

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

**تولید استون، بوتانول و اتانول از گیاه سورگوم شیرین  
با استفاده از باکتری کلسترید یوم استوبوتیلیکم**

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی پیشرفته

یدالله جعفری

استاد راهنما

دکتر کیخسرو کریمی

دکتر حمید امیری



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

تولید استون، بوتانول و اتانول از ساقه سورگوم شیرین

با استفاده از باکتری کلستریدیوم استوبوتیلیکم

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی پیشرفته

تولید استون، بوتانول و اتانول از گیاه سورگوم شیرین با استفاده از باکتری

کلستریدیوم استوبوتیلیکم

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر کیخسرو کریمی  
دکتر حمید امیری  
دکتر اکرم زمانی  
دکتر محمد رضا احسانی  
دکتر حمید زیلویی  
دکتر مرتضی صادقی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

۲- استاد راهنمای پایان نامه

۳- استاد مشاور

۴- استاد داور

۵- استاد داور

۶- سرپرست تحصیلات تکمیلی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است

خدا را شاکرم که توان انجام این پروژه را به من عطا فرمود.

تشکر می‌کنم از پدر زحمتکش و مادر مهربان و دلسوزم که همیشه موفقیت من آرزوی آنها بوده است.  
از اساتید راهنما، آقای دکتر کیخسرو کریمی، آقای دکتر حمید امیری و خانم دکتر اکرم زمانی سپاسگزارم  
که در این مسیر، یاری‌رسان بنده بودند.

از تمامی دوستان و عزیزانم که یاد آنها برای من انگیزه‌ی حرکت بوده است، تشکر می‌نمایم.

تقدیم به تمامی اعضای خانواده مهربانم...

تقدیم به عشق پنهانم...

تقدیم به جویندگان علم و پژوهش...

