

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



موسسه آموزش عالی انرژی
دانشکده فنی و مهندسی
پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

عنوان

تولید همزمان کار و حرارت با استفاده از توربین گاز و سیستم بازیافت انرژی برای سوخت های تجدیدپذیر (زیست توده)

استاد راهنما:

دکتر مجتبی میرزایی

استاد مشاور:

دکتر رضا اعلائی

پژوهشگر

احسان سبحانی

زمستان ۱۳۹۵

صورتجلسه دفاع

تقدیم به

تقدیم به روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را
تجربه نمایم
و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم
همه مهر

پیشگفتار

کشور ما به عنوان سرزمین انرژی همواره دلخوش به این تصور ذهنی بوده است که مزیت اصلی آن انرژی است و میتواند در سایه‌ی این مزیت، صنعت و خدمات خود را رشد دهد، غافل از آن که تبدیل مزیت انرژی به شکوفایی صنعت و خدمات در گروی کسب و ارتقاء دانش و تکنولوژی‌های نو ظهوری می‌باشد.

در حال حاضر روش‌ها و تکنولوژی‌های فراوانی جهت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر توسط شرکت‌های خارجی ارائه گردیده است که اغلب با روش‌های تبلیغاتی و نه به صورت عملی به تشریح محصولات و خدمات خود پرداخته اند در عین حال تجارب فراوانی در بهینه‌سازی انرژی در سطح صنعت وجود دارد که با کمی همت، امکان مستندسازی آن‌ها وجود دارد. لذا در این پروژه سعی شده است با معرفی و ارزیابی یکی از جدیدترین روش‌های استحصال انرژی از مواد که به عنوان معضل در کشور شناخته می‌شود گامی هرچند کوچک در راه کاهش وابستگی کشور به سوخت‌های فسیلی برداشته شود.

در طول دوران تحصیلی و تهیه این پایان نامه از راهنماییها و مساعدت‌های اساتید و سروران عزیزی بهره برده ام که در اینجا لازم است از لطف این عزیزان مراتب سپاس قلبی و تشکر خالصانه خود را داشته باشم.

از استادان ارجمندم جناب آقای دکتر مجتبی میرزایی و جناب آقای دکتر رضا علایی صمیمانه تشکر می‌نمایم و برایشان توفیقات روز افزون در خدمات علمی و فرهنگی و آموزشی آرزو می‌کنم.

چکیده

تولید همزمان کار و حرارت با استفاده از توربین گاز و سیستم بازیافت انرژی برای سوخت‌های تجدیدپذیر (زیست توده)

هزینه‌های زیاد آلودگی و منابع محدود سوخت‌های فسیلی موجب شده که بشر برای تأمین انرژی مورد نیاز خود به منابع تجدیدپذیر از جمله زیست توده روی آورد. تبدیل زیست توده به گاز سنتز در مقایسه با انواع دیگر روش‌های استحصال انرژی از زیست توده، دارای ارزش حرارتی بالاتری است. برای تأمین انرژی از زیست توده، انجام مطالعه بر روی فناوری‌های موجود و استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، توربین‌های گازی اهمیت فراوانی دارد. در این پایان نامه، طرحی جهت استفاده از منابع زیست توده کشور جهت تولید همزمان برق و حرارت ارائه شده است. در این طرح با استفاده از پسماند جامد شهر تهران دو حالت خشک و با رطوبت به عنوان یک منبع تجدیدپذیر انرژی، به همراه بخار آب و هوا در راکتور گازی‌سازی بستر ثابت، گاز ترکیبی تولید می‌گردد که این گاز مخلوطی از هیدروژن، منواکسید کربن، دی اکسید کربن، آب و مقادیری متان می‌باشد. راکتور انتخابی در دمای ۱۹۰۰ فارنهایت و فشار ۳۹۰ (psi) عمل می‌کند. گاز ترکیبی تولیدی پس از مراحل پاکسازی به عنوان سوخت وارد توربین گازی (Siemens V94.2) می‌شود و کلیه‌ی فرایند تولید گاز و استفاده به عنوان سوخت توربین با استفاده از ماژول GT pro نرم افزار Thermo Flow شبیه‌سازی شده است.

لازم به ذکر است که عمده توجه در انجام این پایان نامه به بخش شناخت و تولید گاز قابل اشتعال با ارزش حرارتی بالا از پسماند اختصاص داده شده است.

بهترین ترکیب هوا و بخار ورودی به راکتور بستر ثابت در میان ۶۰ حالت بررسی شده برای پسماند خشک مربوط به بخار ۰/۲ (درصد حجمی سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) برابر با با ارزش حرارتی آن $6471 \frac{BTU}{lb}$ است. و بهترین ترکیب نسبت رطوبت و درصد‌های وزنی آب ورودی برای پسماند تهران در میان ۴۰ حالت بررسی شده مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با درصد‌های وزنی آب ۱۰٪ و ۱۵٪ با ارزش حرارتی $6242 \frac{BTU}{lb}$ است. که با استفاده از گاز سنتز تولیدی حاصل از پسماند خشک در توربین گازی Siemens V94.2 توان خالص خروجی (kw) ۱۶۵۵۵ و در سیستم CHP (lb/s) ۲۱۲ بخار تولید شد.

کلید واژه: راکتور گازی‌سازی - زیست توده - gasification - توربین - گازی‌سازی

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: کلیات تحقیق

| | | |
|-------|--|----|
| ۱-۱ | مقدمه | ۲ |
| ۲-۱ | بیان مسأله | ۳ |
| ۳-۱ | اهمیت و ضرورت تحقیق | ۴ |
| ۴-۱ | اهداف تحقیق | ۴ |
| ۵-۱ | روش و مراحل انجام تحقیق | ۵ |
| ۶-۱ | منابع زیست توده | ۵ |
| ۷-۱ | زیست توده منابع بالقوه تولید انرژی | ۷ |
| ۸-۱ | پیش بینی وضعیت انرژی زیست توده تا سال ۲۰۴۰ | ۹ |
| ۸-۱-۱ | سناریو سیاست‌های پیشرفته بین المللی (API) | ۹ |
| ۹-۱ | پیش بینی DLR برای ایران | ۱۱ |
| ۱۰-۱ | حوزه‌ی تحقیق | ۱۱ |
| ۱۱-۱ | ساختار پایان‌نامه | ۱۲ |

فصل دوم: تاریخچه سیستم‌های گازی‌سازی و شرح عملکرد آن

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| ۱-۲ | مقدمه | ۱۴ |
| ۲-۲ | تاریخچه | ۱۴ |
| ۳-۲ | تحقیقات و دستاوردهای گذشته | ۱۷ |
| ۴-۲ | فرآیند گازی‌سازی | ۱۸ |
| ۵-۲ | مراحل مختلف فرآیند گازی‌سازی | ۱۹ |
| ۱-۵-۲ | پیش گرمایش و خشک شدن | ۲۰ |
| ۲-۵-۲ | پیرولیز | ۲۱ |
| ۳-۵-۲ | احیاء | ۲۵ |
| ۶-۲ | طراحی Gasifier | ۲۶ |
| ۱-۶-۲ | بستر ثابت (fixed beds) | ۲۶ |

فصل سوم: مبانی و مفاهیم و معرفی شبیه سازی

| | | |
|-------|--|----|
| ۳-۱ | مقدمه | ۳۱ |
| ۳-۲ | معرفی مدل | ۳۱ |
| ۳-۳ | ارزش حرارتی بالا (HHV) | ۳۳ |
| ۳-۴ | شیرین سازی گاز سنتز (gas cleanup system) | ۳۶ |
| ۳-۴-۱ | طراحی فرآیندهای شیرین سازی گاز ترش | ۳۶ |
| ۳-۴-۲ | شیرین سازی به وسیله بسترهای جامد | ۳۷ |
| ۳-۵ | توربین گازی Siemens V94.2 | ۳۸ |
| ۳-۵-۱ | چرخه ترمودینامیک توربین ها | ۳۸ |
| ۳-۵-۲ | راندمان توربین گازی | ۴۰ |
| ۳-۵-۳ | بازده جزء به جزء | ۴۱ |
| ۳-۵-۴ | کمپرسور | ۴۱ |
| ۳-۵-۵ | راندمان توربین | ۴۲ |
| ۳-۵-۶ | توان توربین (تولید) | ۴۲ |
| ۳-۶ | جایگاه توربین Siemens V94.2 | ۴۳ |
| ۳-۷ | کاربرد توربین گازی Siemens V94.2 | ۴۳ |
| ۳-۸ | مزایا توربین گازی Siemens V94.2 | ۴۳ |
| ۳-۹ | ویژگی ها توربین Siemens V94.2 | ۴۴ |

فصل چهارم: آنالیز روابط

| | | |
|-----|--|----|
| ۴-۱ | مقدمه | ۴۶ |
| ۴-۲ | خوراک ورودی راکتور گازی ساز | ۴۶ |
| ۴-۳ | انتخاب و تعریف سوخت gasifier | ۴۷ |
| ۴-۴ | آنالیز سوخت ورودی gasifier در نرم افزار | ۴۷ |
| ۴-۵ | انتخاب ورودی های اصلی gasifier | ۴۸ |
| ۴-۶ | پیکربندی gasifier | ۴۹ |
| ۴-۷ | سیستم پاکسازی گاز سنتز (gascleanup system) | ۴۹ |
| ۴-۸ | نتایج مدل سازی | ۵۰ |

| | | |
|--------|--|----|
| ۹-۴ | تأثیر رطوبت | ۶۵ |
| ۱۰-۴ | شبیه‌سازی سیکل توربین گازی | ۷۹ |
| ۱-۱۰-۴ | انتخاب شکل بندی عمومی نیروگاه | ۸۰ |
| ۲-۱۰-۴ | انتخاب چند فشاره بودن بویلر بازیاب | ۸۱ |
| ۳-۱۰-۴ | انتخاب فشار و دمای بخار | ۸۱ |
| ۴-۱۰-۴ | ورودی‌های HRSG (دمای pinch & Approach) | ۸۲ |
| ۵-۱۰-۴ | تعیین سوخت مورد استفاده در توربین گازی | ۸۲ |
| ۱۱-۴ | آنالیز سوخت ورودی به توربین در نرم افزار | ۸۳ |

فصل پنجم: نتایج تحقیق

| | | |
|-----|--|----|
| ۱-۵ | مقدمه | ۸۵ |
| ۲-۵ | نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین simians v92-4 | ۹۷ |

فصل ششم: نتایج و پیشنهادها

| | | |
|-----|------------|-----|
| ۱-۶ | نتایج | ۱۰۱ |
| ۲-۶ | پیشنهادهای | ۱۰۲ |
| | منابع | ۱۰۳ |

فهرست جداول

| عنوان | صفحه |
|---|------|
| جدول ۱-۱ رشد سالانه زیست توده تا سال ۲۰۴۰..... | ۱۰ |
| جدول ۲-۱ سهم انرژی‌های نو از تامین انرژی جهان مطابق سناریوی AIP (۹)..... | ۱۰ |
| جدول ۱-۴ ترکیبات شیمیایی زباله شهری تهران..... | ۴۶ |
| جدول ۲-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۲ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۱ |
| جدول ۳-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۳ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۲ |
| جدول ۴-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۴ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۳ |
| جدول ۵-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۵ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۴ |
| جدول ۶-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۶ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۵ |
| جدول ۷-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۷ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۶ |
| جدول ۸-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۸ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۷ |
| جدول ۹-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۹ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۸ |
| جدول ۱۰-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۱ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۵۹ |
| جدول ۱۱-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۱ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور..... | ۶۰ |
| جدول ۱۲-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۲ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور ... | ۶۱ |
| جدول ۱۳-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۳ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور ... | ۶۲ |
| جدول ۱۴-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۴ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور ... | ۶۳ |
| جدول ۱۵-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۵ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور ... | ۶۴ |
| جدول ۱۶-۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۵٪..... | ۶۵ |
| جدول ۱۷-۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۵٪..... | ۶۶ |
| جدول ۱۸-۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۰٪..... | ۶۷ |
| جدول ۱۹-۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۰٪..... | ۶۸ |
| جدول ۲۰-۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۵٪..... | ۶۹ |

| | |
|---|----|
| جدول ۴-۲۱ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۵٪ | ۷۰ |
| جدول ۴-۲۲ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۰٪ | ۷۱ |
| جدول ۴-۲۳ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۵٪ | ۷۲ |
| جدول ۴-۲۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۵٪ | ۷۳ |
| جدول ۴-۲۵ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۵٪ | ۷۴ |
| جدول ۴-۲۶ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۰٪ | ۷۵ |
| جدول ۴-۲۷ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۰٪ | ۷۶ |
| جدول ۴-۲۸ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۵٪ | ۷۷ |
| جدول ۴-۲۹ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۵٪ | ۷۸ |
| جدول ۴-۳۰ اطلاعات توربین | ۸۱ |
| جدول ۵-۱ پارامترهای مربوط توربین گازی | ۹۷ |
| جدول ۵-۲ اطلاعات مربوط به تولید توان توربین | ۹۸ |

فهرست شکل‌ها

| عنوان | صفحه |
|---|------|
| شکل ۱-۱ مقایسه هزینه سرمایه گذاری انواع منابع انرژی | ۳ |
| شکل ۲-۱ تولید برق اتحادیه اروپا | ۷ |
| شکل ۳-۱ تولید حرارت اتحادیه اروپا | ۸ |
| شکل ۴-۱ تولید برق در سال ۲۰۰۸ از منابع انرژی تجدید پذیر، شکست‌های مختلف منابع انرژی | ۸ |
| شکل ۵-۱ تولید حرارت در سال ۲۰۰۸ از منابع انرژی تجدید پذیر، شکست‌های مختلف منابع انرژی | ۹ |
| شکل ۶-۱ سناریو سیاست‌های پویا جاری (DCP) | ۱۱ |
| شکل ۱-۲ تاریخچه گازی‌سازی | ۱۵ |
| شکل ۲-۲ فرآیند گازی‌سازی | ۲۰ |
| شکل ۳-۲ فرآیند تجزیه مولکول‌های هیدروکربنی بزرگ به مولکول‌های کوچکتر در طی پیرولیز | ۲۲ |
| شکل ۴-۲ تاثیر دماهای مختلف پیرولیز بر روی تولید گازهای مختلف | ۲۳ |
| شکل ۵-۲ اثر نرخ حرارت دهی بر پیرولیز | ۲۴ |
| شکل ۶-۲ اثر زمان ماند بر پیرولیز | ۲۵ |
| شکل ۷-۲ راکتور با جریان صعودی | ۲۷ |
| شکل ۸-۲ راکتور جریان نزولی | ۲۸ |
| شکل ۹-۲ راکتور Twin-fire gas producer | ۲۸ |
| شکل ۱۰-۲ راکتور جریان عرضی | ۲۹ |
| شکل ۱-۳ واحدهای مختلف در تعادل ترمودینامیکی گازی ساز | ۳۲ |
| شکل ۲-۳ تصویر مدل تعادلی شامل gasifier سیستم بخار دهی و سیستم هوا دهی | ۳۵ |
| شکل ۳-۳ سیستم شیرین‌سازی گاز سنتز (gas cleanup system) | ۳۸ |

| | |
|--|----|
| شکل ۳-۴ نمودار فشار دمای (t_p) توربین ها..... | ۳۸ |
| شکل ۳-۵ نمودار فشار حجم توربین ها..... | ۳۹ |
| شکل ۳-۶ جایگاه توربین گازی زیمنس..... | ۴۳ |
| شکل ۴-۱ سوخت انتخابی به gasifier..... | ۴۷ |
| شکل ۴-۲ آنالیز سوخت ورودی gasifier..... | ۴۸ |
| شکل ۴-۳ ورودی های مختلف گازی ساز..... | ۴۸ |
| شکل ۴-۴ پیکر بندی گازی ساز..... | ۴۹ |
| شکل ۴-۵ سیستم پاک سازی گاز سنتز..... | ۵۰ |
| شکل ۴-۶ شرایط سایت انتخابی..... | ۷۹ |
| شکل ۴-۷ توربین انتخابی در نرم افزار..... | ۸۰ |
| شکل ۴-۸ تعریف شوخت حاصل از گازی سازی به نرم افزار Thermo Flow..... | ۸۳ |
| شکل ۴-۹ آنالیز سوخت ورودی توربین..... | ۸۳ |
| شکل ۵-۱ جدول خروجی های نرم افزار..... | ۹۸ |

فهرست نمودارها

| عنوان | صفحه |
|---|------|
| نمودار ۱-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید منواکسید کربن .. | ۸۶ |
| نمودار ۲-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید دی اکسید کربن. | ۸۷ |
| نمودار ۳-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید متان | ۸۸ |
| نمودار ۴-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید هیدروژن | ۸۹ |
| نمودار ۵-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید هیدروژن | ۹۰ |
| نمودار ۶-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در ارزش حرارتی گاز تولیدی | ۹۱ |
| نمودار ۷-۵ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید منواکسید کربن | ۹۲ |
| نمودار ۸-۵ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید دی اکسید کربن | ۹۳ |
| نمودار ۹-۵ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید متان | ۹۴ |
| نمودار ۱۰-۵ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید آب در فاز بخار | ۹۵ |
| نمودار ۱۱-۵ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید آب در فاز بخار | ۹۶ |
| نمودار ۱۲-۵ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در ارزش حرارتی گاز تولیدی | ۹۷ |
| نمودار ۱۳-۵ توان تولیدی توربین | ۹۹ |

فهرست علائم و اختصارات

| | |
|----------------|-----------------------------------|
| W | کار |
| K | دمای کلوین |
| kg/sec | کیلوگرم بر ثانیه |
| percent | درصد |
| KW | کیلو وات |
| kJ/kg | کیلوژول بر کیلو |
| Hr | ساعت |
| HP | اسب بخار |
| Kj | کیلوژول |
| Eff | راندمان |
| h_f | آنتالپی احتراق |
| h_{fb} | آنتالپی استاندارد تشکیل زیست توده |
| h_b | آنتالپی خالص زیست توده |
| η_{cG} | ارزش حرارتی گاز |
| ER | نسبت تعادلی |
| h_{cher} | آنتالپی char |
| h_{tar} | آنتالپی Tar |
| η_c | بازده تبدیل کربن |
| η_t | راندمان حرارتی توربین |
| T | دما |
| <i>TIT</i> | دمای ورودی توربین |
| °F | فارنهایت |
| P | فشار |
| C | سرعت |
| kJ/kg | کیلو زول بر کیلو گرم |
| R_c | نرخ فشار کمپرسور |
| η | بازده |

| | |
|----------------|-----------------------------------|
| C_p | ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت |
| C_r | گرمای ویژه در حجم ثابت |
| Ma/Mf ratio | نسبت جرمی هوا به سوخت |
| Mw/Mf ratio | نسبت جرمی رطوبت به سوخت |
| char | نیم سوز |
| tar | قیر |
| fixed beds | بستر ثابت |
| fluidized beds | بستر سیال |
| f | Fuel |
| b | biomass |
| a | air |
| w | water |
| CHP | combined heat and power |
| EREC | European Renewable Energy Council |
| API | American Petroleum Institute |
| LHV | Lower Heating Value |
| ACC | Air Cooled Condenser |
| HHV | Higher Heating Value |
| GCS | Gas cleanup system |
| RPM | Revolutions Per Minute |
| PR | Pressure Ratio |
| TET | Turbine Inlet Temperature |
| HRSG | Heat Recovery Steam Generator |
| kWe | Kilowatts electric |
| H.R. | Heat Rate |

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

بشریت چندین هزار سال با کم ترین اثر گذاری بر روی کره‌ی زمین زندگی کرد. حتی پنج قرن پیش در زمان وقوع رنسانس در اروپا، جهان هنوز جمعیت کمی داشت. از آن زمان تا کنون جمعیت جهان بر اثر انقلاب‌های پیش آمده در زمینه کشاورزی، صنعت و دارو رشد شتابزده‌ای پیدا کرده و حدود ۱۵ برابر گردیده است.

از شش میلیارد جمعیت امروز جهان، تنها چند میلیون نفر آن در سطوح بسیار بالایی از استانداردها زندگی می‌کنند. و از زندگی خود لذت می‌برند. اما یک سوم از انسان‌ها به برق دسترسی نداشته و یک سوم دیگر نیز دسترسی محدودی به آن دارند. جمعیت‌های زیادی نیز در فقر ملات باری زندگی می‌کنند. بیش از یک میلیارد نفر آب پاکیزه در اختیار ندارند و دو میلیارد و چهارصد میلیون نفر از سیستم مناسب تخلیه‌ی فاضلاب محرومند. و همه روزه ۴۰ هزار نفر (یعنی هر دقیقه ۲۵ نفر) بر اثر بیماری می‌میرند. (۱)

برای کاهش مصیبت‌های بشر نه تنها توسعه‌ی اقتصادی ضروری است بلکه ایجاد شرایط لازم نیز برای تثبیت جمعیت جهان نیز لازم است. طی ۵۰ سال آینده زمانی که جمعیت جهان به ۹ میلیارد نفر رسید، نیازهای برآورده نشده امروزه بشری به شدت چند برابر خواهد شد. امروزه تلاش روبه رشد برای رفع این نیازها در اکثر کشورهای در حال توسعه جهان، تقاضای بسیار زیادی برای استفاده از انرژی ایجاد کرده است. به طوری که تا سال ۲۰۵۰ مصرف جهانی انرژی دو برابر خواهد شد.

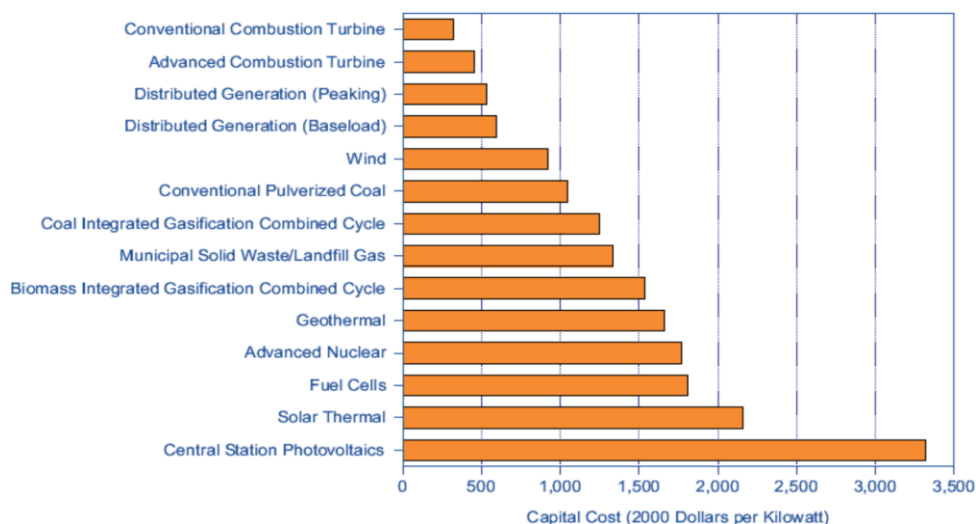
محدود بودن این منابع تلاش‌های فراوانی در جهت دستیابی به منابع انرژی جدید و نیز استفاده از منابع موجود به طور بهینه صورت می‌پذیرد و با پیشرفت‌هایی که در زمینه تکنیک‌های تولید انرژی پاک کسب گردیده افق امید بخشی در این راستا پیشرو می‌باشد. در این فصل تعاریف مربوط به زیست توده، منابع زیست توده و اقدامات صورت گرفته در زمینه استحصال انرژی از زیست توده در سایر کشورها به طور کامل بیان شده است.

۲-۱ بیان مسأله

افزایش روبه رشد مصرف انرژی در جهان به خصوص کشورهای در حال توسعه، بحران‌های اقتصادی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی پاک و منابع تجدیدپذیر انرژی سوق می‌دهد. زیست توده (Biomass) یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که علاوه بر قابلیت جایگزینی با سوخت‌های فسیلی، باعث کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی است. (۲)

بیشترین منابع زیست توده در کشورهای در حال توسعه‌ی آسیا و آفریقا یافت شده‌اند که عمدتاً شامل پسماندهای کشاورزی، چوبی، حیوانی و پسماند شهری می‌باشند. البته در سال‌های اخیر مصرف زیست توده در کشورهای توسعه یافته و اروپایی نیز گسترش یافته است. (۳). کشور سوئد سرمایه‌گذاری وسیعی در بخش زیست توده داشته است. بسیاری از کشورهای آمریکایی لاتین نظیر برزیل بیش از ۶۰ درصد از سوخت مورد نیاز خود را از منابع زیست توده تأمین می‌کند. در ایالات میثیگان آمریکا، مواد زایل حاصل از برش درختان جنگلی، حدود یک درصد از انرژی برق این ایالت را تأمین می‌کند. (۳۰۰ مگاوات). بیوماس بالغ بر ۳۵ درصد مصرف انرژی کشورهای در حال توسعه را تشکیل می‌دهد و این سهم در کشورهای صنعتی تنها ۳ درصد است.

در شکل (۱-۱) هزینه سرمایه‌گذاری بخش انرژی با توجه به منابع آن نشان داده شده است (سایت سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)).



شکل ۱-۱ مقایسه هزینه سرمایه‌گذاری انواع منابع انرژی

(سایت سازمان انرژی‌های نو ایران «سانا»)

۳-۱ اهمیت و ضرورت تحقیق

توسعه و ارتقاء در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر موجب، غنی‌سازی و توسعه تکنولوژی‌ها به منظور به کارگیری انرژی تجدیدپذیر پایدار است. انرژی تجدیدپذیر قادر خواهد بود برای کشورهای در حال توسعه و مناطق روستایی، فرصت‌ها و امکانات فوق العاده فراهم نماید. (۲)

در این میان فرآیند گازی‌سازی که شامل تبدیل ترموشیمیایی به گاز می‌باشد، گزینه ای است که در دهه‌های اخیر توجه ویژه ای را از سوی کشورهای جهان به خود معطوف داشته و توسعه و کاربرد چشمگیری داشته است. گاز سنتز بدست آمده از زیست توده در این فناوری می‌تواند هم برای تولید انرژی گرمایی و هم برای تولید برق بکار رود و دستگاههای بسیار متنوعی قابلیت استفاده از این گاز را دارند از این رو تحقیق در این زمینه می‌تواند باعث عدم وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی گردد. (۲)

۴-۱ اهداف تحقیق

- آن چه در این پایان نامه به عنوان هدف و ویژگی مد نظر بوده، به شرح زیر می‌باشد:
- در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی تعادلی به پیش بینی رفتار یک گازی ساز پایین سو با خوراک زباله شهری پرداخته شده که این مدل‌سازی جهت آنالیز پارامترهای مختلف به ما کمک نموده در حالی که خرید، ساخت و آزمایش عملی یک گازی ساز واقعی جهت آنالیز پارامترها بسیار هزینه بر و زمان بر است.
 - مطابق آمار شهرداری تهران، سالانه هزینه گزافی صرف جمع‌آوری زباله از سطح شهر تهران می‌شود که بایستی هزینه پردازش، حمل و نقل و دفع این مواد نیز به آن اضافه گردد. بر اساس برآوردهای به عمل آمده در سال ۱۳۸۹، هر کیلوگرم پسماند برای شهرداری تهران با احتساب هزینه‌های جمع‌آوری و دفن، هزینه‌ای معادل ۳۲۰ ریال در بر دارد که این هزینه در سال ۹۵ برای هر کیلو پسماند به حدود ۱۰۰۰ ریال رسیده است. با یک حساب ساده می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به این که روزانه در شهر تهران حدود ۷۵۰۰ تن زباله شهری تولید و به مکانی در جنوب شهر تهران به نام کهریزک منتقل می‌شود، در مجموع روزانه ۷/۵ میلیارد ریال توسط شهرداری تهران

- هزینه می‌شود. لذا گازی‌سازی زباله می‌تواند یک راه‌حل مناسب برای صرفه‌جویی در بخشی از هزینه‌ها باشد. میزان این صرفه‌جویی براساس خصوصیات و ظرفیت نیروگاه و میزان سرمایه‌گذاری در این بخش می‌تواند متفاوت باشد. از طرفی اجرای این پروژه می‌تواند از نظر زیست‌محیطی بسیار مفید باشد و به جای دفن زباله و رها شدن گاز متان تولید شده به جو، می‌توان از زباله در جهت تولید انرژی پاک بهره گرفت. (۴)
- به دلیل موثر بودن پارامتر رطوبت و هوای ورودی بر عملکرد گازی‌ساز، اثر این دو عامل بر عملکرد و ترکیب گاز خروجی از گازی‌سازی بررسی شده است. (۵)
 - این پژوهش مقدمه‌ای برای طراحی، ایجاد و بهینه‌سازی واحدهای گازی‌سازی زیست توده در کشور با هدف تولید توان خواهد بود.

۵-۱ روش و مراحل انجام تحقیق

- در این مطالعه چند مرحله برای حل این مسئله مذکور در نظر گرفته شده است که در ادامه به تشریح آنها پرداخته خواهد شد:
- مرحله ۱: مطالعه و بررسی در مورد فرایند گازی‌سازی و بررسی کارهای پیشین انجام شده
 - مرحله ۲: شبیه‌سازی راکتور گازی‌سازی و سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP)
 - مرحله ۳: تعیین عملکرد گازی‌ساز نسبت به دبی‌های مختلف هوا و بخار ورودی به راکتور بستر ثابت برای زباله خشک
 - مرحله ۴: تعیین عملکرد گازی‌ساز نسبت به دبی‌های مختلف تزریقی هوا و به زباله مرطوب
 - مرحله ۵: تعیین عملکرد توربین گازی در استفاده از گاز قابل اشتعال حاصل از گازی‌سازی به جای گاز طبیعی

۶-۱ منابع زیست توده

- تقسیم بندی‌ها و دسته بندی‌های مختلفی نیز برای منابع زیست توده وجود دارد. که ما در این جا به سه دسته بندی ساده و توضیحی مختصر درباره هر کدام از آن‌ها می‌پردازیم.

