

مروری بر فرایند تولید بیواتانول از مواد پایه قندی و لیگنوسلولزی و مقایسه آن‌ها

میلاذ مقدم^۱، کیوان شایسته^{۲*}، حسن صدیقی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: k.shayesteh@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷

چکیده

نگرانی از منابع محدود فسیلی، محققان را به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و نو سوق داده است. بیواتانول، یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین سوخت‌زیستی است که می‌تواند جایگزین سوخت‌های فسیلی گردد. بیواتانول را از محصولات و پسماندهای کشاورزی گوناگونی نظیر غلات، ملاس، میوه، مواد لیگنوسلولزی، جلبک‌ها می‌توان تولید کرد. ملاس که قند غیر متبلور عصاره نیشکر و چغندر قند است به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد اولیه پایه قندی مطرح می‌باشد. معمولاً مواد قندی با مخمر ساکارومایسیس سروزیه^۱ تخمیر و بیواتانول تولید می‌شود. مواد بر پایه نشاسته، نظیر گندم و ذرت ابتدا باید هیدرولیز آنزیمی شوند و سپس به کمک فرایند تخمیر، بیواتانول حاصل شود. ضایعات کشاورزی مانند کاه غلات، خاکاره و لیکورسیاه به‌عنوان مواد اولیه لیگنوسلولزی به‌شمار می‌روند. از مواد اولیه لیگنوسلولزی، ابتدا لیگنین زدایی می‌شود. سپس فرایند هیدرولیز آنزیمی انجام و در نهایت به کمک تخمیر، بیواتانول حاصل می‌شود. مقاله مروری حاضر ابتدا به وضعیت تولید این سوخت‌زیستی در کشورهای پیشرو جهان می‌پردازد. سپس به اجمال به فرایند تولید بیواتانول از مواد اولیه قندی، نشاسته‌ای و لیگنوسلولزی و چالش‌های موجود هر روش اشاره می‌کند. همچنین به بررسی انواع مخمرها و مقایسه آن‌ها و پارامترهای مؤثر در فرایند تخمیر، فرایند پیش تصفیه، هیدرولیز و در نهایت به فرایند تقطیر می‌پردازد.

کلمات کلیدی

"بیواتانول"، "مواد لیگنوسلولزی"، "مواد پایه قندی"، "سوخت‌زیستی"، "پسماند جامد".

۱- مقدمه

از طریق یک فرایند بیوشیمیایی به اتانول تبدیل می‌کنند. بیو-اتانول دارای مزایای متعددی نسبت به سوخت سنتی می‌باشد. احتراق زودرس، جلوگیری از کوبش سیلندر به دلیل بالا بودن عدد اکتان و گرمای بالای تبخیر، قابلیت اختلاط با بنزین و کاهش انتشار هیدروکربن و مونوکسید کربن به دلیل وجود درصد بالای اکسیژن در ساختار بیواتانول از ویژگی‌های بارز آن می‌باشد (Deenanath et al., ۲۰۱۲). آمارها نشان می‌دهد که سالانه ۴/۲ میلیون نفر بر اثر استنشاق گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی از بین می‌روند (Fedacko et al., ۲۰۱۷). بنابراین ایده یافتن یک منبع تولید انرژی در دسترس و سازگار با محیط‌زیست که عموماً از ضایعات کشاورزی تولید می‌شود، بسیار جذاب است؛ زیرا علیرغم تولید یک محصول ارزشمند، موجب ایجاد منفعت

صنعت تولید بیواتانول امروزه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های تجاری سبز شناخته می‌شود. منابع سوخت‌های-طبیعی نظیر سوخت‌های فسیلی و زغال سنگ به سرعت در حال اتمام است؛ بنابراین سوخت‌هایی نظیر اتانول، متان و هیدروژن مدنظر محققین و صاحبان صنعت قرار گرفته است. بیواتانول را می‌توان از محصولات و پسماندهای کشاورزی گوناگونی نظیر غلات، ملاس، میوه، آب پنییر، مواد لیگنوسلولزی و جلبک‌ها تولید کرد (Sadik et al., ۲۰۱۴). بیواتانول با فرمول شیمیایی $(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH})$ از طریق فرایند بیولوژیکی تولید می‌شود. در این فرایند زیست توده را

^۱ Saccharomyces cerevisiae

جایگزین مناسب برای بنزین می‌توان به این موارد اشاره کرد: (۱) بیواتانول را می‌توان از مواد خام تجدیدپذیر تهیه کرد، (۲) سمیت کمتری نسبت به سایر سوخت‌ها دارد، (۳) می‌توان از آن به صورت مستقیم یا مخلوط با بنزین با نسبت‌های مختلف، استفاده کرد، و (۴) آلاینده‌های کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی تولید می‌کند؛ زیرا اکسیژن موجود در اتانول، سبب بهبود کیفیت سوخت می‌شود (Minteer, ۲۰۱۶). با این وجود، طبق آمارهای شبکه بین‌المللی REN۲۱ در سال ۲۰۱۶، سهم سوخت‌زیستی تنها ۳ درصد از سوخت‌های مصرفی در دنیا می‌باشد (Kusch-Brandt, ۲۰۱۹). عوامل متعددی می‌تواند دلیل عدم استقبال از سوخت‌های زیستی باشد. دسترسی آسان به سوخت‌های فسیلی، جدی نبودن سیاست‌گذاران و نگرانی از مواد اولیه پایه‌قندی و نشاسته‌ای که غذای مردم است می‌تواند از مهم‌ترین دلایل باشد (Saygin et al., ۲۰۱۵). هزینه تولید بیواتانول تابع مهمی از ماده اولیه می‌باشد. در حال حاضر حدود ۹۸ درصد از اتانول تولیدی جهان از طریق تخمیر قندها حاصل می‌شود (Zabed et al., ۲۰۱۴). به همین سبب موفقیت در تولید اقتصادی بیواتانول و رقابت آن با بنزین بسیار دشوار به نظر می‌رسد. جهت اقتصادی بودن تولید بیواتانول باید هزینه مواد اولیه آن پایین و دسترسی آسان به مواد اولیه ممکن باشد. در حال حاضر، بیواتانول به‌عنوان پرمصرف‌ترین سوخت در بین انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۲۰۱۹ تولید این سوخت-زیستی به ۱۱۰۰۰۰ میلیون لیتر در جهان رسید. طبق آمارها تا سال ۲۰۱۹ ایالات متحده آمریکا با سهم ۵۴ درصدی، پیشتاز تولید بیواتانول در جهان می‌باشد. کشور برزیل نیز به تنهایی با مجموع ۳۲۰۰۰ میلیون لیتر در سال ۲۰۱۹ حدود ۳۰ درصد تولید جهانی بیواتانول را در دست دارد، که به‌عنوان دومین تولیدکننده بیواتانول جهان شناخته می‌شود. مطابق شکل ۱، تولیدکنندگان اصلی بیواتانول معرفی شده‌اند (Schmitz et al., ۲۰۲۰). همان‌طور که ذکر شد بیواتانول را می‌توان با توجه به شرایط مختلف هر کشور از مواد اولیه متفاوتی به‌دست آورد. ماده اصلی تولید بیواتانول در آمریکا به‌عنوان اولین کشور پیشرو در صنعت بیواتانول ذرت است. ذرت عمدتاً به‌عنوان خوراک دام استفاده می‌شود. در ایالات-متحده آمریکا حدود ۳۸ درصد ذرت برای خوراک دام، ۲۹

اقتصادی از ماده اولیه‌ای که هیچ سودی ندارد، می‌شود. همچنین دفع ضایعات کشاورزی یک مشکل اساسی زیست-محیطی است که با راه‌اندازی چرخه تولید بیواتانول تا حد زیادی قابل مرتفع‌شدن است. برای مثال سالانه بیش از ۲۱/۵ میلیون تن زباله کشاورزی در ایران تولید می‌شود که می‌توان بیش از ۵/۵ میلیون لیتر بیواتانول از آن تولید کرد. البته تبدیل این ضایعات به بیواتانول خود دستاوردی بسیار بزرگ است که نیازمند برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری دقیق می‌باشد (Panahi et al., ۲۰۲۰). در حال حاضر ایالات-متحده و برزیل دو کشوری هستند که حدود ۷۰ الی ۸۰ درصد تولید بیواتانول جهان را به خود اختصاص داده‌اند (Walker, ۲۰۱۱).

هدف اصلی این مقاله مروری، ارائه آخرین دستاوردها برای تولید بیواتانول از مواد پایه قندی، نشاسته‌ای و لیگنوسلولوزی می‌باشد. بسته به ماده اولیه، فرایند تولید بیواتانول ممکن است ساده‌تر و یا پیچیده‌تر باشد. مثلاً استفاده از نیشکر سبب می‌شود تا هزینه ماده اولیه برای تولید بیواتانول بسیار بالا رود؛ اما هزینه فرایند به‌شدت کاهش یابد. از طرفی استفاده از نیشکر تهدید بسیار جدی برای غذای جامعه بشری است؛ لذا در این مقاله سعی بر آن است تا چالش‌های پیش روی در تولید بیواتانول به‌درستی بررسی گردد.

۲- روش انجام تحقیق

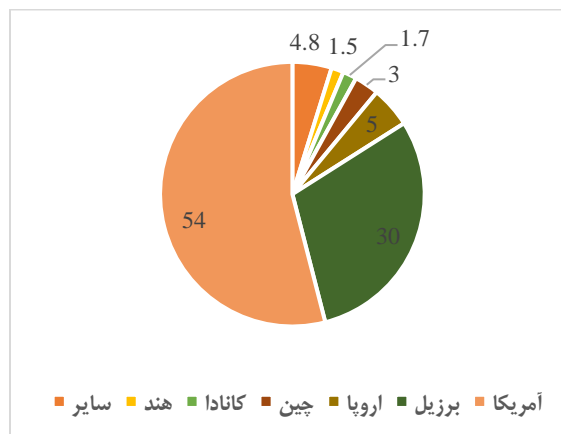
جهت بررسی مقالات مختلف در مورد فرایند تولید بیواتانول از مواد پایه قندی و لیگنوسلولوزی، پایگاه‌های اطلاعاتی ResearchGate، ScienceDirect، Google scholar، ACS، Scopus، SID، سیویلیکا، گنج ایراندک با کلیدواژه‌های Bioethanol, Lignocellulosic materials, sugar-based materials, biofuels، متون استفاده-شده در این مقاله شامل مقالات گوناگون، پایان‌نامه‌ها، کتب و گزارشات علمی می‌شود. در این مطالعه، بیشتر از مقالات منتشرشده در پایگاه‌های اطلاعات علمی اشاره‌شده استفاده شد.

