سیانوباکتری، گونه‌ای مفید در تولید اتانول زیستی

سمانه جوادی تدین و مرتضی یوسف زادی*

ایران، قم، دانشگاه قم، دانشکده علوم، گروه زیست شناسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

چکیده

امروزه استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر به دلیل انفجار جمعیت و به دنبال آن کاهش این سوخت‌ها، آلودگی‌های زیست‌محیطی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و همچنین چالش‌های اقتصادی در پی کم شدن سوخت‌های فسیلی ما را ترغیب می‌کند تا روی سوخت های تجدیدپذیر مانند بیواتانول تمرکز کنیم. اتانول علاوه بر روش‌های شیمیایی، از مواد اولیه طبیعی نیز تولید شود و به طور خاص، تولید اتانول از منابع ریزجلبکی و سیانوباکتری روشی جذاب در روزهای اخیر بوده است. سیانوباکتری‌ها به دلیل حداقل نیاز به مواد مغذی، فتوسنتز و تبدیل نور خورشید به انرژی، رشد سریع و تراکم بالا رشد، نداشتن تداخل با چرخه‌غذایی و عدم نیاز به زمین‌های زراعی جهت کشت آن‌ها، می‌تواند راه حل خوبی برای بسیاری از مشکلات زیست محیطی باشد. به طور کلی بدست آوردن اطلاعات برای تولید اتانول زیستی به عنوان یکی از مواد پرکاربرد در عرصه‌های تولید مواد مورد نیاز جامعه، موجب کاهش آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود و همچنین می‌تواند به عنوان جایگزین منابع تجدیدناپذیر در سطح صنعتی و تحقیقات آینده انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار مفید باشد.

کلیدواژگان: سیانوباکتری، اتانول، اتانول زیستی

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: morteza110110@gmail.com

مقدمه

امروزه سبک زندگی کنونی و افزایش جمعیت که موجب استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر شده است، ما را ترغیب می‌کند تا روی سوخت‌های تجدیدپذیر مانند بیواتانول تمرکز کنیم (Chandrasekhar et al., 2023).

همچنین افزایش قیمت نفت و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای که یکی از علل آن مصرف شدید سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر است، یک مشکل زیست محیطی عظیم ایجاد کرده است. این مصرف سریع همچنین باعث کاهش ذخایر سوخت فسیلی در ۴۰ تا ۵۰ سال آینده خواهد شد و نگرانی‌های فزاینده در مورد بحران انرژی، امنیت غذایی، شیوع بیماری‌ها، گرم شدن کره‌زمین و آلودگی‌های زیست محیطی، ما را نیازمند بررسی راه حل-هایی می‌کند که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه، پایدار و همچنین امکان پذیر باشد (Huisman et al., 2018; Narisetty et al., 2022).

امروزه افزایش بی‌سابقه‌ای نیز در ردپای کربن جو (اتمسفر) دیده می‌شود که چالش‌های زیست محیطی جدیدی را برای طبیعت و بقای موجودات زنده ایجاد کرده است. علاوه بر این، بحران انرژی که جهان به دلیل کاهش مداوم سوخت‌های فسیلی با آن مواجه است، می‌تواند جرقه‌ای برای ایجاد عدم تعادل در اقتصاد و پیشرفت جهانی باشد. از این رو می‌توان گفت منابع انرژی تجدیدپذیر مانند زیست‌توده جایگزین مناسب و پایداری برای سوخت‌های فسیلی هستند. علاوه بر این، استفاده از آن‌ها به تمیز نگه‌داشتن محیط زیست نیز کمک می‌کند (Agarwal et al., 2022).

سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز و زغال سنگ ناشی از تجمع طولانی مدت زمین‌شناسی زیست‌توده آلی حاوی کربن و هیدروژن است، اما سوخت‌های زیستی از زیست-توده طبیعی بدست می‌آیند (Mishra et al., 2023). انرژی مبتنی بر زیست‌توده یکی از منابع مهم تجدیدپذیر است. این سوخت‌های مبتنی بر زیست توده، عمدتاً از مواد آلی بیولوژیکی مشتق شده از گیاهان، حیوانات، موجودات میکروبی و ضایعات آن‌ها از جمله پیکر مرده آنها تولید می‌شوند؛ زیست‌توده دارای درصد بالایی از کربوهیدرات‌ها

است که می‌تواند منبع مهمی برای تولید اتانول باشد (Chandrasekhar et al., 2023).

بررسی اتانول زیستی[1] و نسل‌های مختلف آن

تلاش‌های روزافزون در کاهش ردپای کربن و آلودگی‌های زیست محیطی و همچنین سهم بالای ۶۵٪ انتشار CO_2 از سوزاندن سوخت‌های فسیلی و محدودیت منابع آن‌ها محرک اصلی برای کشف انرژی‌های جدید و افزایش نرخ تولید سوخت‌های زیستی مایع کم کربن، به‌ویژه اتانول سوختی است (Farrokh et al., 2019; Olughu et al., 2023).