۱- یک دسته بندی ساده، دسته بندی ارائه شده در مطالعه پتانسیل زیست توده در وزارت نیرو (۱۳۷۹-۸۰) می باشد. مطابق نتایج مطالعه‌ی مذکور منابع زیست توده به شکل زیر دسته بندی شده اند:

- زایدات و ضایعات کشاورزی و جنگلی
 - فضولات دامی
 - زباله‌های شهری
 - فاضلاب‌های شهری
 - فاضلاب‌ها و پسماندهای صنعتی (عمدتا صنایع غذایی).
- ۲- دسته بندی دیگر توسط وزارت انرژی آمریکا در کتاب داده‌های انرژی زیست توده^۱ ارائه شده است. در کتاب مذکور منابع زیست توده به سه دسته مواد اولیه، ثانویه و ثالثیه به شرح زیر دسته بندی شده است:
- مواد اولیه: کلیه گیاهان زمینی که از فتوسنتز به عمل آیند و در خشکی‌ها و آب‌ها وجود دارند.
 - مواد ثانویه: زایدات، ضایعات و محصولات جنبی صنایع غذایی، چوبی جنگلی و فضولات دامی را شامل می شود.
 - مواد ثالثیه: کلیه ضایعات، زباله‌ها و زایدات پس از مصرف نظیر چربی‌ها، روغن‌ها، زباله‌های جامد شهری، نخاله‌های چوبی محیط‌های شهری، زباله‌های بسته بندی، فاضلاب‌ها و گاز دفنگاه را شامل می شود.
- ۳- همچنین آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر آمریکا (NREL) در سال ۲۰۰۵ در راستای مطالعه ای که جهت تعیین پتانسیل از منابع زیست توده انجام داده است. دسته بندی زیر را انجام داده است:

- ضایعات کشاورزی شامل ضایعات زارعی و متان حاصل از فضولات دامی
- ضایعات چوبی شامل ضایعات جنگلی، صنایع چوبی و ضایعات چوبی شهری (سرشاخه‌ها و نخاله‌های چوبی)
- پسماندهای شهری شامل گاز دفنگاه، گاز فاضلاب
- گیاهان انرژی زا

^۱ . Biomass data book

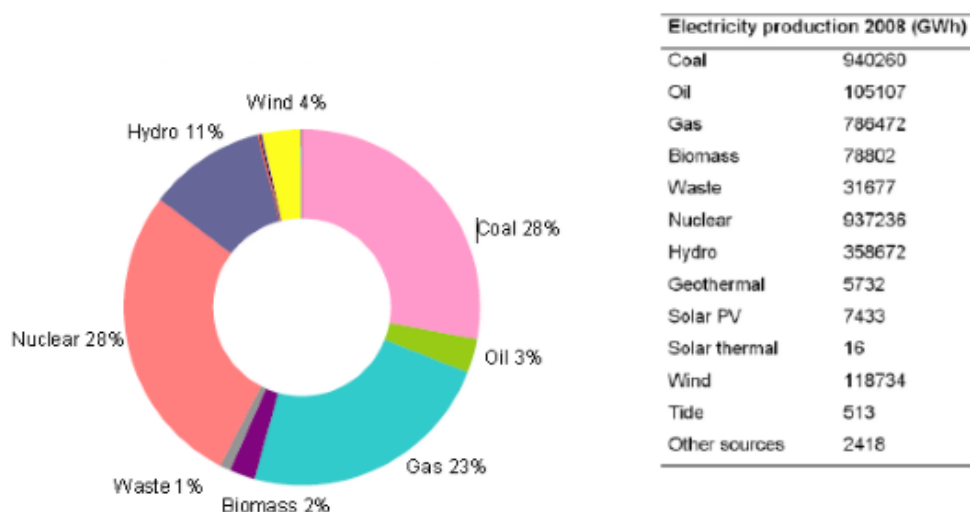
۷-۱ زیست توده منابع بالقوه تولید انرژی

امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی مورد نیاز دنیا سهم کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارند این در حالیست که رویکردهای جدید مهندسين انرژی به سمت استفاده هر چه بیشتر از این انرژی‌ها می‌باشد. در ترازنامه تصویب شده اتحادیه اروپا مصوب شده که انرژی‌های تجدید پذیر باید تا سال ۲۰۲۰ حداقل ۲۰٪ از انرژی مصرفی اتحادیه اروپا را تأمین کند این در حالیست که در سال ۲۰۰۸ تنها ۸/۵٪ از انرژی مورد نیاز اتحادیه اروپا از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شده است. (۶)

با تغییر شرایط اقلیمی، اتحادیه اروپا در مارس ۲۰۰۸ طرحی را بین کشورهای عضو به تصویب رساند که این طرح شامل طیف گسترده‌ای از اقدامات برای جلوگیری از تغییر آب و هوا بود. این طرح ۲۰ هدف دارد که در ۴ قالب کلی قرار می‌گیرد که به شرح زیر است:

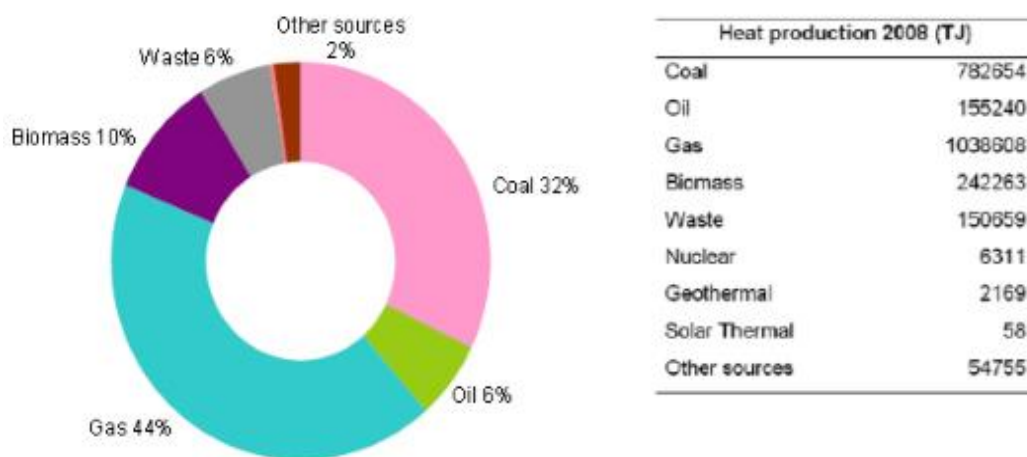
۱. کاهش ۲۰٪ تولید گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۲۰
۲. صرف جویی ۲۰٪ مصرف انرژی تا سال ۲۰۲۰
۳. استفاده ۲۰٪ از انرژی‌ها تجدید پذیر در مصرف کل انرژی اتحادیه اروپا تا سال ۲۰۲۰
۴. استفاده ۱۰٪ از سوخت‌های زیست توده برای مصارف حمل و نقل تا سال ۲۰۲۰

شکل‌های (۱-۲) و (۱-۳) تجزیه و تحلیل سهم منابع تولید مختلف را در تولید برق و حرارت اتحادیه اروپا را در سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. (۶)



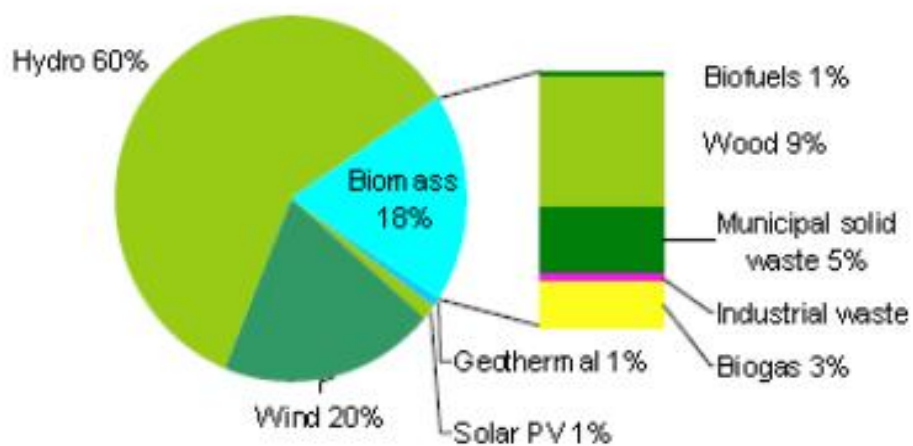
شکل ۲-۱ تولید برق اتحادیه اروپا

(source: International Energy Agency www.iea.org)

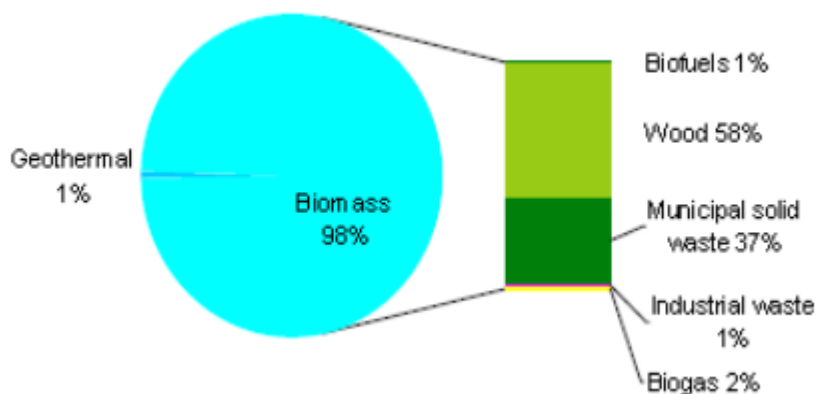


شکل ۳-۱ تولید حرارت اتحادیه اروپا
(source: International Energy Agency www.iea.org)

در میان منابع تجدیدپذیر داده شده در شکل (۴-۱) و شکل (۵-۱) می‌توان دید که چگونه زیست توده سهم مهمی در تولید برق و حرارت (سال ۲۰۰۸)



شکل ۴-۱ تولید برق در سال ۲۰۰۸ از منابع انرژی تجدید پذیر، شکست‌های مختلف منابع انرژی
(source: International Energy Agency www.iea.org)



شکل ۵-۱ تولید حرارت در سال ۲۰۰۸ از منابع انرژی تجدید پذیر، شکست‌های مختلف منابع انرژی
(source: International Energy Agency www.ea.org)

۸-۱ پیش‌بینی وضعیت انرژی زیست توده تا سال ۲۰۴۰

بر اساس سناریوهای سیاست‌های پیشرفته بین‌المللی و سیاست‌های جاری که توسط انجمن انرژی‌های نو جامعه اروپا (European Renewable Energy Council) EREC انتشار یافته، در خوش‌بینانه‌ترین حالت نصف انرژی جهانی در سال ۲۰۴۰ از انرژی‌های نو قابل تأمین است و این نسبت در بدبینانه‌ترین حالت کمتر از ۲۷ درصد نخواهد بود. از قرائن چنین بر می‌آید که منابع انرژی‌های تجدیدپذیر نقش قابل توجهی در آینده تأمین انرژی جهان بازی خواهند کرد. در دراز مدت، انرژی‌های تجدیدپذیر نقش قابل توجهی در آینده تأمین انرژی جهان بازی خواهند کرد. در دراز مدت، انرژی‌های تجدیدپذیر نقش غالب را در سیستم تأمین انرژی خواهند داشت. دلیل این امر ساده و حتمی است: این جا هیچ گزینه دیگری برای بشر مطرح نمی‌باشد. نوع بشر نمی‌تواند بی‌حد و اندازه منابع پایان پذیر و محدود را مصرف نماید. در این بخش نتایج پیش‌بینی‌ها برای زیست توده ارائه می‌شود: (۷)

۸-۱-۱ سناریوی سیاست‌های پیشرفته بین‌المللی (API)

زیست توده، منبع انرژی تجدیدپذیر با بالاترین میزان استفاده در حال و آینده نرخ رشد در طول پیش‌بینی نسبتاً کم است. اما بدلیل استفاده‌های مختلف گرمایی، برقی و سوختی روبه‌هم رفته مهم‌ترین منبع تأمین انرژی آینده خواهد بود. برای این منبع کاربردهای فراوانی در سیستم‌های غیر متمرکز کوچک بعد از سال ۲۰۱۰ فرض شده است. (۷)

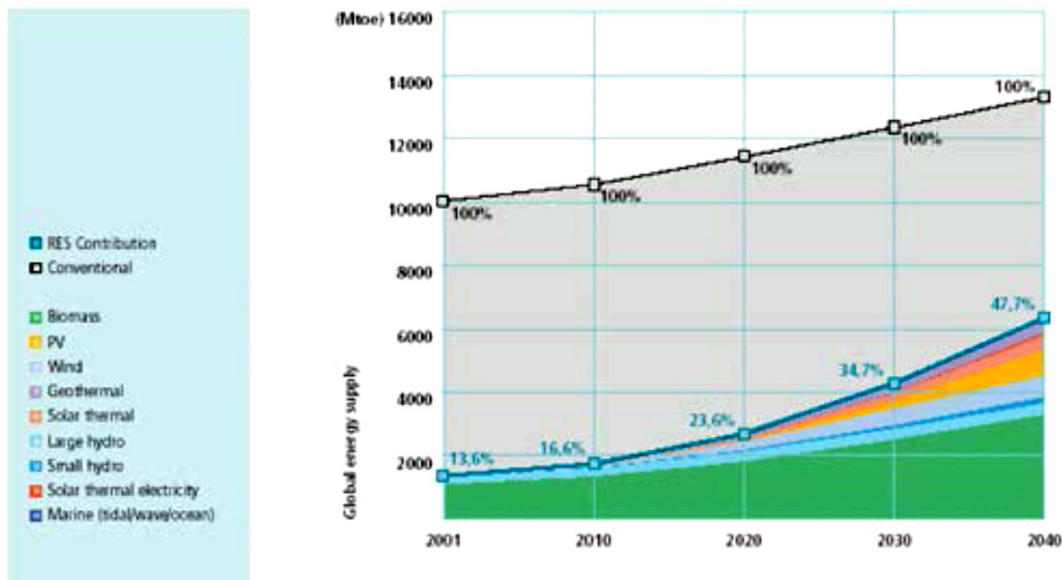
جدول ۱-۱ رشد سالانه زیست توده تا سال ۲۰۴۰

| سال | ۲۰۰۱-۲۰۱۰ | ۲۰۱۰-۲۰۲۰ | ۲۰۲۰-۲۰۳۰ | ۲۰۳۰-۲۰۴۰ |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| نرخ رشد مطابق سناریو | ۲,۲٪ | ۳,۱٪ | ۳,۳٪ | ۲,۸٪ |

در جدول زیر نیز بر اساس سناریو سیاست پیشرفته بین المللی نتیجه می شود رشد فناوریهای تجدیدپذیر با هم تا سال ۲۰۴۰ باعث خواهد شد تا نزدیک به ۵۰ درصد مصرف انرژی از تجدیدپذیرها قابل تامین شود و در این میان سهم زیست توده بالاتر از سایر منابع تجدیدپذیر خواهد بود. (۴)

جدول ۲-۱ سهم انرژیهای نو از تامین انرژی جهان مطابق سناریوی AIP (۸)

| | 2001 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
|-----------------------------------|---------|--------|--------|-------|-------|
| Total Consumption in Mtoe (IIASA) | 10038,3 | 10549 | 11425 | 12352 | 13310 |
| Biomass | 1080 | 1313 | 1791 | 2483 | 3271 |
| Large hydro | 222,7 | 266 | 309 | 341 | 358 |
| Small hydro | 9,5 | 19 | 49 | 106 | 189 |
| Wind | 4,7 | 44 | 266 | 542 | 688 |
| PV | 0,2 | 2 | 24 | 221 | 784 |
| Solar thermal | 4,1 | 15 | 66 | 244 | 480 |
| Solar thermal electricity | 0,1 | 0,4 | 3 | 16 | 68 |
| Geothermal | 43,2 | 86 | 186 | 333 | 493 |
| Marine (tidal/wave/ocean) | 0,05 | 0,1 | 0,4 | 3 | 20 |
| Total RES | 1364,5 | 1745,5 | 2694,4 | 4289 | 6351 |
| RES Contribution | 13,6% | 16,6% | 23,6% | 34,7% | 47,7% |



شکل ۱-۶ سناریو سیاست‌های پویا جاری (DCP)

۹-۱ پیش‌بینی DLR برای ایران

موسسه DLR، یک موسسه دولتی در آلمان می‌باشد که نقش قابل توجهی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در آلمان دارد. موسسه‌های مذکور کشورهای جنوب آسیا، خاورمیانه و جنوب شرق اروپا مورد مطالعه قرار داده و پتانسیل منبع، فنی و اقتصادی انواع انرژی‌های تجدیدپذیر را تعیین کرده است. بر اساس مطالعه مذکور برای ایران، کل پتانسیل اقتصادی زیست توده (زایادات کشاورزی و جنگلی و زباله‌های شهری) در سال ۲۰۵۰ به میزان ۷/۷۳ (معادل ۳۳۹۰ mw ظرفیت نیروگاهی) خواهد بود. در این میان پتانسیل اقتصادی تولید برق از زباله‌های شهری در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۲۰، ۲۰۳۰، ۲۰۴۰، ۲۰۵۰ به ترتیب ۷/۴۴، ۱۱/۴۶، ۱۳/۰۳ و ۱۴/۶۹ و ۱۵/۹۴ تراوات ساعت در سال که به ترتیب معادل ۱۸۵۵، ۲۰۹۰، ۱۶۳۰، ۱۳۳۰، ۱۰۶۰ و ۲۲۶۰ مگاوات ظرفیت معادل نیروگاهی می‌باشد. (۷)

۱۰-۱ حوزه‌ی تحقیق

حوزه‌ی تحقیق در مورد ایجاد گاز قابل اشتعال از پسماند شهری است که توسط شهرداری‌ها و یا شرکت‌های صنعتی در جهت تولید برق برای قسمت‌های مختلف مورد نیاز و یا فروش برق تولیدی به شبکه برق کشور مورد استفاده می‌باشد. عمده اقدامات صورت گرفته در جهت تولید گاز قابل اشتعال در کشور به صورت روش‌های سنتی و استفاده از مخزن

تخمیر(هاضم) بوده است اما در این تحقیق یکی از جدید ترین روش های تولید گاز قابل اشتعال با کارایی بالا مورد بررسی می گیرد.

۱-۱۱ ساختار پایان نامه

ساختار پایان نامه حاضر بر اساس ترتیب معمول تهیه شده است؛ بدین ترتیب که در این فصل، فصل اول، کلیات تحقیق، روش و مراحل آن ارائه شده، در فصل بعدی مبانی نظری تحقیق آورده شده است و پیشینه نظری مسائل مطرح در حوزه های مورد نظر به تفصیل بیان شده اند، مباحث مربوط به تئوری گازی سازی در فصل سوم مطرح شده است. شبیه سازی راکتورگازی سازی و تحلیل حساسیت نتایج آنها در فصل چهارم ارائه شده است. و تحلیل حساسیت نتایج آن در فصل پنجم ارائه شده است. فصل چهارم و پنجم حاوی تمام آن چیزی است که در طول تحقیق به آن ها دست یافتیم؛ و در انتها نتیجه گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آینده در انتهای تحقیق آورده شده اند.

فصل دوم

تاریخچه سیستم‌های گازی سازی

و شرح عملکرد آن

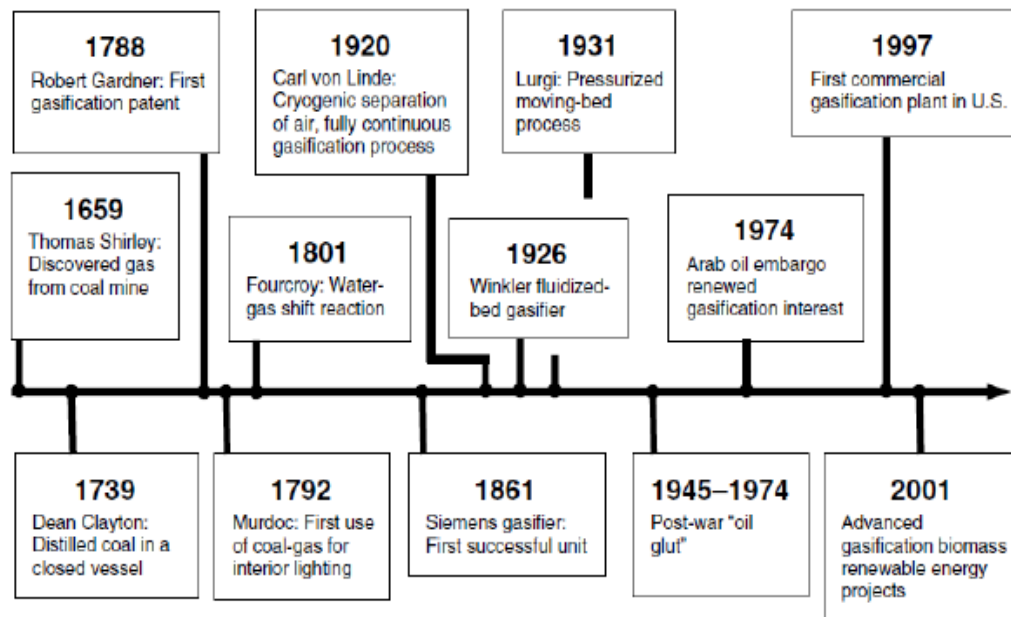
۲-۱ مقدمه

همان گونه که در فصل اول بیان شد امروزه بیوماس به عنوان بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، در تأمین انرژی اولیه جهان شناخته می شود؛ حدود ۸/۲ درصد از کل ۴۷۴ اگزاژول (۱۰ به توان ۱۸)، انرژی اولیه مصرفی جهان در سال ۲۰۰۸ به کمک منابع انرژی تجدیدپذیر فراهم شده است. منابع زیست توده براساس همین آمارگیری و برآورد در سال ۲۰۰۸ حدود ۴ درصد از کل انرژی اولیه جهان را فراهم کرده است (۱۰). یکی از انواع ترکیبات زیست توده، زباله های شهری یا پسماند می باشد. پسماند به مواد جامد، مایع و گاز (غیر از فاضلاب) گفته می شود که به طور مستقیم یا غیرمستقیم حاصل از فعالیت انسان بوده و از نظر تولیدکننده زائد تلقی می شود (۷). از متداول ترین روش های استحصال انرژی از زیست توده روش گازی سازی می باشد. در این فصل در ابتدا به مروری بر تاریخچه فرایند گازی سازی می پردازیم سپس روش گازی سازی و انواع راکتورهای موجود به طور کامل توضیح داده می شود.

۲-۲ تاریخچه

اولین سوختی که توسط انسان جهت رفع نیازش به کار برده شد چوب بود. امروزه نیز این سوخت توسط میلیون ها انسان در سراسر جهان جهت پخش غذا و گرمایش منازل به کار برده می شود و همچنین به صورت زغال چوب در فرآیندهای صنعتی به کار می رود. اما کاهش منابع سوخت چوب باعث گردید تا استفاده از زغال سنگ به عنوان سوخت مرسوم گردد. تولید زغال سنگ از قرن ۱۸ رواج یافت که البته تنها کاربرد صنعتی داشت و در صنعت

ذوب آهن به کار گرفته شد تا کک را جایگزین زغال چوب نماید. در پایان قرن هجدهم تولیدات گازی از زغال سنگ طی فرآیند پیرولیز در ظرفیت‌های بالا رواج یافت. تولیدات گازی در سال ۱۸۱۲ توسط شرکت گاز لندن (tight and coke company) آغاز شد و پس از آن به صورت یک فرآیند مرسوم تجاری درآمد. (۹)



شکل ۱-۲ تاریخچه گازی سازی (۹)

در سال ۱۹۷۸، ویلیام مردوچ^۱ از گاز شهری (coal-gas) جهت روشنایی ساختمان اصلی shoos foundry استفاده نمود و در سال ۱۸۰۲ او روشنایی ناشی از این گاز را در معرض نمایش عموم قرار داد که جمعیت محلی آن زمان را متحیر ساخت. فردریچ وینزن^۲ نیز در آلمان در سال ۱۸۰۴ چراغ‌های گازی زغال سنگ را اختراع نمود. به طور کلی تا سال ۱۸۲۳ استفاده از گاز جهت روشنایی در تعداد زیادی از شهرهای انگلستان رواج یافت. در آن زمان قیمت چراغ‌های گازی ۷۵٪ کمتر از چراغ‌های نفتی و شمع بود و این امر موجب شتاب بیشتری به تحول و گسترش چراغ‌های گازی بخشید. در سال ۱۸۵۹ چراغ‌های گازی در سرتاسر انگلستان گسترش یافت. همچنین در سال ۱۸۱۶ این چراغ‌ها در آمریکا نیز رایج شد. (۱۰)

^۱. william mardoch

^۲. Friedrich winzen

به طور کلی تاریخچه فرایند گازی‌سازی را می‌توان به چهار مرحله تقسیم نمود:

مرحله اول (۱۸۵۰-۱۹۴۰): در طی این دوره گاز تولیدی از زغال سنگ عمدتاً جهت تأمین روشنایی منازل و خیابان‌ها همچنین گرمایش استفاده می‌شد. با اختراع لامپ‌های الکتریکی تقاضای لامپ‌های گازی رو به کاهش نهاد اما همچنان تقاضا جهت گرمایش با استفاده از گاز شهری ادامه داشت. با کشف گاز طبیعی نیاز به گازی‌سازی زغال سنگ یا زیست توده کاهش یافت. تمام تکنولوژی‌های گازی‌سازی تجاری بزرگ (گازی ساز بستر سیال وینکлер^۱ در سال ۱۹۲۶، گازی ساز بستر متحرک تحت فشار لیورگی^۲، در سال ۱۹۳۱ و گازی ساز ایترند-فلو^۳ در این دوره شروع به کار کرده (۱۰))

مرحله دوم (۱۹۴۰-۱۹۷۵): در طی این دوره گازی‌سازی به عنوان گاز سنتز در سنتز شیمیایی نفت و دیگر فرایندهای شیمیایی به کار برده شد. طی جنگ جهانی دوم تولید گاز ترکیبی از گازی‌سازی زغال سنگ و زیست توده جهت مصرف در خودروها افزایش یافت و در طی چند سال هزاران گازی ساز جهت تأمین سوخت خودروها ساخته شد. کشف و استخراج مقدار زیاد گاز طبیعی در سال ۱۹۵۰ مانع از پیشرفت گازی‌سازی زغال سنگ و زیست توده شده. اما تولید گاز ترکیبی از گاز طبیعی و بنزین^۴ طی فرایند ریفرمینگ^۵ افزایش پیدا کرد (۱۰)

مرحله سوم (۱۹۷۵-۲۰۰۰): این مرحله پس از بحران نفتی سال ۱۹۷۳ شکل گرفت. در این سال‌ها علاوه بر تولید گاز جهت گرمایش، گازی‌سازی به صورت یک فرایند مرسوم تجاری جهت تولید مواد خام شیمیایی رواج یافت. همچنین موجب تحولی شگرف در ساخت نیروگاه‌های IGCC^۶ شد (۱۰)

مرحله چهارم (۲۰۰۰ به بعد): در این مرحله، تحولات بخش انرژی، افزایش قیمت سوخت، اثر گازهای گلخانه‌ای و افزایش دمای کره زمین سبب گردید تا گازی‌سازی جهت تبدیل زیست توده به سوخت گازی به عنوان یک فرایند همسو با حفاظت محیط زیست پا به عرصه جدیدی گذارد. (۱۰)

^۱. winkler

^۲. lurgi

^۳. entrained-flow

^۴. naphtha

^۵. steam reforming

^۶. Integrated gasification combined cycle

مهم ترین سوخت گازی در اوایل انقلاب صنعتی گاز شهری بود که توسط دو فرایند تولید می شد:

۱. فرایند پیرولیز، فرآیند ناپیوسته تولید گاز از کک با ارزش حرارتی نسبتاً بالا (۲۰۰۰۰-)

$$\left(\frac{kg}{m^3}\right) 2300$$

۲. فرآیند آب-گاز که در آن کک به ترکیبی از گازهای مونوکسیدکربن و هیدروژن تبدیل می گردد. (۹)

۲-۳ تحقیقات و دستاوردهای گذشته

۱. یک نوع مدلسازی با استفاده از تعادل ترمودینامیکی برای گازی سازی بستر سیال با واسطه بخار توسط شاستر و همکارانش (۱۱) صورت گرفت که به پیش بینی ترکیب گاز سنتز خروجی از گازی ساز بستر سیال پرداختند در این تحقیق از زائدات چوب به عنوان خوراک راکتور استفاده شده است.

۲. پلیس و ویلک (۱۲) نیز با استفاده از روش تعادل ترمودینامیکی، یک راکتور بالا سوی با آزمایشگاهی را مدل نمودند و پس از تطابق مدل خود با داده های آزمایش، به بررسی اثر رطوبت و مقدار هوای تعادل روی ترکیب گاز سنتز خروجی پرداختند.

۳. دوتا و جارانگتاماچوت (۱۳) از روش غیر استوکیومتریک برای مدلسازی سه نوع گازی سازی استفاده کردند که به پیش بینی ترکیب گاز خروجی از گازی ساز پرداختند در این مقاله به نحوه تغییر ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی پرداخته شد.

۴. زینال و همکارانش (۱۴) از روش مدلسازی استوکیومتریک برای پیش بینی ترکیب گاز تولیدی بیوماس های مختلفی استفاده نمودند.

۵. پلگرینی (۱۵) و همکارانش با استفاده از یک تحقیق پارامتریک براساس تعادل ترمودینامیکی به بررسی دما و رطوبت روی ترکیب گاز خروجی پرداختند در این تحقیق از باگاس حاصل از نیشکر به عنوان خوراک گازی ساز استفاده شده است

به علت وجود منابع غنی جنگل و کشاورزی در کشورهای توسعه یافته بلاخص حوزه ی اروپا بیشتر مقالات و اقدامات صورت گرفته در زمینه گازی سازی مربوط به زائدات صنایع چوب و کشاورزی می باشد

۲-۴ فرآیند گازی سازی

فرآیند گازی سازی؛ فرآیند تبدیل سوخت جامد به سوخت گازی با ارزش حرارتی بالا می‌باشد. این تکنولوژی شامل پیرولیز، اکسراسیون جزئی و تولید هیدروژن است؛ که کارایی آن به میزان پیرولیز (حرارت دادن خوراک در غیاب اکسیژن)، بستگی دارد. امروزه اهمیت بخش پیرولیز کم رنگ تر شده و قسمت مهم و قابل توجه فرآیند، اکسیداسیون جزئی است که ترکیبات جزئی گازی را تولید می‌کند. این ترکیبات گازی؛ شامل هیدروژن، منوکسید کربن، دی اکسید کربن و متان و برخی ترکیبات جزئی دیگر است. گاه ترکیبی را می‌توان جهت تولید برق در نیروگاه، تولید حرارت، به عنوان ماده اولیه ترکیبات شیمیایی، به عنوان سوخت مایع و یا سوخت گازی نظیر هیدروژن به کار برد. (۹)

در سال‌های اخیر گازی‌سازی پس مانده‌های نفتی سنگین به گاز سنتز^۱ جهت تولید هیدروکربن‌های سبک تر ترویج یافته است. تعدادی از نیروگاه‌های گازی‌سازی به تولید مواد خام شیمیایی از زغال سنگ یا دیگر هیدروکربن‌ها اختصاص یافته اند. (۹)

مزیت این تکنولوژی را به صورت زیر می‌توان برشمرد

۱. ساخت و تولید مواد با ارزش تر جهت تولید برق
۲. قابلیت پالایش پخش گسترده از خوراک شامل: زغال سنگ، نفت سنگین، کک خام، پالایش پس مانده‌های سنگین، فاضلاب و آلودگی‌های هیدروکربنی و پسماندهای شهری
۳. قابلیت حذف آلودگی‌های ناشی از خوراک و تولید سوخت گازی پاک
۴. قابلیت تبدیل ضایعات و یا مواد کم ارزش به تولیدات با ارزش
۵. قابلیت کاهش و یا حذف آلودگی و ضایعات زیست محیطی بی ارزش، این تکنولوژی می‌تواند مواد زاید و آلوده کننده را به سوخت و مواد اولیه بی خطر تبدیل می‌شود.
۶. امکان استفاده در مناطق دور از مراکز تولید برق (۱۶)

از نقاط ضعف و مشکلات بهره‌برداری از تکنولوژی گازی‌سازی می‌توان به موارد زیر

اشاره نمود

۱. نیاز به خرد کردن و آماده‌سازی زیست توده و همچنین احتمال محدود شده منبع زیست توده در طول زمان و نتیجتاً کاهش عمر بهره‌برداری
۲. نیاز به پالایش گاز تولیدی

^۱. syngas

۳. نیاز به تجهیزات فنی نسبتاً پیچیده

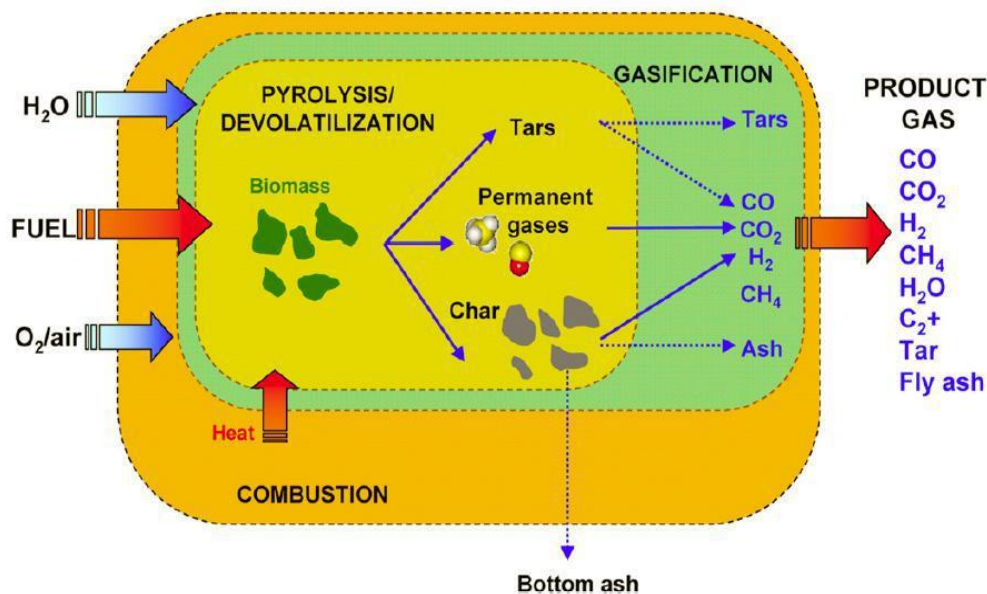
۴. لزوم به کارگیری نیروی انسانی متخصص (۹)

۲-۵ مراحل مختلف فرآیند گازی سازی

گازی سازی تبدیل خوراک جامد یا مایع به سوخت گازی مفید و مناسب یا مواد خام شیمیایی با ارزش حرارتی بالا است که می تواند جهت آزاد نمودن انرژی بسوز و یا به عنوان ماده اولیه در صنعت شیمیایی مورد استفاده قرار گیرند.