۳- نتایج

بیواتانول به‌دلیل عدد اکتان بالا، گرمای تبخیر زیاد، و فشار بخار کم به‌عنوان سوختی پاک و تجدیدپذیر می‌باشد؛ از این رو جایگزین مناسبی برای بنزین است (Thangavelu et al., ۲۰۱۶). از دلایل اصلی در نظر گرفتن اتانول به‌عنوان

(نیشکر، چغندر قند) اساساً به فرایند خرد کردن نیاز دارند تا بازده قند بالایی داشته باشند. در فرایندی که در کارخانه‌های نیشکر استفاده می‌شود، ساقه‌های نیشکر را با غلتک‌های مخصوص پرس می‌کنند تا شیره غنی از شکر، آزاد شود. سپس شیره حاصله را در مجاورت با آهک قرار می‌دهند تا مواد کلوئیدی شیره رسوب کند. سپس به کمک فرایند فیلتراسیون، شکر استحصال می‌شود. بخش قند غیرمتبلور که به عنوان ملاس شناخته می‌شود، با مخمر ساکارومایسیس سروویزه در دمای حدود ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و در غلظت قند ۱۴ تا ۱۸ درصد تخمیر می‌شود (Susmozas et al., ۲۰۲۰). در این فرایند ممکن است ۷۵ تا ۱۰۰ لیتر اتانول به ازای هر تن زیست‌توده تولید شود. این تکنولوژی عمدتاً در برزیل مورد استفاده قرار می‌گیرد (Araújo et al., ۲۰۱۸). فرایند تولید بیواتانول از ملاس نیشکر در شکل ۲ نشان داده شده است. برخلاف مواد اولیه قندی، مواد خام مبتنی بر نشاسته مانند ذرت، گندم، برنج، کاساوا، ابتدا باید هیدرولیز شوند. برای هیدرولیز کردن کربوهیدرات‌ها به مونومرهای قند لازم است تا مراحل مایع‌سازی و ساکاره‌سازی انجام شود. برای نمونه در مورد ذرت، دو روش برای پیش‌فرآوری وجود دارد؛ آسیاب خشک و آسیاب تر. آسیاب‌های خشک عمدتاً برای تولید اتانول استفاده می‌شوند و معمولاً ظرفیت کمتری دارند؛ در حالی که آسیاب‌های تر برای به‌دست‌آوردن محصولات دیگر مانند شربت ذرت با فروکتوز بالا (HFCS^۱)، دکستروز و شربت گلوکز هم مناسب می‌باشند. در طی فرایند آسیاب خشک ذرت، مواد خام ابتدا به ذرات ریز آسیاب می‌شوند تا مرحله مایع‌سازی آسان شود. مایع‌سازی و هیدرولیز نشاسته در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد (۱ تا ۲ ساعت) در حضور آنزیم آلفا-آمیلاز صورت می‌گیرد. سپس مخلوط تا دمای ۳۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد خنک‌شده و با مخمر ساکارومایسیس سروویزه و آنزیم گلوکومیلاز، در یک فرایند ساکاره‌سازی و تخمیر هم‌زمان (SSF^۲) انجام می‌شود. زمان فرایند، ۴۰ الی ۵۰ ساعت است. در انتها جهت افزایش خلوص بیواتانول، فرایند تقطیر انجام می‌شود. محصول پایین برج تقطیر یک ماده با پروتئین ۲۷ درصد است که برای تغذیه دام مناسب است. برخلاف فرایند

درصد برای تولید بیواتانول و بقیه برای مصارف صنعتی و صادرات در نظر گرفته می‌شود. ماده اولیه اصلی در تولید بیواتانول در کشور برزیل به‌عنوان دومین تولیدکننده بیواتانول، نیشکر است. نیشکر عمدتاً برای پاسخگویی به تقاضای جهانی شکر کشت می‌شود و حدود ۸۰ درصد از تولید جهانی شکر از نیشکر و ۲۰ درصد باقی‌مانده از چغندر قند است. برزیل و هند بزرگ‌ترین تولیدکنندگان نیشکر هستند که به ترتیب ۲۶ و ۲۱ درصد از تولیدات جهانی این محصول را در سال ۲۰۱۶ به خود اختصاص دادند (Mekonnen et al., ۲۰۱۸). با توجه به مطالب فوق انتظار می‌رود که جهت‌گیری تحقیقات و صنعت تولید بیواتانول به سمت ضایعات کشاورزی و مواد اولیه ارزان قیمت و فراوان برود؛ به عبارتی نسل اول تولید بیواتانول که استفاده از مواد پایه قندی و نشاسته‌ای می‌باشد باید عوض و نسل دوم تولید بیواتانول که استفاده از مواد لیگنوسلولزی است باید جایگزین شود تا امکان رقابت اقتصادی با سوخت‌های فسیلی ممکن شود.



شکل ۱- سهم تولید بیواتانول به تفکیک کشورها (Schmitz et al., ۲۰۲۰)

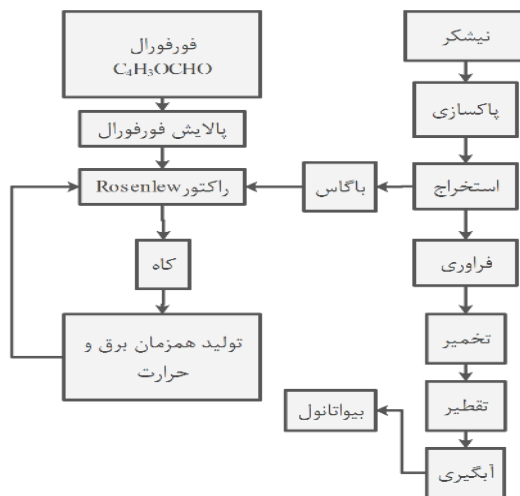
• تولید بیواتانول از مواد قندی و نشاسته‌ای امروزه تولید اتانول در جهان از مواد اولیه قندی و نشاسته‌ای مانند ذرت، غلات، نیشکر، به‌طور گسترده در بسیاری از کشورها به‌صورت تجاری انجام می‌شود. اگرچه مواد اولیه آن با توجه به شرایط کشورها متفاوت است. تولید بیواتانول از مواد قندی و نشاسته‌ای به پیش تصفیه کمی نیاز دارد تا بتواند بازده بالای بیواتانول تولیدی را داشته باشد. مواد اولیه قندی

^۲ Simultaneous saccharification and fermentation

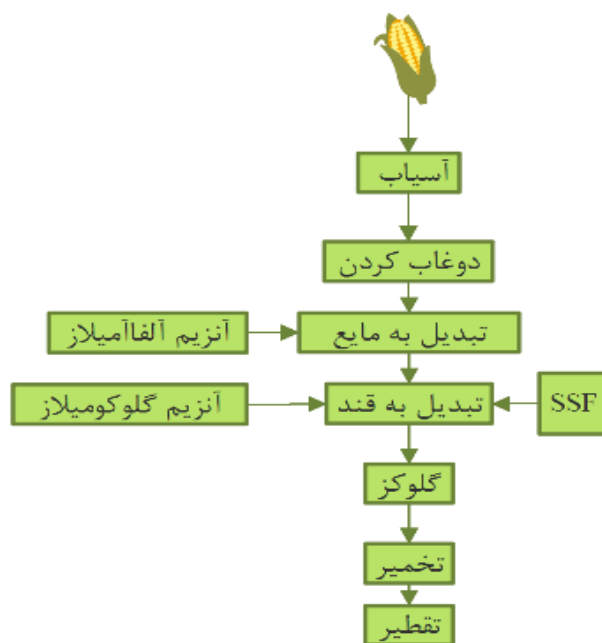
^۱ high-fructose corn syrup

است. به طور کلی می‌توان تا ۴۰۰ لیتر بیواتانول از هر تن ذرت تولید کرد (Mohanty *et al.*, ۲۰۱۹). فرایند تولید بیواتانول از ذرت در شکل ۳ نشان داده شده است.

آسیاب خشک، در فرایند آسیاب تر هدف تکه‌تکه کردن دانه‌های ذرت به پوسته، جوانه و آندوسپرم^۱ برای به‌دست‌آوردن محصولات جانبی دیگر علاوه بر بیواتانول



شکل ۲- فرایند تولید بیواتانول از ملاس نیشکر (Silva *et al.*, ۲۰۱۷)



شکل ۳- فرایند تولید بیواتانول از ذرت (Kumar *et al.*, ۲۰۱۶)

کشاورزی و پسماندهای جامد شهری هستند که متشکل از سلولز، همی سلولز و لیگنین می‌باشند (Broda *et al.*, ۲۰۲۲). مواد لیگنوسلولزی بیش از ۹۰ درصد از وزن خشک سلول گیاهی را به خود اختصاص می‌دهند (Devi *et al.*,

تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی • مواد لیگنوسلولزی به دلیل فراوانی و دسترسی بالا می‌توانند جهت تولید سوخت زیستی مورد استفاده قرار گیرد. ترکیبات لیگنوسلولزی شامل انواع مختلفی از گیاهان، پسماندهای

^۱ Endosperm

دی-مانوز، دی-الکتوز و دی-لوکوز طبقه بندی می‌شوند (Cardona et al., ۲۰۰۷). میزان متوسط همی سلولز در سخت چوب‌ها، ۳۵ درصد و نرم چوب‌ها، ۲۸ درصد است (Balat et al., ۲۰۰۸). جهت تولید بیواتانول، لیگنین به-عنوان جزء نامطلوب به‌شمار می‌رود؛ زیرا تجزیه زیستی آن بسیار دشوار است. خصوصیات این جز از زیست توده باعث می‌شود که به‌عنوان مانعی برای دسترسی آنزیم‌ها به قند، شناخته شود (Boerjan et al., ۲۰۰۳).

• فرایند تبدیل زیست توده لیگنوسلولزی به بیواتانول برای تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی دو مسیر فرایندی وجود دارد: ۱- ترموشیمیایی، و ۲- بیوشیمیایی. در فرایند ترموشیمیایی از کاتالیزورهای غیربیولوژیکی در راکتور استفاده می‌کنند. در این نوع از فرایند نیازی به استفاده از مخمرها و آنزیم‌ها نیست (Foust et al., ۲۰۰۹). فرایند ترموشیمیایی امکان تبدیل هر ماده کربنی به محصولاتی از جمله اتانول را فراهم می‌کند. در این نوع فرایند، امکان تولید اتانول و یا سایر سوخت‌های زیستی از طریق تجزیه حرارتی وجود دارد. زیست توده در دمای بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در ۲ تا ۳ مگاپاسکال با دسترسی محدود به اکسیژن، تحت پلیمریزاسیون کامل قرار می‌گیرد و گاز سنتز تولید می‌کند. گاز سنتز مخلوطی از مونوکسید کربن، هیدروژن و سایر هیدروکربن‌ها است (Paykani et al., ۲۰۲۲). فرایند پیرولیز در دماهای پایین‌تر از گازی شدن (۴۰۰-۶۵۰ درجه سانتی‌گراد) و در محیط فاقد اکسیژن، اتفاق می‌افتد (Ragauskas et al., ۲۰۰۶).