## چکیده

تخمیر استون، بوتانول و اتانول توسط باکتری‌های *کلستری‌دی* در طی قرن بیستم فراز و نشیب‌های متعددی داشته است. این فرایند که با نام فرایند تولید حلال‌های زیستی شناخته می‌شود، در میانه قرن بیستم یکی از بزرگ‌ترین صنایع تخمیر در سرتاسر جهان بوده است. با این وجود با ورود صنایع پتروشیمی به عرصه تولید مواد مختلف شیمیایی از جمله بوتانول، صنعت تخمیر استون، بوتانول و اتانول از عرصه رقابت اقتصادی کنار رفت. در سال‌های اخیر با بروز نگرانی‌ها از منابع رو به اتمام تجدید ناپذیر نفتی و آثار زیان‌بار مصرف بیش از اندازه آن‌ها و همچنین شناخت بوتانول زیستی به عنوان یکی از گزینه‌های اصلی برای جای‌گزینی با سوخت‌های فسیلی کنونی، بهبود فرایند تخمیر استون، بوتانول و اتانول مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود پیش از آن که بتوان بوتانول زیستی را به عنوان سوخت جای‌گزین در لیست سوخت‌های مصرفی کنونی قرار داد، باید بتوان آن را به صورت اقتصادی تولید کرد. استفاده از منابع زیستی ارزان‌قیمت غیرخوراکی به عنوان منبع کربنی جهت تولید بوتانول در چند سال اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از نکات قابل توجه باکتری‌های *کلستری‌دی* قابلیت تخمیر مستقیم منابع نشاسته‌ای با بازده بالا می‌باشد. از این رو در این مطالعه از گیاهی با نام سورگوم شیرین استفاده شده است که مشخصات ویژه‌ای جهت به کارگیری در تولید حلال‌های استون، بوتانول و اتانول دارد. گیاه سورگوم شیرین گیاهی است که در چهار فصل سال کشت و برداشت می‌شود و با آب و هوای گرم و نسبتاً خشک سازگاری مناسبی دارد. علاوه بر دانه سورگوم که یک منبع نشاسته‌ای مناسب برای تخمیر است، ساقه‌ی سورگوم شیرین نیز شامل کربوهیدرات‌های قابل حل (گلوکز و ساکاروز) و غیرقابل حل (سلولز و همی سلولز) می‌باشد که پس از انجام فرآوری قابل تبدیل به استون، بوتانول و اتانول می‌باشد. در این مطالعه تولید زیستی حلال‌های آلی شامل استون، بوتانول و اتانول از گیاه سورگوم شیرین با استفاده از باکتری *کلستری‌دی* و استوبوتیل‌کم بررسی شده است. اجزاء گیاه سورگوم شیرین شامل دانه، شیره، مواد لیگنوسلولزی ساقه است که به صورت جداگانه جهت تولید حلال‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش استخراج یک مرحله‌ای شیره‌ای حاوی ۳۵/۱۲ گرم بر لیتر قند به دست آمد و برای تولید مخلوط حلال‌ها استفاده شد. بیشترین بازده تولید حلال از شیره سورگوم برابر با ۲۴/۴ درصد به دست آمد. بخش لیگنوسلولزی باقی‌مانده از استخراج (باگاس) که بسیار مقاوم است برای تبدیل مناسب به قند ابتدا نیاز به پیش‌فرآوری دارد لذا باگاس سورگوم ابتدا تحت پیش‌فرآوری آلی محلول ۵۰ درصد استون حاوی ۰/۱ درصد وزنی اسید سولفوریک در دما و زمان ماندن متفاوت و آبکافت آنزیمی قرار گرفت. مواد فرآوری شده تحت آبکافت آنزیمی و سپس توسط تخمیر به استون، بوتانول و اتانول تبدیل شدند. آبکافت آنزیمی مواد فرآوری شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۹۰ دقیقه منجر به تولید ۲۶/۲ گرم بر لیتر قند شد که پس از تخمیر به ۵/۸۸ گرم بر لیتر تبدیل شد. دانه سورگوم که حاوی ۷۰ درصد نشاسته می‌باشد نیز مستقیماً تحت تخمیر قرار گرفت. تخمیر مستقیم ۲۰ گرم بر لیتر دانه سورگوم بازده تولید حلال برابر با ۳۷/۱ درصد، به دست آمد. بر اساس کلیه نتایج به دست آمده در بهترین حالت به ازای هر کیلوگرم گیاه سورگوم با تخمیر جداگانه قسمت‌های مختلف سورگوم، در مجموع ۱۴۴/۶ گرم حلال تولید شد. این میزان ۲/۴ برابر بیش‌تر از میزان حلال تولید شده از تخمیر گیاه سورگوم خام می‌باشد.

کلمات کلیدی: بوتانول، استون، اتانول، کلستریل دیوم استویوتیل ای کم، سورگوم شیری ن، آبکافت  
آنزیمی



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
یازده	فهرست اشکال
سیزده	فهرست مطالب
۱	چکیده
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۳	۱-۱ ضرورت کار
۵	۲-۱ چارچوب کلی و هدف از انجام این پروژه
۶	۳-۱ محتوای فصول بعدی
<b>فصل دوم: مروری بر منابع و مطالعات</b>	
۸	۱-۲ سوختهای زیستی
۸	۲-۲ تولید سوختهای زیستی از منابع نشاستهای و قندی
۹	۳-۲ تولید سوختهای زیستی از منابع لیگنوسلولزی
۱۰	۴-۲ مقایسه بوتانول با اتانول به عنوان سوخت زیستی برتر
۱۰	۵-۲ سوبستراهای غیرسلولزی جهت تولید بوتانول
۱۱	۱-۵-۲ نشاسته
۱۱	۲-۵-۲ ملاس
۱۲	۶-۲ ترکیبات نشاسته‌ای
۱۲	۷-۲ مواد لیگنوسلولزی برای تولید بوتانول زیستی
۱۳	۸-۲ ساختار مواد لیگنوسلولزی
۱۴	۱-۸-۲ سلولز
۱۵	۲-۸-۲ همی سلولز
۱۶	۳-۸-۲ لیگنین
۱۶	۹-۲ پیش‌فراوری مواد لیگنوسلولزی
۱۹	۱۰-۲ روش‌های مختلف پیش‌شنهاد شده جهت پیش‌فراوری مواد لیگنوسلولزی
۲۰	۱-۱۰-۲ پیش‌فراوری فیزیکی
۲۰	۲-۱۰-۲ پیش‌فراوری شیمیایی
۲۱	۳-۱۰-۲ پیش‌فراوری زیستی
۲۲	۱۱-۲ پیش‌فراوری با حلال آلی
۲۲	۱-۱۱-۲ پیش‌فراوری با اتانول
۲۳	۲-۱۱-۲ پیش‌فراوری با استون
۲۴	۱۲-۲ آبکافت مواد لیگنوسلولزی
۲۵	۱-۱۲-۲ آبکافت آنزیمی