گازی سازی و احتراق دو پروسه ترمو شیمیایی نسبتاً نزدیک به هم می باشند که یک تفاوت مهم دارند: گازی سازی انرژی را در غالب پیوندهای شیمیایی گاز تولیدی نگه می دارد در حالی که در احتراق پیوندهای شیمیایی شکسته می شوند تا انرژی آزاد گردد. در گازی سازی هیدروژن به محصول گازی اضافه و کربن آزاد می شود تا نسبت (H/C) در گاز تولیدی افزایش یابد، در حالی که در احتراق هیدروژن و کربن اکسید می شوند تا آب و دی اکسید کربن تولید شود. یک فرایند گازی سازی معمولی شامل مراحل زیر است (۱۰):

- خشک کردن
- تجزیه حرارتی یا پیرولیز
- احتراق جزئی مقداری گاز، بخار و char
- احیاء



شکل ۲-۲ فرآیند گازی سازی (۹)

اگر چه این مراحل پشت سر هم رخ می دهند اما مرز دقیقی بین آنها وجود ندارد و معمولاً دارای همپوشی هستند. در یک فرآیند نمونه، ابتدا بیوماس در معرض گرما خشک شده و سپس وارد فاز تجزیه حرارتی یا پیرولیز می شود. محصولات پیرولیز (گاز، مایع و جامد)، در کنار یکدیگر به واسطه گازی سازی واکنش داده و منجر به تولید محصولات گازی می شود. در اکثر گازی سازی های تجاری، انرژی مورد نیاز بخش خشک کردن، پیرولیز و واکنش های گرماگیر از طریق میزان مشخصی از فرآورده های احتراق تأمین می شود. (۹).

۲-۵-۱ پیش گرمایش و خشک شدن

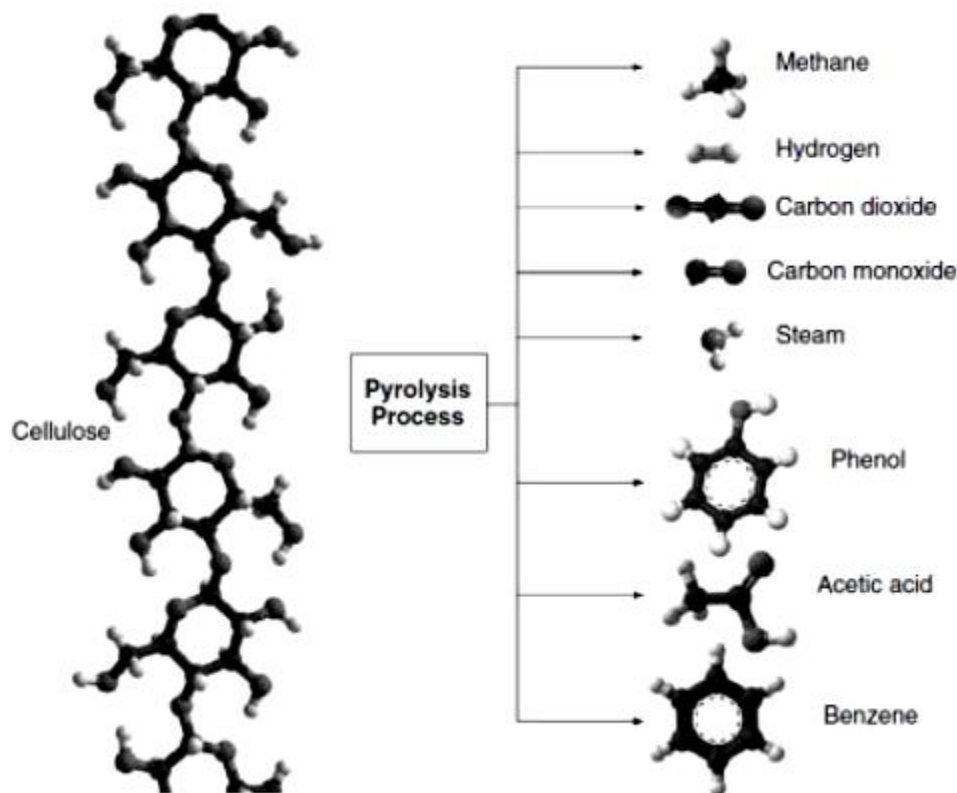
به طور کلی هر کیلوگرم رطوبت موجود در بیوماس نیازمند ۲۲۶۰ کیلوژول انرژی در گازی ساز جهت تبخیر آب می باشد. میزان بالای رطوبت بیوماس در گازی سازی، مطلوب نمی باشد. بنابر این قبل از ورود خوراک به گازی سازی به میزان مشخصی پیش گرمایش صورت می گیرد. برای تولید گازی با ارزش حرارتی بالاتر، بیشتر سیستم های گازی سازی از بیوماس خشک با رطوبت بین ۱۰ تا ۲۰ درصد استفاده می کنند. (۹).

خشک شدن نهایی بیوماس پس از ورود آن به واحد گازی سازی اتفاق می افتد؛ که انرژی آن از جریان های پایین دست در ناحیه داغ تأمین می شود. این گرما موجب خشک شدن

خوراک و جدا شدن آب از آن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد می‌گردد. با افزایش دما مواردی که وزن مولکولی کمی دارند شروع به تبخیر شدن می‌کنند این فرآیند تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد رخ می‌دهد (۹).

۲-۵-۲ پیرولیز

در ناحیه پیرولیز هیچ واسطه خارجی اضافه نمی‌شود. پیرولیز قبل از ناحیه احیاء رخ می‌دهد و باعث تجزیه حرارتی مولکول‌های هیدروکربنی بزرگ بیوماس به مولکول‌های گازی کوچکتر (به صورت تراکم پذیر یا تراکم ناپذیر) می‌شود. یکی از محصولات مهم این ناحیه tar، است که ناشی از تقطیر بخارهای تراکم پذیر تولیدی در فرآیند است. (۹)

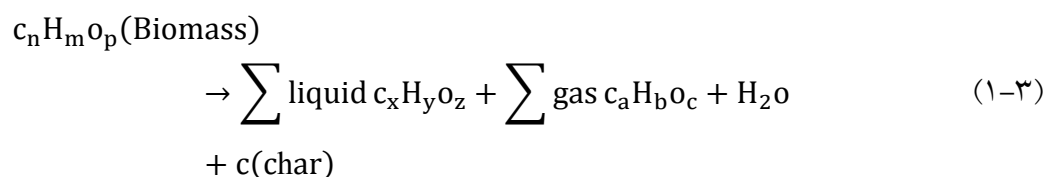


شکل ۳-۲ فرآیند تجزیه مولکول‌های هیدروکربنی بزرگ به مولکول‌های کوچکتر در طی پیرولیز (۱۰)

به طور کلی فرآیند پیرولیز، شامل حرارت دادن زیست توده یا هر خوراک دیگری در غیاب هوا یا اکسیژن با نرخ مشخص درجه حرارت، در زمان مشخص می‌باشد. محصولات پیرولیز به چندین پارامتر بستگی دارد که شامل دمای پیرولیز و نرخ حرارت است. (۱۰)

محصول اولیه پیرولیز از گازهای تراکم پذیر و char جامد تشکیل یافته است، گازهای تراکم پذیر می‌توانند بیشتر شکسته شده و به گازهای ترام ناپذیر (CH_4 ، CO_2 ، H_2 ، CO)، مایع و char تبدیل شوند. بخشی از این تجزیه‌ها در واکنش‌های همگون فاز گازی و بخشی در واکنش‌های ناهمگون فاز جامد-گاز صورت می‌گیرد (۱۰).

پروسه پیرولیز با یک واکنش عمومی مانند واکنش ذیل مشخص می‌گردد. (۱۰)

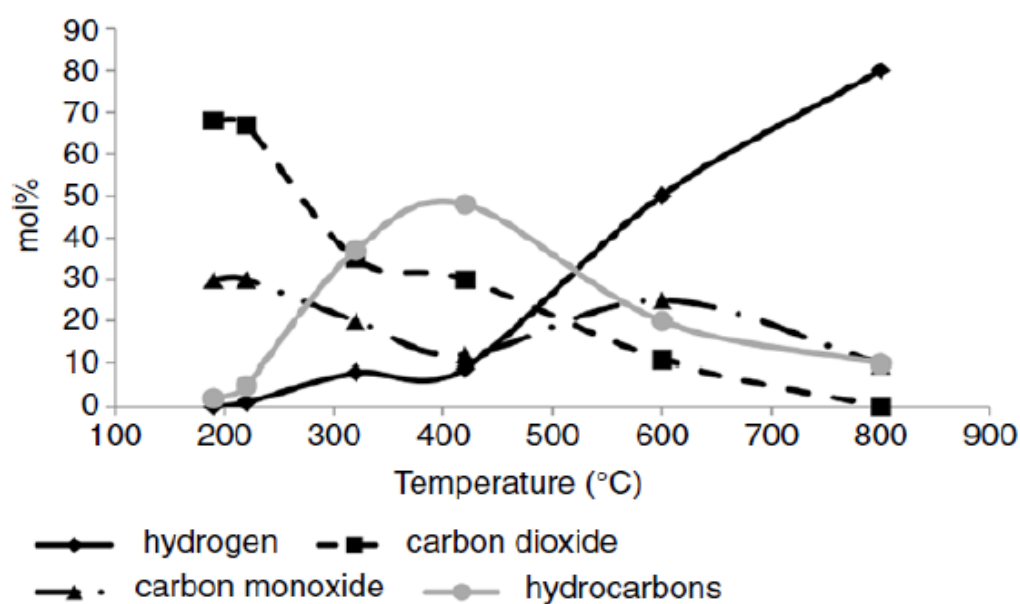


محصولات پیرولیز به طراحی پیرولیز، مشخصات فیزیکی و شیمیایی زیست توده و پارامترهای عملیاتی مهم مانند:

- نرخ حرارت‌دهی
- دمای نهایی (دمای پیرولیز)
- زمان ماند در محدوده منطقه واکنش بستگی دارد.

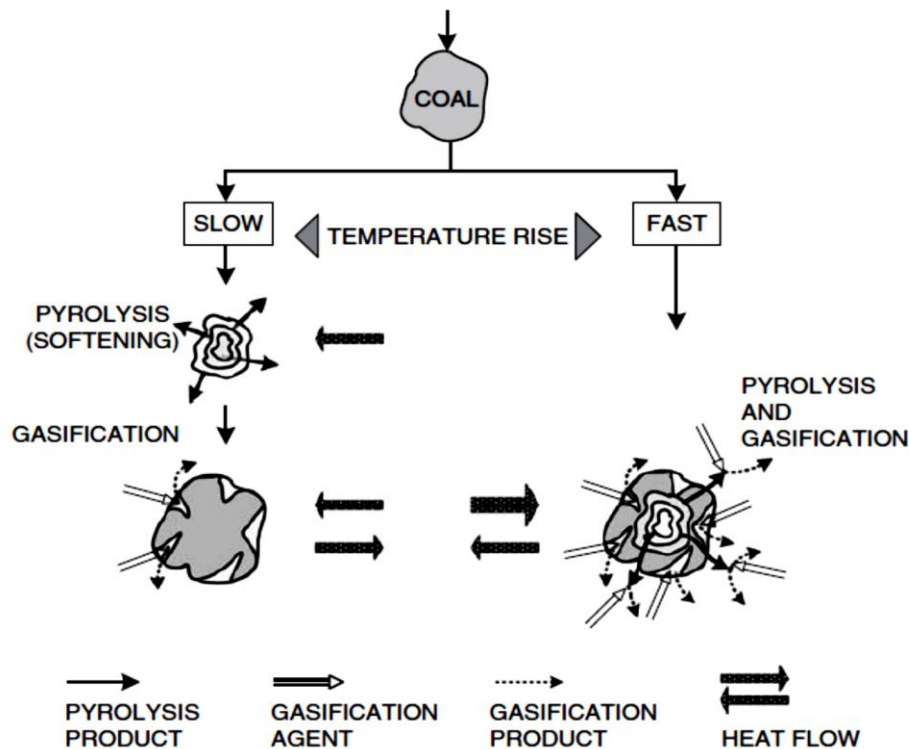
در کنار این موارد، تولید Tar و دیگر محصولات به فشار ترکیبات گازی محیط و حضور کاتالیزور معدنی بستگی دارد. (۱۰).

در طی پیرولیز، اجرای سوخت در یک نرخ مشخص از دمای محیط تا دمای (دمای پیرولیز) حرارت داده می‌شوند و سوخت تا انتهای پروسه در آن ناحیه باقی می‌ماند. دمای پیرولیز بر ترکیب اجزای تولید و بر میزان تولید تاثیر می‌گذارد. (۱۰).



شکل ۲-۴ تاثیر دماهای مختلف پیرولیز بر روی تولید گازهای مختلف (۱۰)

نرخ حرارت‌دهی ذرات زیست توده اثر مهمی بر روی ترکیب اجزا و تولید محصولات پیرولیز دارد. نرخ حرارت‌دهی سریع تا دمای متوسط (600°C تا 400°C) باعث خروج مواد فرار و تولید مایعات سوختی می‌شود. در حالی که نرخ حرارت‌دهی آهسته تا آن دما باعث گازی‌سازی و تولید char بیشتری می‌شود (۱۰).



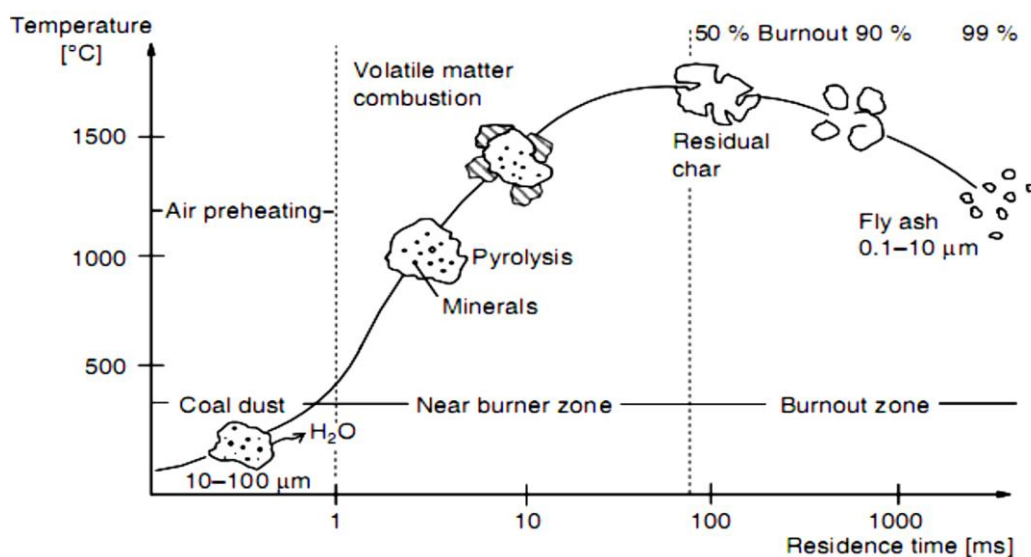
شکل ۵-۲ اثر نرخ حرارت دهی بر پیرولیز (۹)

اگر نرخ حرارت پایین باشد ابتدا تشکیل بخارهای تراکم ناپذیر به سرعت رخ می‌دهند و سپس فرآیند گازی‌سازی کامل می‌شود. در صورتی که اگر نرخ حرارت بالا باشد، فرآیند گازی‌سازی و پیرولیز با هم رخ می‌دهند. (۹)

زمان مانند نیز اثر مهمی بر تولید دارد. در طی یک نرخ حرارت دهی کند و زمان ماند زیاد، خروج آهسته و تدریجی مواد فرار در راکتور اجازه می‌دهد تا واکنش‌های ثانویه بین اجزا char و مواد فرار رخ دهد که منجر به تولید char ثانویه می‌شود (۱۰).

جهت دست یافتن به محصولات دلخواه نتایج تجربی زیر را در راکتور باید در نظر گرفت:

- جهت افزایش محصول char، نرخ حرارت دهی پایین، $(0.01 - 2.0 \text{ } ^\circ\text{C/s})$ و دمای نهایی پایین و زمان ماند زیاد، اعمال شود.
- جهت افزایش محصولات مایع، نرخ حرارت دهی بالا، دمای نهایی میانی $(600 - 700 \text{ } ^\circ\text{C})$ ، زمان ماند کوتاه اعمال شود.
- جهت افزایش محصولات گازی، نرخ حرارت دهی پایین، دمای نهایی $(900 - 1000 \text{ } ^\circ\text{C})$ و زمان ماند بالا اعمال شود. (۱۰)

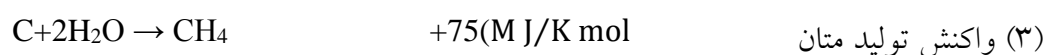
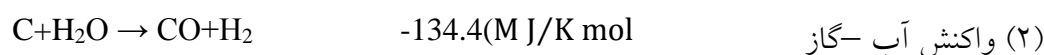
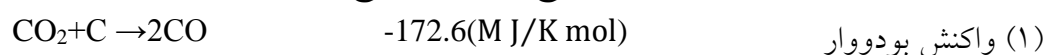


شکل ۲-۶ اثر زمان ماند بر پیرولیز (۱۶)

۲-۵-۳ احیاء

مرحله احیاء بعد از پیرولیز شامل واکنش‌های شیمیایی بین هیدروکربن‌های سوخت، بخار، دی اکسید کربن، اکسیژن و هیدروژن داخل راکتور می‌باشد. گازی‌سازی char یکی از مهم‌ترین قسمت‌های فرایند است. Char تولیدی در پیرولیز که از زیست توده تولید شده لزوماً "کربن خالص نیست و حاوی مقدار مشخصی هیدروکربن و هیدروژن و اکسیژن است. char زیست توده عموماً "متخلخل تر و واکنشی‌تر از کک می‌باشد. میزان تخلخل char زیست توده در حدود ۴۰ تا ۵۰٪ است در حالی که char زغال سنگ دارای تخلخل حدود ۲ تا ۱۸٪ می‌باشد. سائز تخلخل‌های char زیست توده بسیار بیشتر (۲۰-۳۰ میکرو متر) از char زغال سنگ (۵ انگستروم) می‌باشد. (۱۰)

واکنش‌های اصلی که در این مرحله رخ می‌دهد به شرح زیر است:



با کم کردن معادله (۱) و (۲) میتوان به معادله جابه جایی آب-گاز رسید. (۱۷، ۱۸)



۲-۶ طراحی Gasifier

راکتورهای مورد استفاده در فرایند تبدیل به گاز بسیار مشابه هستند. و به دو نوع اصلی بستر ثابت fixed beds و بستر بستر سیال fluidized beds تقسیم می‌شوند. از آن جای که واکنش بین هوا، اکسیژن و سوخت (زیست توده) در گازی ساز صورت می‌گیرد با توجه به راههای ورودی هوا، سوخت و اکسیژن به گازی ساز، آنها را طبقه بندی می‌کنند. (۱۹)

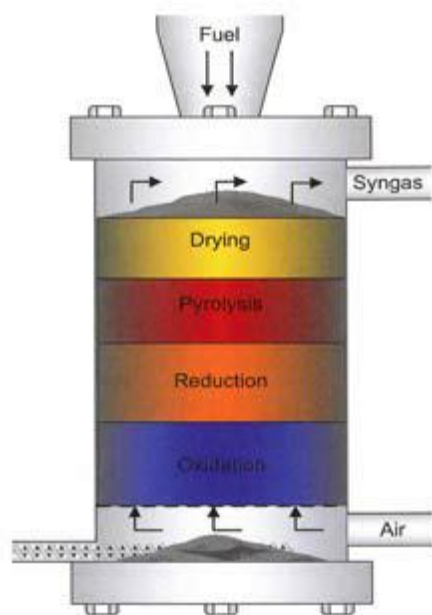
۲-۶-۱ بستر ثابت (fixed beds)

راکتورهای بستر ثابت به علت سادگی در طراحی یکی از پرکاربردترین راکتورهای گازی ساز محسوب می‌شود این راکتور عمداً برای سوخت‌های ماند ضایعات مواد آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد از دیگر ویژگی‌های این نوع راکتور در صورت وجود منابع استفاده در مناطق مختلف طراحی در مقیاس‌های متوسط و کوچک است. و به صورت عمده به دو نوع updraft و downdraft تقسیم می‌شوند. (۲۰)

۲-۶-۱-۱ راکتور با جریان صعودی (updraft gas producer)

راکتوری است دارای مناطق مشخص برای بخش احتراق، احیاء، و پیرولیز. در این راکتور هوا از زیر وارد می‌شود و با جریان ورود مواد (سوخت) به صورت متقابل عمل می‌کند. گاز تولیدی به سمت بالا کشیده شده و از بالای راکتور خارج می‌شود. این راکتور زمانی که گاز داغ از بستر سوخت عبور می‌کند و از راکتور در دمای پایین خارج می‌شود به راندمان بالای می‌رسد. (۲۱)

محتوای گرمایی گاز می‌تواند جهت پیش گرمایش و خشک کردن مواد ورودی (زیست توده) مورد استفاده قرار گیرد. از معایب این سیستم تولید میزان زیاد دوده در گاز و قابلیت محدود بارگیری است. به همین دلیل در راستای اهداف کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای این سیستم کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.



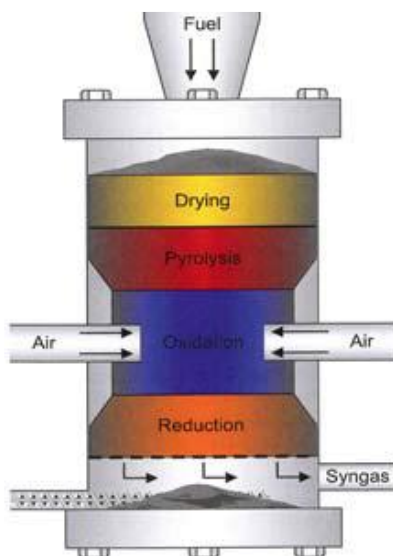
شکل ۷-۲ راکتور با جریان صعودی

(Source: Scottish Agricultural Web Site 2002)

۲-۱-۶-۲ راکتور گازی ساز با جریان نزولی Downdraft gas producer

در راکتور جریان صعودی گاز به صورت مخلوط با بخار دوده زیاد خارج می‌شد که خطر جدی برای ایجاد اختلال در بهره‌برداری از متورهای داخلی می‌باشد. اما این مشکل در راکتور با جریان نزولی کاهش پیدا نموده است. در این راکتور هوای وارد شده به سمت پایین جریان می‌یابد یعنی بر روی بستر ثابت خوراک جامد و گاز به سمت پایین کشیده می‌شود. راندمان کلی پایین و مشکلات بهره‌برداری در خصوص بخار و میزان خاکستر بالا از مشکلات عمومی راکتورهای کوچک تولید کننده گاز با جریان نزولی محسوب می‌شود. (۲۱)

زمان راه اندازی و رسیدن دستگاه به درجه حرارت مناسب برای تولید گاز کوتاه تر از راکتورهای جریان صعودی است از این رو این راکتورها برای استفاده در سیستم‌های مختلف نسبت به راکتورهای جریان صعودی ترجیح داده می‌شوند.

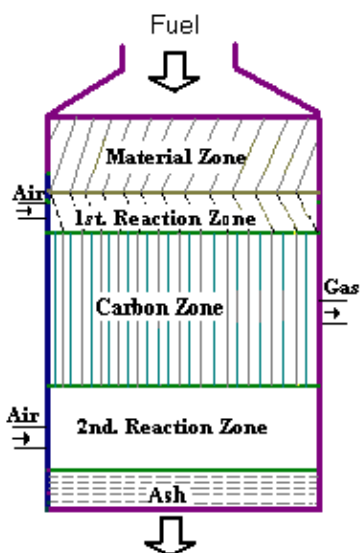


شکل ۲-۸ راکتور جریان نزولی

(Source: Scottish Agricultural Web Site 2002)

۲-۱-۶-۳ راکتور Twin-fire gas producer

مزایای راکتور جریان مجدد و جریان متقابل با هم ترکیب شده و راکتوری با دو محفظه احراق را بوجود آورده است. این راکتور شامل در منطقه مشخص برای واکنش می باشد. خشک کردن دعال سازی در دمای پایین و تجزیه گاز در منطقه بالاتر رخ می دهد. این راکتور گاز تمیز و مناسب تولید می کند. (۲۰)

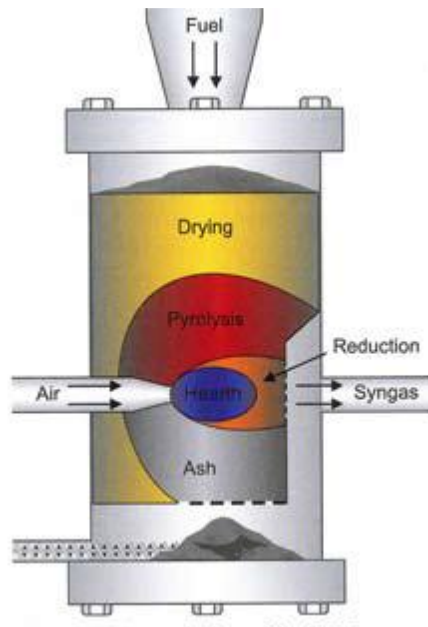


شکل ۲-۹ راکتور Twin-fire gas producer

(Source: Scottish Agricultural Web Site 2002)

۴-۱-۶-۲ راکتور تولید گاز با جریان عرضی (cross draft producer)

این راکتور اگرچه دارای برخی مزایا نسبت به سایر راکتورها است، اما یک راکتور ایده آل بنظر نمی رسد. از معایب آن می توان به خروج گاز با دمای بالا، تولید منواکسید کربن بالا و تولید هیدروژن و متان پایین اشاره کرد اشاره نمود که نتیجه نوع طراحی آن است. بر خلاف راکتورهای Updraft و Downdraft در این راکتور محفظه احتراق، احیاء و خاکستر به صورت جداگانه وجود دارد. مشخصه این طراحی منحصرأ برای سوخت های است که دارای خاکستر کمی هستند مانند چوب و ذغال کک، از ویژگی های عمده این راکتور می توان به توان بارگیری خوب، زمان راه اندازی بسیار سریع می باشد. (۲۲)



شکل ۱۰-۲ راکتور جریان عرضی

(Source: Scottish Agricultural Web Site 2002)

فصل سوم

مبانی و مفاهیم و معرفی شبیه‌سازی

۳-۱ مقدمه

استفاده از گاز سنتز ناشی از گازسازی زائدات و زباله شهری در ایران می‌تواند منجر به افزایش سهم تولید برق و انرژی و کاهش هزینه‌های دفن زائدات گردد. در این فصل به بررسی مدل انتخابی در شبیه‌سازی راکتورهای گازی اختصاص داده شده است. انتخاب یک مدل ریاضی مناسب برای پیش بینی ترکیب گاز تولیدی با استفاده از آنالیز عنصری بسیار مهم است. در میان مدل‌های موجود مدل تعادلی به علت سادگی، دقت بالا یک ابزار مفید برای شبیه‌سازی مورد نظر می‌باشد.

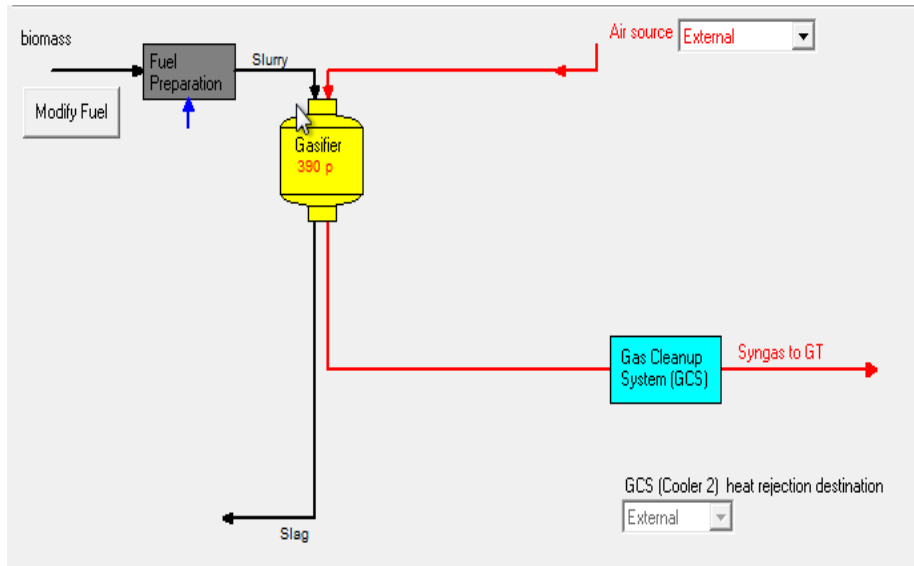
هدف اصلی این فصل معرفی کامل و ارائه یک مدل تعادلی قادر به تعیین ترکیبات گاز قابل اشتعال خروجی از راکتور بستر ثابت پایین سو و ارزش حرارتی گاز تولیدی (LHV) بر اساس تجزیه و تحلیل نهایی زیست توده می‌باشد.

۳-۲ معرفی مدل

مدل تعادلی مورد نظر در نرم افزار Thermo flow (نرم افزار حل معادلات ترمودینامیکی) شبیه‌سازی شده است. این نرم افزار توانای شبیه‌سازی سیکل‌های ترکیبی بر پایه‌ی توربین‌های گازی مورد استفاده در کشور و سیستم‌های یک بار گذر (مانند نیروگاه سیکل ترکیبی نگاه و پردسر) و ACC (مانند نیروگاه قم و کرمان) و سیستم‌های گازی سازی (Gasification) را دارا می‌باشد.

راکتور gasifier به عنوان یک سیستم جریان پیوسته، در حالت پایا و فشار ثابت در نظر گرفته شده است.

شکل ۳-۱ واحدهای مختلف در تعادل ترمودینامیکی شامل واحد بخار دهی و سیستم تولید هوا و سیستم تصفیه گاز نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ واحدهای مختلف در تعادل ترمودینامیکی گازی ساز (منبع: نرم افزار Thermo flow)

برای مدل تعادلی مورد نظر فرضیات پژوهشگران دیگر در ارائه مدل‌های تعادلی قابل اجرا است (۱۴،۲۳،۲۴،۲۵)

- زمان لازم برای به تعادل رسیدن واکنش‌های شیمیایی وجود دارد.
 - هیچ منبع خارجی حرارتی وجود ندارد.
 - میزان خاکستر در گاز تولید شده قابل اغماض است.
 - فشار در راکتور ثابت است.
 - افت حرارت ناچیز می‌باشد.
 - در گاز تولیدی اکسیژن وجود ندارد.
 - گاز تولید شده شامل H_2O و CO_2 ، CO ، CH_4 ، N_2 است.
- نسبت اجزای زیست توده (فرمول شیمیایی خوراک) را می‌توان به صورت $CH_xO_yN_z$ بیان نمود که در آن x و y و z به ترتیب نسبت مولی هیدروژن به کربن، اکسیژن به کربن و نیتروژن به کربن موجود در خوراک می‌باشد.

۳-۳ ارزش حرارتی بالا (HHV)

روش های مختلف برای محاسبه مقدار ارزش حرارتی (HHV) از پژوهشگران مختلف وجود دارد (۲۶) اما در این میان رابطه (HHVb) به دلیل تحلیل بر اساس آنالیز نهایی زیست توده معمولاً دارای دقت بیشتری می باشد. (۲۷)

$$\begin{aligned} \text{HHV}_b \left(\frac{\text{mj}}{\text{kg}} \right) &= 0/3491.C + 1/1783.H + 0/1005.S - 0/1034.O \\ &- 0/0151.N - 0.211.AS \end{aligned} \quad (۱-۳)$$

LHV بر مبنای زیست توده خشک از طریق معادله زیر محاسبه می شود: (۱۸)

$$\text{LHV} = 4/187(81c + 300h - 26(o-s) - 6(9H+m)) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (۲-۳)$$

آنتالپی استاندارد تشکیل زیست توده با استفاده از استیوکیومتری محاسبه می شود. معادله احتراق به شرح زیر است (۲۸)

$$\begin{aligned} h_{fb} = \text{LHV}_b + 1. h_{f,co2} + \frac{x}{2} h_{f,H2O,g} + \frac{Z}{2} \cdot h_{f,N2} \\ - \left(1 + r + \frac{X}{4} - \frac{Y}{2} \right) \cdot H_{F,O2} \end{aligned} \quad (۳-۳)$$

که $h_{f,co2}$, $h_{f,H2O,g}$, $h_{f,N2}$ و $H_{F,O2}$ آنتالپی محصولات احتراق و O_2 در شرایط احتراق جزئی (ناکامل) سوخت جامد می باشد.

آنتالپی هر یک از مواد در شرایط دمای 25°C و فشار ثابت با استفاده از دیتا بیس نرم افزار Thermo flow محاسبه می شود.