فرایند بیوشیمیایی به دلیل گزینش پذیری و راندمان بالای تبدیل زیست توده، یک روش رایج برای تولید بیواتانول است (Achinis et al., ۲۰۱۶). روش بیوشیمیایی شامل مراحل پیش‌فرآوری، هیدرولیز آنزیمی، تخمیر و تقطیر است (Kang et al., ۲۰۱۴). طی فرایند بیوشیمیایی، زیست توده لیگنوسلولزی باید تحت پیش‌فرآوری شیمیایی یا فیزیکی قرار گیرد. علاوه بر این نیاز به آنزیم‌هایی برای هیدرولیز پلی-ساکاریدها و همچنین نیاز به مخمرهایی برای تخمیر قندها به بیواتانول وجود دارد (Achinis et al., ۲۰۱۶). در ادامه به مراحل تولید بیواتانول به روش بیوشیمیایی اشاره می‌شود.

۲۰۲۲) روش تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی ممکن است به اندازه روش تولید بیواتانول از مواد قندپایه توسعه پیدا نکرده باشد. با این حال با توجه به در دسترس بودن مواد اولیه لیگنوسلولزی، پتانسیل عظیمی برای تولید بیواتانول وجود دارد (Hassan et al., ۲۰۰۳). بنابراین سرمایه گذاری در تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی پربیسک به نظر می‌رسد. از این رو پیشنهاد شده است که به تدریج و با سرمایه گذاری‌های اندک نسبت به توسعه تولید بیواتانول از این مواد توجه شود. متخصصان پیش‌بینی کرده‌اند که در آینده‌ای نزدیک، مواد لیگنوسلولزی جایگزین مواد قندی و نشاسته‌ای خواهند شد (Goh et al., ۲۰۱۱). مواد اولیه لیگنوسلولزی هم هزینه بالای مواد قندی و نشاسته‌ای را نداشته و هم خطری برای امنیت غذایی جامعه به‌شمار نمی‌روند (Thompson et al., ۲۰۱۳). لیگنین به‌عنوان یک عامل مزاحم در فرایند تولید بیواتانول یک منبع کربن تجدیدپذیر و پایدار است که در گیاهان وجود دارد (Kim et al., ۲۰۱۰). کاه غلات (Saha et al., ۲۰۰۷)، خاکاره، شاخه‌ها (Frankó et al., ۲۰۱۵)، لیکورسیاه کارخانجات چوب‌و کاغذ (Wilkinson et al., ۲۰۱۷) و پسماندهای جامد شهری از منابع لیگنوسلولزی به‌شمار می‌روند (Prasetyo et al., ۲۰۱۱). بیواتانول حاصل از مواد اولیه لیگنوسلولزی نسبت به بیواتانول تولیدی از مواد اولیه قندی گازهای گلخانه‌ای کمتری تولید می‌کند و باعث آلودگی هوا کمتری می‌شود (Hahn et al., ۲۰۰۶). بازده اتانول تولیدی از مواد لیگنوسلولزی به مقدار سلولز و همی سلولز و لیگنین که اجزای اصلی تشکیل دهنده آن می‌باشد، بستگی دارد (Tye et al., ۲۰۱۶). البته عوامل دیگری نیز فناوری‌های کارآمدتر و انتخاب میکروارگانیسم‌های نو ترکیب نیز بازده تولید بیواتانول موثر است (Senthilkumar et al., ۲۰۰۵). در ساختار گیاه، سلولز توسط لیگنین احاطه شده است. سلولز پلیمری با زنجیره‌های بلند پلی ساکاریدی که از زیر واحدهای گلوکز تشکیل شده است که با پیوندهای بتا به یکدیگر متصل می‌شوند. شکستن ساختار سلولز بدون هیدرولیز آنزیمی به دلیل ویژگی کریستالی آن دشوار است (Ruel et al., ۲۰۱۲). همی سلولز از واحدهای قند کوتاه و شاخه‌دار مختلف تشکیل شده است. همه مونوساکاریدها در همی سلولز به پنتوزهای دی-زایلوز، ۱-آرابینوز، هگزوزهای

• پیش‌فرآوری

کمی سخت‌تر است؛ زیرا باید ساختار سفت‌وسخت لیگنین سلولز و همی‌سلولز تغییر کند تا شرایط مناسب برای فرایند هیدرولیز آنزیمی فراهم شود. روش‌های پیش‌فرآوری به- روش‌های بیولوژیکی، شیمیایی، فیزیکی و فیزیکوشیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در جدول ۱ برخی از انواع پیش-فرآوری‌ها و تاثیر آن‌ها ارائه شده است (González- Kim et al., ۲۰۱۰b; Gloria et al., ۲۰۲۲). بهترین حالت پیش‌فرآوری بر پایه حذف همی‌سلولز و لیگنین و افزایش تخلخل و کاهش بلورینگی سلولز استوار است، تا زمینه افزایش سطح تماس برای بهبود عملکرد آنزیم‌ها فراهم شود. شرایط عملیاتی فرایند پیش‌فرآوری باید ارزان، کارآمد و ساده باشد و پسماند جامدی از خود بر جای نگذارد. به‌طور کلی حدود ۳۳ درصد از هزینه فرایند تولید بیواتانول از ترکیبات لیگنوسلولزی مربوط به مرحله پیش‌فرآوری است که خود نشان‌دهنده اهمیت این مرحله در بازده تولید بیواتانول است (Mosier et al., ۲۰۰۲).

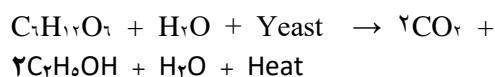
هدف اصلی پیش‌فرآوری آماده‌سازی زیست‌توده برای مراحل بعدی و بازدهی بیشتر فرایند است؛ زیرا سوبسترای لیگنوسلولزی به دلیل داشتن سه بخش اصلی سلولز، همی-سلولز و لیگنین دارای تخلخل کمی است و نسبت به هیرولیز- آنزیمی مقاومت نشان می‌دهد. این فرایند می‌تواند از طریق کاهش اندازه زیست‌توده لیگنوسلولزی برای دسترسی بهتر آنزیم‌ها به قندها اتفاق افتد (Patel et al., ۲۰۰۷). انجام باکیفیت پیش‌فرآوری، موجب افزایش بازده و افزایش دسترسی به قندهای قابل تخمیر در مراحل بعدی می‌شود (Sanchez et al., ۲۰۰۸). اگر پیش‌فرآوری روی ترکیبات لیگنوسلولزی انجام نشود، میزان بازدهی عمل هیدرولیز به کمتر از ۲۰ درصد می‌رسد. معمولاً در پسماندهای کشاورزی، کاهش اندازه فیزیکی زیست‌توده به‌عنوان مرحله‌ی پیش-فرآوری برای مواد اولیه برپایه نشاسته کافی است (Refaat, ۲۰۱۲). زیرا مواد نشاسته‌ای دسترسی مستقیم و آسان‌تری به قندها دارند؛ اما در مواد اولیه لیگنوسلولزی پیش‌فرآوری

جدول ۱- مقایسه برخی از روش‌های پیش‌فرآوری برای مواد لیگنوسلولزی (González-Gloria et al., ۲۰۲۲)

معایب	مزایا	تاثیرات	روش پیش‌فرآوری
- غلظت کم قند در جریان خروجی	- خوردگی کمتر	- هیدرولیز همی‌سلولز - هیدرولیز سلولز - تغییر ساختار لیگنین	اسیدرئیک
- فقط در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است.	- هضم بالا - حلال سبز	- کاهش بلورینگی سلولز - حذف لیگنین	مایعات یونی
- هزینه بالا و مقدار زیادی ازن مورد نیاز است	- عدم تشکیل بازدارنده - شرایط عملیاتی خفیف	- کاهش محتوای لیگنین	اوزونولیز
- تولید ترکیبات بازدارنده - تجزیه نسبی همی‌سلولز - اختلال ناقص ماتریس کربوهیدرات لیگنین	- مقرون‌به‌صرفه - بازده بالای گلوکز	- حذف لیگنین - باعث حل شدن همی - سلولز می‌شود	انفجاربخار
- هزینه بالای اکسیژن و کاتالیزور قلیایی	- تشکیل کمتر مهارکننده‌ها	- حذف لیگنین	اکسیداسیون مرطوب
- عدم تاثیر بر لیگنین و همی‌سلولز - نیاز به فشار بالا	- مقرون‌به‌صرفه - عدم تشکیل بازدارنده	- افزایش سطح قابل‌دسترسی برای آنزیم	سیال فوق بحرانی
- مدت اقامت طولانی - تشکیل نمک	- قابلیت هضم بالا - حذف بالای لیگنین	- حذف لیگنین و همی‌سلولز - افزایش سطح دسترسی آنزیم	قلیایی
- سرعت کم هیدرولیز	- مصرف انرژی کمتر	- تجزیه لیگنین - تجزیه همی‌سلولز	بیولوژیکی
- نیاز به بازیابی اسید - خوردگی تجهیزات - تولید ترکیبات بازدارنده	- بازده بالای گلوکز - کاهش هزینه - دمای عملیاتی متوسط	- تجزیه سلولز - تجزیه همی‌سلولز	اسید قوی

• هیدرولیز

تبدیل می‌کند (Boulton et al., ۲۰۱۳; Lu et al., ۲۰۰۸).
(Tomas-Pejo et al., ۲۰۲۰).



(۱)

در طی فرایند تخمیر، تقریباً ۹۵ درصد محلول به اتانول، ۱ درصد به CO_2 و ۴ درصد به محصولات جانبی نظیر گلیسرین تبدیل می‌شود (Wingren et al., ۲۰۰۳). هزینه‌های فرایند تخمیر حدود ۱۰ درصد از کل هزینه‌های فرایند تولید بیواتانول را شامل می‌شود (Zabed et al., ۲۰۱۷). قندهای هگزوز مانند گلوکز، گالاکتوز و مانوز به آسانی توسط بسیاری از میکروارگانیسم‌های طبیعی مانند *Zymomonas mobilis* و ساکارومایسس سرویزیه تخمیر می‌شوند. با این حال، میکروارگانیسم‌های طبیعی نمی‌توانند قندهای پنتوز مانند زایلوز و آرابینوز را تخمیر کنند. این امر منجر به تحقیق و توسعه گسترده میکروارگانیسم‌های جدید با ظرفیت تبدیل هگزوز و پنتوز به اتانول شده است. به همین سبب یا باید مخمرهای سنتی را توسعه داد یا از چند گونه مخمر استفاده کرد مانند مخمرهایی نظیر: *Pichia stipites* - *Pachysolen tannophilus* - *Candida shehatae* - *Kluyveromyces marxianus* (Dahnum et al., ۲۰۱۵). در تخمیر قند به بیواتانول معمولاً دو روش تخمیر و هیدرولیز جداگانه (SHF) و روش همزمان ساکاره‌سازی (SSF) و تخمیر (SSCF) مورد توجه است. در روش اول (SHF) هیدرولیز مواد لیگنوسلولزی به صورت مجزا از فرایند تخمیر صورت می‌گیرد (Canilha et al., ۲۰۱۲). در این حالت آنزیم می‌تواند در دمای بالاتر بهتر کار کند و مخمر نیز در دمای معمولی به صورت جداگانه به تخمیر قند می‌پردازد. زمان فرایند همزمان SSF و SSCF کوتاه‌تر است؛ زیرا هیدرولیز و تخمیر به صورت هم‌زمان در یک مخزن انجام می‌شود (Chandel et al., ۲۰۰۷). هم‌زمانی دو فرایند SSF و SSCF نسبت به SHF ارجحیت دارد؛ زیرا عملیات را می‌توان در یک مخزن انجام داد. همچنین بازده تولید بیو-اتانول بیشتر و زمان فرایند کوتاه‌تر است (Thatoi et al., ۲۰۱۶). تخمیر بیواتانول را می‌توان به صورت پیوسته، نیمه-پیوسته و ناپیوسته انجام داد. سیستم ناپیوسته به عنوان