۲۶	..... آبکافت اسیدی و بازی.....	۲-۱۲-۲
۲۷	..... سورگوم شیرین.....	۱۳-۲
۲۹	..... تاریخچه تولید استون بوتانول اتانول.....	۱۴-۲
۳۱	..... می‌کروارگانیسم‌ها تولیدکننده ABE.....	۱۵-۲
۳۱	..... باکتری کلستری‌دیوم استوبوتی‌دی‌کم.....	۱۶-۲
۳۲	..... بی‌وشیمی فرایند.....	۱۷-۲
۳۳	..... محصولات تولیدی تخمیر.....	۱۸-۲
۳۳	..... استون.....	۱-۱۸-۲
۳۴	..... بوتانول.....	۲-۱۸-۲
۳۵	..... اتانول.....	۳-۱۸-۲
۳۶	..... انواع فرایندهای تخمیر ABE.....	۱۹-۲
۳۶	..... فرایند ناپی‌وسته.....	۱-۱۹-۲
۳۶	..... فرایند نیمه پی‌وسته.....	۲-۱۹-۲
۳۷	..... فرایند پی‌وسته.....	۳-۱۹-۲
۳۷	..... مشکلات فرایند تخمیر.....	۲۰-۲
۳۸	..... مروری بر مطالعات صورت گرفته.....	۲۱-۲
<b>فصل سوم: مواد، تجهيزات و روش انجام آزمایش‌ها</b>		
۳۹	..... مواد شیمیایی مورد استفاده.....	۱-۳
۴۰	..... سورگوم شیرین.....	۲-۳
۴۰	..... میکروارگانیسم و محیط نگهداری آن.....	۳-۳
۴۱	..... وسایل و تجهیزات مورد استفاده.....	۴-۳
۴۱	..... محلول‌ها و محیط کشت‌های مورد استفاده.....	۵-۳
۴۱	..... بافر سترات.....	۱-۵-۳
۴۱	..... سود ۶ مولار و اسید کلرید ریک ۶,۳۴ مولار.....	۲-۵-۳
۴۱	..... محلول DNS.....	۳-۵-۳
۴۲	..... محلول سیستم.....	۴-۵-۳
۴۲	..... محیط کوکدمیت.....	۵-۵-۳
۴۲	..... محیط کشت پیتون- گلوگز- عصاره مخمر.....	۶-۵-۳
۴۲	..... محلول‌های ذخیره P2.....	۷-۵-۳
۴۳	..... محیط PGY-P2.....	۸-۵-۳
۴۴	..... استخراج شیره سورگوم.....	۶-۳
۴۴	..... پیش‌فراوری دانه سورگوم جهت تخمیر.....	۷-۳
۴۴	..... پیش‌فراوری حلال آلی باگاس سورگوم.....	۸-۳
۴۵	..... هیدرولیز آنزیمی باگاس سورگوم شیرین.....	۹-۳
۴۷	..... فعال‌سازی باکتری و تولید زیست‌توده.....	۱۰-۳

۴۷	تخمیر	۱۱-۳
۴۸	تعیین غلظت قندها، اسیدهای آلی و حلالهای تولی‌دشده	۱۲-۳
۴۹	روش DNS به منظور تعیین غلظت کل قندهای	۱۳-۳
۵۰	تعیین درصد بازیابی شیره و باگاس	۱-۱۳-۳
۵۰	تعیین درصد رطوبت	۱۴-۳