هوای مورد استفاده هوای خشک (بدون رطوبت) و شامل $21\% O_2$ و $79\% N_2$ می باشد. آب و بخار استفاده شده در این شبیه سازی به این صورت محاسبه می شود که از یک طرف اگر دهه آب در دمای زیر 100 درجه باشد، و از طرف دیگر طیف فشار فرایند در محدوده فشار اتمسفر باشد آنتالپی بخار به آنتالپی آب اضافه می شود. $(-22/42. \text{ kJ/kg})$ آنتالپی خالص زیست توده (h_b) در دمای معین با رابطه ارائه شده محاسبه می شود (۲۹).

$$h_b \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = h_{f,b} + \frac{0.003861 \cdot (T^2 - 298^2)}{2} + 0/1031 \cdot (T - 298) \quad (۴-۳)$$

دما بر حسب کلونین می باشد.

آنتالپی خاکستر صفر فرض می‌شود (۳۰)

آنتالپی گاز تولیدی gasifier با استفاده از آنتالپی تک تک تشکیل دهنده این ترکیب گازی محاسبه می‌شود.

بالانس جرم و انرژی در قسمت خشک کردن، زیست توده با وارد شدن به واحد خشک کردن، به شکل سه جریان زیست توده خشک، خاکستر و بخار از واحد خشک کردن خارج می‌شود.

معادله تبدیل جرم برای چهار عنصر (C,H,O,W) و در مجموع آنتالپی مشخص جریان جرم خروجی به وسیله آنتالپی مجموعه جرم تولیدی به دست می‌آید. مقدار رطوبت زیست توده در واحد خشک کن می‌تواند به وسیله‌ی کاربر نرم افزا Thermo flow تعیین می‌شود.

محاسبه ثابت تعادل واکنش‌های آب، گاز و تبدیل متان به وسیله رابطه ارائه شده توسط (۳۱) به دست می‌آید. راندمان تبدیل به گاز با رابطه نسبت مقدار ارزش حرارتی گاز تولید شده بر مقدار ارزش حرارتی سوخت ورودی (خوراک gasifier) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{CG}(\%) = \frac{LHV_g \cdot mg}{LHV_b \cdot m_b} \quad (5-3)$$

نسبت تعادلی (ER) برابر است با مقدار معین مول اکسیژن مورد نیاز در gasifier برای احتراق در شرایط اکتیوکیومتری:

$$ER = \frac{AF \text{ ratio}_{measured}}{AF \text{ ratio}_{stoichiometric}} \quad (6-3)$$

که AF نسبت هوا به سوخت می‌باشد ($Nm^3 \text{ air/kg Fuel}$)

رابطه محاسبه مقدار آنتالپی char که بر اساس رابطه آنتالپی گرافیت ارائه شده بیان شده به شرح زیر می‌باشد: (۳۴,۳۳)

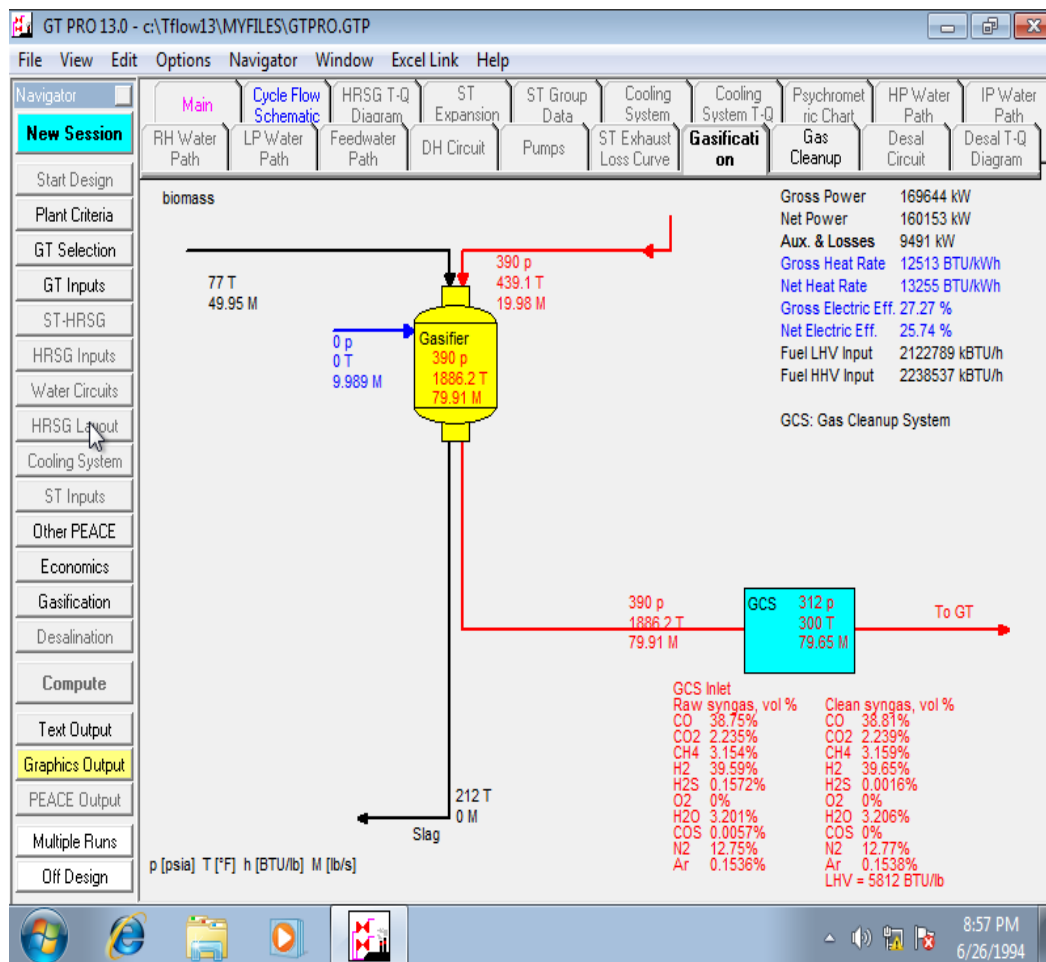
$$h_{cher} \left(\frac{kJ}{kg} \right) = 0/0004 \cdot T^2 + 0/8679 \cdot T - 381/61 \quad (7-3)$$

که دما بر حسب کلوین می‌باشد.

آنتالپی ذرات خروجی gasifier دقیقاً مانند محاسبه آنتالپی Cher می‌باشد درآزمایش‌های انجام شده این نتیجه حاصل شد که قسمت عمده ذرات خروجی از gasifier دوده می‌باشد. (۳۵)

از آن جایی که همه کربن موجود در زیست توده به گاز تبدیل نمی شود بنابراین تعریف مفهوم بازده تبدیل کربن مورد نیاز می باشد.

$$\eta_c (\%) = \frac{\text{توده زیست ورودی جریان در کربن کل مقدار}}{\text{مقدار کل کربن در جریان خروجی گاز}} \times 100 \quad (8-3)$$



شکل ۲-۳ تصویر مدل تعادلی شامل gasifier سیستم بخار دهی و سیستم هوا دهی
(منبع: نرم افزار Thermo flow)

آنتالپی Tar با استفاده از روش معروف به روش جابکس^{۱۱} به دست می آید.

$$h_{tar} = -4.659.16. (T - 273.15)^3 + 0.00193. (T - 273.15)^2 + (T - 273.15) - 1796.4 \quad (9-3)$$

^{۱۱} . jabks method

که دما بر حسب کلوین می‌باشد.

۳-۴ شیرین‌سازی گاز سنتز (gas cleanup system)

وجود عوامل اسیدی هیدروژن سولفور و (H_2S) و گاز کربنیک (CO_2) با غلظت‌های متفاوت در مخلوطی از گازها را در صنعت گاز ترش نامیده‌اند و چنانچه این عوامل اسیدی از جریان گاز حذف نشوند صدمات قابل ملاحظه‌ای به شبکه انتقال به سبب وجود فرآیند خوردگی و دستگاه‌های مصرف کننده گاز وارد می‌گردد و عملیات حذف عوامل اسیدی از جریان گاز ترش را شیرین کردن گاز می‌گویند. منظور از شیرین‌سازی گاز بهره‌گیری از یک ترکیب فرآیند شیمیایی فیزیکی برای جذب عوامل اسیدی از جریان گاز می‌باشد. (۳۶)

برخی از دلایل عمده برای شیرین کردن گاز سنتز به شرح زیر می‌باشد :

۱. خوردگی: با حل شدن گازهای اسیدی در فاز مایع که در کف لوله‌های خطوط انتقال و تجهیزات ضمن افت فشار جریان تشکیل می‌گردد محیط فاز مایع اسیدی شده (کاهش PH) و دیواره فلزی خطوط و تجهیزات که اغلب از آلیاژهای آهن می‌باشند تحت تاثیر فرآیند خوردگی اسیدی قرار می‌گیرد و سبب خرابی و توقف در جریان می‌شود و تداوم خوردگی به معنی از دست دادن سرمایه در صنعت محسوب می‌شود.
۲. نشت گاز سمی و بوی نامطبوع : نشت گاز ترش و استنشاق آن توسط جانداران خصوصاً انسان سبب حمله گاز اسیدی H_2S به مخاط بینی شده و در زمان بسیار کوتاهی کارایی یاخته‌های مخاط بینی را کاهش می‌دهد و در نتیجه حس بویایی را از کار می‌اندازد و در غلظت زیاد سبب مرگ می‌شود. در اغلب جریانات گاز ترکیبات گوگردی دیگری بنام مرکاپتان $(R-S-S-R)$ وجود دارند که با نشت گاز در محیط بوی نامطبویی پراکنده می‌شود و اثرات روانی بدی بر جا می‌گذارد البته از این خاصیت هم برای ردیابی نشت گاز در محل مصرف ضمن کنترل غلظت آن استفاده می‌گردد.
۳. کیفیت خوراک صنایع پایین دستی : بخش بزرگی از گاز طبیعی شیرین شده خوراک صنعت پتروشیمی می‌گردد غلظت بیش از حد استاندارد گازهای اسیدی فرآیندهای پتروشیمیایی را با اختلال مواجه می‌کند

۳-۴-۱ طراحی فرآیندهای شیرین‌سازی گاز ترش

در طراحی فرآیندهای تصفیه گاز شروط امکان پذیری و اقتصادی بودن طرح مهمترین بخش طراحی می‌باشد تا کنون اقدامات بسیاری در این صنعت برای عملیاتی کردن و بدست

آوردن شرایط بهینه انجام شده است و محققین ایده‌های جدیدی برای به روز رسانی فن آوری شیرین‌سازی گاز به بازار صنعت ارائه می‌نمایند

جذب در فاز جامد

۱. جذب فیزیکی (غربالهای مولکولی)

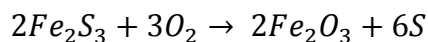
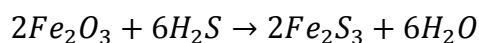
۲. جذب شیمیایی (اکسید آهن)

۳-۴-۲ شیرین‌سازی به وسیله بسترهای جامد

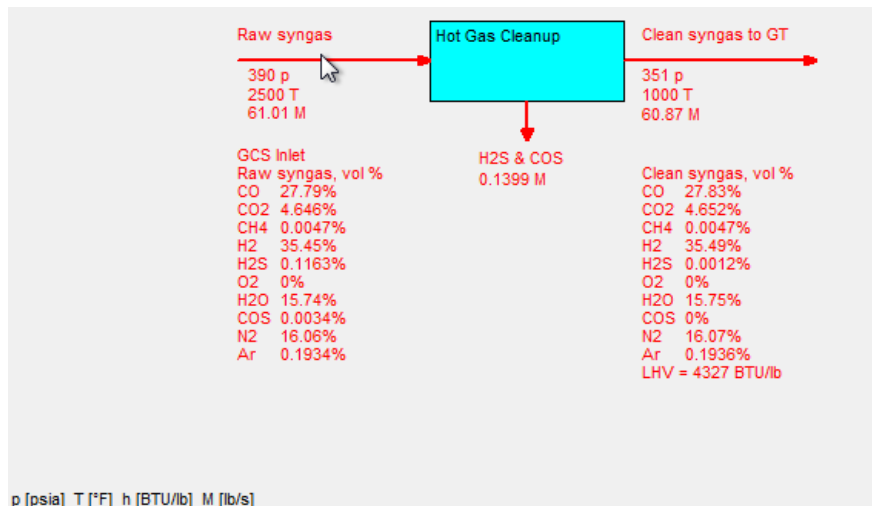
- استفاده از جامدات برای شیرین‌سازی گاز بر پایه جذب گازهای اسیدی بر روی سطح و یا واکنش اجزاء بر روی سطح می‌باشد.
- استفاده از بستر جامد برای شیرین‌سازی گازی که دارای سولفید هیدروژن بهترین فرایند است.
- این فرایندها قابلیت انتخابی داشته و در حالت معمولی مقدار زیادی دی اکسید کربن جذب نمی‌کنند.

Iron Oxide – Sponge

- این فرایند در انگلیس در اواسط قرن ۱۹ ارائه شده و هنوز در کاربردهای مخصوصی بطور گسترده ای استفاده می‌شود
- در این فرایند گاز ترش در تماس با اکسید آهن قرار می‌گیرد که نتیجه آن تشکیل سولفید آهن است. وقتی اکسیژن (هوا) به سولفید آهن می‌رسد آنرا به اکسید آهن و سولفور تبدیل می‌کند.



(۱۰-۳)



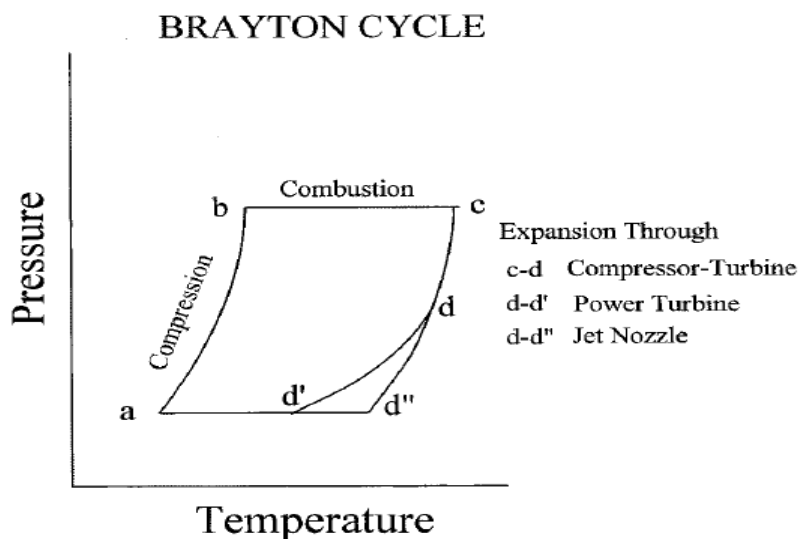
شکل ۳-۳ سیستم شیرین‌سازی گاز سنتز (gas cleanup system) (منبع: نرم افزار Thermo flow)

۳-۵ توربین گازی Siemens V94.2:

سیکل توربین گازی بهتر است با سیکل برایتون به تصویر کشیده شود از مشخصه‌های اصلی این سیکل افزایش حرارت در فشار ثابت می‌باشد. (۳۷)

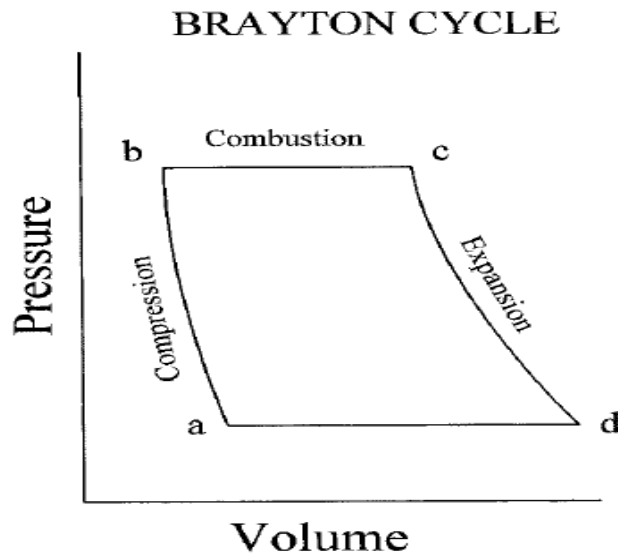
۳-۵-۱ چرخه ترمودینامیک توربین‌ها

نمودار فشار و دمای (p-t) توربین‌هایی گازی



شکل ۳-۴ نمودار فشار دمای (t_p) توربین‌ها (۳۷)

نمودار فشار و حجم (p-v) توربین‌های گازی



شکل ۳-۵ نمودار فشار حجم توربین‌ها (۳۷)

توربین گازی یک ماشین جریان مستقیم است بهترین توصیف برای این چرخه قانون اول ترمودینامیک می‌باشد (۳۷)

$$w(Q_{12}) = w \left(h_2 - h_1 + KE_2 - KE_1 + PE_2 - PE_1 + \frac{W_{12}}{J} \right) \quad (۱۱-۳)$$

W : دبی جرمی جریان lb/sec

h_2 : آنتالپی ثانویه سیال btu/LBm

h_1 : آنتالپی اولیه سیال btu/LBm

KE_2 : انرژی جنبشی ثانویه سیال btu/LBm

KE_1 : انرژی جنبشی اولیه سیال btu/LBm

PE_2 : انرژی پتانسیل ثانویه سیال btu/LBm

W_{12} : کار انجام شده یا صورت گرفتار روی سیستم $ft - lbf/lbm$

$\frac{W_{12}}{J}$: کار btu/LBm

J : نسبت واحد کار به واحد گرما، $778.2 ft lb/Btu$

در توربین گازی، مقدار عددی تفاوت بین انرژی‌های پتانسیلی بسیار ناچیز می‌باشد که در اکثر موارد نادیده گرفته می‌شد؛ بنابراین قانون اول ترمودینامیک به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$w(Q_{12}) = w \left(h_2 - h_1 + KE_2 - KE_1 + PE_2 + PE_1 + \frac{W_{12}}{J} \right) \quad (12-3)$$

در فرآیند آریاباتیک (انتقال حرارت صفر)

$$\begin{aligned} Q_{12} &= 0 \\ w &= \left(\Delta h + \Delta KE + \frac{W_{12}}{J} \right) \\ \frac{W_{12}}{J} &= w(h_1 - h_2 + KE_1 - KE_2) = \text{power} \end{aligned} \quad (13-3)$$

$$HP = \left(\frac{W}{0/707} \right) (h_1 - h_2 + KE_1 - KE_2)$$

$$KE = \frac{C^2}{2g_c J}$$

HP: اسب بخار (Horse power)

C: سرعت هوای ورودی کمپرسور

$$g_c: \text{ارایش ثابت و } -132.17 \text{ ft lbm} / \text{lb}_f \text{ sec}^2$$

توان خروجی توربین گازی

$$HP = \frac{W}{0/707} (h_1 - h_2 + KE_1 - KE_2) \quad (14-3)$$

0/707 تبدیل btu/sec به اسب بخار می باشد.

۳-۵-۲ راندمان توربین گازی

راندمان حرارتی توربین گازی (η_t) با توجه به فرایند تراکم و انبساط بدون بازگشت و به صورت کار خروجی تقسیم بر انرژی ورودی سوخت تعریف می شود. کار خروجی برابر است با کل کار توربین های کار صورت گرفته بر روی کمپرسور (توجه داشته باشید که کار کمپرسور منفی می باشد از این رو):

$$\begin{aligned} HP &= \frac{W}{0/707} (h_1 - h_2 + KE_1 - KE_2) \\ \eta_t &= \frac{2540}{\text{btu}/\text{HP} - \text{Hr}} = \frac{3600}{\text{kJ}/\text{kw} - \text{Hr}} = \frac{3424}{\text{btu}/\text{kw} - \text{Hr}} \end{aligned} \quad (15-3)$$

Kj: کیلوژول

Kw: کیلو وات

Hr: ساعت

همچنین این رابطه می تواند برای مقایسه بین توربین ها مورد استفاده قرار گیرد. (۳۷)

۳-۵-۳ بازده جزء به جزء

بازده جزء به جزء هر یک از اجزا منجر به روشی شدن کلی توربین می شود یکی از مشکلات اساسی عدم توانایی بررسی بازده قسمت های مختلف به صورت جداگانه می باشد. (۳۷)

۳-۵-۴ کمپرسور

کمپرسور η_t به طور مستقیم با نسبت فشار و معکوس دمای خروجی متناسب است رابطه ذیل بیان دقیق تری از تعریف بازده کمپرسور می باشد.

$$\eta_0 = \frac{R_0^0 - 1}{\frac{T_\infty}{T_i} - 1} \quad (۱۶-۳)$$

$$\sigma = \frac{k-1}{k} \infty$$

R_c : نرخ فشار کمپرسور p_0/p_i

p_0 : کل فشار خروجی psia

p_i : کل فشار ورودی psia

K : نسبت گرمای ویژه c_p/c_r

c_p : گرمای ویژه در فشار ثابت btu/lbf^0

c_r : گرمای ویژه در حجم ثابت btu/lbf^0

T_0 : دمای کل خروجی کمپرسور 0R

T_i : دمای کل کمپرسور 0R

۳-۵-۴-۱ توان کمپرسور

توان کمپرسور نیروی مورد نیاز برای فشرده سازی هوا و حرکت آن به علت محفظه احتراق است

$$HP_0 = \frac{J}{550} W_a C_p \frac{T_i}{\eta_c} \left[\left(\frac{p_0}{p_i} \right)^6 - 1 \right] = \frac{J}{550} W_a C_p (AT) \quad (۱۷-۳)$$

W_a : جریان ورودی هوا به کمپرسور lb/sec

۳-۵-۵ راندمان توربین

پیگیری راندمان توربین یک روش بسیار عالی برای نظارت بر سلامت یک واحد می باشد اما به هر حال دمای ورودی توربین (TIT) ممکن است افزایش یابد و اندازه گیری آن برای مدت زمان طولانی غیر ممکن است. (۳۷)

$$\eta_t = \frac{1 - \frac{T_{exH}}{TIT}}{1 - R_t^s} \quad (۱۸-۳)$$

T_{exH} : دمای خروجی توربین R

TIT : دمای ورودی توربین R

R_t : کل فشار ورودی / کل فشار خروجی

راندمان توربین نیز می تواند از تقریب زیر نیز حاصل شود.

$$\frac{1}{R_c} = R_t$$

$$\eta_t = \frac{1 - \frac{T_{exH}}{TIT}}{1 - \left(\frac{1}{R_c}\right)^6} \quad (۱۹-۳)$$

۳-۵-۶ توان توربین (تولید)

معادله زیر توان تولید شده توسط توربین است که شامل توان به حرکت در آوردن کمپرسور، و برای ماشین های تک شفت توان مورد استفاده برای به حرکت بار می باشد. (۳۷)

$$HP_t = \frac{J}{550} W_g C_p \eta_t T_i \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^6 \right] = \frac{J}{550} W_a C_p T_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \quad (۲۰-۳)$$

W_g : جریان ورودی توربین lb/sec

C_p : گرمای ویژه در فشار ثابت $btu/lbf \cdot ^\circ F$

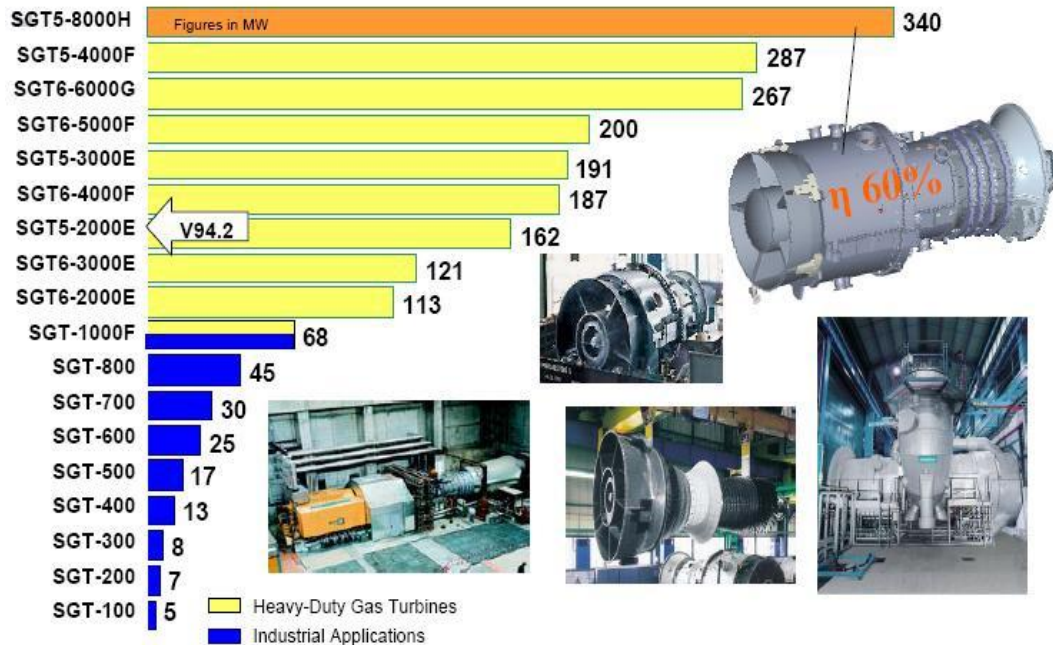
η_t : راندمان آدیاباتیک توربین گازی

p_0 : فشار کل خروجی گاز ژنراتور $psia$

p_i : فشار کل ورودی گاز ژنراتور $psia$

T_i : دمای کل ورودی توربین⁰R

۳-۶ جایگاه توربین Siemens V94.2



شکل ۳-۶ جایگاه توربین گازی زیمنس

(source: <http://epczoom.ir/archive/2999>)

۳-۷ کاربرد توربین گازی Siemens V94.2

- نیروگاه‌های سیکل ساده توربین گازی برای تولید توان الکتریکی
- نیروگاه‌های سیکل ترکیبی یک محوره و چند محوره برای تولید توان الکتریکی و یا گرما ترکیبی (CHP).

۳-۸ مزایا توربین گازی Siemens V94.2

- قابلیت استارت و بارگیری سریع بعلا داشتن روتور با پاسخ زمانی حرارتی بسیار کم
- راندمان بالا در طول کارکردهای متناوب بعلا داشتن اجزایی با قابلیت تحمل شرایط مختلف
- نصب راحت سیستم بویلر بازیاب به علت قرار داشتن اگزوز توربین بصورت افقی

- تعویض اکثر پره‌های ثابت و متحرک قسمت توربین در سایت بدون نیاز به جابجایی روتور
- بازرسی راحت و سریع تمام قطعات مسیر داغ توربین به علت داشتن دریچه‌های بازدید بزرگ و مناسب
- فراهم بودن فواصل بازرسی تعمیر و نگهداری طولانی به مدت ۳۳۰۰۰ EOH.

۳-۹ ویژگی‌ها توربین Siemens V94.2

- کمپرسور ۱۶ مرحله ای با یک ردیف IGV قابل تنظیم
- دو محفظه احتراق سیلویی شکل متصل به توربین از طرفین با مجموعاً ۱۶ برنر
- بخش توربین ۴ مرحله ای
- پوسته‌های در معرض گاز داغ با روش جوشکاری تولید می‌شوند
- استفاده از تنها دو یاتاقان در ابتدا و انتهای روتور
- روتور توخالی، متشکل از تعدادی دیسک که توسط تای راد مرکزی بهم متصل شده‌اند
- اتصال توربین به ژنراتور از سمت خنک آن (کمپرسور) صورت می‌گیرد.
- آگروز محوری برای سهولت استفاده از توربین در سیکل ترکیبی
- قابلیت استارت سریع

فصل چہارم

آنالیز روابط

۴-۱ مقدمه

در این فصل با کمک روابط فصل سوم به آنالیز رفتارگازی ساز با شرایط و خوراک زباله شهری تهران می‌پردازیم تا بهترین ترکیب دبی بخار و هوای ورودی به گازی ساز (gasifier) را ابتدا برای پسماند خشک و سپس پسماند با رطوبت استاندارد ۵٪ تا ۳۵٪ در جهت تولید گاز سنتز با ارزش حرارتی بالا مورد بررسی قرار می‌دهیم.

پس از مشخص شدن بهترین ترکیب هوا و بخار ورودی و تولید گاز قابل اشتعال با بیشترین ارزش حرارتی حال گاز سنتز بدست آمده را به توربین گازی Siemens V94.2 انتقال می‌دهیم تا امکان تولید برق و حرارت در این توربین با گاز سنتز بررسی شود.

۴-۲ خوراک ورودی راکتور گازی ساز

اولین گام در مدیریت یک سیستم گازی ساز داشتن اطلاعات در مورد نوع و ترکیبات شیمیایی زباله می‌باشد.

جدول (۴-۱) ترکیبات شیمیایی زباله شهری تهران را نشان می‌دهد. (۴)

جدول ۴-۱ ترکیبات شیمیایی زباله شهری تهران

| عناصر | درصد وزنی ناشی از آنالیز نهایی |
|-------|--------------------------------|
| C | ۴۸/۷۲ |
| H | ۶/۸۶ |
| O | ۴۱/۰۷ |
| N | ۲/۸۷ |
| S | ۰/۴۸ |

۳-۴ انتخاب و تعریف سوخت gasifier

شکل (۱-۴) تغییر سوخت gasifier را نشان میدهد. در این قسمت سوخت ورودی به راکتور را که ترکیبات شیمیایی پسمان شهری تهران است را به در فاز جامد و دمای 77°F برای گازی ساز تعریف می کنیم.

PROFUEL - Fuel Selection and Definition Utility

☐ Fuel Library ☒ User-defined

Fuel Type
☐ Gas
☐ Liquid
☒ Solid

Fuel Analysis Ash Analysis

Fuel name: biomass

Solid type: Biomass Coal rank: High-volatile C bituminous

Fuel supply temperature: 77 °F

Ultimate Analysis (weight percent)

| | | |
|--|---------|--------|
| Moisture | 0 | % |
| Ash | 0 | % |
| Carbon | 48.72 | % |
| Hydrogen | 6.86 | % |
| Nitrogen | 2.87 | % |
| Chlorine | 0 | % |
| Sulfur | 0.48 | % |
| Oxygen | 41.07 | % |
| Total weight percentage | 100.000 | % |
| HHV (Moisture and Ash included) @ 77°F | 12450 | BTU/lb |
| LHV (Moisture and Ash included) @ 77°F | 11806 | BTU/lb |

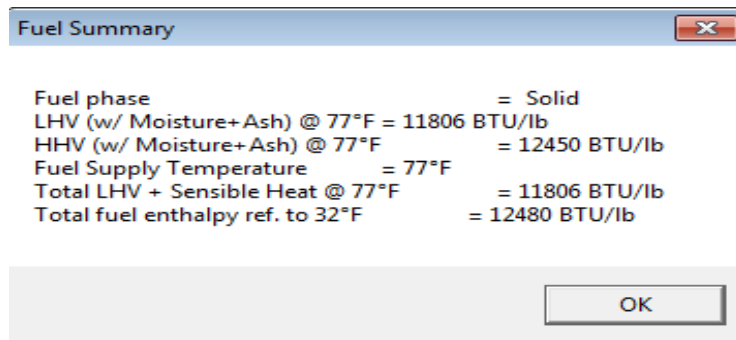
Proximate Analysis (weight percent)

| | | |
|------------------------------------|---------|---|
| Moisture | 0 | % |
| Ash | 0 | % |
| Volatile matter | 35.91 | % |
| Fixed carbon | 64.09 | % |
| Total (including moisture and ash) | 100.000 | % |

شکل ۱-۴ سوخت انتخابی به gasifier (منبع: نرم افزار Thermo flow)

۴-۴ آنالیز سوخت ورودی gasifier در نرم افزار

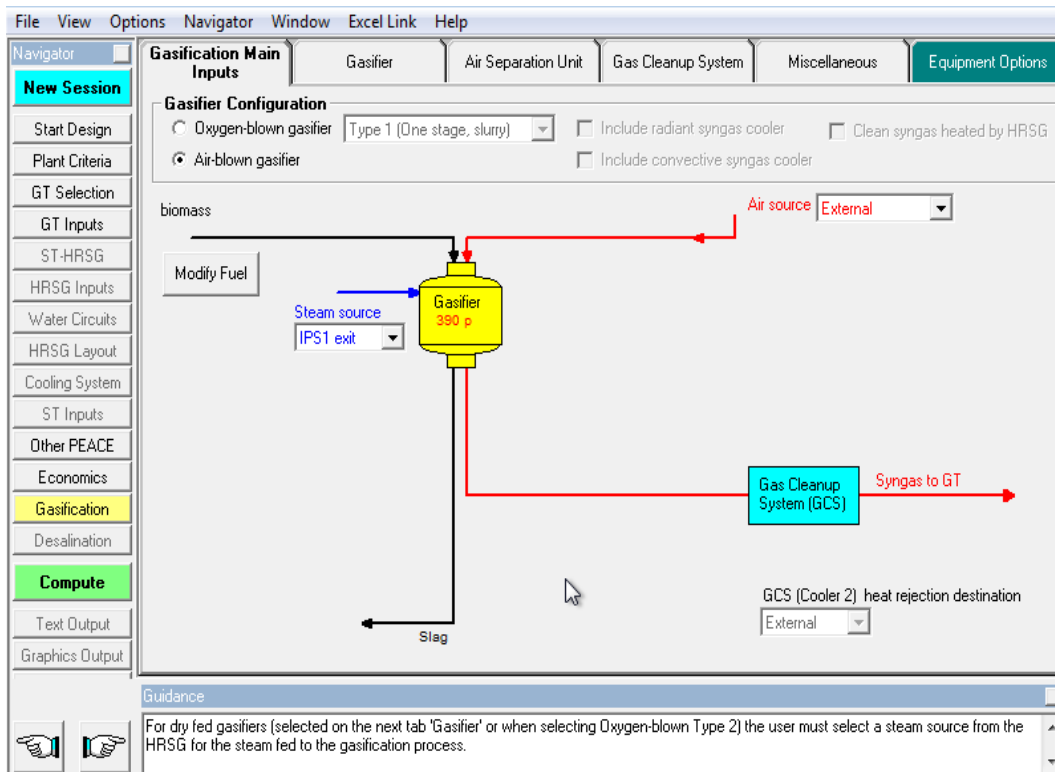
پس از وارد نمودن ترکیبات مربوط به سوخت، نرم افزار این اطلاعات را آنالیز کرده و خلاصه ای از ویژگی های سوخت انتخابی شامل فاز سوخت، ارزش حرارتی بالا، ارزش حرارتی پایین، دمای عرضه سوخت،... را در اختیار کاربر قرار میدهد.