در فرایند تولید بیواتانول از زیست‌توده لیگنوسلولزی مرحله هیدرولیز یک مرحله چالش برانگیز از نقطه نظر فنی و اقتصادی است که نیازمند مطالعه و پژوهش‌های بیشتری می‌باشد. فرایند هیدرولیز، زنجیره طولانی کربوهیدرات‌ها را توسط آنزیم یا اسید می‌شکند. این مرحله در تولید بیواتانول امری ضروری است؛ زیرا بر کیفیت فرایند تخمیر تأثیر می‌گذارد. فرایند هیدرولیز از این جهت ضرورت دارد که میکروارگانیسم‌ها فقط قادر به هضم قندهای ساده هستند. هیدرولیز آنزیمی به دلیل هزینه بالای آنزیم‌ها از نظر اقتصادی برای اهداف تجاری مسئله‌ای چالش برانگیز است (Ferreira et al., ۲۰۰۹). با این حال اگر با هیدرولیز اسیدی مقایسه شود، به تجهیزات آسیب کمتری وارد می‌شود. علاوه بر این برای فرایند هیدرولیز اسیدی نیاز به سیستم دفع اسید است که خود مستلزم هزینه اضافی است. مشکل عمده دیگر هیدرولیز اسیدی، توانایی اسیدها در تجزیه تدریجی مونومرهای قند در دمای بالا است (Ndubuisi et al., ۲۰۲۳). مرحله هیدرولیز و به کارگیری آنزیم می‌تواند بهره‌وری تولید اتانول را به شدت بهبود بخشد. کارایی هیدرولیز آنزیمی به عوامل متعددی همچون نوع سوبسترا، غلظت سوبسترا، نوع پیش‌فراوری، درصد لیگنین و همی سلولز، تخلخل زیست‌توده، دما و pH بستگی دارد (Hamelinck et al., ۲۰۰۵).

• تخمیر

تخمیر یکی از فرایندهای حیاتی در تولید بیواتانول است که در آن اتانول مستقیماً از فعالیت متابولیکی مخمر تولید می‌شود. به عنوان نمونه، *Zymomonas mobilis* نوعی مخمر است که گلوکز را به عنوان «غذا» مصرف و اتانول را به عنوان محصول دفع می‌کند (Duque et al., ۲۰۲۱). چندین گونه مخمر برای تبدیل قندها به بیواتانول مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما در مقیاس صنعتی، مخمر ساکارومایسس سرویزیه رایج‌ترین میکروارگانیسم مورد استفاده برای تولید بیواتانول است (Ochoa-Chacón et al., ۲۰۲۱). ساکارومایسس سرویزیه قادر به تبدیل انواع هگزوزها به اتانول با بازده تبدیل بالا است. در فرایند تخمیر متداول، مخمر، گلوکز را براساس واکنش ۱ به بیواتانول

است. مخمر ساکارومایسس سرویزیه دارای دمای بهینه نزدیک به ۳۰ درجه سانتی‌گراد هستند (Phisalaphong *et al.*, ۲۰۰۶). علاوه بر این، آنزیم‌هایی که فعالیت میکروبی و فرآیند تخمیر را تنظیم می‌کنند، به دمای بالا حساس هستند که این دمای بالا می‌تواند موجب از بین بردن ساختار آن‌ها شود (Awg-Adeni *et al.*, ۲۰۱۳). بنابراین دما یک فاکتور کلیدی در فرآیند تخمیر است و باید به دقت کنترل شود.

افزایش غلظت قند تا یک حد معین باعث افزایش سرعت تخمیر می‌شود. با این حال، افزایش بیش از حد غلظت قند باعث ثابت شدن سرعت تخمیر می‌شود؛ این امر زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت قند مصرفی فراتر از ظرفیت جذب مخمرها است که سبب کاهش بهره‌وری تولید بیواتانول می‌شود (Azhar *et al.*, ۲۰۱۷). به طور کلی، حداکثر سرعت تولید بیواتانول در غلظت قند ۱۵۰ گرم در لیتر حاصل می‌شود؛ بنابراین غلظت اولیه قند نیز یک فاکتور مهم و کلیدی در تولید بیواتانول به شمار می‌آید و بایستی مقدار آن کنترل شود تا حداکثر بهره‌وری در طول فرآیند به دست آید (Shuai *et al.*, ۲۰۱۰).

تولید اتانول تحت تأثیر مستقیم pH مخلوط است؛ زیرا بر آلودگی باکتریایی، رشد مخمر، سرعت تخمیر و بازدهی نهایی تولید بیواتانول مؤثر است. علت این همه تأثیرگذاری، می‌تواند به نفوذپذیری برخی از مواد مغذی ضروری مورد نیاز برای مخمرها، به غلظت H^+ دانست (Lin *et al.*, ۲۰۱۲). علاوه بر این رشد و بقای مخمرها باید در محدوده pH ۲/۷۵ الی ۴/۲۵ باشد. در فرآیند تخمیر با مخمر ساکارومایسس سرویزیه محدود pH بهینه در حدود ۵-۴ است (Staniszewski *et al.*, ۲۰۰۹). هنگامی که pH کمتر از ۴ باشد، دوره انکوباسیون طولانی‌تری مورد نیاز است؛ اما غلظت بیواتانول به طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد. با این حال هنگامی که pH بالاتر از ۵ باشد غلظت بیواتانول تولیدی کاهش محسوسی خواهد یافت (El-Mekawi *et al.*, ۲۰۱۹).

زمان تخمیر بر روی رشد مخمرها مؤثر است. اگر زمان فرآیند تخمیر کوتاه باشد به دلیل رشد ناکافی مخمرها باعث ناکارآمدی فرآیند می‌شود. از طرفی دیگر زمان تخمیر طولانی موجب تأثیرات سمی بر روی رشد مخمر خصوصاً در فرآیند ناپیوسته می‌شود (Chan *et al.*, ۲۰۱۹). تخمیر کامل را می‌توان در دمای پایین‌تر با استفاده از زمان تخمیر بهینه

سیستم آسان و انعطاف‌پذیر با شرایط کنترلی راحت تلقی می‌شود. با این حال این سیستم بیشتر در کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی کاربرد دارد و در مقیاس صنعتی بهره‌وری پایینی دارد (Asif *et al.*, ۲۰۱۹). حالت نیمه-پیوسته حالتی میانی است. حجم کشت در فرایندهای نیمه-پیوسته به طور گسترده‌ای می‌تواند متفاوت باشد؛ اما بایستی به درستی و سرعت معینی مواد اولیه و مخمر با همدیگر مخلوط شوند. برای بهره‌وری بیشتر فرآیند نیمه پیوسته می‌توان غلظت کم سوپسترا را حفظ کرد تا امکان تبدیل قندهای قابل تخمیر به بیواتانول، افزایش یابد (Cheng *et al.*, ۲۰۰۹). این مسیر دارای بهره‌وری بالاتر، اکسیژن محلول بیشتر در محیط، زمان تخمیر کوتاه‌تر و اثرات جانبی کمتری برای محیط ایجاد می‌کند (Lee *et al.*, ۲۰۱۷). با این حال میزان بهره‌وری بیواتانول در حالت نیمه پیوسته وابسته به دبی خوراک و غلظت مخمر است (Ivanova *et al.*, ۲۰۱۱). عملیات پیوسته با افزودن مداوم بسترها، محیط کشت و مواد مغذی به بیوراکتور حاوی میکروارگانیسم‌های فعال انجام می‌شود. مخمرها به طور مداوم باید از محیط کشت به بیوراکتور وارد و از جریان خروجی بیوراکتور پس گرفته و به بیوراکتور مجدداً تزریق شوند (Khandaker *et al.*, ۲۰۱۸). از مزایای سیستم پیوسته نسبت به سیستم ناپیوسته و نیمه پیوسته می‌توان به بهره‌وری بالاتر، حجم کمتر بیوراکتور و هزینه‌های سرمایه-گذاری و عملیاتی کمتر اشاره کرد (Mahboubi *et al.*, ۲۰۱۷). دلیل سرعت بالای فرآیند، بهره‌وری تولید اتانول افزایش می‌یابد ولی به دلیل مصرف ناقص قند توسط مخمرها، راندمان تولید بیواتانول نسبت به دو روش قبلی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، توانایی مخمر برای تولید بیو-اتانول در فرآیند مداوم به دلیل زمان طولانی کشت، کاهش می‌یابد (Cot *et al.*, ۲۰۰۷).

• پارامترهای مؤثر در فرآیند تخمیر

از عوامل متعدد تأثیرگذار بر تولید بیواتانول می‌توان به دما، غلظت قند، pH، زمان تخمیر، سرعت همزن و میزان تلقیح اشاره کرد (Zabed *et al.*, ۲۰۱۴). سرعت رشد مخمرها مستقیماً تحت تأثیر دما است. دمای بالا یک عامل نامطلوب برای رشد مخمرها می‌باشد (Liu *et al.*, ۲۰۰۸). دمای ایده آل مطلوب برای تخمیر در بازه ۲۰ الی ۳۵ درجه سانتی‌گراد

زمان تخمیر را کاهش می‌دهد؛ زیرا سلول‌ها به سرعت رشد می‌کنند و مستقیماً قندها را به بیواتانول تبدیل می‌کنند (Zhang *et al.*, ۲۰۱۱). عوامل مؤثر در تخمیر در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲، فرایند تخمیر اکثراً به کمک مخمر ساکارومایسس سرویزیه انجام می‌شود همچنین تخمیر با استفاده از *Kluyveromyces marxianus* در دمای ۴۲ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد؛ بنابراین دمای ایده‌آل برای تولید بیواتانول بستگی به دمای ایده‌آل جهت فعالیت مخمر دارد. همچنین فرایند تخمیر معمولاً در ۲۴ و ۷۲ ساعت و در دور همزن ۱۲۰ الی ۱۵۰ دور در دقیقه انجام می‌شود. در پژوهش صورت گرفته توسط ژانگ^۱ و همکاران تلقیح مناسب جهت تولید بیواتانول، ۵ الی ۱۰ درصد است (Yan *et al.*, ۲۰۱۵). کمترین غلظت بیو-اتانول ۹/۵ گرم در لیتر مربوط به سنبل‌آبی است. غلظت پایین قند سنبل‌آبی عامل محدود شدن تولید بیواتانول می‌باشد (Choi *et al.*, ۲۰۱۰).