#### فصل چهارم: نتایج و بحث پیرامون آن‌ها

۵۲	مقدمه	۱-۴
۵۳	استخراج شیره سورگوم	۲-۴
۵۳	اندازه‌گیری غلظت قند آزادشده در شیره سورگوم	۱-۲-۴
۵۵	نرخ استخراج قند از سورگوم	۲-۲-۴
۵۵	استخراج چند مرحله‌ای	۳-۲-۴
۵۶	پیش‌فراوری باگاس سورگوم جهت هیدرولیز آنزیمی	۳-۴
۵۷	هیدرولیز آنزیمی باگاس پیش‌فراوری شده	۴-۴
۵۸	نرخ آزاد شدن قند و بازده هیدرولیز	۱-۴-۴
۵۹	تخمیر محلول‌های شاهد	۵-۴
۵۹	تخمیر گلوکز خالص	۱-۵-۴
۶۰	تخمیر ساکاروز خالص	۲-۵-۴
۶۱	تخمیر نشاسته خالص	۳-۵-۴
۶۲	تخمیر قسمت‌های مختلف سورگوم شیری‌ن	۶-۴
۶۲	تخمیر دانه‌ی سورگوم	۱-۶-۴
۶۴	تخمیر شیره سورگوم	۲-۶-۴
۶۵	تخمیر محلولهای قندی حاصل از باگاس سورگوم	۳-۶-۴
۶۶	تخمیر کل ساقه و دانه به‌عنوان سویسترا	۷-۴
۶۷	موازنه جرم بر روی گیاه سورگوم	۸-۴

#### فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶۹	نتیجه‌گیری	۱-۵
۷۱	پیشنهادها	۲-۵
۶۹	مراجع	

## فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲: ساختار سلولز ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: ساختار اصلی همی سلولز در چوب درخت ..... ۱۶
- شکل ۳-۲: نمایشی از تاثیر پیش فراوری بر روی ماده لیگنوسلولزی ..... ۱۷
- شکل ۴-۲: واحد های تشکیلی دهنده پلیمر سلولز ..... ۱۸
- شکل ۵-۲: نمایش پیوندهای هیدرورژنی که باعث چیدمان زنجیره های پلیمری در دو صفحه ای موازی شده است ..... ۱۸
- شکل ۶-۲: روش های مختلف پیش فراوری ..... ۱۹
- شکل ۷-۲: سورگوم شیرین ..... ۲۷
- شکل ۸-۲: نمودار بلوکی فرایند بیوپالایشگاه پیوسته از ساقه ی سورگوم شیرین ..... ۲۸
- شکل ۹-۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) باکتری کلستریدیوم استوبوتیلیکم ..... ۳۲
- شکل ۱۰-۲: مسیور متابولیسمی تخمیر ABE توسط باکتری کلستریدیوم استوبوتیلیکم ..... ۳۳
- شکل ۱۱-۲: کاربردهای بوتانول در صنایع مختلف، سمت چپ. میزان مصرف بوتانول در تولید مواد، سمت راست. .... ۳۵
- شکل ۱-۳: سورگوم شیرین کشت شده در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه اصفهان ..... ۴۰
- شکل ۲-۳: راکتور فشار بالا ..... ۴۵
- شکل ۳-۳: باتل های آماده شده جهت اضافه کردن آنزیم ..... ۴۶
- شکل ۴-۳: ستون مس جهت جذب اکسیژن (الف) و وسایل مورد استفاده جهت برقراری شرایط بی هوازی (ب) ..... ۴۸
- شکل ۵-۳: دستگاه HPLC آزمایشگاه آنالیز، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی اصفهان ..... ۴۹
- شکل ۱-۴: نمودار استاندارد گلوکز با هیدرولیزاسیدی ..... ۵۴
- شکل ۲-۴: مقادیر جذب گلوکز با غلظت های مختلف قبل (○) و بعد (□) از آبکافت اسیدی رقیق ..... ۵۴
- شکل ۳-۴: روند آزاد شدن قند در زمان های مختلف ..... ۵۵
- شکل ۴-۴: پروفایل دما (خط ممتد) و فشار (خط چین) برای پیش فراوری  $150^{\circ}\text{C}$  و 90 دقیقه ..... ۵۶
- شکل ۵-۴: درصد بازیابی جامد در پیش فراوری های مختلف ..... ۵۷
- شکل ۶-۴: غلظت کل قندهای آزاد شده در طی آبکافت آنزیمی برای مواد پیش فراوری شده مختلف ..... ۵۸
- شکل ۷-۴: پروفایل تولید گلوکز در هیدرولیز آنزیمی مواد پیش فراوری شده در  $180^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد و زمان ماند ۶۰ دقیقه ..... ۵۹