شکل ۴-۲ آنالیز سوخت ورودی **gasifier** (منبع: نرم افزار Thermo flow)

۴-۵ انتخاب ورودی‌های اصلی **gasifier**

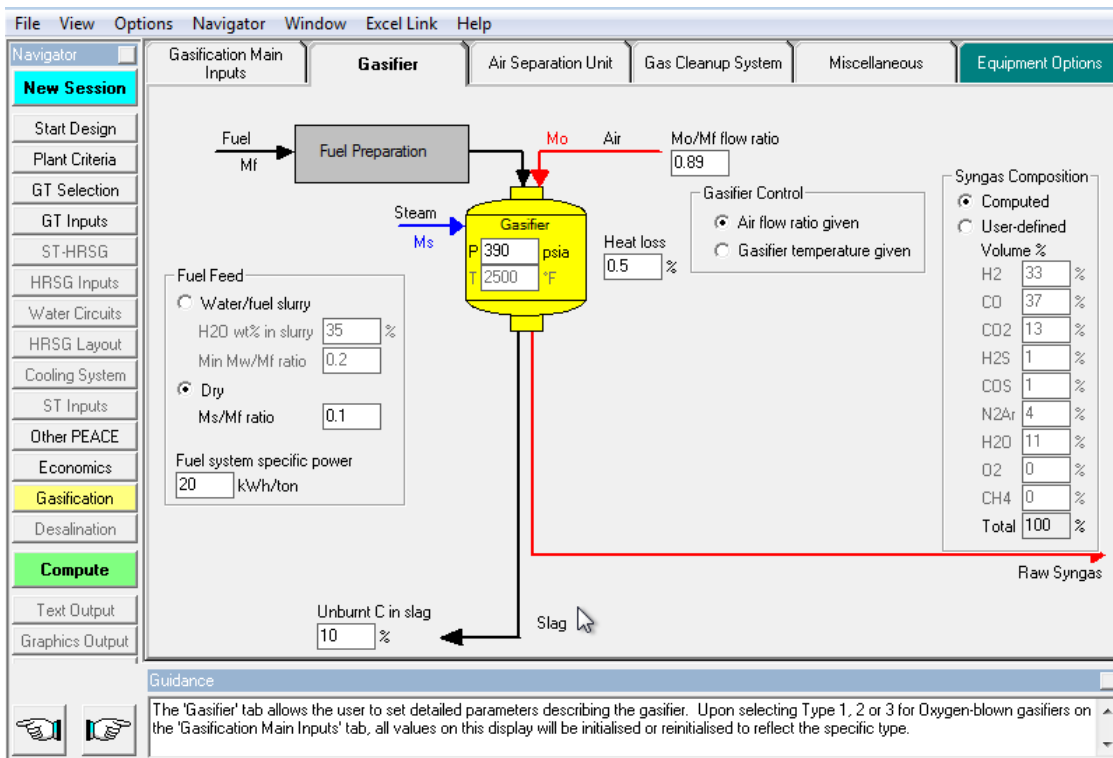
شکل (۴-۳) ورودی‌های مختلف گازی ساز را نشان می‌دهد که شامل منبع هوای و بخار ورودی و سیستم پاک‌سازی گاز سنتز خروجی می‌باشد. استفاده از اکسیژن خالص به عنوان سیال در راکتور گازی ساز می‌تواند باعث افزایش ارزش حرارتی گاز سنتز خروجی از راکتور گردد اما به دلیل شرایط اقتصادی و امکان تولید گاز قابل اشتعال با کمترین هزینه ممکن از هوا به عنوان سیال استفاده شده است.



شکل ۴-۳ ورودی‌های مختلف گازی ساز (منبع: نرم افزار Thermo flow)

۴-۶ پیکر بندی gasifier

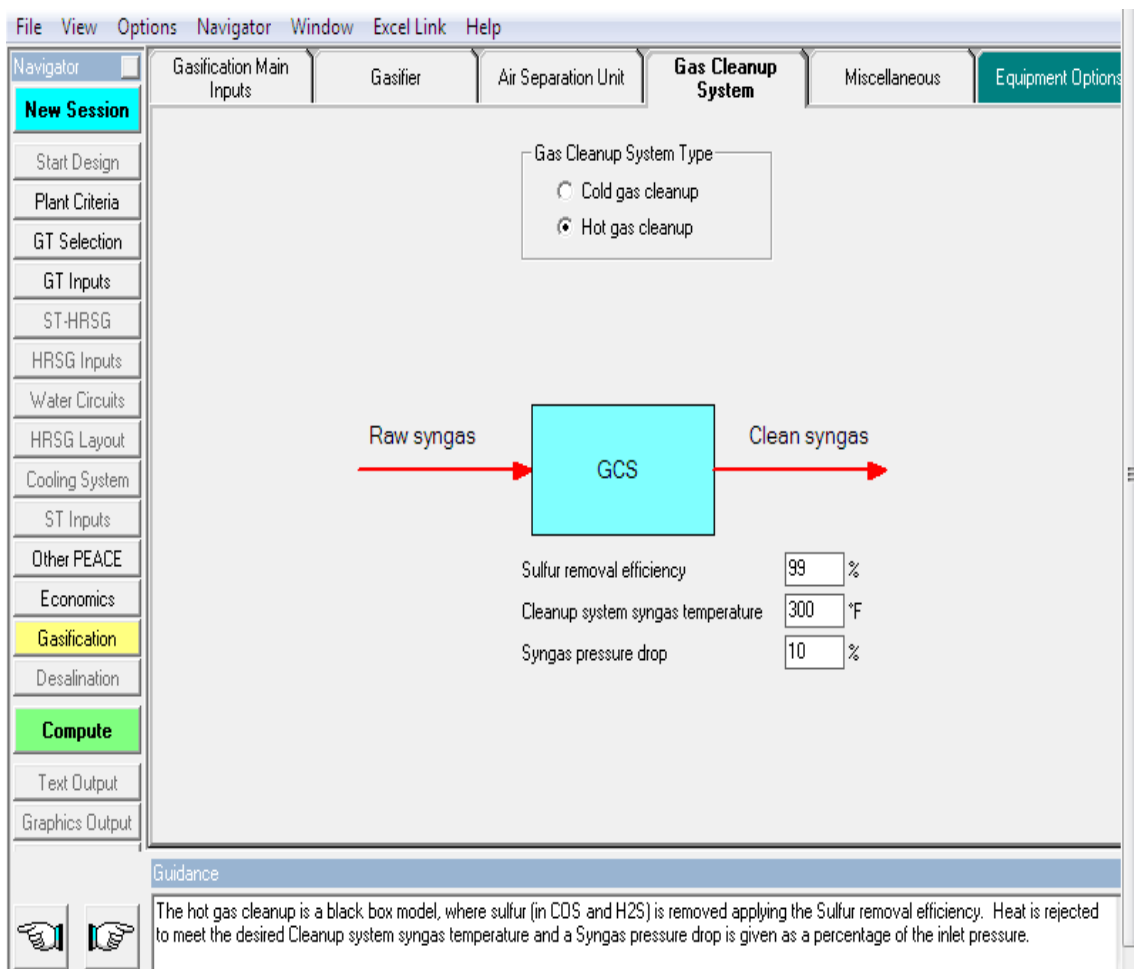
شکل (۴-۶) پیکر بندی گازی ساز را نشان می‌دهد که شامل تنظیمات مربوط به میزان رطوبت موجود در سوخت در قسمت fuel feed است که برای بررسی سوخت در حالت خشک و بدون رطوبت باید تیک قسمت Dry را فعال نمود پس از فعال نمودن این قسمت، مقادیر دبی جرمی بخار و هوای ورودی به گازی ساز، مقدار تلفات حرارتی و ترکیبات گاز سنتز می‌باشد.



شکل ۴-۶ پیکر بندی گازی ساز (منبع: نرم افزار Thermo flow)

۴-۷ سیستم پاکسازی گاز سنتز (gascleanup system)

پاکسازی گاز داغ از طریق فیلترها ذرات در دمای بالا، در حدود ۱۰۰۰-۱۱۰۰ درجه فارنهایت (۵۵۰-۶۰۰ °C)، با استفاده از فیلترهای سرامیکی صورت می‌پذیرد. گوگرد در دمای بالا در اثر واکنش با یک ماده جاذب اکسید فلزی در یک راکتور از گاز سنتز خارج می‌شود.



شکل ۴-۵ سیستم پاک‌سازی گاز سنتز (منبع: نرم افزار Thermo flow)

۴-۸ نتایج مدل‌سازی

نتایج به دست آمده‌ی دو مدل ایجاد شده در نرم افزار Thermo flow برای پسماندهای خشک و با رطوبت به شرح زیر می‌باشد.

ترکیب نهایی گاز برای پسماند خشک در جداول زیر مفروض است:

جدول ۴-۲ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۲ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.2 Air=0.25 | | steam=0.2 Air=0.4 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 40.44 | 40.51 | 38.75 | 38.81 |
| CO2 | 2.21 | 2.214 | 2.235 | 2.239 |
| CH4 | 5.241 | 5.25 | 3.154 | 3.159 |
| H2 | 39.83 | 39.9 | 39.59 | 39.65 |
| H2S | 0.1704 | 0.0017 | 0.1572 | 0.0016 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 2.898 | 2.903 | 3.201 | 3.206 |
| COS | 0.0064 | 0 | 0.0057 | 0 |
| N2 | 9.095 | 9.11 | 12.75 | 12.77 |
| Ar | 0.1095 | 0.1097 | 0.1536 | 0.1538 |
| LHV (BTU/lb) | | 6471 | | 5812 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 49.04 | | 49.95 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1847.2 | | 1886.2 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 12.26 | | 19.98 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 9.809 | | 9.989 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 70.89 | | 79.65 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | |

جدول ۳-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۳/۰ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.3 Air=0.25 | | steam=0.3 Air=0.4 | | steam=0.3 Air=0.6 | | steam=0.3 Air=0.8 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 34.59 | 34.65 | 33.54 | 33.59 | 32.26 | 32.3 | 30.95 | 30.99 |
| CO2 | 5.279 | 5.287 | 4.952 | 4.959 | 4.627 | 4.634 | 4.441 | 4.447 |
| CH4 | 5.788 | 5.798 | 3.731 | 3.737 | 1.653 | 1.655 | 0.4223 | 0.4229 |
| H2 | 38.77 | 38.83 | 38.54 | 38.6 | 37.81 | 37.86 | 36.08 | 36.12 |
| H2S | 0.1632 | 0.0016 | 0.151 | 0.0015 | 0.1379 | 0.0014 | 0.1281 | 0.0013 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 6.63 | 6.641 | 6.739 | 6.75 | 7.09 | 7.1 | 7.935 | 7.945 |
| COS | 0.0053 | 0 | 0.0048 | 0 | 0.0043 | 0 | 0.0041 | 0 |
| N2 | 8.67 | 8.685 | 12.2 | 12.22 | 16.22 | 16.25 | 19.8 | 19.83 |
| Ar | 0.1044 | 0.1046 | 0.1469 | 0.1471 | 0.1954 | 0.1957 | 0.2389 | 0.2388 |
| LHV (BTU/lb) | | 5986 | | 5411 | | 4774 | | 4234 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 50.26 | | 51.18 | | 51.7 | | 52.5 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1725.2 | | 1763 | | 1833.6 | | 1956.9 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 12.56 | | 20.47 | | 31.02 | | 42 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 15.08 | | 15.35 | | 15.51 | | 15.75 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 77.64 | | 86.74 | | 97.96 | | 110 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۴ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.4 Air=0.25 | | steam=0.4 Air=0.4 | | steam=0.4 Air=0.6 | | steam=0.4 Air=0.8 | | steam=0.4 Air=1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 29.16 | 29.21 | 28.64 | 28.69 | 27.98 | 28.02 | 27.27 | 27.31 | 26.35 | 26.38 |
| CO2 | 8.116 | 8.129 | 7.506 | 7.517 | 6.846 | 6.855 | 6.333 | 6.341 | 5.98 | 5.987 |
| CH4 | 6.528 | 6.539 | 4.464 | 4.47 | 2.299 | 2.302 | 0.8165 | 0.8176 | 0.1543 | 0.1545 |
| H2 | 37.33 | 37.39 | 37.19 | 37.25 | 36.69 | 63.74 | 35.51 | 35.55 | 33.06 | 33.1 |
| H2S | 0.1572 | 0.0016 | 0.1458 | 0.0015 | 0.1333 | 0.0013 | 0.1235 | 0.0012 | 0.1164 | 0.0012 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 10.28 | 10.3 | 10.17 | 10.19 | 10.23 | 10.24 | 10.65 | 10.7 | 11.82 | 11.83 |
| COS | 0.0045 | 0 | 0.0041 | 0 | 0.0037 | 0 | 0.0025 | 0 | 0.0034 | 0 |
| N2 | 8.32 | 8.333 | 11.73 | 11.75 | 15.63 | 15.65 | 19.03 | 19.06 | 22.25 | 22.28 |
| Ar | 0.1002 | 0.1004 | 0.1413 | 0.1415 | 0.1882 | 0.1885 | 0.2292 | 0.2295 | 0.268 | 0.2683 |
| LHV (BTU/lb) | | 5548 | | 5044 | | 4482 | | 4006 | | 3580 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 51.56 | | 51.79 | | 52.21 | | 52.89 | | 54.07 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1644.7 | | 1678.5 | | 1736.5 | | 1827 | | 1979 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 12.89 | | 20.72 | | 31.33 | | 4231 | | 54.07 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 20.62 | | 20.72 | | 20.88 | | 21.16 | | 21.63 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 84.81 | | 92.96 | | 104.1 | | 116 | | 129.5 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۵ خروجی نرم افزار با بخار ۵/۰ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.5 Air=0.25 | | steam=0.5 Air=0.4 | | steam=0.5 Air=0.6 | | steam=0.5 Air=0.8 | | steam=0.5 Air=1 | | steam=0.5 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|-------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 24.27 | 24.31 | 24.18 | 24.21 | 24.01 | 24.04 | 23.76 | 23.79 | 23.34 | 23.37 | 23.02 | 23.5 |
| CO2 | 10.6 | 10.62 | 9.785 | 9.799 | 8.878 | 8.89 | 8.132 | 8.142 | 7.513 | 7.539 | 7.292 | 7.3 |
| CH4 | 7.285 | 7.296 | 5.213 | 5.22 | 2.987 | 2.991 | 1.339 | 1.338 | 0.3633 | 0.3637 | 0.1521 | 0.152 |
| H2 | 35.71 | 35.76 | 3569 | 35.75 | 35.42 | 35.46 | 34.66 | 34.7 | 32.92 | 32.96 | 31.58 | 31.62 |
| H2S | 0.1518 | 0.0015 | 0.1411 | 0.0014 | 0.1292 | 0.0013 | 0.1196 | 0.0012 | 0.1123 | 0.0011 | 0.1095 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 13.87 | 13.89 | 13.53 | 13.55 | 13.29 | 13.31 | 13.39 | 13.41 | 14.07 | 14.09 | 14.68 | 14.7 |
| COS | 0.0038 | 0 | 0.0035 | 0 | 0.0032 | 0 | 0.003 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.003 | 0 |
| N2 | 8.006 | 8.019 | 11.32 | 11.33 | 15.1 | 15.12 | 18.38 | 18.4 | 21.4 | 21.42 | 22.88 | 22.91 |
| Ar | 0.0964 | 0.0966 | 0.1363 | 0.1365 | 0.1819 | 0.1821 | 0.2213 | 0.2216 | 0.2577 | 0.258 | 0.2755 | 0.276 |
| LHV (BTU/lb) | | 5159 | | 4714 | | 4214 | | 3791 | | 3414 | | 3237 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 52.16 | | 5239 | | 52.81 | | 53.42 | | 54.39 | | 55.07 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1579.9 | | 1611 | | 1660.6 | | 1730 | | 1843.6 | | 1922.2 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit tempereture (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 13.04 | | 20.96 | | 31.69 | | 42.74 | | 54.39 | | 60.57 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 26.08 | | 26.19 | | 26.41 | | 26.71 | | 27.19 | | 27.53 | |
| GCS temperatuer (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressuer (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 91.02 | | 99.27 | | 110.6 | | 122.6 | | 135.7 | | 142.9 | |
| slag temperatuer | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۶-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۰/۶ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.6 Air=0.25 | | steam=0.6 Air=0.4 | | steam=0.6 Air=0.6 | | steam=0.6 Air=0.8 | | steam=0.6 Air=1 | | steam=0.6 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 19.93 | 19.96 | 20.15 | 20.18 | 20.37 | 20.4 | 20.49 | 20.51 | 20.45 | 20.48 | 20.34 | 20.37 |
| CO2 | 12.71 | 12.73 | 11.76 | 11.77 | 10.68 | 10.69 | 9.776 | 9.788 | 9.007 | 9.017 | 8.672 | 8.681 |
| CH4 | 8.013 | 8.025 | 5.945 | 5.953 | 3.68 | 3.684 | 1.922 | 1.924 | 0.7093 | 0.7101 | 0.3502 | 0.3506 |
| H2 | 33.95 | 34 | 34.07 | 34.12 | 43.01 | 34.06 | 33.58 | 33.62 | 32.46 | 32.49 | 31.47 | 31.51 |
| H2S | 0.1469 | 0.0015 | 0.1365 | 0.0014 | 0.1254 | 0.0013 | 0.1162 | 0.0012 | 0.1088 | 0.0011 | 0.1058 | 0.0011 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 17.44 | 17.47 | 16.86 | 16.89 | 16.33 | 16.35 | 16.1 | 16.12 | 16.35 | 16.36 | 16.73 | 16.75 |
| COS | 0.0031 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.0027 | 0 | 0.0026 | 0 | 0.0025 | 0 | 0.0025 | 0 |
| N2 | 7.719 | 7.731 | 10.94 | 10.95 | 14.62 | 14.64 | 17.8 | 17.82 | 20.67 | 20.69 | 22.05 | 22.08 |
| Ar | 0.093 | 0.931 | 0.1317 | 0.1319 | 0.1761 | 0.1763 | 0.2144 | 0.2146 | 0.2489 | 0.2492 | 0.2656 | 0.2659 |
| LHV (BTU/lb) | | 4812 | | 4417 | | 3969 | | 3589 | | 3254 | | 3096 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 52.78 | | 53.05 | | 53.48 | | 54.03 | | 54.83 | | 55.39 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1523.3 | | 1552 | | 1597.2 | | 1654.3 | | 1739 | | 1799.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 13.2 | | 21.22 | | 32.09 | | 43.22 | | 54.83 | | 60.93 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 31.67 | | 31.83 | | 32.09 | | 32.42 | | 32.9 | | 33.23 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 97.37 | | 105.8 | | 117.4 | | 129.4 | | 142.3 | | 149.3 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۷-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۷/۰ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.7 Air=0.25 | | steam=0.7 Air=0.4 | | steam=0.7 Air=0.6 | | steam=0.7 Air=0.8 | | steam=0.7 Air=1 | | steam=0.7 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 16.11 | 16.13 | 16.58 | 16.6 | 17.09 | 17.11 | 17.48 | 17.5 | 17.73 | 17.75 | 17.78 | 17.8 |
| CO2 | 14.44 | 14.46 | 13.41 | 13.43 | 12.23 | 12.25 | 11.23 | 11.24 | 10.36 | 10.37 | 9.964 | 9.974 |
| CH4 | 8.704 | 8.717 | 6.643 | 6.652 | 4.358 | 4.363 | 2.531 | 2.534 | 1.16 | 1.161 | 0.6727 | 0.6734 |
| H2 | 32.05 | 32.09 | 32.33 | 32.38 | 32.49 | 32.53 | 32.34 | 32.37 | 31.67 | 31.71 | 31.03 | 31.06 |
| H2S | 0.1423 | 0.0014 | 0.1327 | 0.0013 | 0.122 | 0.0012 | 0.1131 | 0.0011 | 0.1058 | 0.0011 | 0.1027 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 21.01 | 21.04 | 20.19 | 20.22 | 19.35 | 19.38 | 18.82 | 18.84 | 18.69 | 18.71 | 18.84 | 18.86 |
| COS | 0.0026 | 0 | 0.0025 | 0 | 0.0023 | 0 | 0.0022 | 0 | 0.0022 | 0 | 0.0022 | 0 |
| N2 | 7.454 | 7.465 | 10.58 | 10.6 | 14.18 | 14.2 | 17.28 | 17.29 | 20.03 | 20.06 | 21.34 | 21.37 |
| Ar | 0.0898 | 0.0899 | 0.1275 | 0.1276 | 0.1708 | .0.171 | 0.2081 | 0.2083 | 0.2413 | 0.2415 | 0.257 | 0.2573 |
| LHV (BTU/lb) | | 4503 | | 4149 | | 3746 | | 3402 | | 3100 | | 2959.5 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 53.45 | | 53.74 | | 54.16 | | 54.68 | | 55.37 | | 55.83 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1471.2 | | 1500 | | 1541.4 | | 1590.8 | | 1657.6 | | 1703.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 13.36 | | 21.49 | | 32.5 | | 43.74 | | 55.37 | | 61.41 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 37.42 | | 37.62 | | 37.92 | | 38.28 | | 38.76 | | 39.08 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 104 | | 112.6 | | 124.3 | | 136.4 | | 149.2 | | 156 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۸-۴ خروجی نرم افزار با بخار ۸۰٪ در صد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.8 Air=0.25 | | steam=0.8 Air=0.4 | | steam=0.8 Air=0.6 | | steam=0.8 Air=0.8 | | steam=0.8 Air=1 | | steam=0.8 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 12.8 | 12.82 | 13.43 | 13.45 | 14.15 | 14.17 | 14.75 | 14.76 | 15.21 | 15.22 | 15.38 | 15.4 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 14.75 | 14.77 | 13.54 | 13.55 | 12.48 | 12.5 | 11.55 | 11.57 | 11.13 | 11.14 |
| CH4 | 9.354 | 9.367 | 7.31 | 7.319 | 5.013 | 5.019 | 3.14 | 3.144 | 1.667 | 1.669 | 1.09 | 1.091 |
| H2 | 30.01 | 30.05 | 30.47 | 30.51 | 30.86 | 30.89 | 30.96 | 30.99 | 30.65 | 30.68 | 30.27 | 30.3 |
| H2S | 0.1379 | 0.0014 | 0.1289 | 0.0013 | 0.1187 | 0.0012 | 0.1102 | 0.0011 | 0.103 | 0.001 | 0.1 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 24.61 | 24.64 | 23.53 | 23.56 | 22.39 | 22.41 | 21.57 | 21.59 | 21.11 | 21.13 | 21.06 | 21.08 |
| COS | 0.0021 | 0 | 0.0021 | 0 | 0.002 | 0 | 0.0019 | 0 | 0.0019 | 0 | 0.0019 | 0 |
| N2 | 7.207 | 7.217 | 10.0021 | 10.27 | 13.77 | 13.78 | 16.79 | 16.81 | 19.47 | 19.49 | 20.72 | 20.75 |
| Ar | 0.0868 | 0.0869 | 0.1235 | 0.1237 | 0.1658 | 0.166 | 0.2022 | 0.2025 | 0.2345 | 0.2348 | 0.2496 | 0.2498 |
| LHV (BTU/lb) | | 4227 | | 3907 | | 3542 | | 3229 | | 2954.5 | | 2827.7 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 54.14 | | 54.43 | | 54.86 | | 55.35 | | 55.97 | | 56.36 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1421.6 | | 1450.4 | | 1421.6 | | 1535.4 | | 1591.1 | | 1626.8 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 13.53 | | 21.77 | | 32.92 | | 44.28 | | 55.97 | | 62 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 43.31 | | 43.55 | | 43.89 | | 44.28 | | 44.78 | | 45.09 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 110.7 | | 119.5 | | 131.4 | | 143.6 | | 156.4 | | 163.2 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۹ خروجی نرم افزار با بخار ۹۰ درصد حجمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=0.9 Air=0.25 | | steam=0.9 Air=0.4 | | steam=0.9 Air=0.6 | | steam=0.9 Air=0.8 | | steam=0.9 Air=1 | | steam=0.9 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.969 | 9.982 | 10.7 | 10.72 | 11.56 | 11.57 | 12.29 | 12.3 | 12.9 | 12.91 | 13.16 | 13.17 |
| CO2 | 16.8 | 16.83 | 15.79 | 15.81 | 14.58 | 14.6 | 13.53 | 13.54 | 12.58 | 12.59 | 12.14 | 12.15 |
| CH4 | 9.962 | 9.975 | 7.932 | 7.942 | 5.639 | 5.645 | 3.739 | 3.743 | 2.197 | 2.199 | 1.563 | 1.564 |
| H2 | 27.83 | 27.87 | 28.49 | 28.53 | 29.12 | 29.15 | 29.46 | 29.49 | 29.45 | 29.48 | 29.27 | 29.3 |
| H2S | 0.1338 | 0.0013 | 0.1253 | 0.0013 | 0.1156 | 0.0012 | 0.1074 | 0.0011 | 0.1005 | 0.001 | 0.0975 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 28.24 | 28.28 | 26.89 | 26.93 | 25.44 | 25.47 | 24.34 | 24.36 | 23.58 | 23.61 | 23.36 | 23.38 |
| COS | 0.0017 | 0 | 0.0017 | 0 | 0.0017 | 0 | 0.0016 | 0 | 0.0016 | 0 | 0.0016 | 0 |
| N2 | 6.976 | 6.985 | 9.945 | 9.958 | 13.38 | 13.39 | 16.34 | 16.36 | 18.96 | 18.98 | 20.17 | 20.19 |
| Ar | 0.084 | 0.0841 | 0.1198 | 0.1199 | 0.1611 | 0.1613 | 0.1968 | 0.197 | 0.2283 | 0.2286 | 0.2429 | 0.2432 |
| LHV (BTU/lb) | | 3978 | | 3689 | | 3355 | | 3069 | | 2817.8 | | 2702.1 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 54.81 | | 55.11 | | 55.55 | | 56.04 | | 56.62 | | 56.97 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1373.1 | | 1402.8 | | 1442.5 | | 1484.9 | | 1534.1 | | 1563.5 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 13.7 | | 22.04 | | 33.33 | | 44.83 | | 56.62 | | 62.66 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 49.33 | | 49.6 | | 49.99 | | 50.43 | | 50.95 | | 51.27 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 117.6 | | 126.5 | | 138.6 | | 151 | | 163.9 | | 170.6 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۱۰ خروجی نرم افزار با بخار ۱ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=1 Air=0.25 | | steam=1 Air=0.4 | | steam=1 Air=0.6 | | steam=1 Air=0.8 | | steam=1 Air=1 | | steam=1 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|------------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|---------------|--------|-----------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 7.587 | 7.597 | 8.364 | 8.374 | 9.293 | 9.303 | 10.11 | 10.12 | 10.82 | 10.83 | 11.13 | 11.14 |
| CO2 | 17.47 | 17.5 | 16.53 | 16.55 | 15.39 | 15.4 | 14.36 | 14.38 | 13.43 | 13.44 | 13 | 13.01 |
| CH4 | 10.53 | 10.54 | 8.52 | 8.531 | 6.234 | 6.241 | 4.318 | 4.322 | 2.732 | 2.734 | 2.058 | 2.06 |
| H2 | 25.53 | 25.56 | 26.4 | 26.43 | 27.28 | 27.31 | 27.86 | 27.88 | 28.11 | 28.14 | 28.09 | 28.12 |
| H2S | 0.13 | 0.0013 | 0.1219 | 0.0012 | 0.1127 | 0.0011 | 0.1049 | 0.001 | 0.09882 | 0.001 | 0.0953 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 31.91 | 31.95 | 30.29 | 30.33 | 28.53 | 28.56 | 27.14 | 27.17 | 26.1 | 26.13 | 25.73 | 25.75 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0014 | 0 | 0.0014 | 0 | 0.0014 | 0 | 0.0014 | 0 | 0.0014 | 0 |
| N2 | 6.758 | 6.767 | 39.654 | 9.665 | 13.01 | 13.03 | 15.92 | 15.94 | 18.48 | 18.5 | 19.66 | 19.68 |
| Ar | 0.0814 | 0.0815 | 0.1163 | 0.1164 | 0.1567 | 0.1569 | 0.1917 | 0.1919 | 0.2226 | 0.2228 | 0.2368 | 0.237 |
| LHV (BTU/lb) | | 3755 | | 3490 | | 3185 | | 2921.4 | | 2689.9 | | 2583.6 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.46 | | 55.78 | | 56.23 | | 56.72 | | 57.28 | | 57.6 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1324.9 | | 1356 | | 1396.3 | | 1437.6 | | 1483 | | 1508.7 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 13.86 | | 22.31 | | 33.74 | | 45.37 | | 57.28 | | 63.36 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 55.46 | | 55.78 | | 56.23 | | 56.72 | | 57.25 | | 57.6 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 124.5 | | 133.6 | | 145.9 | | 158.5 | | 171.5 | | 178.3 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۱۱ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۱ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=1.1 Air=0.25 | | steam=1.1 Air=0.4 | | steam=1.1 Air=0.6 | | steam=1.1 Air=0.8 | | steam=1.1 Air=1 | | steam=1.1 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 4.053 | 4.058 | 10.11 | 10.12 | 10.11 | 10.12 | 10.11 | 10.12 | 8.961 | 8.97 | 9.308 | 9.317 |
| CO2 | 17.9 | 17.93 | 14.36 | 14.38 | 14.36 | 14.38 | 14.36 | 14.38 | 14.11 | 14.12 | 13.69 | 13.7 |
| CH4 | 11.52 | 11.54 | 4.318 | 4.322 | 4.318 | 4.322 | 4.318 | 4.322 | 3.26 | 3.264 | 2.56 | 2.562 |
| H2 | 20.62 | 20.65 | 27.86 | 27.88 | 27.86 | 27.88 | 27.86 | 27.88 | 26.65 | 26.68 | 26.77 | 26.79 |
| H2S | 0.1227 | 0.0012 | 0.1049 | 0.001 | 0.1049 | 0.001 | 0.1049 | 0.001 | 0.096 | 0.001 | 0.0931 | 0.0009 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 39.34 | 39.39 | 27.14 | 27.17 | 27.14 | 27.17 | 27.14 | 27.17 | 28.67 | 28.7 | 28.15 | 28.18 |
| COS | 0.0009 | 0 | 0.0014 | 0 | 0.0014 | 0 | 0.0014 | 0 | 0.0012 | 0 | 0.0012 | 0 |
| N2 | 6.358 | 6.366 | 15.92 | 15.94 | 15.92 | 15.94 | 15.92 | 15.94 | 18.04 | 18.05 | 19.19 | 19.21 |
| Ar | 0.0766 | 0.0767 | 0.1917 | 0.1919 | 0.1917 | 0.1919 | 0.1917 | 0.1919 | 0.2172 | 0.2174 | 0.2311 | 0.2314 |
| LHV (BTU/lb) | | 3553 | | 3310 | | 3029 | | 2785.1 | | 2570.7 | | 2472.3 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 56.66 | | 56.72 | | 56.72 | | 56.72 | | 57.94 | | 58.2 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1226.9 | | 1437.6 | | 1437.6 | | 1437.6 | | 1435.6 | | 1459.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.17 | | 45.37 | | 45.37 | | 45.37 | | 57.94 | | 64.02 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 67.99 | | 56.72 | | 56.72 | | 56.72 | | 63.74 | | 64.02 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 138.5 | | 158.5 | | 158.5 | | 158.5 | | 179.3 | | 186 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۱۲ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۲ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=1.2 Air=0.25 | | steam=1.2 Air=0.4 | | steam=1.2 Air=0.6 | | steam=1.2 Air=0.8 | | steam=1.2 Air=1 | | steam=1.2 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 4.053 | 4.058 | 4.772 | 4.777 | 5.688 | 5.694 | 6.542 | 6.548 | 7.324 | 7.331 | 7.688 | 7.695 |
| CO2 | 17.9 | 17.93 | 17.2 | 17.22 | 16.3 | 16.31 | 15.43 | 15.45 | 14.62 | 14.63 | 14.23 | 14.24 |
| CH4 | 11.52 | 11.54 | 9.58 | 9.591 | 7.328 | 7.336 | 5.407 | 5.413 | 3.774 | 3.778 | 3.056 | 3.059 |
| H2 | 20.62 | 20.65 | 21.92 | 21.95 | 23.32 | 23.34 | 24.36 | 24.39 | 25.09 | 25.12 | 25.34 | 25.36 |
| H2S | 0.1227 | 0.0012 | 0.1155 | 0.0012 | 0.1072 | 0.0011 | 0.1001 | 0.001 | 0.0939 | 0.0009 | 0.0911 | 0.0009 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 39.34 | 39.39 | 37.18 | 37.22 | 34.78 | 34.82 | 32.83 | 32.86 | 31.27 | 31.3 | 30.62 | 30.65 |
| COS | 0.0009 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.001 | 0 | 0.001 | 0 | 0.001 | 0 |
| N2 | 6.358 | 6.366 | 9.116 | 9.127 | 12.34 | 12.35 | 15.14 | 15.16 | 17.61 | 17.63 | 18.75 | 18.77 |
| Ar | 0.0766 | 0.0767 | 0.1098 | 0.1099 | 0.1486 | 0.1488 | 0.1824 | 0.1825 | 0.2121 | 0.2123 | 0.2258 | 0.226 |
| LHV (BTU/lb) | | 3370 | | 3146 | | 2885.7 | | 2659.2 | | 2459.6 | | 2368.1 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 56.66 | | 57.03 | | 57.53 | | 58.02 | | 58.47 | | 58.62 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1226.9 | | 1262.4 | | 1306.3 | | 1348.3 | | 1390.7 | | 1413 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.17 | | 22.81 | | 34.52 | | 46.44 | | 58.47 | | 64.48 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 67.99 | | 68.44 | | 69.04 | | 69.66 | | 70.17 | | 70.34 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 138.5 | | 148 | | 160.8 | | 173.9 | | 186.8 | | 193.1 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۱۳ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۳ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=1.3 Air=0.25 | | steam=1.3 Air=0.4 | | steam=1.3 Air=0.6 | | steam=1.3 Air=0.8 | | steam=1.3 Air=1 | | steam=1.3 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|-------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 2.822 | 2.826 | 3.464 | 3.468 | 4.311 | 4.315 | 5.128 | 5.133 | 5.898 | 5.904 | 6.262 | 6.268 |
| CO2 | 17.73 | 17.75 | 17.18 | 17.2 | 16.43 | 16.45 | 15.69 | 15.7 | 14.96 | 14.98 | 14.61 | 14.62 |
| CH4 | 11.96 | 11.97 | 10.05 | 10.06 | 7.827 | 7.836 | 5.914 | 5.92 | 4.272 | 4.275 | 3.543 | 3.546 |
| H2 | 18.06 | 18.08 | 19.57 | 19.59 | 21.03 | 21.24 | 22.5 | 22.52 | 23.45 | 23.47 | 23.81 | 23.83 |
| H2S | 0.1193 | 0.0012 | 0.1126 | 0.0011 | 0.1047 | 0.001 | 0.0978 | 0.001 | 0.0919 | 0.0009 | 0.0892 | 0.0009 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 43.06 | 43.11 | 40.65 | 40.7 | 37.94 | 37.98 | 35.72 | 35.75 | 33.9 | 33.93 | 33.14 | 33.17 |
| COS | 0.0007 | 0 | 0.0007 | 0 | 0.0008 | 0 | 0.0008 | 0 | 0.0008 | 0 | 0.0008 | 0 |
| N2 | 6.173 | 6.18 | 8.867 | 8.877 | 12.03 | 12.04 | 14.78 | 14.79 | 17.21 | 17.23 | 18.33 | 18.35 |
| Ar | 0.0743 | 0.0744 | 0.1068 | 0.1069 | 0.1448 | 0.145 | 0.178 | 0.1782 | 0.2073 | 0.2073 | 0.2208 | 0.221 |
| LHV (BTU/lb) | | 3204 | | 2996.9 | | 2754 | | 2542 | | 2356.3 | | 2270 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 57.21 | | 57.61 | | 58.15 | | 58.62 | | 58.88 | | 59.03 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1176 | | 1214.6 | | 1261.2 | | 1304.8 | | 1347.3 | | 1369 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.3 | | 23.04 | | 34.89 | | 46.9 | | 58.88 | | 64.93 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 74.37 | | 74.9 | | 75.59 | | 76.21 | | 76.54 | | 76.74 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 145.6 | | 155.3 | | 168.3 | | 181.4 | | 194 | | 200.4 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۱۴ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۴ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=1.4 Air=0.25 | | steam=1.4 Air=0.4 | | steam=1.4 Air=0.6 | | steam=1.4 Air=0.8 | | steam=1.4 Air=1 | | steam=1.4 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 1.893 | 1.895 | 2.439 | 2.441 | 3.19 | 3.193 | 3.934 | 3.947 | 4.674 | 4.678 | 5.027 | 5.032 |
| CO2 | 17.34 | 17.36 | 16.95 | 16.97 | 16.37 | 16.39 | 15.77 | 15.78 | 15.15 | 15.17 | 14.84 | 14.85 |
| CH4 | 12.34 | 12.35 | 10.48 | 10.49 | 8.391 | 8.299 | 6.392 | 6.398 | 4.749 | 4.753 | 4.013 | 4.017 |
| H2 | 15.49 | 15.51 | 17.18 | 17.2 | 19.06 | 19.08 | 20.57 | 20.59 | 21.74 | 21.76 | 22.2 | 22.22 |
| H2S | 0.116 | 0.0012 | 0.1097 | 0.0011 | 0.1022 | 0.001 | 0.0957 | 0.001 | 0.09 | 0.0009 | 0.0874 | 0.0009 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 46.75 | 46.81 | 44.11 | 44.16 | 41.11 | 41.15 | 38.62 | 38.66 | 36.56 | 36.6 | 35.68 | 35.71 |
| COS | 0.0005 | 0 | 0.0006 | 0 | 0.0006 | 0 | 0.0007 | 0 | 0.0007 | 0 | 0.0007 | 0 |
| N2 | 5.996 | 6.003 | 8.629 | 8.638 | 11.73 | 11.74 | 14.43 | 14.45 | 16.83 | 16.85 | 17.93 | 17.95 |
| Ar | 0.0722 | 0.0723 | 0.1039 | 0.104 | 0.1412 | 0.1414 | 0.1738 | 0.174 | 0.2027 | 0.2029 | 0.216 | 0.2162 |
| LHV (BTU/lb) | | 3054 | | 2860.4 | | 2633.5 | | 2435.4 | | 2260.2 | | 2179.7 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 57.72 | | 58.16 | | 58.73 | | 58.99 | | 59.27 | | 59.43 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1123.6 | | 1165 | | 1215.7 | | 1261.4 | | 1304.8 | | 1326.3 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.43 | | 23.26 | | 35.24 | | 47.19 | | 59.27 | | 65.37 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 80.8 | | 81.42 | | 82.22 | | 82.59 | | 82.98 | | 83.2 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 152.7 | | 162.5 | | 175.9 | | 188.5 | | 201.2 | | 207.7 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۱۵ خروجی نرم افزار با بخار ۱/۵ درصد جرمی سوخت ورودی به راکتور