به دست آورد و به بیشترین بازدهی اتانول رسید (Wang *et al.*, ۲۰۱۲). سرعت همزدن در نفوذپذیری مواد مغذی موجود در محلول به سطح مخمر و آزادسازی بیواتانول از سطح مخمر به محیط مؤثر است. هرچه سرعت همزدن بیشتر باشد مقدار بیواتانول تولید شده بیشتر می‌شود. علاوه بر این مصرف قند نیز بیشتر می‌شود (Derman *et al.*, ۲۰۲۲). سرعت همزدن به طور متداول بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ دور بر دقیقه است. با این حال سرعت همزدن اگر بیش از حد باشد موجب محدودیت فعالیت‌های متابولیکی مخمر می‌شود (Sriputom *et al.*, ۲۰۲۰). غلظت تلقیح اثر قابل توجهی بر غلظت نهایی اتانول ندارد؛ اما بر میزان مصرف قند و بهره‌وری بیواتانول تأثیرگذار است (Rolz *et al.*, ۲۰۱۹). در تحقیقی، تولید بیواتانول با افزایش تعداد سلول‌ها از ۱۰۴ به ۱۰۷ سلول در هر میلی‌لیتر، افزایش یافت؛ اما تولید بیواتانول قابل توجهی بین ۱۰۷ و ۱۰۸ سلول در هر میلی‌لیتر مشاهده نشد. به عبارتی، افزایش غلظت مخمر در محدوده خاصی

جدول ۲- مقایسه انواع مخمر و ماده اولیه و عوامل مؤثر در فرایند تخمیر (Kim *et al.*, ۲۰۱۰a)

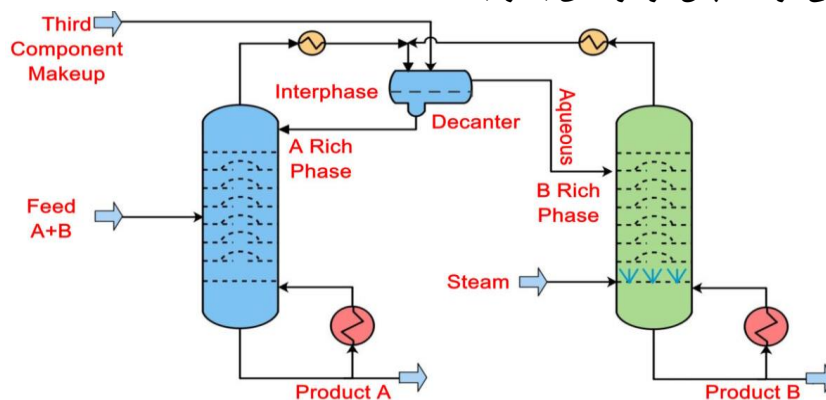
Yeast	Feedstock	T(C)	pH	Sugar concentration (g/L)	rpm	Inoculum size %	Ethanol concentration (g/L)	Ref
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> CHY۱۰۱۱	Cassava starch	۳۲	۴.۵	۵۸۵	۱۲۰	۵	۸۹.۱	(Choi <i>et al.</i> , ۲۰۱۰)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ZU-۱۰	Corn stover	۳۰	۵.۵	۹۹	۱۲۰	۵	۴۱.۲	Derman <i>et al.</i> , ۲۰۲۲
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> K۳۰	Instant noodle waste	۳۰	-	۸۴	۲۵۰	۵	۴۱.۳	Sriputom <i>et al.</i> , ۲۰۲۰
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Wood	۳۰	۵.۵	۳۷.۴۷	۱۵۰	۱۰	۱۸.۵۲	Rolz <i>et al.</i> , (۲۰۱۹)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ATCC ۲۴۴۸۵۸	Reed	۳۸	۵	۱۲۳	۱۵۰	۱۰	۵۵	Zhang <i>et al.</i> , (۲۰۱۱)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Sweet potato	۳۰	۵.۳	۲۴۰	۱۵۰	۷	۱۲۸.۵	El-Mekkawi <i>et al.</i> , ۲۰۱۹
<i>Kluyveromyces marxianus</i> K۲۱۳	Water hyacinth	۴۲	۴.۸	۲۳.۳	-	۵	۷.۳۴	Chan <i>et al.</i> , (۲۰۱۹)
<i>Kluyveromyces marxianus</i> CECT ۱۰۸۷۵	Wheat straw	۴۲	۵.۵	-	۱۵۰	-	۳۶.۲	Yan <i>et al.</i> , (۲۰۱۵)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> GIM-۲	Paper sludge	۳۳	-	۲۷.۸	۶۰	۶	۹.۵	Choi <i>et al.</i> , (۲۰۱۰)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> CHFY۰۳۲۱	Cassava mash	۳۳	-	۱۸۳.۵	۱۰۰	۵	۸۶.۱	Baeyens <i>et al.</i> , ۲۰۱۵

^۱ Zhang

• تقطیر
محصول اتانول حاصل از فرایند تخمیر باید تقطیر شود تا محتوای آب آن از بین برود و اتانول بی‌آب به دست آید (Kiss, ۲۰۱۴). به‌طور کلی حذف محتوای آب وقتی فراریت نسبی بین اجزای مخلوط وجود داشته باشد با عمل تقطیر امکان‌پذیر است. اتانول بی‌آب به‌طور گسترده برای صنایع دارویی، آرایشی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از پتانسیل آن به‌عنوان سوخت نیز استفاده می‌شود. چند تکنیک تقطیر برای آبیگری از اتانول وجود دارد که عبارت‌اند از: تقطیر جذبی، تقطیر آزنوتروپیک، آبیگری-شیمیایی، تقطیر نفوذی، تقطیر استخراجی، تقطیر اتمسفریک و تقطیر خلا (Wang et al., ۲۰۱۵).

• تقطیر آزنوتروپیک
این نوع تقطیر می‌تواند توسط اضافه کردن یک ماده شیمیایی سوم صورت پذیرد (Shilton et al., ۲۰۱۰). افزودن این ماده سوم می‌تواند نوسانات نسبی را اصلاح کند و از طریق تخلیه، تقطیر یا سایر روش‌های مناسب، بازیابی جهت استفاده مجدد انجام شود. مخلوط به ستون تقطیر-آزنوتروپیک ریخته می‌شود و ماده سوم از بالا وارد می‌شود؛ در حالی که از پایین ستون اتانول بی‌آب جمع‌آوری می‌شود. با وجود ماهیت بنزن که خاصیت سرطان‌زایی دارد، پرکاربردترین ماده مورد استفاده در این نوع تقطیر، مواد بنزن‌دار هستند (Singh et al., ۲۰۱۱a). این روش هم از نقطه‌نظر هزینه و هم از منظر زیست‌محیطی نگرانی‌هایی را بدنبال دارد (Aresta et al., ۲۰۰۵). شکل ۴ شماتیکی از این فرایند را نشان می‌دهد.

• تقطیر جذبی
اساس کار تقطیر جذبی تفاوت در اندازه‌های مولکولی مخلوط اتانول و آب است (Soares et al., ۲۰۱۵). مولکول‌های اتانول با قطر 4 \AA از مولکول‌های آب توسط غشاهای با قطر 3 \AA جدا می‌شوند. لازم به‌ذکر است که مولکول‌های آب دارای قطر $2/5 \text{ \AA}$ هستند. در فرایند تقطیر جذبی، حداقل دو بستر از غربال مولکولی مورد نیاز است (Korikov et al., ۲۰۰۶). یکی از بسترها در وضعیت آماده‌باش قرار دارد. بخار آب و اتانول وارد بستر اول می‌شوند. سپس مولکول‌های بخار آب



شکل ۴- شماتیک تقطیر آزنوتروپیک (Menetrez, ۲۰۱۲)

• آبیگری شیمیایی
آبیگری از طریق مواد شیمیایی یکی از متداول‌ترین روش‌ها در فرایند تولید بیواتانول می‌باشد (Singh et al., ۲۰۱۱b). مواد جاذب الرطوبه به مخلوط اتانول - آب اضافه می‌شوند و این مواد مولکول‌های آب موجود در مخلوط را جذب می‌کنند. برای آبیگری در مقیاس آزمایشگاهی، ابتدا اکسید کلسیم یا

آهک را به محلول اضافه می‌کنند تا با تشکیل هیدروکسید-کلسیم نامحلول اتانول خالص حاصل شود. معمولاً برای هر لیتر آب باید حداقل $4/2$ کیلوگرم آهک در نظر گرفته شود. با انجام فیلتراسیون، اتانول خالص تولید می‌شود. به‌کمک روش آبیگری، می‌توان اتانول با خلوص بالای ۹۷ درصد تولید کرد (Li et al., ۲۰۱۴).

در صنایع شیمیایی و دارویی، تقطیر استخراجی روشی رایج برای تولید یک جزء با خلوص بالا از مخلوط با افزودن یک حلال غیر فرار است (Sirajunnisa *et al.*, ۲۰۱۶). با افزودن حلال به مخلوط، حلال اقدام به انحلال جزء غیر فرار می‌کند. در نتیجه جزء سبک در بالا و جزء سنگین در پایین ظرف قرار می‌گیرد. با جداسازی دو فاز، در ستون اول جزء سبک با خلوص بالا جدا می‌شود. در ستون دوم فرایند تقطیر سبب جداسازی حلال و جزء سنگین می‌شود (Harun *et al.*, ۲۰۱۱). به طور کلی، حلال مورد استفاده باید دارای چندین ویژگی مهم، از جمله قابلیت بازیافت آسان، دارای خاصیت غیر خورندگی و غیر سمی بودن، دارای نقطه جوش بالاتر از مخلوط و دارای پایداری حرارتی بالا باشد (Nahak *et al.*, ۲۰۱۱).