بیشتر تولیدات تجاری اتانول در جهان از اتانول نسل اول است که از مواد اولیه غذایی تولید می‌شود. مواد اولیه غذایی به دلیل استفاده رقابتی با خوراک انسان و دام، موجب افزایش هزینه این مواد اولیه می‌شود و در نتیجه تحقیقات در مورد استفاده از زیست‌توده لیگنوسلولزی به عنوان یک ماده اولیه جایگزین برای تولید اتانول از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. زیست‌توده لیگنوسلولزی عرضه فراوان و هزینه به نسبت کم دارد. با این حال، به دلیل ماهیت پیچیده ساختار آن‌ها، بازده قند قابل تخمیر از زیست توده سلولزی تیمار نشده بسیار کم است و این مرحله حدود ۱۹ تا ۲۲ درصد از هزینه تولید سوخت زیستی سلولزی را تشکیل می‌دهد که یکی از عوامل اصلی در هزینه تولید اتانول است (Olughu et al., 2023).

همچنین تولید سوخت زیستی نسل اول و دوم در مقیاس بزرگ به دلیل نیاز به استفاده از زمین برای کشت مواد اولیه و تغییر کاربری زمین، جنبه‌ها و پیچیدگی‌های زیادی دارد که توجه را به خود جلب کرده است (Canabarro et al., 2023).

سوخت‌های زیستی نسل سوم از میکروجلبک‌های یوکاریوتی[2] و سیانوباکتری‌های پروکاریوتی[3] مشتق می‌شوند. جلبک‌ها می‌توانند در آینده نزدیک به مهم‌ترین منبع سوخت زیستی تبدیل شوند و همچنین این مواد اولیه به‌عنوان امیدوارکننده‌ترین منابع به حساب می‌آیند. این میکروارگانیسم‌های فتوسنتزی پتانسیل قابل توجهی برای تولید لیپیدها و کربوهیدرات‌ها به‌عنوان ماده اولیه سوخت‌های زیستی دارند. سوخت‌های زیستی نسل چهارم نیز بر اساس جلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها با ترکیبی از ژنتیک و راندمان فتوسنتز بالاتر است و نرخ تولید زیست توده در سیانوباکتری ها تا ۱۰ درصد است که بیشتر از گیاهان (حدود ۱ درصد) و جلبک ها (۵ درصد) می‌باشد (Farrokh et al., 2019).

وضعیت تولید اتانول در جهان

در سال ۲۰۲۱، منابع انرژی اولیه تجدیدپذیر، از جمله سوخت‌های زیستی، افزایش قابل‌توجهی را تجربه کرده است. در شکل ۱ میزان تولید اتانول از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ آورده شده است و در جدول ۱ نیز برخی از پیش‌بینی‌های مربوط به تولید و نیاز اتانول قابل مشاهده است. از جدول زیر می‌توان دریافت که نیاز پیش‌بینی شده به اتانول همیشه بیشتر از تولید پیش‌بینی شده است. انتظار می‌رود در سال‌های آینده، تولید اتانول از منابع زیستی نقش مهمی در تامین نیاز اتانول کشورها داشته باشد.

آژانس بین‌المللی انرژی ارزیابی می‌کند که سوخت‌های زیستی از سهم جاری خود از ۳٪ تا حدود ۲۷٪ احتمال تامین مداوم آن‌ها را دارد و تولید اتانول زیستی نه تنها می‌تواند اهداف توسعه پایدار دستور کار ۲۰۳۰ را برآورده می‌کند، بلکه توافقنامه پاریس در مورد کاهش انتشار گازهای گلخانه ای که اخیرا به تصویب رسیده است را نیز برآورده می‌کند (Mülleret al., 2023; Olguin-Maciel et al., 2020).

جدول ۱- پیش‌بینی مربوط به تولید و نیاز اتانول

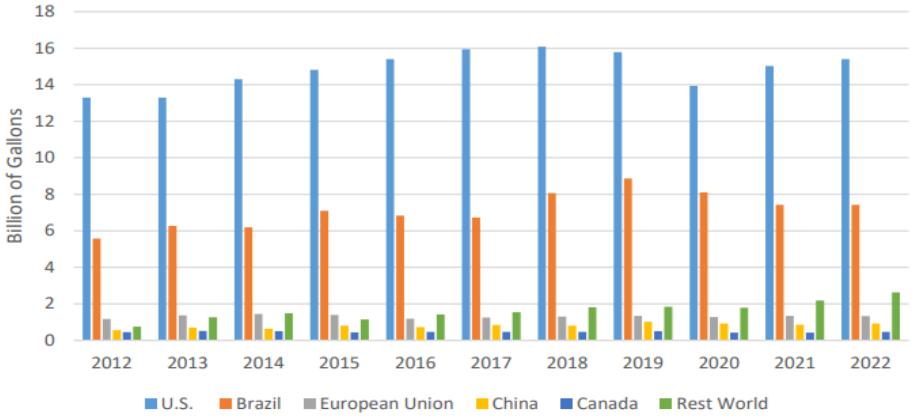
ظرفیت مورد نیاز	پیش بینی تولید اتانول	سال مالی
۹۷۵۰	۸۲۸۰	۲۰۲۲-۲۰۲۳
۱۱۷۵۰	۹۸۸۰	۲۰۲۳-۲۰۲۴
۱۴۳۰۰	۱۲۸۸۰	۲۰۲۴-۲۰۲۵
۱۵۰۰۰	۱۳۵۰۰	۲۰۲۵-۲۰۲۶

- تمامی مقادیر جدول برحسب میلیون‌لیتر می‌باشند.

چالش‌های تولید سوخت‌های زیستی مانند اتانول

یکی از ملاحظات و چالش‌ها در تولید سوخت زیستی مقرون برصرفه و سازگار بودن آن با محیط زیست است که هدف اصلی پالایشگاه‌های زیستی است (Singh et al., 2019).