| عناصر | steam=1.5 Air=0.25 | | steam=1.5 Air=0.4 | | steam=1.5 Air=0.6 | | steam=1.5 Air=0.8 | | steam=1.5 Air=1 | | steam=1.5 Air=1.1 | |
|--------------------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|-------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 1.216 | 1.218 | 1.659 | 1.66 | 2.298 | 2.301 | 2.967 | 2.97 | 3.641 | 3.644 | 3.973 | 3.977 |
| CO2 | 16.79 | 16.81 | 16.55 | 16.57 | 16.15 | 16.17 | 15.7 | 15.71 | 15.2 | 15.21 | 14.94 | 14.95 |
| CH4 | 12.67 | 12.68 | 10.86 | 10.88 | 8.719 | 8.728 | 6.843 | 6.85 | 5.203 | 5.207 | 4.464 | 4.468 |
| H2 | 12.95 | 12.96 | 14.79 | 14.81 | 16.88 | 16.9 | 18.59 | 18.61 | 19.97 | 19.98 | 20.53 | 20.55 |
| H2S | 0.1129 | 0.0011 | 0.1069 | 0.0011 | 0.0998 | 0.001 | 0.0936 | 0.0009 | 0.0881 | 0.0009 | 0.0857 | 0.0009 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 50.36 | 50.42 | 47.53 | 47.58 | 44.27 | 44.31 | 41.1 | 41.57 | 39.24 | 39.27 | 38.24 | 38.28 |
| COS | 0.0004 | 0 | 0.0004 | 0 | 0.0005 | 0 | 0.0005 | 0 | 0.0006 | 0 | 0.0006 | 0 |
| N2 | 5.826 | 5.832 | 8.4 | 8.409 | 11.44 | 11.45 | 14.1 | 14.12 | 16.47 | 16.48 | 17.55 | 17.57 |
| Ar | 0.0702 | 0.0702 | 0.1012 | 0.1013 | 0.1377 | 0.1379 | 0.1699 | 0.17 | 0.1983 | 0.1985 | 0.2114 | 0.2116 |
| LHV (BTU/lb) | | 2917.1 | | 2735.7 | | 2522.5 | | 2335.9 | | 2170.8 | | 2094.9 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 58.18 | | 58.66 | | 59.05 | | 59.33 | | 59.64 | | 59.81 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1069.3 | | 1115.3 | | 1169.4 | | 1217.7 | | 1262.7 | | 1284.6 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.54 | | 23.46 | | 35.43 | | 47.46 | | 59.64 | | 65.79 | |
| steam mass flow rate (lb/s) | 87.27 | | 87.99 | | 88.57 | | 89 | | 89.46 | | 89.71 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 159.7 | | 169.8 | | 182.7 | | 195.5 | | 208.4 | | 215 | |
| Slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

۴-۹ تأثیر رطوبت

پسماند شهری کشورهای در حال توسعه معمولاً از رطوبت بالاتری نسبت به کشورهای توسعه یافته برخوردارند لذا بررسی اثر رطوبت روی ترکیب گاز خروجی ناشی از زائدات در فرایند گازی سازی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. ترکیب نهایی گاز برای پسماند با رطوبت در جداول زیر مفروض است:

جدول ۴-۱۶ خروجی نرم افزار با رطوبت ۵٪

| عناصر | H2O wt 5% Mw/Mf ration 0.2 | | H2O wt 5% Mw/Mf ration 0.4 | | H2O wt 5% Mw/Mf ration 0.6 | | H2O wt 5% Mw/Mf ration 0.8 | |
|--------------------------------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 39.9 | 39.97 | 28.93 | 28.97 | 20.33 | 20.36 | 13.84 | 20.36 |
| CO2 | 2.175 | 2.179 | 7.607 | 7.619 | 11.63 | 11.64 | 14.28 | 11.64 |
| CH4 | 4.417 | 4.425 | 4.994 | 5.001 | 5.794 | 5.802 | 6.509 | 5.802 |
| H2 | 39.89 | 39.96 | 37.41 | 37.47 | 34.29 | 34.33 | 30.87 | 34.33 |
| H2S | 0.1655 | 0.0017 | 0.1491 | 0.0015 | 0.1364 | 0.0014 | 0.1258 | 0.0014 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 2.957 | 2.962 | 10.14 | 10.16 | 16.78 | 16.8 | 23.08 | 16.8 |
| COS | 0.0061 | 0 | 0.0042 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.002 | 0 |
| N2 | 10.36 | 10.38 | 10.63 | 10.65 | 10.91 | 10.92 | 11.15 | 10.92 |
| Ar | 0.1248 | 0.125 | 0.128 | 0.1282 | 0.1314 | 0.1316 | 0.1343 | 0.1316 |
| LHV (BTU/lb) | | 6242 | | 5209 | | 4424 | | 4424 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 49.3 | | 51.65 | | 52.95 | | 52.95 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1862.9 | | 1670.7 | | 1557.6 | | 1557.6 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.79 | | 18.08 | | 21.18 | | 21.18 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 9.859 | | 20.66 | | 31.77 | | 31.77 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |

جدول ۴-۱۷ خروجی نرم افزار با رطوبت ۵٪

| عناصر | H2O wt 5% Mw/Mf ration 1 | | H2O wt 5% Mw/Mf ration 1.2 | | H2O wt 5% Mw/Mf ration 1.5 | |
|--------------------------------------|--------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.075 | 9.085 | 5.687 | 5.693 | 2.555 | 2.557 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 16.4 | 16.42 | 16.06 | 16.07 |
| CH4 | 7.121 | 7.129 | 7.632 | 7.641 | 8.227 | 8.235 |
| H2 | 27.24 | 27.27 | 23.45 | 23.47 | 17.7 | 17.71 |
| H2S | 0.1167 | 0.0012 | 0.1087 | 0.0011 | 0.0985 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 29.16 | 29.19 | 35.05 | 35.09 | 43.48 | 43.53 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.0005 | 0 |
| N2 | 11.36 | 11.37 | 11.53 | 11.54 | 11.74 | 11.75 |
| Ar | 0.1368 | 0.1369 | 0.1389 | 0.139 | 0.1414 | 0.1415 |
| LHV (BTU/lb) | | 3341 | | 2956 | | 2506.8 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 57.23 | | 58.89 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1383.3 | | 1304.2 | | 1187.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 27.92 | | 31.47 | | 36.81 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 68.67 | | 88.33 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 139.3 | | 157.1 | | 183.7 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۱۸ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۰٪

| عناصر | H2O wt 10% Mw/Mf ration 0.2 | | H2O wt 10% Mw/Mf ration 0.4 | | H2O wt 10% Mw/Mf ration 0.6 | | H2O wt 10% Mw/Mf ration 0.8 | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 39.9 | 39.97 | 28.93 | 28.97 | 20.33 | 20.36 | 13.84 | 13.86 |
| CO2 | 2.177 | 2.18 | 7.607 | 7.619 | 11.63 | 11.64 | 14.28 | 14.3 |
| CH4 | 4.42 | 4.427 | 4.994 | 5.001 | 5.794 | 5.802 | 6.509 | 6.517 |
| H2 | 39.89 | 39.95 | 37.41 | 37.47 | 34.29 | 34.33 | 30.87 | 30.91 |
| H2S | 0.1655 | 0.0017 | 0.1491 | 0.0015 | 0.1364 | 0.0014 | 0.1258 | 0.0013 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 2.958 | 2.963 | 10.14 | 10.16 | 16.78 | 16.8 | 23.08 | 23.11 |
| COS | 0.0061 | 0 | 0.0042 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.002 | 0 |
| N2 | 10.36 | 10.38 | 10.63 | 10.65 | 10.91 | 10.92 | 11.15 | 11.16 |
| Ar | 0.1248 | 0.125 | 0.128 | 0.1282 | 0.1314 | 0.1316 | 0.1343 | 0.1345 |
| LHV (BTU/lb) | | 6242 | | 5209 | | 4424 | | 3819 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 49.3 | | 51.66 | | 52.95 | | 54.41 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1862.8 | | 1670.7 | | 1557.6 | | 1466.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.79 | | 18.08 | | 21.18 | | 24.48 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 9.86 | | 20.66 | | 31.77 | | 43.53 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 73.69 | | 90.12 | | 105.6 | | 122.1 | |

جدول ۴-۱۹ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۰٪

| عناصر | H2O wt 10% Mw/Mf ration 1 | | H2O wt 10% Mw/Mf ration 1.2 | | H2O wt 10% Mw/Mf ration 1.5 | |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.075 | 9.085 | 5.687 | 5.693 | 2.555 | 2.557 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 16.4 | 16.42 | 16.06 | 16.07 |
| CH4 | 7.121 | 7.129 | 7.632 | 7.641 | 8.227 | 8.235 |
| H2 | 27.24 | 27.27 | 23.45 | 23.47 | 17.7 | 17.71 |
| H2S | 0.1167 | 0.0012 | 0.1087 | 0.0011 | 0.0985 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 29.16 | 29.19 | 35.05 | 35.09 | 43.48 | 43.53 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0009 | 11.54 | 0.0005 | 0 |
| N2 | 11.36 | 11.37 | 11.53 | 11.54 | 11.74 | 11.75 |
| Ar | 0.1368 | 0.1369 | 0.1389 | 0.139 | 0.1414 | 0.1415 |
| LHV (BTU/lb) | | 3341 | | 2956 | | 2506.8 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 57.23 | | 58.89 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1383.3 | | 1304.2 | | 1187.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 27.92 | | 31.47 | | 36.81 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 68.67 | | 88.33 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 139.3 | | 157.1 | | 183.7 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۰ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۵٪

| عناصر | H2O wt 15% Mw/Mf ration 0.2 | | H2O wt 15% Mw/Mf ration 0.4 | | H2O wt 15% Mw/Mf ration 0.6 | | H2O wt 15% Mw/Mf ration 0.8 | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 39.9 | 39.97 | 28.93 | 28.97 | 20.33 | 20.36 | 13.84 | 13.86 |
| CO2 | 2.177 | 2.18 | 7.607 | 7.619 | 11.63 | 11.64 | 14.28 | 14.3 |
| CH4 | 4.42 | 4.427 | 4.994 | 5.001 | 5.794 | 5.802 | 6.509 | 6.517 |
| H2 | 39.89 | 39.95 | 37.41 | 37.47 | 34.26 | 34.33 | 30.87 | 30.91 |
| H2S | 0.1655 | 0.0017 | 0.1491 | 0.0015 | 0.1364 | 0.0014 | 0.1258 | 0.0013 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 2.958 | 2.963 | 10.14 | 10.16 | 16.78 | 16.8 | 23.08 | 23.11 |
| COS | 0.0061 | 0 | 0.0042 | 0 | 0.002910.91 | 0 | 0.002 | 0 |
| N2 | 10.36 | 10.38 | 10.63 | 10.65 | 0.1314 | 10.92 | 11.15 | 11.16 |
| Ar | 0.1248 | 0.125 | 0.128 | 0.1282 | 0.128 | 0.1316 | 0.1343 | 0.1345 |
| LHV (BTU/lb) | | 6242 | | 5209 | | 4424 | | 3819 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 49.3 | | 51.65 | | 52.95 | | 54.41 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1862.8 | | 1670.7 | | 1557.6 | | 1466.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 14.79 | | 18.08 | | 21.18 | | 24.48 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 9.86 | | 20.66 | | 31.77 | | 43.53 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 73.69 | | 90.12 | | 105.6 | | 122.1 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۱ خروجی نرم افزار با رطوبت ۱۵٪

| عناصر | H2O wt 15% Mw/Mf ration 1 | | H2O wt 15% Mw/Mf ration 1.2 | | H2O wt 15% Mw/Mf ration 1.5 | |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.075 | 9.085 | 5.678 | 5.693 | 2.555 | 2.557 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 16.4 | 16.42 | 16.06 | 16.07 |
| CH4 | 7.121 | 7.129 | 7.632 | 7.641 | 8.227 | 8.235 |
| H2 | 27.24 | 27.27 | 23.45 | 23.47 | 17.7 | 17.71 |
| H2S | 0.1167 | 0.0012 | 0.1087 | 0.0011 | 0.0985 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 29.16 | 29.19 | 35.05 | 35.09 | 43.48 | 43.53 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.0005 | 0 |
| N2 | 11.36 | 11.37 | 11.53 | 11.54 | 11.74 | 11.75 |
| Ar | 0.1368 | 0.1369 | 0.1389 | 0.139 | 0.1414 | 0.1415 |
| LHV (BTU/lb) | | 3341 | | 2956.6 | | 2506.8 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 57.23 | | 58.89 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1383.3 | | 1304.2 | | 1187.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 27.92 | | 31.47 | | 36.81 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 68.67 | | 88.33 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 139.3 | | 157.1 | | 183.7 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۲ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۰٪

| عناصر | H2O wt 20% Mw/Mf ration 0.2 | | H2O wt 20% Mw/Mf ration 0.4 | | H2O wt 20% Mw/Mf ration 0.6 | | H2O wt 20% Mw/Mf ration 0.8 | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 36.96 | 37.02 | 28.93 | 28.97 | 20.33 | 20.36 | 13.84 | 13.86 |
| CO2 | 3.632 | 3.638 | 7.607 | 7.616 | 11.63 | 11.64 | 14.28 | 14.3 |
| CH4 | 4.465 | 4.472 | 4.994 | 5.001 | 5.794 | 5.802 | 6.509 | 6.517 |
| H2 | 39.42 | 39.49 | 37.41 | 37.47 | 34.29 | 34.33 | 30.87 | 30.91 |
| H2S | 0.1607 | 0.0016 | 0.1491 | 0.0015 | 0.1364 | 0.0014 | 0.1258 | 0.0013 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 4.813 | 4.821 | 10.14 | 10.16 | 16.78 | 16.8 | 23.08 | 23.11 |
| COS | 0.0055 | 0 | 0.0042 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.002 | 0 |
| N2 | 10.42 | 10.43 | 10.63 | 10.65 | 10.91 | 10.92 | 11.15 | 11.16 |
| Ar | 0.1254 | 0.1256 | 0.128 | 0.1282 | 0.1314 | 0.1316 | 0.1343 | 0.1345 |
| LHV (BTU/lb) | | 5958 | | 5209 | | 4424 | | 3819 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 49.94 | | 51.56 | | 52.95 | | 54.41 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1796.5 | | 1670.7 | | 1557.6 | | 1466.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 15.61 | | 18.08 | | 21.18 | | 24.48 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 12.49 | | 20.66 | | 31.77 | | 43.53 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 77.77 | | 90.12 | | 105.6 | | 122.1 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۳ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۵٪

| عناصر | H2O wt 20% Mw/Mf ration 1 | | H2O wt 20% Mw/Mf ration 1.2 | | H2O wt 20% Mw/Mf ration 1.5 | |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.075 | 9.085 | 5.687 | 5.693 | 2.555 | 2.557 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 16.4 | 16.42 | 16.06 | 16.07 |
| CH4 | 7.121 | 7.129 | 7.632 | 7.641 | 8.227 | 8.235 |
| H2 | 27.24 | 27.27 | 23.45 | 23.47 | 17.7 | 17.71 |
| H2S | 0.1167 | 0.0012 | 0.1087 | 0.0011 | 0.0985 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 29.16 | 29.19 | 35.05 | 35.09 | 43.48 | 43.53 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.0005 | 0 |
| N2 | 11.36 | 11.37 | 11.53 | 11.54 | 11.74 | 11.75 |
| Ar | 0.1368 | 0.1369 | 0.1389 | 0.139 | 0.1414 | 0.1415 |
| LHV (BTU/lb) | | 3341 | | 2956 | | 2506 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 57.23 | | 58.89 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1383.3 | | 1304.2 | | 1187.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 27.92 | | 31.47 | | 36.81 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 68.67 | | 88.33 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | |

جدول ۴-۲۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۵٪

| عناصر | H2O wt 25% Mw/Mf ration 0.2 | | H2O wt 25% Mw/Mf ration 0.4 | | H2O wt 25% Mw/Mf ration 0.6 | | H2O wt 25% Mw/Mf ration 0.8 | |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 32.33 | 32.38 | 28.93 | 28.97 | 20.33 | 20.36 | 13.84 | 13.86 |
| CO2 | 5.936 | 5.945 | 7.607 | 7.619 | 11.63 | 11.64 | 14.28 | 14.3 |
| CH4 | 4.731 | 4.738 | 4.994 | 5.001 | 5.794 | 5.802 | 6.509 | 6.517 |
| H2 | 38.37 | 38.43 | 37.41 | 37.47 | 34.29 | 34.33 | 30.87 | 30.91 |
| H2S | 0.1539 | 0.0015 | 0.1491 | 0.0015 | 0.1364 | 0.0014 | 0.1258 | 0.0013 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 7.821 | 7.834 | 10.14 | 10.16 | 16.78 | 16.8 | 23.08 | 23.11 |
| COS | 0.0048 | 0 | 0.0042 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.002 | 0 |
| N2 | 10.53 | 10.55 | 10.63 | 10.65 | 10.91 | 10.92 | 11.15 | 11.16 |
| Ar | 0.1268 | 0.127 | 0.128 | 0.1282 | 0.1314 | 0.1346 | 0.1343 | 0.1345 |
| LHV (BTU/lb) | | 5523 | | 5209 | | 4424 | | 3819 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 51.16 | | 51.65 | | 52.95 | | 54.41 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1719 | | 1670.7 | | 1557.6 | | 1466.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 17.05 | | 18.08 | | 21.18 | | 24.48 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 17.05 | | 20.66 | | 31.77 | | 43.53 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 85 | | 183.7 | | 105.6 | | 122.1 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۵ خروجی نرم افزار با رطوبت ۲۵٪

| عناصر | H2O wt 25% Mw/Mf ration 1 | | H2O wt 25% Mw/Mf ration 1.2 | | H2O wt 25% Mw/Mf ration 1.5 | |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.075 | 9.085 | 5.687 | 5.693 | 2.555 | 2.557 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 16.4 | 16.42 | 16.06 | 16.07 |
| CH4 | 7.121 | 7.129 | 7.632 | 7.641 | 8.227 | 8.235 |
| H2 | 27.24 | 27.27 | 23.45 | 23.47 | 17.7 | 17.71 |
| H2S | 0.1167 | 0.0012 | 0.1087 | 0.0011 | 0.0985 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 29.16 | 29.19 | 35.05 | 35.09 | 43.48 | 43.53 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.0005 | 0 |
| N2 | 11.36 | 11.37 | 11.53 | 11.54 | 11.74 | 11.75 |
| Ar | 0.1368 | 0.1369 | 0.1389 | 0.139 | 0.1414 | 0.1415 |
| LHV (BTU/lb) | | 3341 | | 2956.6 | | 2506.8 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 57.23 | | 58.89 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1383.3 | | 1304.2 | | 1187.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 27.92 | | 31.47 | | 36.81 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 68.67 | | 88.33 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۶ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۰٪

| عناصر | H2O wt 30% Mw/Mf ration 0.2 | | H2O wt 30% Mw/Mf ration 0.45 | | H2O wt 30% Mw/Mf ration 0.6 | | H2O wt 30% Mw/Mf ration 0.8 | |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 27.56 | 27.6 | 26.56 | 26.6 | 20.33 | 20.36 | 13.84 | 13.86 |
| CO2 | 8.272 | 8.284 | 8.75 | 8.763 | 11.63 | 11.64 | 14.28 | 14.3 |
| CH4 | 5.109 | 5.117 | 5.196 | 5.204 | 5.794 | 5.802 | 6.509 | 6.517 |
| H2 | 36.99 | 37.04 | 36.67 | 36.72 | 34.29 | 34.33 | 30.87 | 30.91 |
| H2S | 0.1471 | 0.0015 | 0.1457 | 0.0015 | 0.1364 | 0.0014 | 0.1258 | 0.0013 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 11.12 | 11.14 | 11.85 | 11.86 | 16.78 | 16.8 | 23.08 | 23.11 |
| COS | 0.004 | 0 | 0.0039 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.002 | 0 |
| N2 | 10.67 | 10.69 | 10.7 | 10.72 | 10.91 | 10.92 | 11.15 | 11.16 |
| Ar | 0.1285 | 0.1287 | 0.1289 | 0.1291 | 0.1314 | 0.1316 | 0.1343 | 0.1345 |
| LHV (BTU/lb) | | 5083 | | 4992 | | 4424 | | 3819 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 51.82 | | 51.96 | | 52.95 | | 54.41 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1652.3 | | 1639.1 | | 1557.6 | | 1466.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 18.51 | | 18.83 | | 21.18 | | 24.48 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 22.21 | | 23.38 | | 31.77 | | 43.53 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 92.28 | | 93.9 | | 105.6 | | 122.1 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۷ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۰٪

| عناصر | H2O wt 30% Mw/Mf ration1 | | H2O wt 30% Mw/Mf ration 1.2 | | H2O wt 30% Mw/Mf ration 1.5 | |
|--------------------------------------|--------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.075 | 9.085 | 5.687 | 5.693 | 2.555 | 2.557 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 16.4 | 16.42 | 16.06 | 16.07 |
| CH4 | 7.121 | 7.129 | 7.632 | 7.641 | 8.227 | 8.235 |
| H2 | 27.24 | 27.27 | 23.45 | 23.47 | 17.7 | 17.71 |
| H2S | 0.1167 | 0.0012 | 0.1087 | 0.0011 | 0.0985 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 29.16 | 29.19 | 35.05 | 35.09 | 43.48 | 43.53 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.0005 | 0 |
| N2 | 11.36 | 11.37 | 11.53 | 11.54 | 11.74 | 11.75 |
| Ar | 0.1368 | 0.1369 | 0.1389 | 0.139 | 0.1414 | 0.1415 |
| LHV (BTU/lb) | | 3341 | | 2956.6 | | 2506 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 57.23 | | 58.89 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1383.3 | | 1304.2 | | 1187.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 27.92 | | 31.47 | | 36.81 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 68.67 | | 88.33 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 139.3 | | 157.1 | | 183.7 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۲۸-۴ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۵٪

| عناصر | H2O wt 35% Mw/Mf ration 0.2 | | H2O wt 35% Mw/Mf ration 0.5 | | H2O wt 35% Mw/Mf ration 0.6 | | H2O wt 35% Mw/Mf ration 0.8 | |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 22.73 | 22.77 | 22.27 | 22.3 | 20.33 | 20.36 | 13.84 | 13.86 |
| CO2 | 10.55 | 10.56 | 10.76 | 10.77 | 11.63 | 11.64 | 14.28 | 14.3 |
| CH4 | 5.554 | 5.562 | 5.6 | 5.608 | 5.794 | 5.802 | 6.509 | 6.517 |
| H2 | 35.28 | 35.33 | 35.1 | 35.15 | 34.29 | 34.33 | 30.87 | 30.91 |
| H2S | 0.14 | 0.0014 | 0.1393 | 0.0014 | 0.1364 | 0.0014 | 0.1258 | 0.0013 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 14.78 | 14.8 | 15.16 | 15.18 | 16.78 | 16.8 | 23.08 | 23.11 |
| COS | 0.0033 | 0 | 0.0032 | 0 | 0.0029 | 0 | 0.002 | 0 |
| N2 | 10.83 | 10.84 | 10.84 | 10.86 | 10.91 | 10.92 | 11.15 | 11.16 |
| Ar | 0.1304 | 0.1306 | 0.1306 | 0.1308 | 0.1314 | 0.1316 | 0.1343 | 0.1345 |
| LHV (BTU/lb) | | 4644 | | 4601 | | 4424 | | 3819 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 52.53 | | 52.6 | | 52.95 | | 54.41 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1589.1 | | 1583 | | 1557.6 | | 1466.1 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 20.2 | | 20.38 | | 21.18 | | 24.48 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 28.28 | | 28.93 | | 31.77 | | 43.53 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 100.7 | | 101.7 | | 105.6 | | 122.1 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | | 212 | |

جدول ۴-۲۹ خروجی نرم افزار با رطوبت ۳۵٪

| عناصر | H2O wt 35% Mw/Mf ration 1 | | H2O wt 35% Mw/Mf ration 1.2 | | H2O wt 35% Mw/Mf ration 1.5 | |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT | GCS inlet | to GT |
| CO | 9.075 | 9.085 | 5.687 | 5.693 | 2.555 | 2.557 |
| CO2 | 15.8 | 15.82 | 16.4 | 16.42 | 16.06 | 16.07 |
| CH4 | 7.121 | 7.129 | 7.632 | 7.641 | 8.227 | 8.235 |
| H2 | 27.24 | 27.27 | 23.45 | 23.47 | 17.7 | 17.71 |
| H2S | 0.1167 | 0.0012 | 0.1087 | 0.0011 | 0.0985 | 0.001 |
| O2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2O | 29.16 | 29.19 | 35.05 | 35.09 | 43.48 | 43.53 |
| COS | 0.0014 | 0 | 0.0009 | 0 | 0.0005 | 0 |
| N2 | 11.36 | 11.37 | 11.53 | 11.54 | 11.74 | 11.75 |
| Ar | 0.1368 | 0.1369 | 0.1389 | 0.139 | 0.1414 | 0.1415 |
| LHV (BTU/lb) | | 3341 | | 2956.6 | | 2506.8 |
| fuel temperature (°F) | 77 | | 77 | | 77 | |
| fuel mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 57.23 | | 58.89 | |
| Gasifier Temperature (°F) | 1383.3 | | 1304.2 | | 1187.4 | |
| Gasifier pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit pressure (psia) | 390 | | 390 | | 390 | |
| air separation unit temperature (°F) | 439.1 | | 439.1 | | 439.1 | |
| Air mass flow rate (lb/s) | 27.92 | | 31.47 | | 36.81 | |
| H2O wt% in slurry | 5 | | 5 | | 5 | |
| water mass flow rate (lb/s) | 55.85 | | 68.67 | | 88.33 | |
| water temperature (°F) | 59 | | 59 | | 59 | |
| GCS temperature (°F) | 300 | | 300 | | 300 | |
| GCS pressure (psia) | 312 | | 312 | | 312 | |
| GCS mass flow rate (lb/s) | 139.3 | | 157.1 | | 183.7 | |
| slag temperature (°F) | 212 | | 212 | | 212 | |

۴-۱۰ شبیه‌سازی سیکل توربین گازی

یکی از عوامل مهم در شبیه‌سازی شرایط سایت می‌باشد. شرایط سایت مانند پارامترهای محیطی معمولاً خارج از کنترل هستند و در انتخاب تجهیزات و یا طراحی سیکل می‌توانند تأثیر گذار باشند. برخی از پارامترهای محیطی به طور مستقیم بر عملکرد توربین گاز و سیستم‌های مربوط مؤثر هستند.