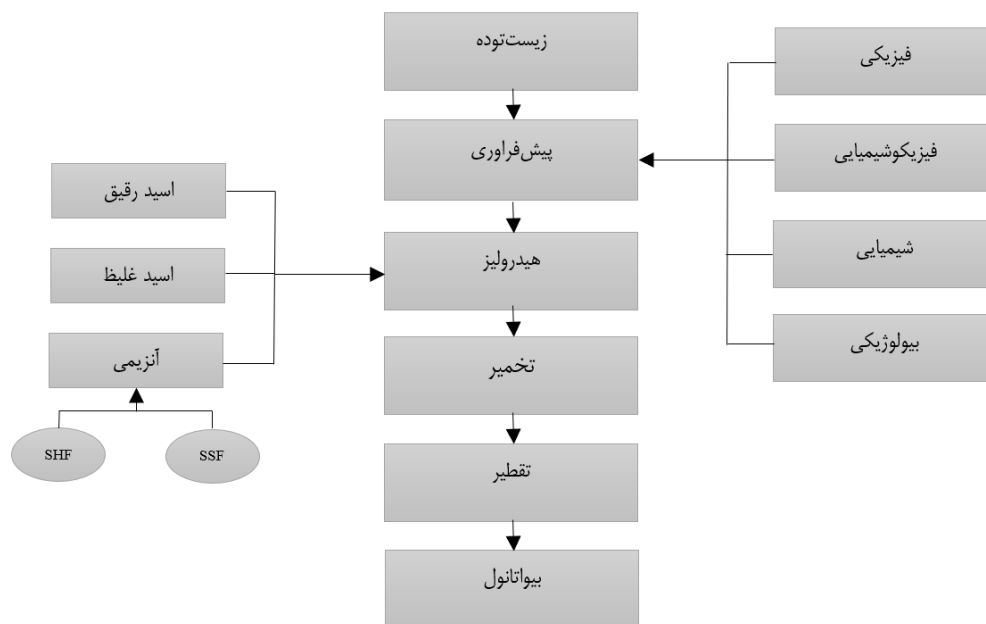
• تقطیر اتمسفریک

این روش تقطیر در ابتدا توسط فولارتون و شلوندنر مورد مطالعه قرار گرفت (Surendhiran *et al.*, ۲۰۱۵). مخلوط قبل از دمای جوش آب تبخیر و بر اساس فراریت اجزا جداسازی می‌شود. با این روش که معمولاً در صنعت متداول-تر است می‌توان الکل با درجه حداکثر ۹۶ تولید کرد (Wang *et al.*, ۲۰۱۴).

• تقطیر خلا

در این روش با کاهش فشار ستون تقطیر توسط اژکتور، شکستن نقطه آزنوتروپ اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان فرایند تقطیر را با خلوص به مراتب بالاتر از تقطیر اتمسفریک توسعه داد. از این روش می‌توان تا خلوص بالای ۹۹ درصد هم الکل تهیه کرد. این روش هم جزو روش‌های صنعتی محسوب می‌شود (Zeitsch, ۲۰۰۰).

• تقطیر استخراجی



شکل ۱۰- فرایند تولید بیواتانول از زیست توده لیگنوسلولزی (Deenanath *et al.*, ۲۰۱۲)

پایه قندی می‌باشد. معمولاً مواد قندی با مخمر ساکاروماسیسی سروزیه تخمیر و بیواتانول تولید می‌کند. مواد بر پایه نشاسته، نظیر گندم و ذرت ابتدا باید هیدرولیز-آنزیمی شوند و سپس به کمک فرایند تخمیر، بیواتانول حاصل شود. پسماندهای کشاورزی مانند کاه غلات، خاکاره و لیکورسیاه به عنوان مواد اولیه لیگنوسلولزی به شمار می‌روند. از مواد اولیه لیگنوسلولزی، ابتدا لیگنین زدایی می‌شود. سپس

۴- نتیجه گیری

بیواتانول به عنوان یک منبع قابل اتکا برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی و به عنوان سوختی سبز می‌تواند مطرح باشد. بیواتانول را از محصولات و پسماندهای کشاورزی گوناگونی نظیر غلات، ملاس، میوه، مواد لیگنوسلولزی، جلبک‌ها می‌توان تولید کرد. ملاس که قند غیر متبلور عصاره نیشکر و چغندر قند است به عنوان یکی از مهمترین مواد اولیه

به مواد پایه‌قندی و نشاسته‌ای به‌دنبال دارد. بنابراین توسعه استفاده از پسماندهای جامد کشاورزی و موادیگنوسولوزی برای تولید بیواتانول، علاوه بر کاهش حجم ضایعات و مدیریت آن‌ها، سبب ایجاد ارزش‌افزوده هم می‌شود؛ لذا لازم است تا تحقیقات گسترده‌ای جهت تجاری‌سازی فرایند انجام شود.

فرایند هیدرولیز آنزیمی اتفاق می‌افتد و در نهایت به کمک تخمیر، بیواتانول حاصل می‌شود. روش‌های تولید بیواتانول عمدتاً منشأ گیاهی و غذایی دارند که همین امر سبب ایجاد چالش‌هایی جدی جهت تولید بیواتانول شده است؛ از این رو تولید بیواتانول از مواد لیگنوسولوزی، توجه محققان را به خود جلب کرده است. با این حال فرایند تولید بیواتانول از مواد لیگنوسولوزی پیچیده‌تر است و مشکلات بیشتری را نسبت منابع

- Achinas, S., & Euverink, G. J. W. ۲۰۱۶. Consolidated briefing of biochemical ethanol production from lignocellulosic biomass. *Electronic Journal of Biotechnology*, ۲۳, ۴۴-۵۳.
- Araújo, T. M., et al. ۲۰۱۸. Cachaça yeast strains: alternative starters to produce beer and bioethanol. *Antonie van Leeuwenhoek*, ۱۱۱(۱۰), ۱۷۴۹-۱۷۶۶.
- Aresta, M., et al. ۲۰۰۵. Utilization of macro-algae for enhanced CO₂ fixation and biofuels production: Development of a computing software for an LCA study. *Fuel processing technology*, ۸۶(۱۴-۱۵), ۱۶۷۹-۱۶۹۳.
- Asif, M. B., et al. ۲۰۱۹. Applications of membrane bioreactors in biotechnology processes. In *Current trends and future developments on (bio-) membranes* (pp. ۲۲۳-۲۵۷). Elsevier.
- Awg-Adeni, D. S., et al. ۲۰۱۳. Recovery of glucose from residual starch of sago hampas for bioethanol production. *BioMed Research International*, ۲۰۱۳.
- Azhar, S. H. M., et al. ۲۰۱۷. Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and biophysics reports*, ۱۰, ۵۲-۶۱.
- Baeyens, J., et al. ۲۰۱۵. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. *Progress in Energy and Combustion Science*, ۴۷, ۶۰-۸۸.
- Balat, M., et al. ۲۰۰۸. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, ۳۴(۵), ۵۵۱-۵۷۳.
- Boerjan, W., et al. ۲۰۰۳. Lignin biosynthesis. *Annual review of plant biology*, ۵۴(۱), ۵۱۹-۵۴۶.
- Broda, M., et al. ۲۰۲۲. Bioethanol production from lignocellulosic biomass—challenges and solutions. *Molecules*, ۲۷(۲۴), ۸۷۱۷.
- Canilha, L., et al. ۲۰۱۲. Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation. *BioMed Research International*, ۲۰۱۲.
- Cardona, C. A., & Sánchez, Ó. J. ۲۰۰۷. Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource technology*, ۹۸(۱۲), ۲۴۱۵-۲۴۵۷.
- Chan, M. Z. A., et al. ۲۰۱۹. Survival of probiotic strain *Lactobacillus paracasei* L^{۲۶} during co-fermentation with *S. cerevisiae* for the development of a novel beer beverage. *Food microbiology*, ۸۲, ۵۴۱-۵۵۰.
- Chandel, A. K., et al. ۲۰۰۷. Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnol Mol Biol Rev*, ۲(۱), ۱۴-۳۲.
- Cheng, N. G., et al. ۲۰۰۹. Production of ethanol by fed-batch fermentation. *Pertanika J Sci Technol*, ۱۷(۲), ۳۹۹-۴۰۸.
- Choi, G.-W., et al. ۲۰۱۰. Isolation and characterization of two soil derived yeasts for bioethanol production on Cassava starch. *Biomass and bioenergy*, ۳۴(۸), ۱۲۲۳-۱۲۳۱.
- Cot, M., et al. ۲۰۰۷. Physiological behaviour of *Saccharomyces cerevisiae* in aerated fed-batch fermentation for high level production of bioethanol. *FEMS yeast research*, ۷(۱), ۲۲-۳۲.
- Dahnum, D., et al. ۲۰۱۵. Comparison of SHF and SSF processes using enzyme and dry yeast for optimization of bioethanol production from empty fruit bunch. *Energy Procedia*, ۶۸, ۱۰۷-۱۱۶.
- Deenanath, E. D., et al. ۲۰۱۲. The bioethanol industry in Sub-Saharan Africa: history, challenges, and prospects. *BioMed Research International*, ۲۰۱۲.

- Derman, E., et al. ۲۰۲۲. Simultaneous saccharification and fermentation of empty fruit bunches of palm for bioethanol production using a microbial consortium of *S. cerevisiae* and *T. harzianum*. *Fermentation*, ۸(۷), ۲۹۵.
- Devi, A., et al. ۲۰۲۲. Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: a circular bioeconomy approach. *Bioenergy Research*, ۱۵(۴), ۱۸۲۰-۱۸۴۱.
- Duque, A., et al. ۲۰۲۱. Advanced bioethanol production: From novel raw materials to integrated biorefineries. *Processes*, ۹(۲), ۲۰۶.
- El-Mekkawi, S. A., et al. ۲۰۱۹. Optimization of some fermentation conditions for bioethanol production from microalgae using response surface method. *Bulletin of the National Research Centre*, ۴۳, ۱-۸.
- Fedacko, J., et al. ۲۰۱۷. Air pollution and the global heart health: A view point of the International College of Cardiology. *World Heart Journal*, ۹(۴), ۲۶۹-۲۷۲.
- Ferreira, S., et al. ۲۰۰۹. Response surface optimization of enzymatic hydrolysis of *Cistus ladanifer* and *Cytisus striatus* for bioethanol production. *Biochemical Engineering Journal*, ۴۵(۳), ۱۹۲-۲۰۰.
- Foust, T. D., et al. ۲۰۰۹. An economic and environmental comparison of a biochemical and a thermochemical lignocellulosic ethanol conversion processes. *Cellulose*, ۱۶, ۵۴۷-۵۶۵.
- Frankó, B., et al. ۲۰۱۵. Influence of bark on fuel ethanol production from steam-pretreated spruce. *Biotechnology for Biofuels*, ۸, ۱-۱۱.
- Goh, C. S., & Lee, K. T. ۲۰۱۱. Second-generation biofuel (SGB) in Southeast Asia via lignocellulosic biorefinery: Penny-foolish but pound-wise. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۱۵(۶), ۲۷۱۴-۲۷۱۸.
- González-Gloria, K., et al. ۲۰۲۲. Bubble column bioreactor design and evaluation for bioethanol production using simultaneous saccharification and fermentation strategy from hydrothermally pretreated lignocellulosic biomass. *Biochemical Engineering Journal*, ۱۸۷, ۱۰۸۶-۱۰۹۵.
- Hahn-Hägerdal, B., et al. ۲۰۰۶. Bio-ethanol—the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in biotechnology*, ۲۴(۱۲), ۵۴۹-۵۵۶.
- Hamelinck, C. N., et al. ۲۰۰۵. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term. *Biomass and bioenergy*, ۲۸(۴), ۳۸۴-۴۱۰.
- Harun, R., et al. ۲۰۱۱. Exploring alkaline pre-treatment of microalgal biomass for bioethanol production. *Applied Energy*, ۸۸(۱۰), ۳۴۶۴-۳۴۶۷.
- Hassan, M., & Shirai, Y. ۲۰۰۳. Palm biomass utilization in Malaysia for the production of bioplastic. *Biomass-Asia-workshop*. Available at www.biomassasiaworkshop.jp/presentation_files/۲۱_Alihassan.pdf,
- Ivanova, V., et al. ۲۰۱۱. Application in the ethanol fermentation of immobilized yeast cells in matrix of alginate/magnetic nanoparticles, on chitosan-magnetite microparticles and cellulose-coated magnetic nanoparticles. *arXiv preprint arXiv:۱۱۰۵.۰۶۱۹*.
- Kang, Q., et al. ۲۰۱۴. Bioethanol from lignocellulosic biomass: current findings determine research priorities. *The Scientific World Journal*, ۲۰۱۴.
- Khandaker, M. M., et al. ۲۰۱۸. Bio-ethanol production from fruit and vegetable waste by using *saccharomyces cerevisiae*. *Bioethanol Technologies*, ۳۷-۵۳.
- Kim, J.-H., et al. ۲۰۱۰a. Simultaneous consumption of pentose and hexose sugars: an optimal microbial phenotype for efficient fermentation of lignocellulosic biomass. *Applied microbiology and biotechnology*, ۸۸(۵), ۱۰۷۷-۱۰۸۵.
- Kim, J.-H., et al. ۲۰۱۰b. Simultaneous consumption of pentose and hexose sugars: an optimal microbial phenotype for efficient fermentation of lignocellulosic biomass. *Applied microbiology and biotechnology*, ۸۸, ۱۰۷۷-۱۰۸۵.
- Kiss, A. A. ۲۰۱۴. Distillation technology—still young and full of breakthrough opportunities. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, ۸۹(۴), ۴۷۹-۴۹۸.
- Korikov, A., et al. ۲۰۰۶. Interfacially polymerized hydrophilic microporous thin film composite membranes on porous polypropylene hollow fibers and flat films. *Journal of membrane science*, ۲۷۹(۱-۲), ۵۸۸-۶۰۰.