[1] Bio ethanol
[2] Eukarvotes
[3] Prokaryote



شکل ۱- تولید جهانی اتانول توسط کشورهای مختلف

از جمله چالش‌های دیگر که جهت تولید صنعتی و بیشتر این سوخت‌ها، تأثیر سوخت‌های زیستی بر بازار انرژی و مواد غذایی، شرایط کار و حقوق کارگران در مورد بهداشت حرفه‌ای، نابرابری سیاست‌های سوخت زیستی، دسترسی و تغییر کاربری زمین می‌باشد. محدوده نظر پایداری سوخت زیستی می‌تواند بسته به تمایل افراد، مقیاس زمانی و منطقه جغرافیایی متفاوت باشد و تئوری پایداری مسائلی مانند ملاحظات اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی، حقوقی و فرهنگی را در برمی‌گیرد (Avramovic et al., 2018).

زیست توده جلبک و انواع آن‌ها

جلبک‌ها موجودات زنده‌ای هستند که از نور به عنوان منبع انرژی برای تولید اکسیژن و کربوهیدرات، از آب و CO_2 استفاده می‌کنند (Witthohn, 2024).

جلبک‌ها موجودات فتوسنتزی هستند که معمولاً بر اساس مورفولوژی و اندازه آن‌ها به ماکروجلبک‌ها و ریزجلبک‌ها تقسیم می‌شوند که از میکرومتر تا ۷۰ متر متغیر است. ماکروجلبک‌ها را می‌توان به سه گروه، جلبک‌های دریایی قهوه‌ای[1] جلبک‌های دریایی قرمز[2] و جلبک‌های دریایی سبز[3] طبقه بندی کرد. در حالی که ریزجلبک‌ها به طور کلی به دیاتوم‌ها[4]، جلبک‌های سبز[5]، جلبک‌های طلایی[6] و جلبک‌های سبز-آبی یا همان سیانوباکتری‌ها[7] گروه بندی می‌شوند. جلبک‌های بزرگ عمدتاً در محیط‌های دریایی یافت می‌شوند، در حالی که گونه‌های ریزجلبک در محیط‌های دیگر مانند محیط‌های آب شیرین نیز یافت می‌شوند. جلبک‌ها این قابلیت را دارند که مقادیر زیادی کربوهیدرات را به عنوان ذخیره انرژی سنتز کنند به همین دلیل از زیست توده آن‌ها می‌توان برای تولید بیواتانول که یک سوخت تجدیدپذیر است، استفاده کرد (Müller et al., 2023).

[1] Phaeophyceae
[2] Rhodophyceae
[3] Chlorophyceae
[4] Bacillariophyceae
[5] chlorophyceae
[6] Chrysophyceae
[7] Cyanophyceae

مزیت

زیست‌توده جلبکی به سایر مواد اولیه در تولید اتانول

از مزیت آن‌ها می‌توان موارد زیر را بیان کرد: ۱) جلبک‌ها دارای پتانسیل رشد در تمام طول سال هستند، ۲) آن‌ها در مقابل محتوای دی اکسید کربن بالا، تحمل بیشتری دارند، ۳) مصرف آب بسیار کم دارند، ۴) پرورش جلبک نیازی به استفاده از علف‌کش ها یا آفت‌کش‌ها ندارد، ۵) جلبک‌ها می‌تواند در محیط های غیرحساس مانند آب شور و آب دریا نیز رشد کند، که تاثیری بر بهره‌وری کشاورزی معمولی ندارد، ۶) سوخت‌های زیستی نسبت به سایر انواع سوخت، زیست تخریب پذیر هستند، که آن‌ها را در صورت نشت، برای محیط زیست بی‌ضرر می‌کند، ۷)سوخت های زیستی جلبکی به عنوان بهترین منبع برای جایگزینی سوخت مایع نفت انتخاب شدند، زیرا دارای محتوای روغن و کربوهیدرات بالا با بهره وری بالا و عملکرد خوب در هر هکتار هستند (Mishra et al., 2023).

سیانوباکتری‌ها

پوسته‌های زیستی که روی سطح خاک تشکیل می‌شوند، از میکرو و ماکروارگانیسم‌هایی همچون سیانوباکتری‌ها، قارچ‌ها، باکتری‌ها، جلبک‌ها و سایر گونه‌ها تشکیل شده

است. سیانوباکتری‌ها جزء پروکاریوت‌های گرم منفی، فتوتروف و مولد اکسیژن هستند و برخی از گونه‌های آن قادر به تثبیت ازت اتمسفر نیز هستند (Hosseini et al., 2022).

سیانوباکتری‌ها گونه‌هایی بسیار جالب هستند که ظرفیت فتوسنتز اکسیژنی را دارند و کاربرد سیانوباکتری‌ها به عنوان کارخانه‌های سلول خورشیدی برای تولید مواد شیمیایی از جمله سوخت‌های بالقوه است (Vidal et al., 2021).

سیانوباکتری‌ها بیش از ۲/۵ میلیارد سال پیش به وجود آمدند و در طی دوره‌های مختلف و تغییرات آب و هوایی در طول تاریخ زمین تکامل یافتند و در طیف گسترده‌ای از زیستگاه‌های طبیعی در اکوسیستم‌های متنوعی مانند سطوح سنگ‌ها، اقیانوس‌ها، خاک وآب شیرین متنوع شدند. در حال حاضر، سیانوباکتری‌ها نقش کلیدی در چرخه جهانی کربن و نیتروژن دارند و همچنین جزء مهمی در بسیاری از شبکه‌های غذایی آبزی هستند (Burford et al., 2020; Żymańczyk-Duda et al., 2022).