- شکل ۴-۸: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از گلوکز خالص  
 ۶۰ .....
- شکل ۴-۹: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از ساکاروز.....  
 شکل ۴-۱۰: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از نشاسته خالص  
 ۶۱ .....
- شکل ۴-۱۱: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از دانه سورگوم  
 پیش فراوری نشده در غلظت‌های مختلف ..... ی‌ازد .....  
 ۶۳ .....
- شکل ۴-۱۲: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از دانه سورگوم  
 پیش فراوری شده با آب در غلظت‌های مختلف .....  
 ۶۳ .....
- شکل ۴-۱۳: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از غلظت‌های  
 مختلف شیره سورگوم .....  
 ۶۴ .....
- شکل ۴-۱۴: بازده تولی‌د کل حلال‌ها از غلظت‌های مختلف شیره سورگوم .....  
 شکل ۴-۱۵: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از آبکافت  
 آنزیمی .....  
 ۶۶ .....
- شکل ۴-۱۶: تولی‌د استون (خاکستری تیره)، بوتانول (سی‌اه رنگ) و اتانول (خاکستری روشن) از کل‌گی‌اه  
 سورگوم به صورت یک‌جا در دو نسبت جامد به مایع متفاوت .....  
 ۶۷ .....

## فهرست جدول ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۴	جدول ۱-۲: ترکیب درصد مواد لیگنوسلولزی از منابع مختلف: وزن خشک
۳۴	جدول ۲-۲: خواص فیزیکی بوتانول در مقایسه با بنزیر دوازده ستانول
۵۵	جدول ۱-۴: میزان قند آزاد شده در هر مرحله
۶۸	جدول ۲-۴: بیشترین حلال تولیدی از اجزا مختلف سورگوم به صورت تفکیک شده
۶۸	جدول ۳-۴: تخمیر کل گیاه سورگوم

سیزده

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱ ضرورت کار

هم اکنون جهت تأمین بیش از ۸۵ درصد از کل انرژی مصرفی و همچنین ۹۶ درصد از مواد اولیه مورد نیاز تولید مواد شیمیایی آلی جهان از منابع فسیلی استفاده می‌شود. با افزایش جمعیت جهان، روند استفاده از سوخت‌های فسیلی نیز افزایش یافته است و موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، گرم شدن و تغییرات در اکوسیستم زمین شده است. از سوی دیگر ذخایر نفتی تجدید پذیر نیستند و نگرانی‌های شدیدی در ارتباط با کاهش میزان جهانی این گونه ذخایر وجود دارد. با افزایش جمعیت کشورهای صنعتی و در حال توسعه پیش‌بینی می‌شود میزان مصرف انرژی طی ۲۰ سال آینده تا ۳۵ درصد افزایش پیدا کند. از طرفی می‌زان تولید سوخت‌های مایع روبه کاهش است و پیش‌بینی می‌شود تولید سوخت‌های مایع از ۱/۹ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۱۰ به ۵/۹ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۳۰ برسد [۱].