- Kumar, D., & Singh, V. ۲۰۱۶. Dry-grind processing using amylase corn and superior yeast to reduce the exogenous enzyme requirements in bioethanol production. *Biotechnology for Biofuels*, ۹(۱), ۱-۱۲.
- Kusch-Brandt, S. ۲۰۱۹. Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21's "Renewables ۲۰۱۹ Global Status Report". In: MDPI.
- Lee, S., et al. ۲۰۱۷. Semi-continuous fermentation of onion vinegar and its functional properties. *Molecules*, ۲۲(۸), ۱۳۱۳.
- Li, K., et al. ۲۰۱۴. An overview of algae bioethanol production. *International Journal of Energy Research*, ۳۸(۸), ۹۶۵-۹۷۷.
- Lin, Y., et al. ۲۰۱۲. Factors affecting ethanol fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* BY۴۷۴۲. *Biomass and bioenergy*, ۴۷, ۳۹۵-۴۰۱.
- Liu, R., & Shen, F. ۲۰۰۸. Impacts of main factors on bioethanol fermentation from stalk juice of sweet sorghum by immobilized *Saccharomyces cerevisiae* (CICC ۱۳۰۸). *Bioresource technology*, ۹۹(۴), ۸۴۷-۸۵۴.
- Mahboubi, A., et al. ۲۰۱۷. Continuous bioethanol fermentation from wheat straw hydrolysate with high suspended solid content using an immersed flat sheet membrane bioreactor. *Bioresource technology*, ۲۴۱, ۲۹۶-۳۰۸.
- Mekonnen, M. M., et al. ۲۰۱۸. Water, energy, and carbon footprints of bioethanol from the US and Brazil. *Environmental science & technology*, ۵۲(۲۴), ۱۴۵۰۸-۱۴۵۱۸.
- Menetrez, M. Y. ۲۰۱۲. An overview of algae biofuel production and potential environmental impact. *Environmental science & technology*, ۴۶(۱۳), ۷۰۷۳-۷۰۸۵.
- Minter, S. D. ۲۰۱۶. Alcoholic fuels: An overview. *Alcoholic Fuels*, ۱-۴.
- Mohanty, S. K., & Swain, M. R. ۲۰۱۹. Bioethanol production from corn and wheat: food, fuel, and future. In *Bioethanol production from food crops* (pp. ۴۵-۵۹). Elsevier.
- Mosier, N. S., et al. ۲۰۰۲. Characterization of acid catalytic domains for cellulose hydrolysis and glucose degradation. *Biotechnology and bioengineering*, ۷۹(۶), ۶۱۰-۶۱۸.
- Nahak, S., et al. ۲۰۱۱. Bioethanol from marine algae: a solution to global warming problem. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, ۱(۴), ۷۴-۸۰.
- Ndubuisi, I. A., et al. ۲۰۲۳. Non-conventional yeast strains: Unexploited resources for effective commercialization of second generation bioethanol. *Biotechnology Advances*, ۱۰۸۱۰۰.
- Ochoa-Chacón, A., et al. ۲۰۲۱. Xylose metabolism in bioethanol production: *Saccharomyces cerevisiae* vs non-*Saccharomyces* yeasts. *Bioenergy Research*, ۱-۱۹.
- Panahi, H. K. S., et al. ۲۰۲۰. Conversion of residues from agro-food industry into bioethanol in Iran: An under-valued biofuel additive to phase out MTBE in gasoline. *Renewable Energy*, ۱۴۵, ۶۹۹-۷۱۰.
- Patel, S. J., et al. ۲۰۰۷. Fungal pretreatment studies on rice husk and bagasse for ethanol production. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, ۶(۴), ۱۹۲۱-۱۹۲۶.
- Paykani, A., et al. ۲۰۲۲. Synthesis gas as a fuel for internal combustion engines in transportation. *Progress in Energy and Combustion Science*, ۹۰, ۱۰۰۹۹۵.
- Phisalaphong, M., et al. ۲۰۰۶. Mathematical modeling to investigate temperature effect on kinetic parameters of ethanol fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, ۲۸(۱), ۳۶-۴۳.
- Prasetyo, J., et al. ۲۰۱۱. Bioconversion of paper sludge to biofuel by simultaneous saccharification and fermentation using a cellulase of paper sludge origin and thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* TJJ۴. *Biotechnology for Biofuels*, ۴(۱), ۱-۱۳.
- Ragauskas, A. J., et al. ۲۰۰۶. The path forward for biofuels and biomaterials. *science*, ۳۱۱(۵۷۶۰), ۴۸۴-۴۸۹.
- Refaat, A. ۲۰۱۲. Biofuels from waste materials. *Comprehensive renewable energy*, ۵, ۲۱۷-۲۶۱.
- Rolz, C., et al. ۲۰۱۹. Co-production of ethanol and biodiesel from sweet sorghum juice in two consecutive fermentation steps. *Electronic Journal of Biotechnology*, ۴۱, ۱۳-۲۱.
- Ruel, K., et al. ۲۰۱۲. Crystalline and amorphous cellulose in the secondary walls of *Arabidopsis*. *Plant Science*, ۱۹۳, ۴۸-۶۱.

- Sadik, M. W., & Halema, A. A. ۲۰۱۴. Production of ethanol from molasses and whey permeate using yeasts and bacterial strains. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, ۳(۳), ۸۰۴-۸۱۸.
- Saha, B. C., & Cotta, M. A. ۲۰۰۷. Enzymatic saccharification and fermentation of alkaline peroxide pretreated rice hulls to ethanol. *Enzyme and Microbial Technology*, ۴۱(۴), ۵۲۸-۵۳۲.
- Sanchez, O. J., & Cardona, C. A. ۲۰۰۸. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource technology*, ۹۹(۱۳), ۵۲۷۰-۵۲۹۵.
- Saygin, D., et al. ۲۰۱۵. The implications for renewable energy innovation of doubling the share of renewables in the global energy mix between ۲۰۱۰ and ۲۰۳۰. *Energies*, ۸(۶), ۵۸۲۸-۵۸۶۵.
- Schmitz, A., et al. ۲۰۲۰. The economic effects of COVID-۱۹ on the producers of ethanol, corn, gasoline, and oil. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, ۱۸(۲).
- Senthilkumar, V., & Gunasekaran, P. ۲۰۰۵. Bioethanol production from cellulosic substrates: Engineered bacteria and process integration challenges.
- Shilton, A., & Guieysse, B. ۲۰۱۰. Sustainable sunlight to biogas is via marginal organics. *Current opinion in biotechnology*, ۲۱(۳), ۲۸۷-۲۹۱.
- Shuai, L., et al. ۲۰۱۰. Comparative study of SPORL and dilute-acid pretreatments of spruce for cellulosic ethanol production. *Bioresource technology*, ۱۰۱(۹), ۳۱۰۶-۳۱۱۴.
- Silva, J., et al. ۲۰۱۷. Integrated furfural and first generation bioethanol production: process simulation and techno-economic analysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, ۳۴, ۶۲۳-۶۳۴.
- Singh, A., et al. ۲۰۱۱a. Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. *Bioresource technology*, ۱۰۲(۱), ۲۶-۳۴.
- Singh, A., et al. ۲۰۱۱b. Renewable fuels from algae: an answer to debatable land based fuels. *Bioresource technology*, ۱۰۲(۱), ۱۰-۱۶.
- Sirajunnisa, A. R., & Surendhiran, D. ۲۰۱۶. Algae—A quintessential and positive resource of bioethanol production: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۶۶, ۲۴۸-۲۶۷.
- Soares, R., et al. ۲۰۱۵. Dehydration of ethanol with different salts in a packed distillation column. *Process Safety and Environmental Protection*, ۹۳, ۱۴۷-۱۵۳.
- Sripudorn, B., et al. ۲۰۲۰. Enhancement of ethanol production efficiency in repeated-batch fermentation from sweet sorghum stem juice: Effect of initial sugar, nitrogen and aeration. *Electronic Journal of Biotechnology*, ۴۶, ۵۵-۶۴.
- Staniszewski, M., et al. ۲۰۰۹. Semi-continuous ethanol production in bioreactor from whey with co-immobilized enzyme and yeast cells followed by pervaporative recovery of product—Kinetic model predictions considering glucose repression. *Journal of food engineering*, ۹۱(۲), ۲۴۰-۲۴۹.
- Surendhiran, D., et al. ۲۰۱۵. Kinetic modeling of microalgal growth and lipid synthesis for biodiesel production. *۳ Biotech*, ۵, ۶۶۳-۶۶۹.
- Susmozas, A., et al. ۲۰۲۰. Process strategies for the transition of 1G to advanced bioethanol production. *Processes*, ۸(۱۰), ۱۳۱۰.
- Thangavelu, S. K., et al. ۲۰۱۶. Review on bioethanol as alternative fuel for spark ignition engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۵۶, ۸۲۰-۸۳۵.
- Thatoi, H., et al. ۲۰۱۶. Bioethanol production from tuber crops using fermentation technology: a review. *International Journal of Sustainable Energy*, ۳۵(۵), ۴۴۳-۴۶۸.
- Thompson, W., & Meyer, S. ۲۰۱۳. Second generation biofuels and food crops: co-products or competitors? *Global Food Security*, ۲(۲), ۸۹-۹۶.
- Tye, Y. Y., et al. ۲۰۱۶. The world availability of non-wood lignocellulosic biomass for the production of cellulosic ethanol and potential pretreatments for the enhancement of enzymatic saccharification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۶۰, ۱۵۵-۱۷۲.
- Walker, G. M. ۲۰۱۱. ۱۲۵th anniversary review: fuel alcohol: current production and future challenges. *Journal of the Institute of Brewing*, ۱۱۷(۱), ۳-۲۲.
- Wang, H.-T., et al. ۲۰۱۴. Identification of carbohydrates as the major carbon sink of the marine microalga *Isochrysis zhangjiangensis* (Haptophyta) and optimization of its productivity by nitrogen manipulation. *Bioresource technology*, ۱۷۱, ۲۹۸-۳۰۴.