توربین گازی توانایی عملکرد در شرایط محیطی گوناگون را دارد ولی برای شرایط محیطی استاندارد بهینه‌سازی شده است که این شرایط را اصطلاحاً شرایط ISO می‌گویند که عبارت است از:

- هوا محیط در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد
- فشار محیط (۱/۰۱۳ bar) باشد
- رطوبت نسبی هوا محیط ۶۰ درصد باشد.
- توربین گازی در ۱۰۰ بار تحت بهره‌برداری باشد (۳۸)

The screenshot displays the 'Site' tab in the GT PRO software. The interface includes a left-hand 'Navigator' pane with options like 'New Session', 'Start Design', 'Plant Criteria', 'GT Selection', 'GT Inputs', 'ST-HRSG', 'HRSG Inputs', 'Water Circuits', 'HRSG Layout', 'Cooling System', 'ST Inputs', 'Other PEACE', 'Economics', 'Gasification', 'Desalination', 'Compute', and 'Test Output'. The main area is divided into several sections:

- Site Inputs:** Ambient temperature (59 °F), Altitude (0 ft), Ambient pressure (14.7 psia), Ambient relative humidity (60 %), Ambient wet bulb temperature (51.5 °F), and Line frequency (50 Hz selected).
- ASHRAE Climate Data:** A button to show this data.
- Water Source Parameters:** Makeup water source temperature (59 °F), Process condensate return temperature (200 °F), Process condensate return percentage (100 %), Process water return temperature (59 °F), and Process water return percentage (100 %).
- 3D Model:** A visual representation of a power plant with cooling towers and buildings, labeled with a 'P'.
- Guidance:** A text box at the bottom stating: 'Ambient pressure. This is bounded between 10.11 and 16.34 psia (6.97 and 1.127 bar). GT PRO automatically computes site altitude from the user-specified ambient pressure.'

شکل ۴-۶ شرایط سایت انتخابی (منبع: نرم افزار Thermo flow)

بهینه‌سازی عملکرد هر توربین گاز در شرایط سایت مربوط، از لحاظ اقتصادی منطقی نیست، بنابر این توربین‌های گازی مشابه در سایت‌های گوناگون دارای دبی و دمای دود خروجی و توان تولیدی گوناگون هستند و به همان نسبت نیز طراحی سیستم‌های بازیافت حرارتی می‌تواند متفاوت باشد. یک طراحی بهینه باید به گونه ای باشد که بهترین عملکرد را در حالت طراحی داشته باشد و همچنین بتواند، به گونه ای رضایت بخش در همه‌ی حالت‌های عملکردی off Design بهره‌برداری شود (۳۸) بسیاری از پارامترهای اعمال شده با توجه به مطالب فوق تعیین شده است انتخاب بقیه پارامترها نیز به ترتیب مراحل زیر در ماژول GT pro در نرم افزار Thermo Flow انجام شده است از مهمترین فرضیات و شرایطی که برای اجرای برنامه در نرم افزار GT pro قرار گرفت می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۴-۱۰-۱ انتخاب شکل بندی عمومی نیروگاه

توربین گازی و بویلر بازیاب حرارتی برای شبه‌سازی در نظر گرفته میشود که مدل توربین Siemens V94.2 است که بیشتر طراحی‌های نیروگاهی اخیر ایران بر پایه‌ی آن انجام شده است

The screenshot shows the 'Engine Selection Filter' window in Thermo Flow. It includes a 'Number of gas turbines' set to 1, a 'Single shaft GT/ST configuration' checkbox, and buttons for 'Display Entire GT Library' and 'Display Partial GT Library'. The 'Engine Selection Filter' section has input fields for 'Smallest power' (15 MWe) and 'Largest power' (200 MWe), a 'Show new specs only' checkbox, and checkboxes for 'Show 50 Hz engines' and 'Show 60 Hz engines'. The 'Sort' section has radio buttons for 'Manufacturer', 'Smallest to largest power', and 'Largest to smallest power'. Below these is a table of engine specifications.

| ID | Model | Shfts | RPM | PR | TIT °F | TET °F | Mair lb/s | kWe | H.R. BTU/kWh | %LHV | MM% |
|-----|---------------------|-------|------|------|-----------|-----------|--------------|--------|-----------------|------|------|
| 138 | Siemens GTX100 | 1 | 6600 | 20.0 | 2350 | 1015 | 264 | 43000 | 9215 | 37.0 | 11.8 |
| 68 | Siemens W251 B11/12 | 1 | 5400 | 15.3 | 2100 | 957 | 379 | 49500 | 10375 | 32.9 | 12.4 |
| 183 | Siemens V64.3A | 1 | 5400 | 15.8 | 2390 | 1081 | 415 | 67400 | 9670 | 35.3 | 15.9 |
| 185 | Siemens W501 D5A | 1 | 3600 | 14.2 | 2150 | 986 | 834 | 120500 | 9750 | 35.0 | 19.9 |
| 250 | Siemens V94.2 | 1 | 3000 | 11.4 | 2100 | 1017 | 1102 | 159410 | 9855 | 34.6 | 24.7 |
| 259 | Siemens W501 F | 1 | 3600 | 17.0 | 2460 | 1083 | 1056 | 189500 | 9190 | 37.1 | 31.7 |
| 249 | Siemens V94.2A | 1 | 3000 | 13.8 | 2150 | 1053 | 1124 | 182300 | 9420 | 36.2 | 30.2 |
| 222 | TP+M FT8 Power Pac | 3 | 3600 | 19.3 | 2120 | 855 | 184 | 25495 | 8980 | 38.0 | 9.7 |
| 223 | TP+M FT8+ Power Pac | 3 | 3600 | 20.2 | 2230 | 896 | 191 | 27966 | 8970 | 38.0 | 10.6 |
| 224 | TP+M FT8 Twin Pac | 3 | 3600 | 19.3 | 2120 | 855 | 368 | 51350 | 8920 | 38.3 | 14.8 |

Below the table is a 'Guidance' section with text: 'KWU V94.2 - Revised 06-14-2002, estimated price updated August 2003. Source: Siemens nominal data and correction curves dated 10/95. Source: Updated full load corrections rcvd 2/98 - Updated nominal data rcvd 6/02. Change to nominal data: -0.93% to HR. Max model errors in test range: Mex<1% kW<1.2% HR<1% Tex<5F (2.8C). Test range: 15 to 120 F (-9 to 49 C) full load dry. Part load model with variable IGV control included.'

شکل ۴-۷ توربین انتخابی در نرم افزار (منبع: نرم افزار Thermo flow)

جدول ۴-۳۰ اطلاعات توربین

| Siemens V94.2 | |
|---------------|------------------------------|
| 1 | تعداد شفت |
| 3000 | دور در دقیقه (RPM) |
| 11.4 | نسبت فشار (PR) |
| 2100 | دمای ورودی توربین TIT (F) |
| 1017 | دمای خروجی توربین TET (F) |
| 1102 | نرخ هوای ورودی (lb/s) |
| 159410 | برق تولیدی KWe |
| 9855 | نرخ حرارت H.R. (BTU/kwh) |
| 34.6 | ارزش حرارت پایین (LHV) |

(source: Thermo Flow software library)

۴-۱۰-۲ انتخاب چند فشاره بودن بویلر بازیاب

برای تأمین بخار فرایندی از بویلر بازیاب تک فشار استفاده می‌شود. ساده ترین آرایش بویلر بازیاب سیکل تک فشاراست، زیرا بخار تولید شده توسط بویلر در یک سطح فشار است. (۳۹)

۴-۱۰-۳ انتخاب فشار و دمای بخار

تصمیم گیری در مورد فشار بهینه، به برآورد تحقیق از مسائل اقتصادی و بازده سیکل بستگی دارد. با افزایش فشار بخار در یک سیکل تک فشار آنتالپی بخار اندکی بیشتر می‌شود اما دبی بخار تولیدی کاهش می‌یابد. در نتیجه سائز تجهیزات کاهش و ضخامت آن افزایش می‌یابد. همچنین بازده بویلر بازیاب و توان تولیدی را اندکی کاهش خواهد داد. افزایش بخار سوپر هیت موجب افزایش آنتالپی بخار و کاهش دبی جرمی آن می‌شود. این موضوع باعث کاهش دبی بخار تولیدی، افزایش دمای دودکش و کاهش بازده بویلر بازیاب می‌شود. همچنین دمای بخار نمی‌تواند از محدوده‌ی کاهش یابد این محدوده بستگی به فشار بخار دارد در صورت کاهش درجه حرارت بخار در یک فشار مشخص میزان رطوبت در بخار خروجی افزایش می‌یابد. (۳۹)

۴-۱۰-۴ ورودی‌های HRSG (دمای pinch & Approach)

یک بویلر بازیاب تک فشار از سه المان حرارتی تشکیل می‌شود: اکنومایزر، اوپراتور، سوپرهیتر. در اکنومایزر آب تغذیه تا دمای نزدیک دمای اشباع گرم می‌شود. در اوپراتور آب در دمای ثابت به بخار اشباع تبدیل می‌شود و سوپرهیتر بخار اشباع را به بخار سوپرهیت تبدیل می‌کند. دمای آب در خروجی اکنومایزر با دمای آب در اوپراتور مقداری اختلاف دارد. این مقدار اختلاف دمای Approach نامیده می‌شود. انتخاب میزان دمای Approach یکی از فاکتورهای طراحی بویلر است که در مراجعه گوناگون مقادیر مختلفی برای Approach ذکر شده است، چون این مراجع معمولاً هر کدام بویلرهای ویژه‌ای را مطالعه کرده اند. مقدار دقیق Approach به تعداد سطوح فشار بویلر، تغییرات دمای آب ورودی، ظرفیت احتراق اضافی و شرایط دود خروجی در بارهای گوناگون توربین گاز و محیطی گوناگون بستگی دارد. برای بسیاری از کاربردها یک Approach بین ۶ تا ۱۲ درجه سانتیگراد انتخاب می‌شود (۳۹). یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی بویلر بازیاب، دمای Pinch است. اختلاف دمای دود خروجی از اوپراتور با دمای بخار اشباع اوپراتور، Pinch نامیده می‌شود. هر چه دمای Pinch کم شود بازده حرارتی بویلر بازیاب افزایش می‌یابد. برای کاهش Pinch باید سطوح حرارتی بیشتری در ناحیه اوپراتور در نظر گرفته شود. به همین علت عامل محدود کننده Pinch مسائل اقتصادی است. دمای Pinch باید بر اساس موازنه بین قیمت سطوح و بازیابی سطوح حرارتی و بازده بویلر بهینه شود. به ور رایج عدد Pinch بین ۸ تا ۱۷ درجه سانتیگراد انتخاب می‌شود. (۳۹)

۴-۱۰-۵ تعیین سوخت مورد استفاده در توربین گازی

در این تحقیق با توجه با تولید سوخت قابل اشتعال در راکتور گازی ساز از ترکیبات این سوخت در توربین استفاده می‌کنیم تا بازده توربین و سیستم تولید همزمان برق و حرارت مورد بررسی قرار گیرد.

| Fuel name: sgv gas | | Fuel supply temperature: 77 °F | |
|------------------------|--------|--------------------------------|---|
| Hydrogen | H2 | 39.96 | % |
| Oxygen | O2 | 0 | % |
| Water Vapor | H2O | 2.962 | % |
| Atm. Nitrogen | N2Ar | 10.5 | % |
| Carbon Monoxide | CO | 39.97 | % |
| Carbon Dioxide | CO2 | 2.178 | % |
| Methane | CH4 | 4.423 | % |
| Ethane | C2H6 | 0 | % |
| Propane | C3H8 | 0 | % |
| n-Butane | C4H10 | 0 | % |
| n-Pentane | C5H12 | 0 | % |
| Hexane | C6H14 | 0 | % |
| Ethylene | C2H4 | 0 | % |
| Propylene | C3H6 | 0 | % |
| Butylene | C4H8 | 0 | % |
| Pentene | C5H10 | 0 | % |
| Benzene | C6H6 | 0 | % |
| Toluene | C7H8 | 0 | % |
| Xylene | C8H10 | 0 | % |
| Acetylene | C2H2 | 0 | % |
| Naphthalene | C10H8 | 0 | % |
| Methanol | CH3OH | 0 | % |
| Ethanol | C2H5OH | 0 | % |
| Ammonia | NH3 | 0 | % |
| Hydrogen Sulfide | H2S | 0.0017 | % |
| Sulfur Dioxide | SO2 | 0 | % |
| Isobutane | C4H10 | 0 | % |
| Carbonyl Sulfide | COS | 0 | % |
| Hydrogen Cyanide | HCN | 0 | % |
| Sum of vol. percentage | | 100.000 | % |

شکل ۴-۸ تعریف شوخت حاصل از گازی سازی به نرم افزار Thermo Flow
(منبع: نرم افزار Thermo flow)

۴-۱۱ آنالیز شوخت ورودی به توربین در نرم افزار

پس از وارد نمودن ترکیبات مربوط گاز سنتز، نرم افزار این اطلاعات را آنالیز کرده و خلاصه ای از ویژگی های شوخت انتخابی شامل فاز شوخت، ارزش حرارتی بالا، ارزش حرارتی پایین، دمای عرضه شوخت،... را در اختیار کاربر قرار میدهد.

| | |
|--|-------------------|
| Fuel phase | = Gas |
| LHV @ 77°F | = 6149 BTU/lb |
| HHV @ 77°F | = 6720 BTU/lb |
| Fuel Supply Temperature | = 77°F |
| Total LHV + Sensible Heat @ 77°F | = 6149 BTU/lb |
| Fuel enthalpy referenced to 32°F | = 6748 BTU/lb |
| Volumetric LHV @ 77°F | = 269.3 [Btu/scf] |
| Volumetric HHV @ 77°F | = 294.3 [Btu/scf] |
| (scf is defined as ft³ @ 77°F & 1 atm) | |
| Molecular Weight | = 17.16 |

شکل ۴-۹ آنالیز شوخت ورودی توربین (منبع: نرم افزار Thermo flow)

فصل پنجم

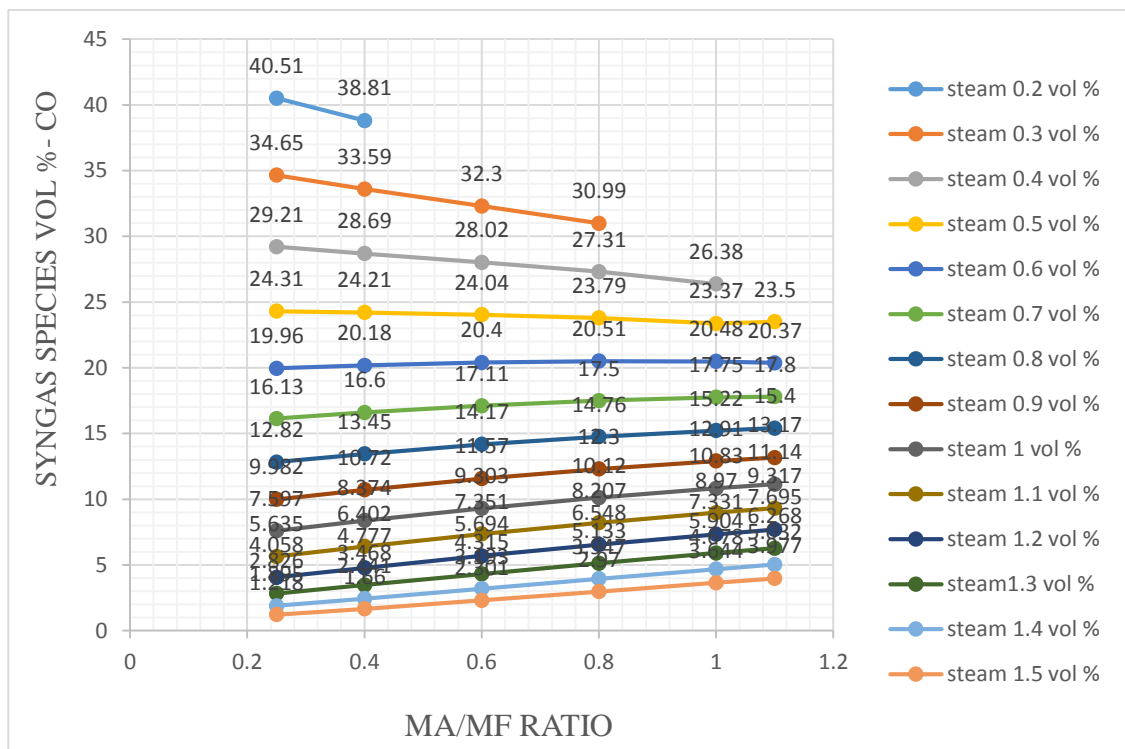
نتایج تحقیق

۵-۱ مقدمه

در فصل قبل آنالیز گاز سنتز خروجی از راکتور گازی ساز انجام شد. در این فصل با دسته بندی اطلاعات به دست آمده برای مقادیر مختلف بخار و هوای به راکتور در پسماند خشک، و پسماند با رطوبت ۵٪ تا ۳۵٪ بهترین گاز سنتز با ارزش حرارتی بالا مشخص می شود و نتایج شبه سازی نیروگاه تولید هم زمان برق و حرارت مشخص می شود

نمودار (۵-۱) درصد حجمی گاز منواکسیدکربن خروجی را به ازای مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به پسمان خشک در گازی ساز نشان می دهد.

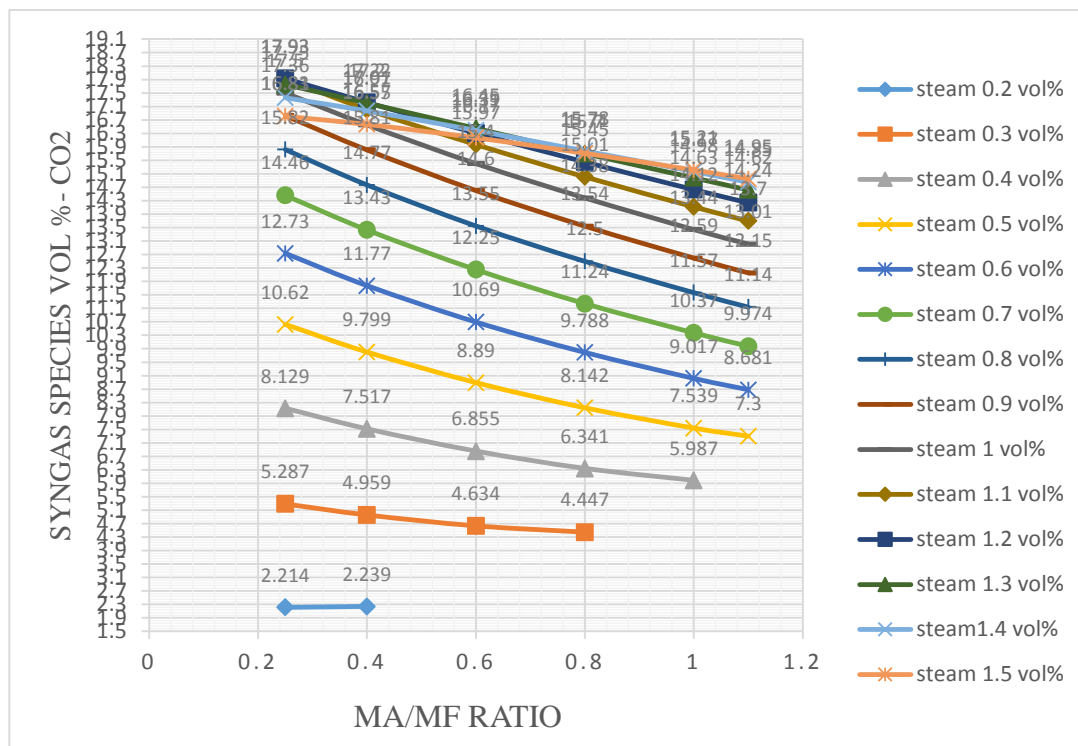
نمودار (۵-۱) نشان می دهد که منو اکسید کربن تولیدی با افزایش هوا، از بخار ۰/۲ تا ۰/۶ (نسبت هوا و بخار به سوخت ورودی) کاهش و در بقیه یعنی از بخار ۰/۷ تا ۱/۵ (نسبت بخار به سوخت ورودی) با افزایش تولید منو اکسید کربن رو به رو هستیم. کمترین مقدار منو اکسید کربن تولیدی مربوط به مقادیر بخار ۱/۵ (نسبت بخار به سوخت ورودی) و هوای ۱/۱ (نسبت هوا به سوخت ورودی) به مقدار ۱/۲۱۸ درصد کل گاز سنتز خروجی می باشد و بیشترین مقدار منو اکسید کربن تولیدی مربوط به بخار ۰/۲ (نسبت بخار به سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (نسبت هوا به سوخت ورودی) به مقدار آن ۴۰/۵۱ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۱-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید منواکسید کربن

نمودار (۲-۵) درصد حجمی گاز دی اکسید کربن را به ازای مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به پسمان خشک را نشان می دهد.

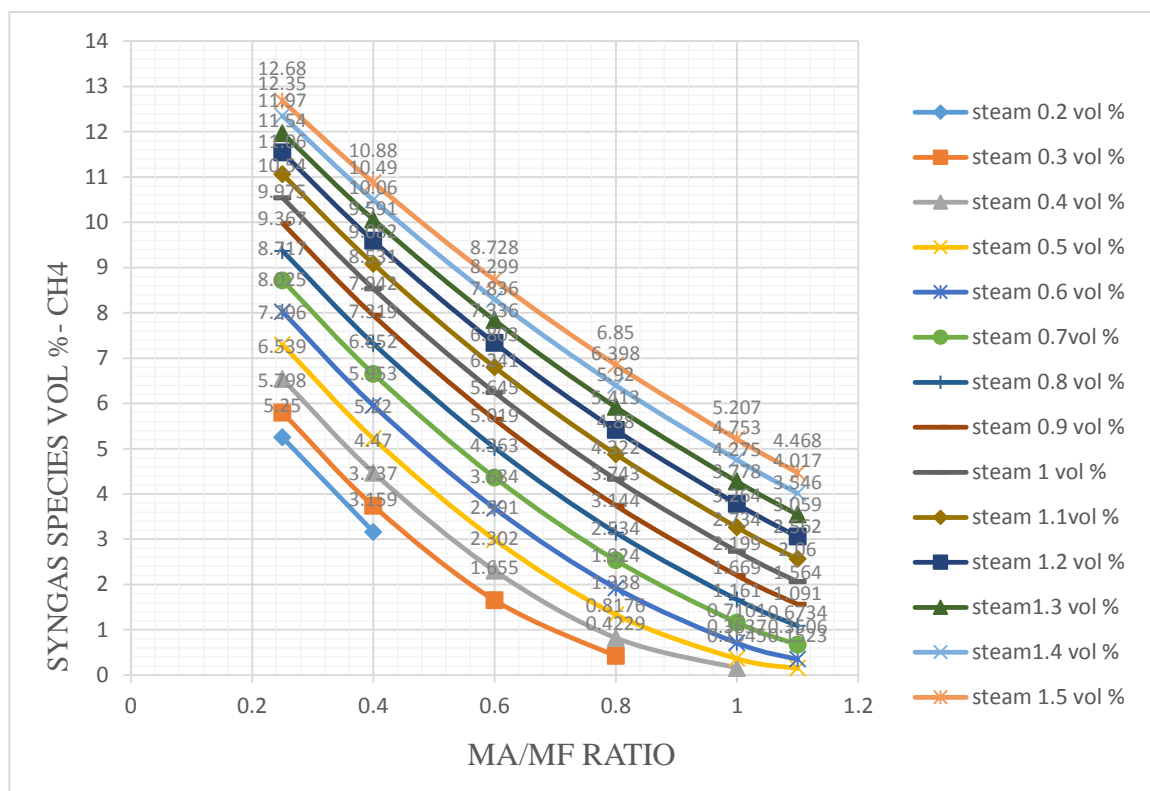
بررسی نمودار (۲-۵) نشان می دهد که تولید دی اکسید کربن با افزایش هوا ورودی به راکتور در تمام مقادیر بخار به جز بخار ۰/۲ (نسبت بخار به سوخت ورودی) کاهش و با افزایش مقادیر بخار، تولید دی اکسید کربن تا بخار ۱/۲ (نسبت بخار به سوخت ورودی) افزایش و سپس کاهش میابد. کمترین مقدار دی اکسید کربن تولیدی مربوط به مقادیر بخار ۰/۲ (نسبت بخار به سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (نسبت هوا به سوخت ورودی) به مقدار ۲/۲۱۴ درصد کل گاز سنتز خروجی و بیشترین مقدار منو اکسید کربن تولیدی مربوط به بخار ۱/۲ (نسبت بخار به سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (نسبت هوا به سوخت ورودی) به مقدار آن ۱۷/۹۳ درصد کل گاز سنتز خروجی از راکتور است.



نمودار ۲-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید دی اکسید کربن

نمودار (۳-۵) درصد حجمی گاز متان که یکی از عوامل مهم در تعیین مقدار ارزش حرارتی گاز است را به ازای مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی نشان می دهد.

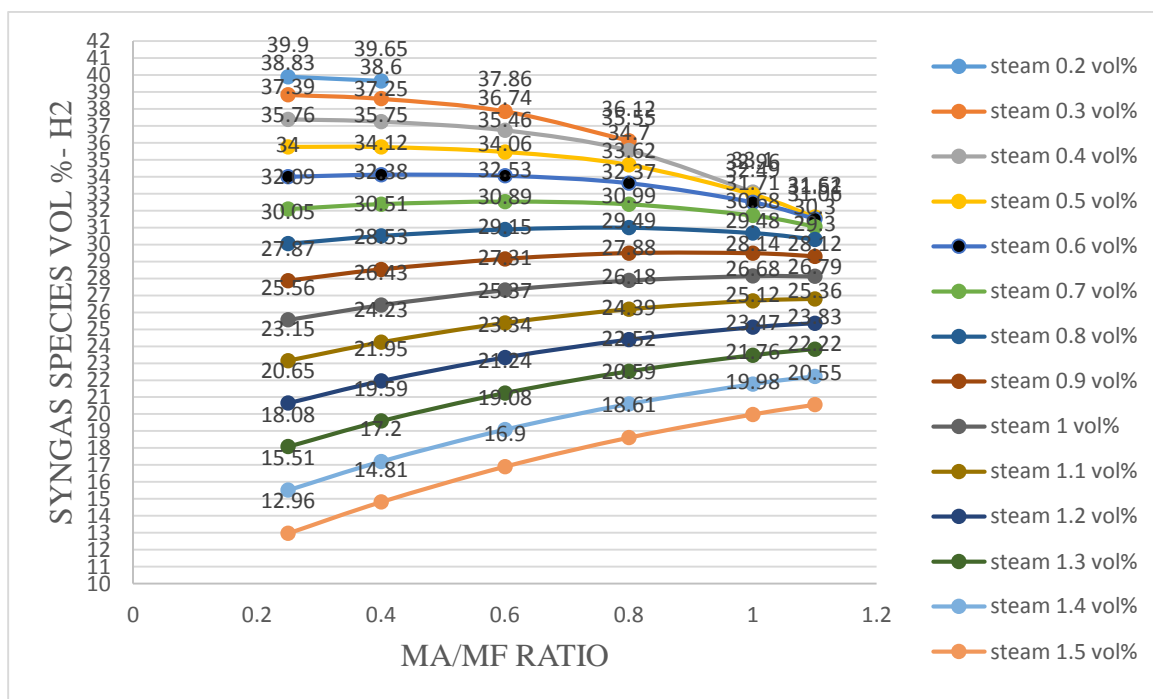
نمودار (۳-۵) نشان می دهد که تولید متان با افزایش هوا ورودی به راکتور در تمام مقادیر بخار کاهش و با افزایش مقادیر بخار، تولید متان افزایش می یابد. کمترین مقدار متان تولیدی مربوط به مقادیر بخار ۰/۲ (نسبت بخار به سوخت ورودی) و هوای ۰/۴ (نسبت هوا به سوخت ورودی) به مقدار ۳/۱۵۹ درصد کل گاز سنتز خروجی و بیشترین مقدار متان تولیدی مربوط به بخار ۱/۵ (نسبت بخار به سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (نسبت هوا و بخار به سوخت ورودی) به مقدار آن ۱۲/۶۸ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۳-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید متان

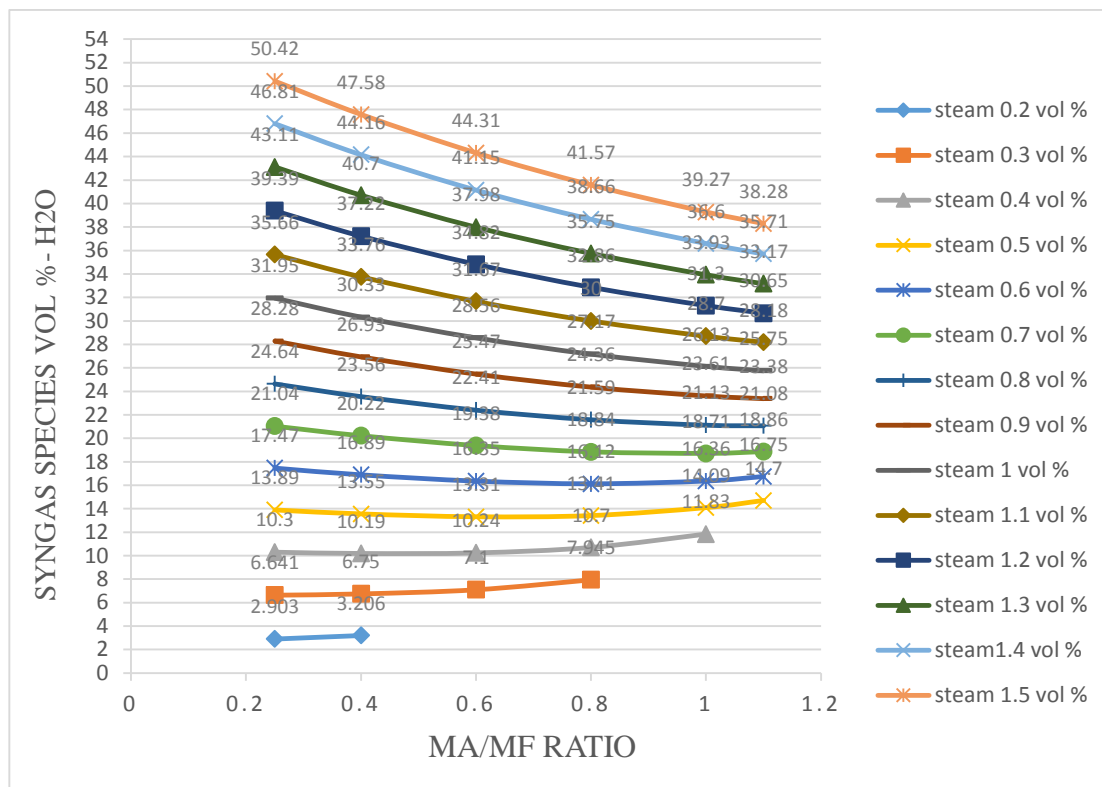
نمودار (۴-۵) درصد حجمی گاز هیدروژن که یکی دیگر از عوامل مهم در تعیین مقدار ارزش حرارتی گاز است را به ازای مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتورگازی ساز نشان می‌دهد.

