودیزل از زیتوده مشتق شده و تجدیدپذیر و تجزیه‌پذیر زیستی است، غیر سمی بوده و دارای سطح پایینی از ذرات، کربن مونواکسید، دوده، هیدروکربن و SO_x است. این بیودیزل برای استفاده در صنایع هوایی (هواپیما) مناسب است زیرا دارای نقطه ذوب پایین و انرژی بالا است که از معیارهای کلیدی است. همچنین بزرگترین مزیت بیودیزل جلبکی این است که انتشار CO₂ را تا ۷۸ درصد در مقایسه با دیزل نفتی کاهش می‌دهد و با عنوان کربن خنثی مورد توجه است [۱].

۱۲- نتیجه گیری

سوخت‌های زیستی به دو نوع اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. سوخت‌های زیستی اولیه مانند چوب به صورت فراوری نشده برای تولید حرارت یا الکتریسیته و پخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. سوخت‌های زیستی ثانویه از راه فراوری زیتوده حاصل می‌شوند و در وسایل نقلیه و صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از انواع آن‌ها می‌توان به بیواتانول و بیودیزل اشاره کرد. سوخت‌های زیستی ثانویه بر اساس مواد خام و فناوری مورد استفاده در تولید آن‌ها به نسل اول، دوم و سوم طبقه بندی می‌شوند. سوخت‌های زیستی بر اساس منبع و نوع آن‌ها نیز طبقه بندی می‌شوند. آن‌ها ممکن است از منابع

پایینی دارند اما نیاز به زمان طولانی داشته و ممکن است برخی از محصولات تجزیه شوند. سانتریفیوژ و تجمع فراصوت کارایی بالایی داشته اما هزینه بالایی دارند. انتخاب روش برداشت وابسته به میزان محصولات هدف، غلظت زیتوده و اندازه ریزجلبک‌ها می‌باشد.

خشک کردن توده جلبکی قبل از استخراج چربی و محصولات و فرایندهای ترموشیمیایی، مرحله دیگری است که باید در نظر گرفته شود. خشک کردن نوری ارزان‌ترین روش می‌باشد اما نیاز به زمان طولانی و سطح زیادی دارد و ممکن است برخی محصولات از بین برود. خشک کردن در فشار پایین یک روش ارزان دیگر است که بررسی شده است اما کارایی پایینی دارد.

به طور کلی تولید سوخت زیستی با ریزجلبک‌ها دارای مزایای زیادی است زیرا ریزجلبک‌ها دارای رشد سریع هستند و در زمین‌های غیر قابل کشت پرورش داده می‌شوند، نیاز به آب کمی داشته و دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهند و نسبت به محصولات کشاورزی کارا تر هستند.

یک راه حل مطلوب برای تولید بیشتر سوخت بیشتر، انتخاب یا مهندسی ژنتیکی رده‌های سلولی‌هایی که حاوی میزان بالای لیپید یا کربوهیدرات با میزان بالای رشد هستند و همچنین با استخراج بیش از یک نوع سوخت زیستی از زیتوده و یا محصولات جانبی اضافی مانند تولید اتانول، بیوگاز، هیدروژن و متابولیت‌های ارزشمند، ارزش زیتوده افزایش می‌یابد.

۱۳- مراجع

- [1] Brennan, L. Owende, P. "Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and coproducts", *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 14, pp.557-577, 2010.
- [2] Li, Y. Horsman, M. Wu, N. Lan, CQ. Dubois Calero, N. "Biofuels from microalgae", *Biotechnology progress*, Vol.24, pp.815-820, 2008.
- [3] Mata, TM. Martins, AA. Caetano, NS. "Microalgae for biodiesel production and other applications: a review", *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol.14, pp.217-232, 2010.
- [4] Falkowski, PG. Raven, JA. "Aquatic photosynthesis" Princeton University Press, 2013.
- [5] Lee, RE. "Phycology" Cambridge University Press, 2008.

کربوهیدرات هستند که در زمان کوتاه، در مقیاس بزرگ تهیه می‌شود. ریزجلبک‌ها برای تولید همزمان سوخت‌های زیستی و محصولات جانبی ارزشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۱، ۳۲].