سیانوباکتری‌ها از نور برای اکسید کردن آب و ارائه الکترون‌ها برای اجرای یک متابولیسم اتوتروف بر اساس تثبیت CO_2 استفاده می‌کنند که در مقایسه با گیاهان زمینی، راندمان تثبیت CO_2 سیانوباکتری ها ۱۰ تا ۵۰ درصد بیشتر است. همین راندمان بالا تثبیت CO_2 به این موجودات پتانسیل بالایی برای ترسیب کربن و تولید بازده سوخت و مواد شیمیایی می‌دهد. در حالی که ریزجلبک‌های یوکاریوتی پتانسیل فتوسنتزی مشابهی دارند، سیانوباکتری‌ها از درجه پایین‌تری از پیچیدگی ساختاری برخوردارند که مهندسی متابولیک آن‌ها را ساده‌تر می‌کند. در حال حاضر، سیانوباکتری‌ها برای تولید ترکیبات متنوعی از هیدروکربن‌های با زنجیره کوتاه و سینتون‌[1]های کم مولکولی تا ترکیبات زیست فعال پیچیده با علاقه غذایی یا دارویی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Toepel et al., 2023).

مزیت سیانوباکتری‌ها به سایر منابع

از نظر کارایی فتوسنتزی، سیانوباکتری‌ها بر گیاهان و همچنین سایر جلبک‌ها غالب هستند و همچنین به دلیل تولید زیست توده بالا و ظرفیت رشد سریع آن‌ها در مقایسه با سایر موجودات فتوسنتزی، یک ماده اولیه احتمالی برای تولید سوخت های زیستی در نظر گرفته می‌شوند (Mishra et al., 2023).

مزیت بزرگ سیانوباکتری ها نسبت به میکروارگانیسم‌های هتروتروف، توانایی آن‌ها در تولید مجموعه وسیعی از ترکیبات صنعتی مرتبط با استفاده از نور و CO_2 است. علاوه بر مصرف CO_2 ، برخی از سیانوباکترها نیتروژن اتمسفر را نیز تثبیت می‌کنند و آن را به ترکیبات نیتروژندار آلی در دسترس تبدیل می‌کنند. اکثر سیانوباکترها را می‌توان به صورت غوطه‌ور در بیوراکتورها کشت نمود و همچنین آن‌ها نسبت به نوسان شرایط کشت مانند دما، ورودی نور و ... تحمل بالایی دارند. از آنجایی که چالش‌های بزرگ زمان ما عمدتاً شامل تغییرات آب و هوایی، ناشی از انتشار CO_2 و متان در جو، و بهره برداری بی‌رویه از منابع تجدیدناپذیر است، این دستاورد تکاملی ممکن است یک عنصر کلیدی باشد. بهره‌برداری تجاری از ریزجلبک‌ها (پروکاریوتی و یوکاریوتی) هنوز تا حد زیادی می‌تواند گسترش یابد، اما چندین شاخه صنعتی در حال حاضر روی تطبیق‌پذیری با این میکروارگانیسم‌ها حساب می‌کنند (Witthohn, 2024).

فرآیند کشت سیانوباکتری‌ها

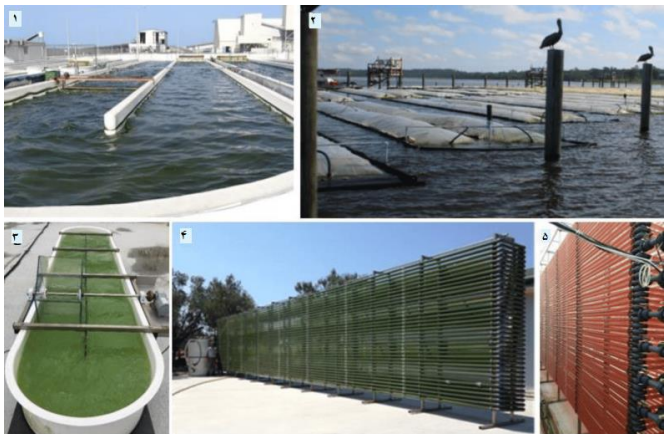
سیانوباکتری‌ها در آب، خاک و غیره یافت می‌شوند و به دلیل فیزیولوژی منحصر به فرد خود، می‌توانند در زیستگاه‌های اکولوژیکی سخت مانند بیابان‌ها، آتشفشان‌ها، چشمه‌های آب گرم و حتی در حوضچه‌های قلیایی زنده بمانند (Yogeswar et al., 2023).

سیانوباکتری‌ها با استفاده از آب، CO_2 و نور خورشید ترکیبات آلی تولید می‌شوند. شدت نور، دما، میزان CO_2، pH و اجزای محیط کشت شامل کربن، نیتروژن، فسفر و سایر عناصر می‌شود، از مهم‌ترین عواملی هستند که بر روی کشت سیانوباکتری‌ها تأثیر می‌گذارد . از آنجا که بهینه سازی غلظت اجزای محیط برای کشت آن‌ها ضروری است، محیط کشت‌های مختلفی جهت رشد سیانوباکتری‌ها وجود دارد (Farrokh et al., 2019).