در حال حاضر ۹/۸ درصد از کل انرژی جهان از منابع تجدید پذیر زیستی تأمین می‌شود که حدود ۳۰ درصد آن به صورت مدرن (به‌طور مثال سوخت مایع و بخار) و ۷۰ درصد باقی‌مانده به صورت سنتی (سوختن برای گرم کردن با دانسیته حرارتی ۱۵ الی ۲۰ مگا ژول بر کیلوگرم) مصرف می‌شود [۱]. برای تأمین این میزان انرژی تقریباً  $۱۰۶ \times ۳/۸۷$  هکتار جنگل (۳۰ درصد از کل سطح زمین) در سراسر دنیا استفاده می‌شود که حدود ۹۵ درصد آن به صورت طبیعی توسعه یافته و ۵ درصد آن به صورت زمین‌های کشاورزی است [۱].

از سوی دیگر چنین راهکاری فرصت مناسبی جهت تبدیل مواد و پسماندهای زائد به انرژی نیز می‌باشد. با وجود آن که تولید اتانول از منابع تجدید پذیر به روش زیستی سابقه تاریخی طولانی دارد. با توجه به موانع



فنی و اقتصادی مختلفی که در تولید و به کارگیری اتانول به عنوان سوخت وجود دارد همچنان تحقیقات برای پیدا کردن سوخت جایگزین مناسب ادامه دارد. استفاده از انرژی ذخایر تجدیدپذیری که از طریق واکنش‌های زیستی میسر می‌شود مزایای زیادی را به همراه دارد. با توجه به روند شدیدی که کاهش ذخایر نفتی مهم‌ترین مزیت آن کاهش وابستگی به منابع فسیلی باشد [۲،۱].

از میان‌های مختلف انرژی جهت توسعه جوامع، سوخت مایعی که از کلدی‌ترین‌ها می‌باشد. از این رو تولید سوخت‌های مایعی که قابل به کارگیری به جای سوخت‌های فسیلی کنونی باشند ارزش بالایی دارد. استفاده از سوخت‌های زیستی مایع منجر به تولید  $CO_2$  کمتری شده و سازگاری مناسب‌تری با محیط زیست دارند. از سوی دیگر به طور معمول پسماندهای باقی‌مانده از فرایندهای نظیر تخمیر قابل به کارگیری به عنوان کود در زمین‌های کشاورزی می‌باشد. در مقایسه با سوزاندن مواد زیستی، تولید سوخت مایع از بروز برخی مشکلات جلوگیری می‌کند. تولید سوخت‌های مایع از مواد زیستی منجر به افزایش دانسیته انرژی<sup>۱</sup> می‌شود و قابل به کارگیری در سیستم حمل‌ونقل شهری می‌باشد. در مقایسه با روش‌های کنونی دفع ضایعات زیستی، تولید سوخت مایع اگر تنها به عنوان روشی برای دفع ضایعات در نظر گرفته شود نیز از نظر زیست‌محیطی ارجحیت دارد زیرا ضایعات زیستی دفع شده در نهایت به صورت طبیعی تخریب شده و منجر به تولید گازهای نظیر متان که اثرات مخرب زیست‌محیطی آن بسیار بیشتر از گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد، می‌شوند [۱].

بدین ترتیب تولید سوخت مناسب از منابع تجدیدپذیری زیستی در سال‌های اخیر موضوع بسیاری از مطالعات گروه‌های مختلف تحقیقاتی می‌باشد. با این وجود چنین سوخت‌هایی بایده‌خواص و ویژگی‌های معینی داشته باشند. به عنوان نمونه سوخت‌های زیستی لازم است دانسیته انرژی بالایی داشته و با سوخت‌های موجود قابل اختلاط و سازگار باشد. همچنین تأثیر کمی روی محیط و منابع غذایی داشته، بازده تولید نزدیکی به بازده استوکیومتری بوده و از نظر اقتصادی با روش‌های تولید پیشین قابل رقابت باشند [۱].

زیست توده می‌تواند با تبدیل مستقیم به انرژی و مواد شیمیایی با ارزش افزوده، علاوه بر کاهش یکی از جریان‌های اتلافی ارزش اقتصادی خوراک مورد استفاده را پیشینه کند. بدین منظور به طور مشابه با پالایشگاه‌های نفت، پالایشگاه‌های زیستی برای تولید گسترده‌تری از محصولات اصلی و جانبی مختلف نظیر بیواتانول، بیوبوتانول، حرارت یا الکتریسیته و مواد غذایی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳].