تولید سالانه زیتوده جلبکی در دنیا حدود ۵ میلیون کیلوگرم در سال تخمین زده شده است. تقریباً نصف توده ریزجلبکی را کربن تشکیل می‌دهد که از کربن دی‌اکسید مشتق شده است. بنابراین تولید ۱۰۰ تن از زیتوده جلبکی تقریباً ۱۸۳ تن از کربن دی‌اکسید را تثبیت می‌کند. ریزجلبک‌ها همچنین به علت دار بودن غلظت کم سلولز، نبود لیگنین و کربوهیدرات‌های تجزیه‌پذیر مانند مانیتول، آلزینات و لامینارین، توانایی تولید انرژی‌هایی مانند بیوگاز را دارا هستند [۲۳، ۳۳، ۳۴].

انتخاب سامانه کشت جلبکی مناسب یک عامل مهم است که در هزینه و تولید سوخت زیستی تاثیر دارد. به عنوان مثال استفاده از نور موثر، کنترل دما و استرس‌های آبی و توانایی نگهداری کشت تک جلبکی از عوامل مهم می‌باشند. بهینه‌سازی شرایط استرس برای به دست آوردن بالاترین محصول لیپید در سلول در سامانه‌های تولید بیودیزل نیز مهم می‌باشد زیرا شرایط استرس می‌تواند جهش‌های خود به خودی را در سویه‌های کشت شده القا کند و انتخاب این سویه‌ها، تولید محصول را افزایش می‌دهد. کاروالهوا^۱ چندین سامانه بسته و لی^۲ چندین سامانه باز را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که سامانه‌های باز برای کشت تجاری ریزجلبک‌ها مطلوب هستند زیرا هزینه آن‌ها پایین می‌باشد. هر چند سامانه‌های بسته در مقابل آلودگی‌ها بهتر کنترل می‌شوند. ترکیب فتوبیوراکتورهای بسته و برکه‌های باز مفید هستند و در مقیاس ۲ هکتار مناسب هستند.

به علت غلظت کم زیتوده به دست آمده از سامانه‌های کشت ریزجلبکی به علت نفوذ کم نور و اندازه کوچک سلول‌های جلبکی، هزینه و انرژی برای برداشت زیتوده به طور قابل توجهی بالاست. روش‌های مختلفی مانند لخته‌سازی شیمیایی، زیستی، فیلتراسیون، سانتریفیوژ و تجمع فراصوت برای برداشت زیتوده ریزجلبکی بررسی شده است. به طور کلی تجمع شیمیایی و زیستی هزینه