فیکولوژیست‌ها ابتدا باید در مورد محصول یا کاربرد مورد نظر تصمیم بگیرند، سپس بر این اساس مناسب ترین گونه یا ترکیبی از گونه‌ها را انتخاب کنند و آنها را از

[1] Synthon

زیستگاه‌های طبیعی خود یا از مجموعه‌های کشت پیشین، برداشت کنند. کشت و تولید انبوه ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌ها را می‌توان به سه حوزه اصلی شامل، حوضچه ها، فوتوبیورآکتورها، سیستم‌های بیوفیلم یا ترکیبی از همه آن‌ها تقسیم کرد که در شکل ۳ آورده شده است و با توجه به شرایط و بررسی مزایا و معایب با در نظر گرفتن حوزه مورد نظر، استفاده می‌شود. روش های کشت جلبک بر اساس کاربرد و شرایط آن‌ها متفاوت است. عامل دیگری که در کشت گونه‌ها مهم است شامل نظارت بر گونه در حال رشد برای ارزیابی پیشرفت، تعیین سلامت کشت و ایجاد برنامه های برداشت است. متغیرهایی مانند تعداد سلول، چگالی نوری، کدورت، pH، غلظت مواد مغذی، مشاهدات میکروسکوپی و نظارت بر ترکیبات هدف مانند لیپیدها یا کربوهیدرات یا رنگدانه‌های مورد نیاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر چه سیستم کشت بزرگتر باشد، احتمال آلودگی و ناهمگنی بیشتر بوده و نیاز به دقت و نظارت بیشتری دارد (Novoveská et al., 2023).



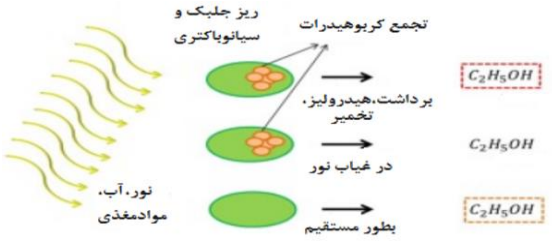
شکل ۲- ۱) حوضچه باز ۲) PBRهای (Photo bio reactor) بسته دریایی شناور با ظرفیت هر کدام ۸۰۰۰ لیتر ۳) حوضچه‌ی ۱۰۰۰ لیتری ۴و۵) PBRهای لوله ای ۴۰۰۰۰ لیتری در مقیاس بزرگ

اتانول

اتانول مایعی شفاف و با بویی خاص و قابل اشتعال است. نقطه جوش آن ۷۸/۱۳ درجه سانتی گراد و چگالی آن ۰/۷۸۹ گرم بر میلی‌لیتر است. اتانول به عنوان سوخت پایداری عمل می‌کند، توانایی آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و اتکا به منابع تجدیدناپذیر باعث شده است که به عنوان جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی متعارف شناخته شود. با سابقه طولانی استفاده به عنوان سوخت، به ویژه در بخش حمل و نقل، اتانول همچنان به عنوان یک منبع انرژی پایدار مورد بررسی و استفاده قرار می‌گیرد (Center, 2021).

سیانوباکتری به عنوان منبعی برای تولید اتانول زیستی

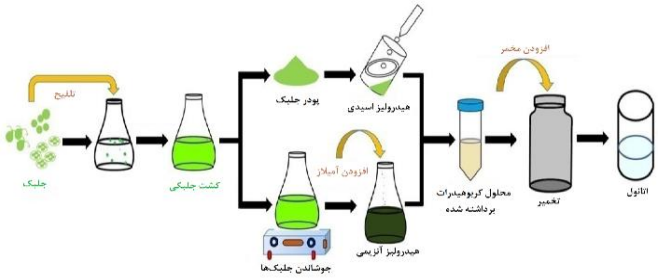
در سال‌های اخیر، ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌هایی مانند *Chlorella*، *Chlamydomonas*، *Spirulina*، *Porphyrydiu* ، *Scenedesmus* و برخی گونه‌های دیگر و همچنین سیانوباکتری‌های مهندسی شده برای تولید بیواتانول بررسی شده‌اند و استفاده از سیانوباکترها برای تولید مستقیم اتانول، مورد توجه قرار گرفته است که در شکل ۳ فناوری تولید اتانول از جابک‌ها بررسی شده است. می‌توان گفت سیانوباکتری‌ها به‌عنوان مواد اولیه جذاب برای تولید بیواتانول عمل می‌کنند، اما دانش علمی و فناوری در این زمینه هنوز کمیاب است و اطلاعات کمی در مورد مزایا و معایب واقعی این فرآیندها در دسترس است (de Farias Silva & Bertucco, 2016; Mishra et al., 2023).



شکل ۳- چشم انداز فناوری اتانول زیستی از ریزجلبک و سیانوباکتری

مراحل مختلف تولید اتانول زیستی

از نظر بیولوژیکی، تخمیر پرکاربردترین روش برای تولید الکل است. تخمیر فرآیندی است که در آن قندهای قابل تخمیر توسط میکروارگانیسم‌ها به اتانول تبدیل می‌شوند. جهت تولید اتانول تخمیری تعدادی کار روی ماده اولیه انجام می‌شود که در شکل ۴ شمایی از آن آورده شده است (Chandrasekhar et al., 2023).



شکل ۴- نمایش شماتیک تولید اتانول از ماده اولیه جلبکی

در ادامه توضیحات مختصری در مورد هر یک از مراحل تولید اتانول زیستی آورده شده است.