- Wang, P., & Chung, T.-S. ۲۰۱۵. Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring. *Journal of membrane science*, ۴۷۴, ۳۹-۵۶.
- Wang, W., et al. ۲۰۱۲. High consistency enzymatic saccharification of sweet sorghum bagasse pretreated with liquid hot water. *Bioresource technology*, ۱۰۸, ۲۵۲-۲۵۷.
- Wilkinson, S., et al. ۲۰۱۷. Bioethanol production from brewers spent grains using a fungal consolidated bioprocessing (CBP) approach. *Bioenergy Research*, ۱۰, ۱۴۶-۱۵۷.
- Wingren, A., et al. ۲۰۰۳. Techno-economic evaluation of producing ethanol from softwood: Comparison of SSF and SHF and identification of bottlenecks. *Biotechnology progress*, ۱۹(۴), ۱۱۰۹-۱۱۱۷.
- Yan, J., et al. ۲۰۱۵. Bioethanol production from sodium hydroxide/hydrogen peroxide-pretreated water hyacinth via simultaneous saccharification and fermentation with a newly isolated thermotolerant *Kluyveromyces marxianu* strain. *Bioresource technology*, ۱۹۳, ۱۰۳-۱۰۹.
- Zbed, H., et al. ۲۰۱۴. Bioethanol production from fermentable sugar juice. *The Scientific World Journal*, ۲۰۱۴.
- Zbed, H., et al. ۲۰۱۷. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۷۱, ۴۷۵-۵۰۱.
- Zeitsch, K. J. ۲۰۰۰. *The chemistry and technology of furfural and its many by-products*. ElsevierDOI (Original Publication)
- Zhang, L., et al. ۲۰۱۱. Application of simultaneous saccharification and fermentation (SSF) from viscosity reducing of raw sweet potato for bioethanol production at laboratory, pilot and industrial scales. *Bioresource technology*, ۱۰۲(۶), ۴۵۷۳-۴۵۷۹.

A Review of the Bioethanol Production Process from Sugar and Lignocellulosic Base Materials and their Comparison

Milad Moghaddam^۱, Keivan Shayesteh^{۲*}, Hassan Seddighi^۱

^۱- M.sc student, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^۲- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

*Email Address: k.shayesteh@uma.ac.ir

Abstract

The concern about limited fossil resources has led researchers to use renewable and new energies. Bioethanol is one of the most important and widely used biofuels that can replace fossil fuels. Bioethanol can be produced from various agricultural products and waste, such as grains, molasses, fruit, lignocellulosic materials, and algae. Molasses, an amorphous sugar extracted from sugar cane and sugar beet, is considered one of the most essential raw materials of sugar base. Sugars are usually produced with *Saccharomyces cerevisiae* yeast and bio-ethanol. Starch-based materials, such as wheat and corn, must first be enzymatically hydrolyzed, and then bioethanol is obtained with the help of the fermentation process. Agricultural wastes such as cereal straw, sawdust, and black liquor are considered lignocellulosic raw materials. Lignocellulosic raw materials are first de-ligninized. Then, the enzymatic hydrolysis process is performed, and finally, with the help of fermentation, bioethanol is obtained. This review article first deals with the production status of this biofuel in the world's leading countries. Then, it briefly mentions the bioethanol production process from sugar, starch, and lignocellulosic raw materials and the challenges of each method. It also examines the types of yeasts and compares them and the effective parameters in the fermentation, pre-treatment, hydrolysis, and distillation processes.

Introduction

Today, the bioethanol production industry is one of the most essential green business activities. The sources of natural fuels such as fossil fuels and coal are rapidly running out; Therefore, fuels such as ethanol, methane, and hydrogen have been considered by researchers and industry owners. Bioethanol can be produced from various agricultural products and waste, such as grains, molasses, fruit, whey, lignocellulosic materials, and algae. Bioethanol with the chemical formula ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) is produced through a biological process. In this process, biomass is converted into ethanol through a biochemical process. Bioethanol has many advantages over traditional fuel. Premature combustion, prevention of cylinder knocking due to high octane number and high heat of vaporization, ability to mix with gasoline, and reduction of hydrocarbon and carbon monoxide emissions due to the presence of a high percentage of oxygen in the structure of bioethanol are its prominent features. Statistics show that ۴.۲ million people die yearly due to the inhalation of gases resulting from the combustion of fossil fuels. Therefore, the idea of finding an accessible and environmentally friendly source of energy production, which is generally produced from agricultural waste, is attractive. Because despite the production of a valuable product, it creates an economic benefit from a raw material that has no use. Also, the disposal of agricultural waste is a fundamental environmental problem that can be solved mainly by starting the bioethanol production cycle. Currently, the United States and Brazil are the two countries that account for ۷۰-۸۰٪ of the world's bioethanol production.

Methodology

To review various articles about the production process of bioethanol from sugar-based and lignocellulosic materials, Google Scholar, ScienceDirect, ResearchGate, Scopus, ACS, SID, Civilica, Ganj Irandak databases with keywords Bioethanol, Lignocellulosic materials, sugar-based materials, biofuels, searched. The texts used in this article include various articles, web pages, theses, and organizational reports. Most of the articles published in the mentioned scientific databases have been used in this study.

Conclusion

Bioethanol can be a good substitute for gasoline for the following reasons: ۱) It can be made from renewable raw materials. ۲) It is less toxic than other fuels. ۳) It can be used directly or mixed with gasoline in different fuel ratios. ۴) Emits fewer pollutants than fossil fuels Because the oxygen in ethanol improves combustion. However, according to the statistics of the REN۲۱ international network in ۲۰۱۶, the share of biofuels is

only ۳٪ of the consumed fuels in the world. Several factors can be the reason for the lack of acceptance of biofuels. Easy access to fossil fuels, lack of seriousness of policymakers, and concern about basic raw materials such as sugar and starch, which are people's food, can be the most important reasons. The cost of bioethanol production is an essential function of the raw material. Currently, about ۹۸٪ of the ethanol produced in the world is obtained through the fermentation of sugars. For this reason, success in the economic production of bioethanol and its competition with gasoline is formidable. For bioethanol production to be economical, the cost of its raw materials should be low, and easy access to raw materials should be possible. Corn is the main ingredient for bioethanol production in America, as the first leading country in the bioethanol industry. Maize is mainly used as animal feed. In the United States, about ۳۸٪ of corn is used for animal feed, ۲۹٪ for bioethanol production, and the rest for industrial use and export. As the second producer of bioethanol, sugarcane is the primary raw material in bioethanol production in Brazil. Sugarcane is mainly grown to meet the global demand for sugar, and about ۸۰٪ of the world's sugar production comes from sugarcane and the remaining ۲۰٪ from sugar beet. According to the above content, the direction of research and the bio-ethanol production industry is expected to go towards agricultural waste and cheap and abundant raw materials. In other words, the first generation of bio-ethanol production, which uses sugar and starch-based materials, should be replaced, and the second generation of bio-ethanol production, which uses lignocellulosic materials, should be returned to be able to compete economically with fossil fuels. Lignocellulosic materials can be used for biofuel production due to their abundance and availability. Lignocellulosic compounds include different types of plants, agricultural wastes, and urban solid wastes, which consist of cellulose, hemicellulose, and lignin. Lignocellulosic materials account for more than ۹۰٪ of the dry weight of plant cells. The method of producing bioethanol from lignocellulosic materials may not be as developed as that of producing bioethanol from sugar-based materials. However, due to the availability of lignocellulosic raw materials, bioethanol production has a massive potential. Lignocellulosic raw materials do not have the high cost of sugar and starch and do not threaten society's food security. The biochemical process is a standard method for bioethanol production due to selectivity and high efficiency of biomass conversion. The biochemical method includes pre-processing, enzymatic hydrolysis, fermentation, and distillation. During the biochemical process, lignocellulosic biomass must undergo chemical or physical pre-processing. In addition, there is a need for enzymes to hydrolyze polysaccharides, as well as a requirement for yeasts to ferment sugars into bioethanol. The primary purpose of pre-processing is to prepare the biomass for the next steps and make the process more efficient. Because the lignocellulosic substrate has low porosity due to having three main parts: cellulose, hemicellulose, and lignin and shows resistance to enzymatic hydrolysis. This process can happen by reducing the size of lignocellulosic biomass to better access enzymes to sugars. Carrying out high-quality pre-processing increases efficiency and the availability of fermentable sugars in the following steps. If pre-processing is not done on lignocellulosic compounds, hydrolysis efficiency will reach less than ۲۰٪. In general, about ۳۳٪ of the cost of the bioethanol production process from lignocellulosic compounds is related to the pre-processing stage, which shows the importance of this stage in the efficiency of bioethanol production. In the process of producing bioethanol from lignocellulosic biomass, the hydrolysis stage is a challenging stage from the technical and economic perspective, requiring more studies and research. The hydrolysis process breaks the long chain of carbohydrates by enzyme or acid. This stage is essential in bioethanol production because it affects the quality of the fermentation process. The hydrolysis process is necessary because microorganisms are only able to digest simple sugars. Due to the high cost of enzymes, enzymatic hydrolysis is economically challenging for commercial purposes. Fermentation is one of the vital processes in bioethanol production, where ethanol is produced directly from the metabolic activity of yeast. For example, *Zymomonas mobilis* is a yeast that consumes glucose as "food" and excretes ethanol as a product. Several yeast species are used to convert sugars into bioethanol, But on an industrial scale, the yeast *Saccharomyces cerevisiae* is the most common microorganism used for bioethanol production; among the many factors affecting bioethanol production temperature, sugar concentration, pH, fermentation time, stirrer speed, and inoculation rate. As a summary of the article, bioethanol production methods are mainly of plant and food origin, which has caused severe challenges for bioethanol production. Therefore, the production of bioethanol from lignocellulosic materials has attracted the attention of researchers. However, the production process of bioethanol from lignocellulosic materials is more complicated and involves more problems than sugar and starch-based materials. Therefore, the development of agricultural solid waste and

lignocellulosic materials for bioethanol production, in addition to reducing the volume of junk and its management, also creates added value. Therefore, it is necessary to carry out extensive research to commercialize the process.

Keywords

Bioethanol; Lignocellulosic material; Sugar base material; Biofuel; Solid waste.