1 Carvalho
2 Lee

- [21] Demirbaş, A. "Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass", Energy conversion and management, Vol. 41, pp.633-646, 2000.
- [22] Singh, A., Olsen, S.I. "A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels", Applied Energy, Vol. 88, pp. 3548-3555, 2011.
- [23] Chisti, Y. "Biodiesel from microalgae beats bioethanol", Trends in biotechnology, Vol.26, pp.126-131, 2008.
- [24] Singh, J., Gu, S. "Commercialization potential of microalgae for biofuels production Renewable and Sustainable", Energy Reviews, Vol. 14, pp.2596-2610, 2010.
- [25] Hirano, A., Ueda, R., Hirayama, S., Ogushi, Y. "CO₂ fixation and ethanol production with microalgal photosynthesis and intracellular anaerobic fermentation", Energy, Vol. 22, pp.137-142, 1997.
- [26] John, R.P., Anisha, G., Nampoothiri, K.M., Pandey, A. "Micro and macroalgal biomass: a renewable source for bioethanol", Bioresource technology, Vol.102, pp.186-193, 2011
- [27] Matsumoto, M., Yokouchi, H., Suzuki, N., Ohata, H., Matsunaga, T. "Saccharification of marine microalgae using marine bacteria for ethanol production. In: Biotechnology for Fuels and Chemicals", Springer, pp. 247-254, 2003.
- [28] Markou, G., Angelidaki, I., Nerantzis, E., Georgakakis, D. "Bioethanol production by carbohydrate-enriched biomass of *Arthrospira (Spirulina) platensis*" Energies, Vol.6, pp. 3937-3950, 2013.
- [29] Schenk, P.M., Thomas-Hall, S.R., Stephens, E., Marx, U.C., Mussgnug, J.H., Posten, C. et al. "Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production", Bioenergy research, Vol.1, pp.20-43, 2008.
- [30] Warabi, Y., Kusdiana, D., Saka, S. "Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols", Bioresource technology, Vol. 91, pp.283287, 2004.
- [31] Nigam, P.S., Singh, A. "Production of liquid biofuels from renewable resources", Progress in energy and combustion science, Vol.37, pp.52-68, 2011.
- [32] Singh, A., Nigam, P.S., Murphy, J.D. "Renewable fuels from algae: an answer to debatable land based fuels", Bioresource technology, Vol.102, pp.10-16, 2011.
- [33] Rosenberg, J.N., Oyler, G.A., Wilkinson, L., Betenbaugh, M.J. "A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution", Current opinion in Biotechnology, Vol.19, pp.430-436, 2008.
- [34] Vanegas, C., Bartlett, J. "Green energy [6] Braun, B.Z. "Light absorption, emission and photosynthesis", Botanical monographs, 1974.
- [7] Khan, S.A., Hussain, M.Z., Prasad, S., Banerjee, U. "Prospects of biodiesel production from microalgae in India", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp.2361-2372, 2009.
- [8] Sheeha, J., Dunahay, T., Benemann, J., Roessler, P. "Look back at the US department of energy's aquatic species program: biodiesel from algae; close-out report. In: National Renewable Energy Lab Golden, CO.(US)", 1998.
- [9] Hossain, A.S., Salleh, A., Boyce, A.N., Chowdhury, P., Naquiuddin, M. "Biodiesel fuel production from algae as renewable energy", American journal of biochemistry and biotechnology, Vol. 4, pp.250-254, 2008.
- [10] Moheimani, N.R. "The culture of coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation", Murdoch University, 2005.
- [11] Park, J., Craggs, R., Shilton, A. "Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production", Bioresource technology, Vol.102, pp.35-42, 2011.
- [12] Richmond, A. "Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology", John Wiley & Sons, 2008.
- [13] Chojnacka, K., Marquez-Rocha, F.-J. "Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae", Biotechnology, Vol.3, pp.21-34, 2004.
- [14] Grima, E.M., Fernandez, F.A., Camacho, F.G., Chisti, Y. "Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup", Journal of biotechnology, Vol. 70, pp.231247, 1999.
- [15] Miron, A.S., Gomez, A.C., Camacho, F.G., Grima, E.M., Chisti, Y. "Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae", Journal of Biotechnology, Vol.70, pp. 249270, 1999.
- [16] Pittman, J.K., Dean, A.P., Osundeko, O. "The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources", Bioresource technology. Vol.102, pp. 1725, 2011.
- [17] Knuckey, R.M., Brown, M.R., Robert, R., Frampton, D.M. "Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds", Aquacultural Engineering, Vol.35, pp.300313, 2006.
- [18] Divakaran, R., Pillai, V.S. "Flocculation of algae using chitosan", Journal of Applied Phycology, Vol. 14, pp. 419-422, 2002.
- [19] Bosma, R., van Spronsen, W.A., Tramper, J., Wijffels, R.H. "Ultrasound, a new separation technique to harvest microalgae", Journal of Applied Phycology, Vol.15, pp.143-153, 2003.
- [20] Singh, A., Nigam, P.S., Murphy, J.D. "Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels", Bioresource technology, Vol. 102, pp. 2634, 2011.

- from marine algae: biogas production and composition from the anaerobic digestion of Irish seaweed species", Environmental technology, Vol. 34, pp.2277-2283, 2013
- [35] Jones, CS. Mayfield, SP. "Algae biofuels: versatility for the future of bioenergy", Current opinion in biotechnology, Vol. 23, pp.346-351, 2012.
- [36] Stephenson, PG. Moore, CM. Terry, MJ. Zubkov, MV. Bibby, TS. "Improving photosynthesis for algal biofuels: toward a green revolution", Trends in biotechnology, Vol.29, pp.615-623, 2011.