پیش‌فرآوری

مواد اولیه لیگنوسلولزی مختلف دارای ترکیب شیمیایی و پلیمریزاسیون متفاوتی هستند و بنابراین به مواد شیمیایی خاصی نیاز دارند که به فرآیند هضم کمک می‌کنند. در مرحله پیش فرآوری لیگنین انباشته شده را حذف می‌کند که موجب می‌شود منافذ زیست توده افزایش و به ادامه فرآیند کمک کند. چندین روش پیش تصفیه به عنوان مثال، فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، و همچنین ترکیب آن‌ها گزارش شده است که با توجه به شرایط و نوع زیست‌توده استفاده می‌شود و ۲۰٪ از هزینه کل فرآیند را در برمی‌گیرد (Sunkar & Bhukya, 2022).

کربوهیدرات ریزجلبک‌ها معمولا از نشاسته و سلولز تشکیل شده است و سلول‌های ریز جلبک فاقد محتوای لیگنین است که عدم وجود آن، تجزیه قندها را به مونوساکارید و تبدیل آن‌ها به بیواتانول را آسان‌تر می‌کند. همچنین نبود لیگنین موجب می‌شود هزینه عملیاتی در مقایسه با مواد لیگنوسلولزی، بسیار ارزان‌تر شود (Phwan et al., 2019).

هیدرولیز

ساخت بیواتانول نیاز به مرحله هیدرولیز دارد که هدف از آن دپلیمریزاسیون سلولز و یا همی‌سلولز به قندهای قابل تخمیر ساده است. بنابراین هیدرولیز سلولز باید یا توسط یک اسید انجام شود که به آن هیدرولیز شیمیایی می‌گویند، یا توسط آنزیم‌های خاص صورت گیرد که هیدرولیز آنزیمی یا قندسازی[1] نامیده می‌شود. در هیدرولیز اسید ضعیف معمولا اسید ۱ تا ۳ درصد در دمای بین ۱۸۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و هیدرولیز اسیدقوی با اسید ۲۰ تا ۴۰ درصد و در دمای ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود که از مزیت آن بازده قند بالا و از معایب آن ایجاد خوردگی و هزینه بازیافت اسید است. در هیدرولیز آنزیمی نیز از آنزیم‌های مختلف استفاده می‌شود که آلودگی زیست‌محیطی ایجاد نمی‌کند و حتی می‌توان گفت برخی آنزیم‌های اختصاصی بازده بالاتری را نیز ارائه می‌دهد، اما هزینه بالای استفاده از آنزیم‌ها می‌تواند مانعی برای توسعه آن باشد، بنابراین در حالا حاضر برخی پژوهش‌ها در خصوص توسعه و کاهش هزینه آنزیم‌ها در جریان است (Abo et al., 2019).

تخمیر

تخمیر یک فرآیند بیولوژیکی است که توسط آنزیم‌های ترشح شده توسط میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود و

[1]Saccharification

قندهای ساده را به مولکول‌های کوچک‌تر مانند الکل‌ها تبدیل می‌کند (Abo et al., 2019).

در حال حاضر، تولید سالانه الکل در سراسر جهان بیش از ۱۰۰ میلیارد لیتر است که ساکارومایسس‌سرویزیه (Saccharomyces cerevisiea) میکروارگانیسم صنعتی است که به دلیل مقاوم بودن در برابر غلظت بالا اتانول، مقاومت در برابر pH و دماها مختلف و پایداری در طول فرآیند، عمدتاً برای تولید اتانول استفاده می‌شود (da Silva et al., 2022; Permatasari et al., 2020).

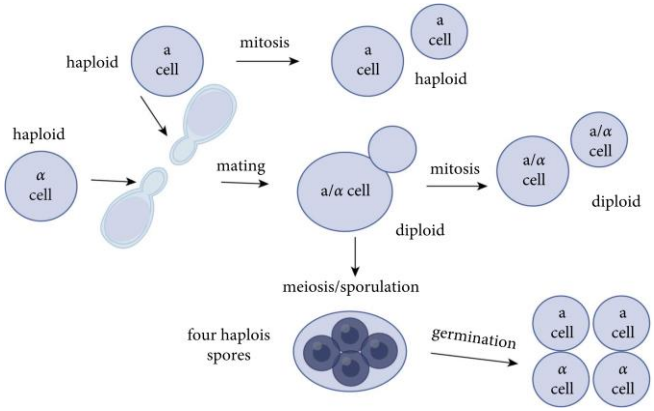
گونه‌های ساکارومایسس مهم‌ترین مخمرهای تجاری هستند و سال‌ها به عنوان مدل‌های موجودات یوکاریوتی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. چرخه زندگی مخمرها به این صورت است که ابتدا از طریق چرخه‌های تولید مثل جوانه می‌زند. مخمر جوانه زده در طول چرخه زندگی از طریق میتوز (Mitosis) هم به صورت سلول‌های هاپلونتیک (Haplontic) و هم سلول های دیپلونتیک (Diplontic) تولید مثل می‌کند که در شکل ۵ نشان داده شده است. تعداد مخمرهای کشف شده سال به سال در حال افزایش است. فرض بر این است که در حال حاضر تنها ۱ درصد از گونه های مخمر شناخته شده است که تقریباً ۱۵۰۰ گونه می‌باشد و تعداد کل گونه‌های مخمر روی زمین ۱۵۰۰۰۰ تخمین زده می‌شود، اما همچنان پرمصرف‌ترین مخمر برای تولید اتانول زیستی ساکارومایسس‌سرویزیه است (da Silva et al., 2022).