در میان مواد مختلفی که می‌توانند به عنوان سوخت زیستی تولید و عرضه گردند، بوتانول زیستی به دلیل خواص ویژه خود در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بوتانول نسبت به اتانول با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، جایگزین مناسب‌تری برای سوخت‌های کنونی در مقایسه با اتانول می‌باشد. محتوی انرژی و نقطه‌ی جوش بالاتر و حداقل اصلاح مورد نیاز برای استفاده در موتورهای احتراق کنونی، از

<sup>1</sup> Energy density

جمله مزایای بوتانول می باشد. همچنین بوتانول کاربردهای زیادی در زمینه های دیگر از جمله در صنایع تولید پلاستیک و سایر صنایع دارد [۲].

بوتانول در کنار مقدار کم تر استون و اتانول به صورت زیستی از زیست توده های تجدیدپذیر معمولاً با استفاده از باکتری کلستری دیوم<sup>۱</sup>، تحت شرایط بی هوازی تولید می شود. این فرایند به تخمیر استون-بوتانول-اتانول<sup>۲</sup> شناخته شده است. با وجود آنکه در قرن بیستم فرایند تخمیری تولید استن-بوتانل-اتانل با موفقیت در کشورهای مختلف دنیا اجرا شده و یکی از بزرگترین صنایع تخمیری در کل جهان بود، از دهه ۱۹۶۰ میلادی به دلایل مختلف از جمله افزایش قیمت سوسترا، توانایی رقابت کردن با صنعت تولید بوتانول پتروشیمیایی را از دست داد. در سال های اخیر با شناخت خواص ویژه بوتانول و پتانسیل آن به عنوان یک سوخت جایگزین مناسب، بهینه سازی فرایند تخمیر ABE برای تولید بوتانول، مورد نظر قرار گرفت. با وجود تحقیقات وسیع هم-چنان تولید صنعتی استن، بوتانول و اتانول به مرحله تولید صنعتی نرسیده است [۲].

از جمله راه های کاهش قیمت فرایند تخمیر ABE می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- استفاده از سوستراهای ارزان قیمت تر
- بهینه کردن شرایط تخمیر به منظور افزایش بازده تبدیل سوسترا به ABE
- یافتن سویه ای مؤثرتر از باکتری کلستری دیوم و یا اصلاح ژنتیکی گونه های مختلف که قادر به تبدیل سوستراهای مختلف به ABE باشد و همچنین نسبت به تغییر شرایط تخمیر مقاوم تر عمل کند
- استفاده از ترکیبی از میکرواورگانیزم ها

با توجه به آن که قیمت سوسترا می تواند تا ۶۳٪ از قیمت تمام شده ABE را به خود اختصاص دهد، استفاده از سوستراهای ارزان قیمت، یکی از راه های اقتصادی کردن این فرایند است [۲].

## ۲-۱ چارچوب کلی و هدف از انجام این پروژه

با توجه به اینکه گیاه سورگوم شیری<sup>۳</sup> با شرایط آب و هوایی گرم و خشک نسبتاً سازگار می باشد و همچنین ساقه آن حاوی مقدار قابل توجهی قند های قابل تخمیر (تقریباً ۱۶-۱۸ درصد)، ساکاروز، گلوکز و فروکتوز است، به نظر می رسد سوسترای مناسبی برای تولید سوخت های زیستی باشد [۴، ۵].

بازیابی قند گیاه سورگوم شیری بر خلاف نیشکر، دشوار خواهد بود. در اکثر پژوهش های انجام شده در رابطه با تولید سوخت زیستی از گیاه سورگوم شیری، اتانول زیستی بی شتر مدنظر قرار گرفته است.