تقطیر یا کم آب کردن محصول نهایی

تقطیر یک روش موثر برای جداسازی مواد تشکیل دهنده مانند اتانول از مخلوط مایع قابل اختلاط مانند مخمر از طریق تبخیر و تکنیک‌ها جداسازی مانند مانند فرآیند جذب، فرآیند غشایی، آبگیری شیمیایی، تقطیر انتشاری، تقطیر استخراجی و تقطیر در خلاء است. بر اساس اصل تقطیر، اتانول از یک مخلوط بر اساس تفاوت در فرّاریت آن‌ها جدا می‌شود. اتانول در دمای ۷۸/۲ درجه سانتی‌گراد به نقطه جوش می‌رسد. بعد از آب‌زدایی می‌توان اتانول خشک با کیفیت بالا و درصد خلوص حدود ۹۹/۵ را به دست آورد (Robak & Balcerek, 2020).

چشم اندازی برای آینده

از زمان انقلاب صنعتی، زغال سنگ و سایر منابع فسیلی منابع اصلی انرژی بوده اند و این امر موجب ایجاد مسائل زیست محیطی جدی، از جمله انتشار و سطح بالای CO_2 در جو و همچنین آلودگی‌های زیست محیطی شده است. بنابراین، منابع انرژی تجدیدپذیر سازگار با محیط زیست، مانند سوخت‌های زیستی، نیاز فوری به توسعه دارند (Roussou et al., 2021). در مجموع، سیاره ما نیازی واقعی به انرژی‌های پاک برای آینده دارد و کارخانه‌های سلولی سیانوباکتری‌ها می‌تواند یکی از کاندیدای مناسب برای این منظور باشد (Farrokh et al., 2019). پیش‌بینی می‌شود در آینده محصولات متنوع، پرکاربرد و اقتصادی زیادی از سیانوباکتری‌ها بدست آید و تولید اتانول زیستی با مواد اولیه جلبکی به عنوان منابع اولیه تجدیدپذیر، بسیار مورد توجه قرار گیرد.



شکل۵- چرخه زندگی مخمر

منابع

Abo, B. O., Gao, M., Wang, Y., Wu, C., Ma, H., & Wang, Q. (2019). Lignocellulosic biomass for bioethanol: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation processes. *Reviews on environmental health*, *34*(1), 57-68.

Agarwal, P., Soni, R., Kaur, P., Madan, A., Mishra, R., Pandey, J., Singh, S., & Singh, G. (2022). Cyanobacteria as a promising alternative for sustainable environment: Synthesis of biofuel and biodegradable plastics. *Frontiers in Microbiology*, *13*, 939347.

Avramovic, J., Velickovic, A., & Veljkovic, V. (2018). Challenges in biodiesel industry: Socio-economic, occupational health, and policy issues. *Saf. Eng*, *8*, 79-83.

Burford, M., Carey, C., Hamilton, D., Huisman, J., Paerl, H., Wood, S., & Wulff, A. (2020). Perspective: Advancing the research agenda for improving understanding of cyanobacteria in a future of global change. *Harmful Algae*, *91*, 101601.

Canabarro, N. I., Silva-Ortiz, P., Nogueira, L., Cantarella, H., Maciel-Filho, R., & Souza, G. M. (2023). Sustainability assessment of ethanol and biodiesel production in Argentina, Brazil, Colombia, and Guatemala. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *171*, 113019.

Center, A. F. D. (2021). Alternative Fuels Data Center: Ethanol Production. In: Retrieved.

Chandrasekhar, T., Varaprasad ,D., Gnaneswari, P., Swapna, B., Riazunnisa, K., Anu Prasanna, V., Korivi, M., Wee, Y.-J., & Lebaka, V. R. (2023). Algae: The Reservoir of Bioethanol. *Fermentation*, *9*(8), 712.

da Silva Fernandes, F., de Souza, É. S., Carneiro, L. M., Alves Silva, J. P., de Souza, J. V. B., & da Silva Batista, J. (2022). Current ethanol production requirements for the yeast Saccharomyces cerevisiae. *International Journal of Microbiology*, *2022*.

de Farias Silva, C. E., & Bertucco, A. (2016). Bioethanol from microalgae and cyanobacteria: a review and technological outlook. *Process Biochemistry*, *51*(11), 1833-1842.

Farrokh, P., Sheikhpour, M., Kasaeian, A., Asadi, H., & Bavandi, R. (2019). Cyanobacteria as an eco-friendly resource for biofuel production: a critical review. *Biotechnology progress*, *35*(5), e2835.

Hosseini, M., Mohammadi, P., Ghadam, P., Saboora, A., Zarei, R., & Hojjati Bonab, Z. (2022). The Role of EPS-producing Cyanobacteria in Desert Soils. *Biological Journal of Microorganism*, *11*(42), 51-66.

Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M., & Visser, P. M. (2018). Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, *16*(8), 471-483.

Mishra, S., Kumari, N., Singh, V., & Sinha, R. (2023). Cyanobacterial Biofuel: A Platform for Green Energy. *Advances in Environmental and Engineering Research*, *5*(3), 1-42.

Müller, C., Scapini, T., Rempel, A., Abaide, E. R., Camargo, A. F., Nazari, M. T., Tadioto, V., Bonatto, C., Tres, M. V., & Zabot, G. L. (2023). Challenges and opportunities for third-generation ethanol production: A critical review. *Engineering Microbiology*, *3*(1), 100056.

Narisetty, V. ,Nagarajan, S., Gadkari, S., Ranade, V. V., Zhang, J., Patchigolla, K., Bhatnagar, A., Awasthi, M. K., Pandey, A., & Kumar, V. (2022). Process optimization for recycling of bread waste into bioethanol and biomethane: A circular economy approach. *Energy Conversion and Management*, *266*, 115784.

Novoveská, L., Nielsen, S. L., Eroldoğan, O. T., Haznedaroglu, B. Z., Rinkevich, B., Fazi, S., Robbens, J., Vasquez, M., & Einarsson, H. (2023). Overview and challenges of large-scale cultivation of photosynthetic microalgae and cyanobacteria. *Marine Drugs*, *21*(8), 445.

Olguin-Maciel, E., Singh, A., Chable-Villacis, R., Tapia-Tussell, R., & Ruiz, H. A. (2020). Consolidated bioprocessing, an innovative strategy towards sustainability for biofuels production from crop residues: an overview. *Agronomy*, *10*(11), 1834.

Olughu, O. O., Tabil, L. G., Dumonceaux, T., Mupondwa, E., Cree, D., & Li, X. (2023). Technoeconomic analysis of a fungal pretreatment-based cellulosic ethanol production. *Results in Engineering*, *19*, 101259 .

Pembroke, J. T., Armshaw, P., & Ryan, M. P. (2019). Metabolic engineering of the model photoautotrophic cyanobacterium synechocystis for ethanol production: Optimization strategies and challenges. *Fuel Ethanol Production from Sugarcane; Basso, TP, Basso, LC, Eds*, 199-219.

Permatasari, N., Zainuri, M., Kusumaningrum, H., Mishbach, I., & Hastuti, E. (2020). Bioethanol production using the SSF method (simultaneous saccharification and fermentation) of microalgae anabaena sp. Journal of Physics: Conference Series,

Phwan, C. K., Chew, K. W., Sebayang, A. H., Ong, H. C., Ling, T. C., Malek, M. A., Ho, Y.-C., & Show, P. L. (2019). Effects of acids pre-treatment on the microbial fermentation process for bioethanol production from microalgae. *Biotechnology for biofuels*, *12*(1), 1-8.

Robak, K., & Balcerek, M. (2020). Current state-of-the-art in ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Microbiological Research*, *240*, 126534.

Roussou, S., Albergati, A., Liang, F., & Lindblad, P. (2021). Engineered cyanobacteria with additional overexpression of selected Calvin-Benson-Bassham enzymes show further increased ethanol production. *Metabolic engineering communications*, *12*, e00161.

Singh, A., Jasso, R. M. R., Gonzalez-Gloria, K. D., Rosales, M., Cerda, R. B. ,Aguilar, C. N., Singhania, R. R., & Ruiz, H. A. (2019). The enzyme biorefinery platform for advanced biofuels production. *Bioresource Technology Reports*, *7*, 100257.

Sunkar, B., & Bhukya, B. (2022). An Approach to Correlate Chemical Pretreatment to Digestibility Through Biomass Characterization by SEM, FTIR and XRD. *Frontiers in Energy Research*, *10*, 802522.

Toepel, J., Karande, R., Klähn, S., & Bühler, B. (2023). Cyanobacteria as whole-cell factories: current status and future prospectives. *Current Opinion in Biotechnology*, *80*, 102892.

Vidal, L., Ballot, A., Azevedo, S., Padisák, J., & Welker, M. (2021). Introduction to cyanobacteria. *Toxic Cyanobacteria in Water, 2nd ed.; Chorus, I., Welker, M., Eds*, 163-211.

Witthohn, M. (2024). *Production, purification and analysis of novel peptide antibiotics from terrestrial cyanobacteria* Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau].

Yogeswar, M., Valle, N., & Nagarajan, A. (2023). Cyanobacteria as a Source of Biodegradable Plastics.

Żymańczyk-Duda, E., Samson, S. O., Brzezińska-Rodak, M., & Klimek-Ochab, M. (2022). Versatile applications of cyanobacteria in biotechnology. *Microorganisms*, *10*(12), 2318.

Cyanobacteria, a beneficial species in bioethanol production

Javadi tadayon S. and Yusufzadi M.

Dept. of Biology, Faculty of Science, University of Qom, Qom, I.R. of Iran

Abstract

Today, excessive use of non-renewable fossil fuels due to population explosion and the subsequent reduction of these fuels, Environmental pollution, the increase of greenhouse gases as well as the economic challenges following the reduction of fossil fuels encourage us to focus on renewable fuels such as bioethanol. In addition to chemical methods, ethanol can also be produced from natural raw materials, and in particular, ethanol production from microalgae and cyanobacteria sources has been an attractive method in recent days. Cyanobacteria due to the minimal need for food, photosynthesis and conversion of sunlight into energy, fast growth and high density of growth, no interference in the food cycle and no need for arable land for cultivation. It can be a good solution for many environmental problems. Generally, obtaining information for the production of bioethanol as one of the most widely used materials in the fields of producing materials needed by the society will reduce environmental pollution and can also be used as a substitute for non-renewable resources at the industrial level and The future research of renewable energies will be very useful.

Keywords: cyanobacteria, ethanol, bioethanol