استفاده از کلیه بخش های گیاه سورگوم به عنوان سوسترا جهت تولید استون، بوتانول و اتانول هدف از انجام این پروژه بوده است. لذا تخمیر استون-بوتانول-اتانول در دو حالت بررسی شد:

<sup>1</sup> *Clostridium* ssp

<sup>2</sup> ABE fermentation

<sup>3</sup> Sweet sorghum

حالت اول: قسمت‌های مختلف گیاه سورگوم (دانه، شیره و هیدرولیزیت باگاس) ابتدا از هم تفکیک گردید. دانه و شیره با انتخاب غلظت‌های مختلف مستقیماً تخمیر زده شد و مقدار تولید حلال بهی‌نه شد. باگاس با روش پیش‌فرآوری با حلال آلی (مخلوط ۵۰-۵۰ استون) و سپس آبکافت آنزیمی، تخمیر زده شد.

حالت دوم: کل گیاه سورگوم به صورت یکجا به صورت مخلوط جامد-مایع پیش‌فرآوری تخمیر زده شد. در پایان میزان بوتانول تولیدی از هر دو روش با یکدیگر مقایسه گردید.

### ۳-۱ محتوای فصول بعدی

در این مطالعه تولید زیستی حلال‌های آلی شامل استون، بوتانول و اتانول از گیاه سورگوم شی‌ری‌ن با استفاده از باکتری کلستری‌دی‌وم استوبوتیلی‌کم بررسی شده است.

در فصل دوم در ابتدا انواع سوخت‌های زیستی، سوبستراهای موجود، و همچنین بررسی ساختار مواد لی‌گنوسلولزی به عنوان سوبسترای ارزان قیمت و فراوان مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه روش‌های مختلف پیش‌فرآوری از مواد لی‌گنوسلولزی، انواع آبکافت، فرایند تخمیر، انواع فرایندهای تخمیر استون، بوتانول و اتانول، مشکلات و مطالعات صورت گرفته در این زمینه مرور شده است.

در چهار بخش ابتدای فصل سوم (بخش ۳-۱ تا ۳-۴) مواد و تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش‌ها بیان گردیده است. در بخش ۳-۵ ساخت و ترکیب درصد انواع محلول‌های به‌کاررفته در این مطالعه آورده شده است. در بخش‌های ۳-۶، ۳-۷، ۳-۸، ۳-۹ روش‌ها و فرایندهای صورت گرفته بر روی گیاه سورگوم جهت آماده‌سازی برای تخمیر شرح داده شده است. در بخش‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ تخمیر استون، بوتانول و اتانول مورد بحث قرار گرفته است. در بخش‌های انتهایی فصل سوم روش‌های اندازه‌گیری قند و حلال‌های تولید شده آورده شده است.

در فصل چهارم ابتدای نتایج حاصل از مطالعه فرایند استخراج و به‌کارگیری شیره سورگوم، بیان شده است. پس از آن پیش‌فرآوری (بخش ۴-۳) و آبکافت آنزیمی باگاس سورگوم (بخش ۴-۴) جهت تولید سوبسترای مناسب برای تخمیر مورد بحث قرار گرفته است. سپس تخمیر محلول‌های شاهد ساخته شده شامل محلول گلوکز (بخش ۴-۵-۱)، محلول ساکاروز (بخش ۴-۵-۲) و محلول نشاسته (۴-۵-۳) تولید استون، بوتانول و اتانول مطرح شده است. در ادامه نتایج حاصل از تخمیر محلول‌های به دست آمده از دانه سورگوم (بخش ۴-۶-۱)، شیره سورگوم (بخش ۴-۶-۲)، باگاس سورگوم (بخش ۴-۶-۳) و همچنین تخمیر کل ساقه و دانه گیاه سورگوم (بخش ۴-۷) مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت با در نظر گرفتن فرایند بهی‌نه تولید استون، بوتانول و اتانول از هر یک از اجزا با استفاده از موازنه جرم کلی بازده کلی تولید محصولات از گیاه سورگوم به صورت همه‌جانبه (بخش ۴-۸) بررسی شد.

در ابتدای فصل پنجم با مقایسه حالت‌های مختلف، خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج حاصل شده از تخمیر آورده شده است. در انتهای این فصل مطالعات و پیشنهادهایی جهت بهبود و توسعه فرایند تولید حلال‌های زیستی استون، بوتانول و اتانول ذکر گردیده است.