نمودار (۴-۵) نشان می‌دهد که تولید هیدروژن با افزایش هوا ورودی به راکتور تا بخار ۷٪ (نسبت بخار به سوخت ورودی) افزایش و سپس در مقادیر بخارهای بالاتر تولید کاهش می‌یابد اما با افزایش مقادیر بخار، در تمام مقادیر هوا ورودی افزایش تولید هیدروژن داریم. کمترین مقدار هیدروژن تولیدی مربوط به مقادیر بخار ۱/۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) به مقدار ۱۲/۹۶ درصد کل گاز سنتز خروجی و بیشترین مقدار منو اکسید کربن تولیدی مربوط به بخار ۰/۲ (درصد حجمی سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) به مقدار آن ۳۹/۹ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۴-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید هیدروژن

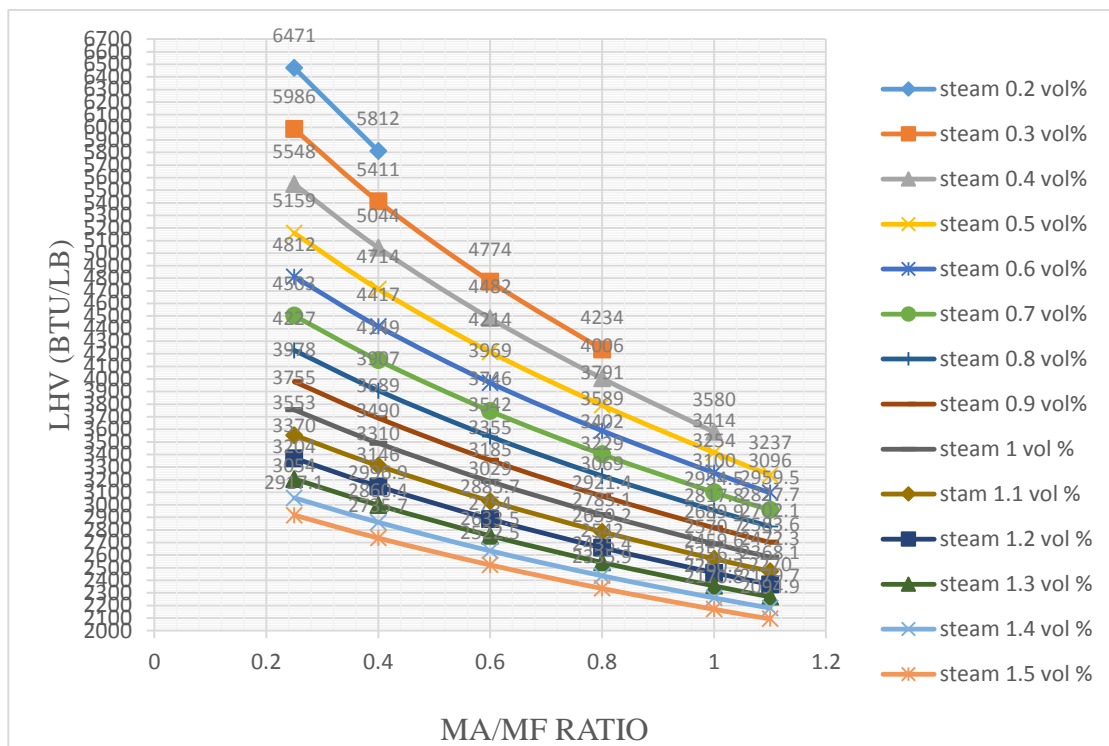
نمودار (۵-۵) درصد حجمی آب در فاز بخار که یکی از عوامل مخرب در ایجاد خوردگی در تجهیزات و سیستم‌های انتقال است را به ازای مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به پسمان خشک استفاده شده در راکتورگازی ساز به عنوان سوخت نشان می‌دهد. نمودار (۵-۵) نشان می‌دهد که تولید آب در فاز بخار با افزایش هوا ورودی به راکتور تا بخار ۰/۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) افزایش و سپس در بخارهای بالاتر تولید کاهش می‌یابد اما با افزایش بخار، در تمام مقادیر هوا ورودی با افزایش تولید آب در فاز بخار رو به رو هستیم. کمترین مقدار بخار آب تولیدی مربوط به مقادیر بخار ۰/۲ (درصد حجمی سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) به مقدار ۲/۹۰۳ (درصد حجمی سوخت ورودی) کل گاز سنتز خروجی و بیشترین مقدار بخار آب تولیدی مربوط به بخار ۱/۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) به مقدار آن ۵۱/۴۲ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۵-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در تولید هیدروژن

نمودار (۵-۶) ارزش حرارتی گاز خروجی از گازی ساز را به ازای مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به پسمان خشک نشان می دهد.

نمودار (۵-۶) نشان می دهد که ارزش حرارتی گاز با افزایش هوا ورودی به راکتور از ۰/۲۵ تا ۱/۱ (درصد حجمی سوخت ورودی) سوخت ورودی کاهش میابد اما با افزایش بخار، از ۰/۲ تا ۱/۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) سوخت ورودی در تمام مقادیر هوا ورودی با افزایش ارزش حرارتی رو به رو هستیم. کمترین مقدار ارزش حرارتی مربوط به مقادیر بخار ۱/۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) و هوای ۱/۱ (درصد حجمی سوخت ورودی) به مقدار $2094/9 \frac{BTU}{lb}$ و بیشترین مقدار ارزش حرارتی مربوط به بخار ۰/۲ (درصد حجمی سوخت ورودی) و هوای ۰/۲۵ (درصد حجمی سوخت ورودی) به مقدار آن $6471 \frac{BTU}{lb}$ است.

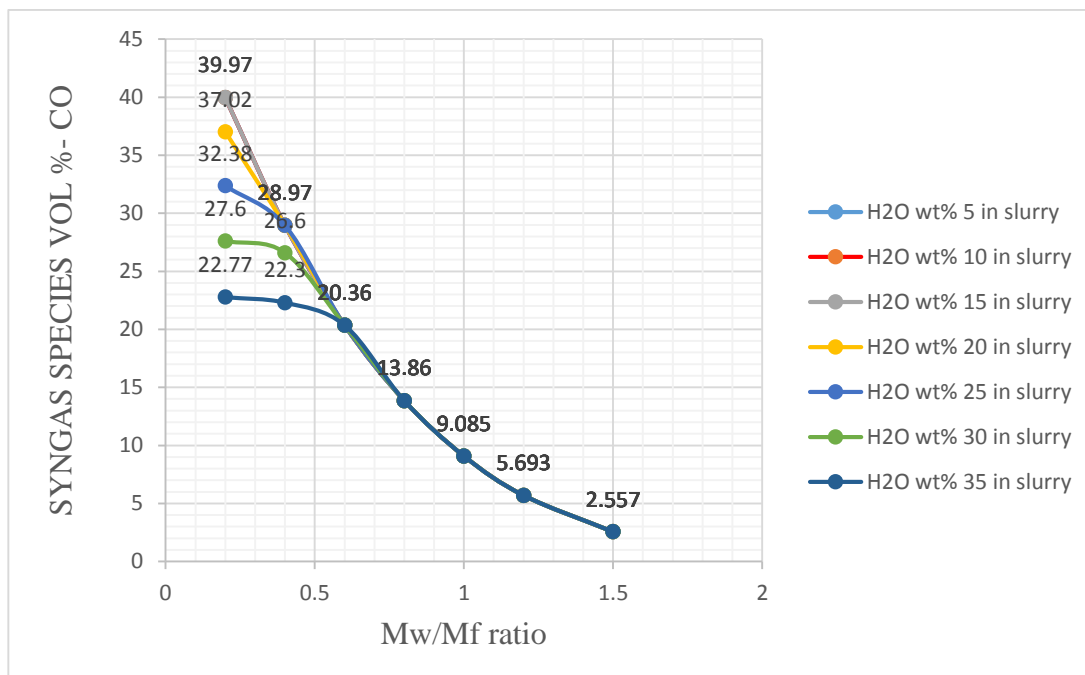


نمودار ۶-۵ تأثیر مقادیر مختلف بخار و هوای ورودی به راکتور در ارزش حرارتی گاز تولیدی.

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی راکتور گازی ساز با خوراک پسماند با رطوبت ۵ تا ۳۵ درصد ارائه می شود.

نمودار (۷-۵) درصد حجمی گاز منواکسیدکربن خروجی را به ازای پسماند با رطوبت های مختلف نشان می دهد.

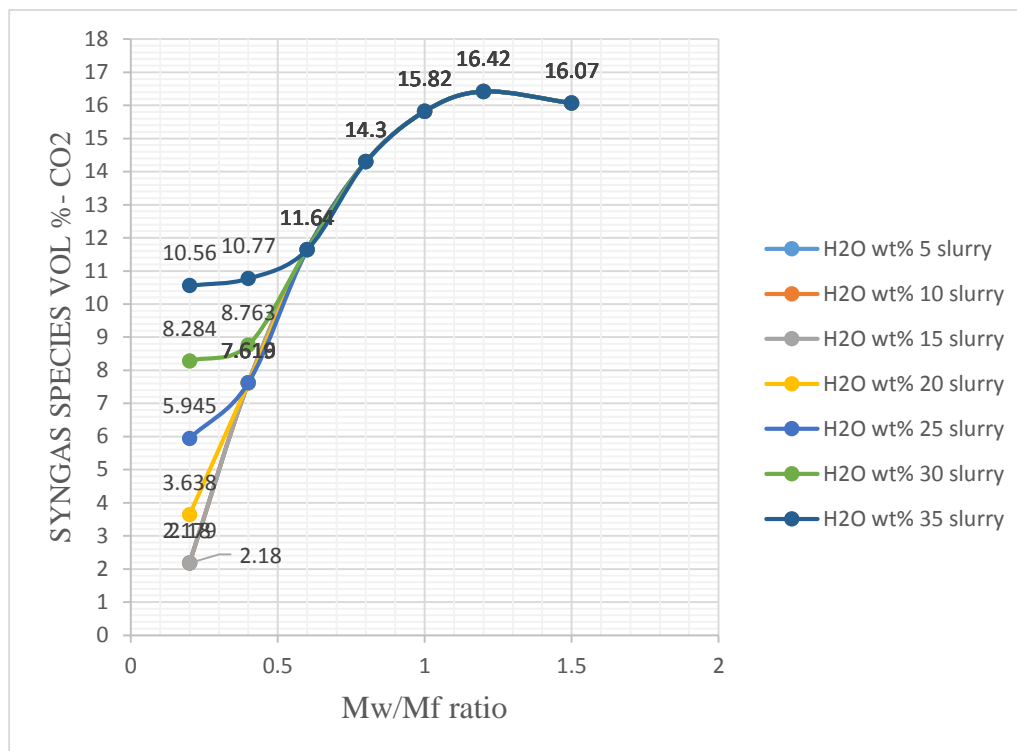
نمودار (۷-۵) نشان می دهد که تولید منو اکسید کربن با افزایش نسبت رطوبت کاهش می یابد و بیشترین تغییر مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) است و در ادامه با افزایش رطوبت تولید منو اکسید کربن ثابت می شود. کمترین مقدار منو اکسید کربن تولیدی مربوط به نسبت ۱/۵ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با تمام درصدهای وزنی آب به مقدار ۲/۵۵۷ درصد کل گاز سنتز خروجی می باشد و بیشترین مقدار منو اکسید کربن تولیدی مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با درصدهای وزنی آب ۱۰٪ و ۱۵٪ به مقدار آن ۳۹/۹۷ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۵-۷ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید منواکسید کربن

نمودار (۵-۸) درصد حجمی گاز دی اکسید کربن خروجی را به ازای پسمان با رطوبت های مختلف نشان می دهد.

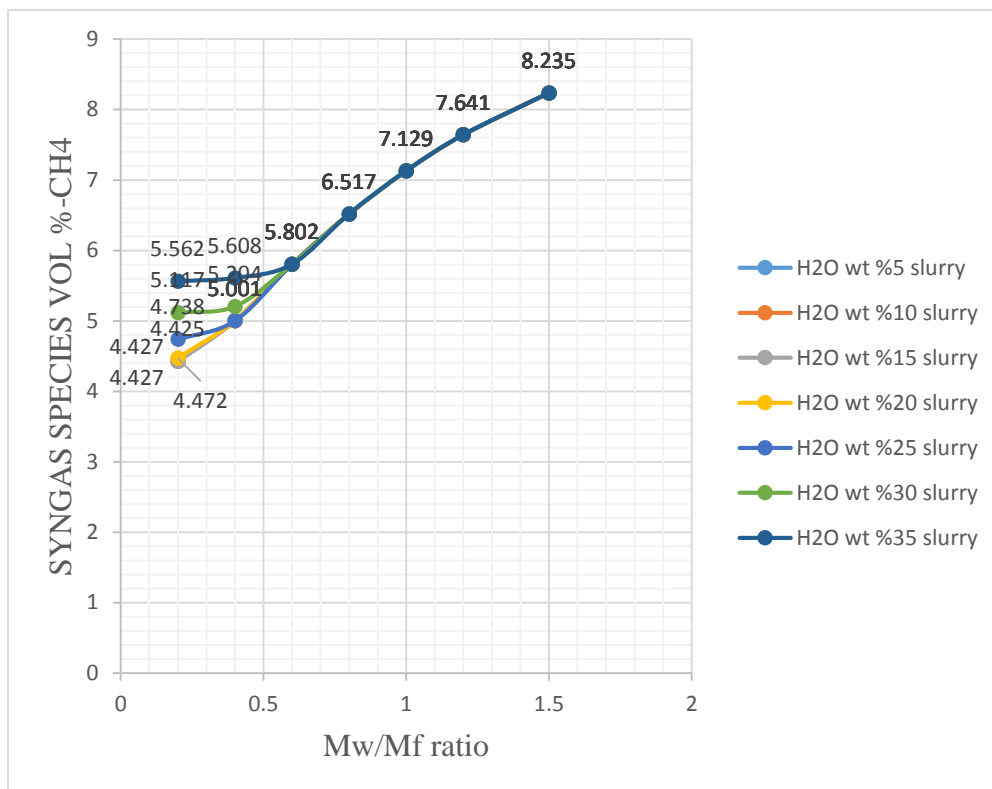
نمودار (۵-۸) نشان می دهد که تولید دی اکسید کربن با افزایش نسبت رطوبت افزایش می یابد و بیشترین تغییر مربوط به نسبت $0/2$ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) است و در ادامه با افزایش رطوبت تولید منواکسید کربن ثابت می شود. کمترین مقدار منواکسید کربن تولیدی مربوط به نسبت $0/2$ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با درصدهای وزنی آب 15% به مقدار $2/18$ درصد کل گاز سنتز خروجی می باشد و بیشترین مقدار منواکسید کربن تولیدی مربوط به نسبت $1/5$ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با تمام درصدهای وزنی آب به مقدار آن $16/07$ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۵-۸ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید دی اکسید کربن

نمودار (۵-۹) درصد حجمی گاز متان خروجی را به ازای پسمان با رطوبت های مختلف نشان می دهد.

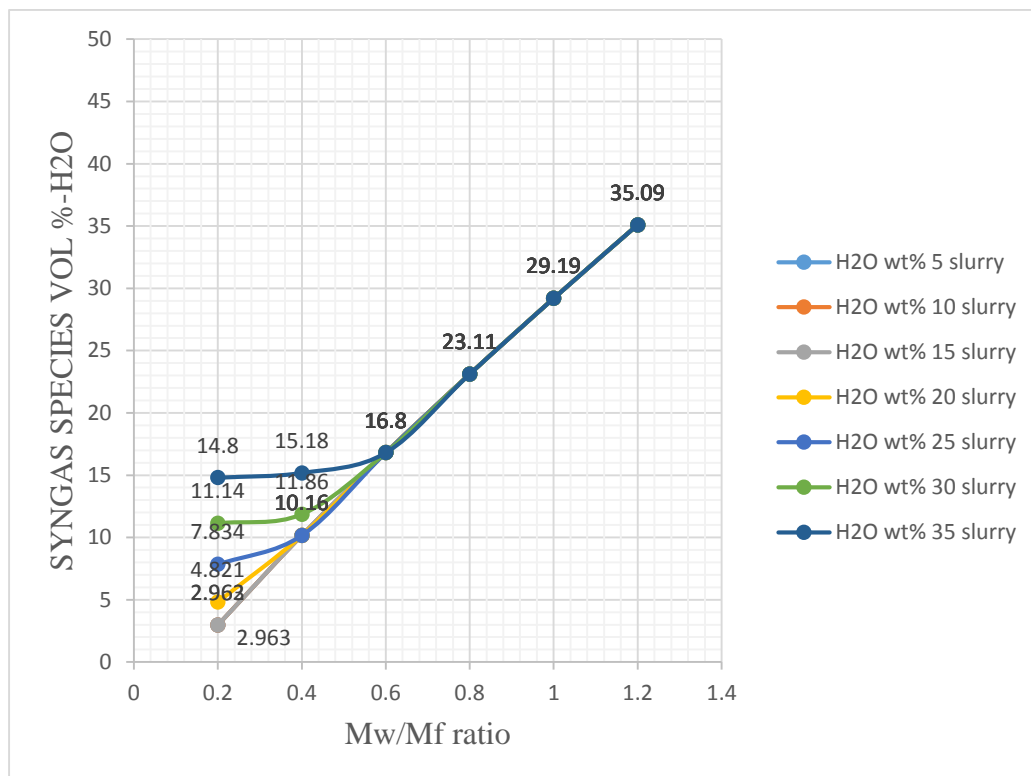
نمودار (۵-۹) نشان می دهد که تولید متان با افزایش نسبت رطوبت افزایش می یابد و بیشترین تغییر مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) است و در ادامه با افزایش رطوبت تولید متان ثابت می شود. کمترین مقدار متان تولیدی مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با درصدهای وزنی آب ۱۵٪ به مقدار ۴/۴۲۷ درصد کل گاز سنتز خروجی می باشد و بیشترین مقدار متان مربوط به نسبت ۱/۵ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با تمام درصدهای وزنی آب به مقدار آن ۸/۲۳۵ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۹-۵ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید متان

نمودار (۱۰-۵) درصد حجم آب در فاز بخار خروجی را به ازای پسمان با رطوبت های مختلف نشان می دهد.

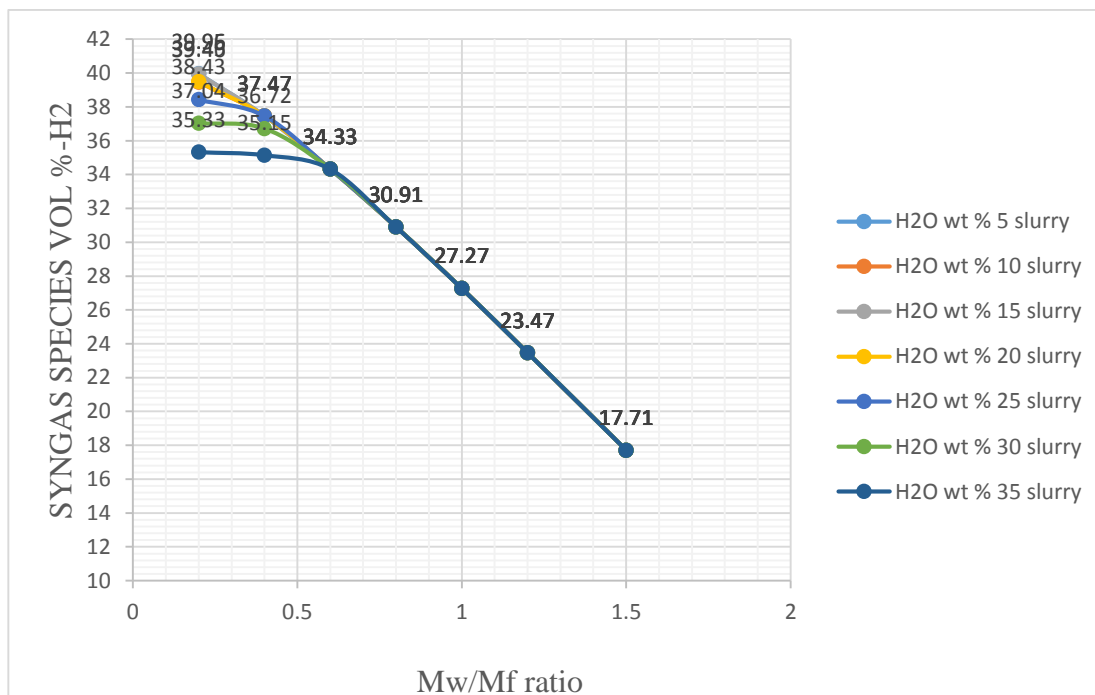
نمودار (۱۰-۵) نشان می دهد که تولید آب در فاز بخار با افزایش نسبت رطوبت افزایش می یابد و بیشترین تغییر مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) است و در ادامه با افزایش رطوبت تولید متان ثابت می شود. کمترین مقدار آب در فاز بخار تولیدی مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با درصدهای وزنی آب ۱۵٪ و ۱۰٪ به مقدار ۲/۹۶۳ درصد کل گاز سنتز خروجی می باشد و بیشترین مقدار منو اکسید کربن تولیدی مربوط به نسبت ۱/۵ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با تمام درصدهای وزنی آب به مقدار آن ۳۵/۰۹ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۵-۱۰ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید آب در فاز بخار

نمودار (۵-۱۱) درصد حجمی گاز هیدروژن خروجی را به ازای پسمان با رطوبت های مختلف نشان می دهد.

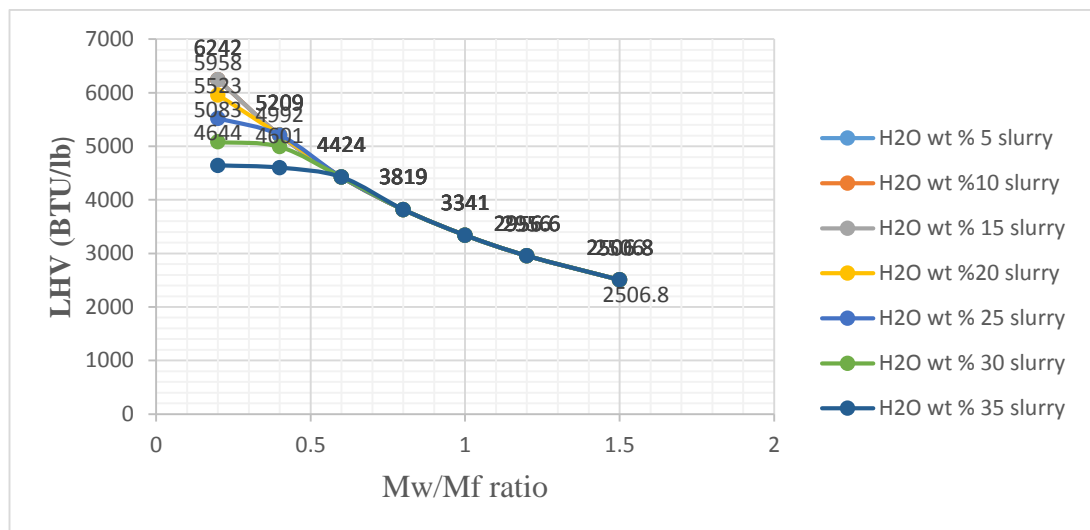
نمودار (۵-۱۱) نشان می دهد که تولیدی هیدروژن با افزایش نسبت رطوبت کاهش می یابد و بیشترین تغییر مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) است و در ادامه با افزایش رطوبت تولید هیدروژن ثابت می شود. کمترین مقدار هیدروژن تولیدی مربوط به نسبت ۱/۵ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با تمام درصدهای وزنی آب به مقدار ۱۷/۷۱ درصد کل گاز سنتز خروجی می باشد و بیشترین مقدار هیدروژن تولیدی مربوط به نسبت ۰/۲ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با درصدهای وزنی آب ۵٪ و ۱۰٪ و ۱۵٪ مقدار آن ۳۹/۹۵ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۵-۱۱ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در تولید آب در فاز بخار

نمودار (۵-۱۲) ارزش حرارتی گاز خروجی را به ازای پسمان با رطوبت‌های مختلف نشان می‌دهد.

بررسی نمودار (۵-۱۲) نشان می‌دهد که ارزش حرارتی گاز تولیدی با افزایش نسبت رطوبت کاهش می‌یابد. بیشترین تغییر مربوط به نسبت $0/2$ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) و در ادامه با افزایش رطوبت ارزش حرارتی گاز تولیدی ثابت می‌شود. کمترین مقدار ارزش حرارتی گاز تولیدی مربوط به نسبت $1/5$ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با تمام درصدهای وزنی آب به مقدار $2506/08 \frac{BTU}{lb}$ و بیشترین مقدار ارزش حرارتی تولیدی مربوط به نسبت $0/2$ (نسبت رطوبت به سوخت ورودی) با درصدهای وزنی آب 10% و 15% به مقدار آن $6242 \frac{BTU}{lb}$ درصد کل گاز سنتز خروجی است.



نمودار ۵-۱۲ تأثیر مقادیر مختلف رطوبت در ارزش حرارتی گاز تولیدی

۵-۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین simians v92-4

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین گازی simians v92-4 با استفاده از سوخت گاز سنتز به جای گاز طبیعی بیان می‌شود.

جدول ۵-۱ پارامترهای مربوط توربین گازی

| مؤلفه | پارامترها | محاسبه |
|--------------------------|---------------------------------|---------|
| پارامترهای محیطی سایت | دمای محیط (°F) | ۵۹ |
| | فشار محیط (psi) | ۱۴/۷ |
| | رطوبت محیط | ۶۰ |
| کمپرسور | دما ورودی (°F) | ۵۹ |
| | فشار ورودی (psi) | ۱۴/۵۵ |
| | دبی جرمی جریان هوا ورودی (lb/s) | ۱۰۹۰/۸۶ |
| محفظه احتراق | دما ورودی (°F) | ۶۵۴ |
| | فشار ورودی (psi) | ۱۷۳/۱۹ |
| | دبی جرمی جریان (lb/s) | ۹۸۰/۷۲ |
| ورودی توربین | دما ورودی (°F) | ۲۱۰۰ |
| | فشار ورودی (psi) | ۱۶۸/۸۶ |
| | دبی جرمی جریان (lb/s) | ۱۰۵۲/۸۵ |
| گاز خروجی | دما ورودی (°F) | ۱۰۲۵ |
| | فشار ورودی (psi) | ۱۵/۰۶ |
| | دبی جرمی جریان (lb/s) | ۱۱۶۲/۹۹ |
| ترکیب گاز خروجی از آگزوز | (%)N2 | ۷۳/۵۴ |
| | (%)O2 | ۱۴/۳۵ |
| | (%)Co2+so2 | ۴/۸۸۲ |

| | | |
|--------|--------|--|
| ۶/۳۴۳ | (%)H2o | |
| ۰/۸۸۵۶ | (%)Ar | |

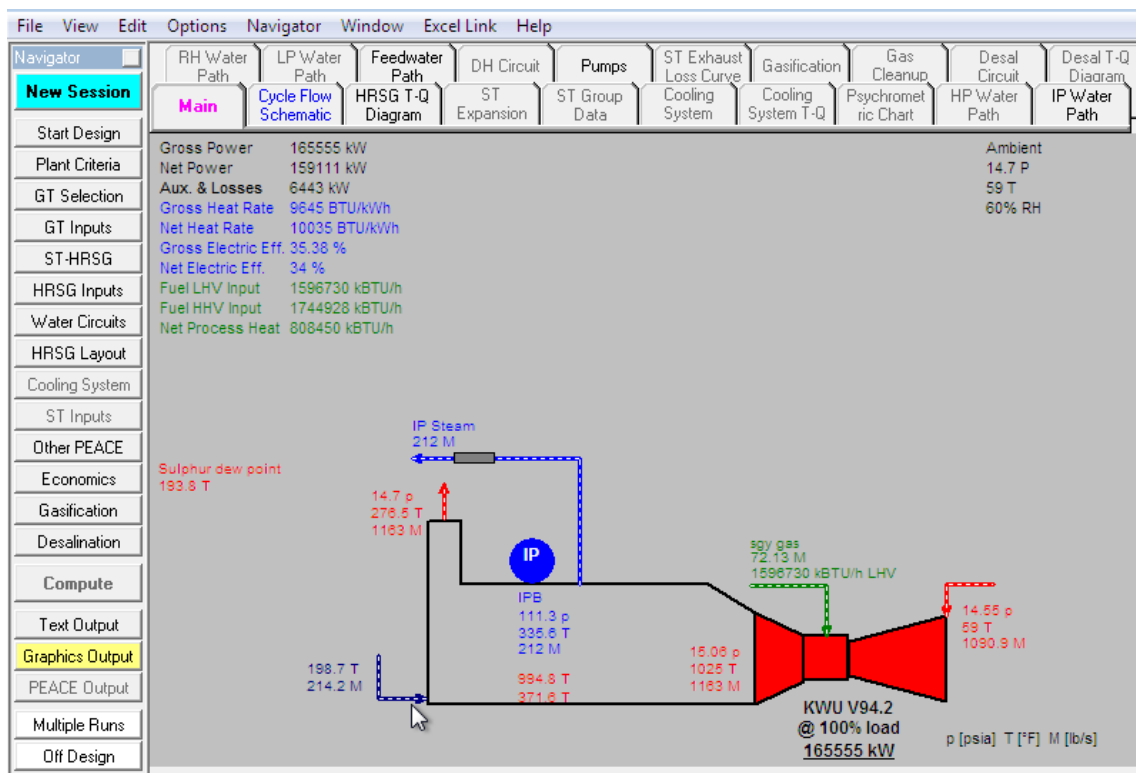
| | | | | | | | | | |
|---|-------|--------|-----------|---------|--------------------|-------|---------|-------|-----------------|
| File | | | | | | | | | |
| 250 | F | F | lb/s | BTU/kWh | lb/s | % | % | % | % |
| ----- | | | | | | | | | |
| KWU V94.2 | 11.9 | 2100 | 1025 | 1091 | 165555 | 9645 | 1163 | 74.42 | 14.35 4.88 6.34 |
| ----- | | | | | | | | | |
| Fuel compressor = 4373 kW, Q rejected = 833.7 BTU/s, exit temperature = 387.8 F | | | | | | | | | |
| Fuel molecular weight = 17.16; LHV @ combustor = 6279 BTU/lb | | | | | | | | | |
| G.T. auxiliary power = 797 kW. | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| ESTIMATED G.T. CYCLE | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| STREAM | TEMP. | PRESS. | MASS FLOW | M.W. | MOLE COMPOSITION % | | | | |
| | F | psia | lb/s | | N2 | O2 | CO2+SO2 | H2O | AR |
| ----- | | | | | | | | | |
| Ambient air in | 59 | 14.70 | 1090.86 | 28.86 | 77.29 | 20.74 | 0.03 | 1.01 | 0.93 |
| Comp. inlet | 59 | 14.55 | 1090.86 | 28.86 | 77.29 | 20.74 | 0.03 | 1.01 | 0.93 |
| Turbine coolant | | | 110.14 | | | | | | |
| Comp. discharge | 654 | 173.19 | 980.72 | 28.86 | 77.29 | 20.74 | 0.03 | 1.01 | 0.93 |
| Fuel flow | 388 | 234.55 | 72.13 | 109 | | | | | |
| Turbine inlet | 2100 | 168.86 | 1052.85 | 28.84 | 73.14 | 13.68 | 5.39 | 6.90 | 0.88 |
| Turbine coolant | | | 110.14 | | | | | | |
| Turbine exhaust | 1025 | 15.06 | 1162.99 | 28.84 | 73.54 | 14.35 | 4.88 | 6.34 | 0.89 |
| ----- | | | | | | | | | |
| Compressor = 167712 Turbine = 338946 kW | | | | | | | | | |
| Turbine coolant = 10.1% compr in | | | | | | | | | |
| Mech loss = 983.6 kW Generator loss = 2695.9 kW | | | | | | | | | |
| Mech eff. = 99.42% Generator eff. = 98.4% | | | | | | | | | |
| GT specific power @ gen term = 151.8 kW per lb/s | | | | | | | | | |
| GT efficiency @ gen term = 32.38% HHV = 35.38% LHV | | | | | | | | | |
| GT eff. @ gen term adjusted for fuel temp. = 31.89% HHV = 34.85% LHV | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| Page 2 | | | | | | | | | |
| GT PRO 13.0 ehsan | | | | | | | | | |
| 1000 11-18-1994 23:49:35 file=c:\Tflow13\MYFILES\GTPRO.GTP | | | | | | | | | |

شکل ۱-۵ جدول خروجی های نرم افزار

جدول (۲-۵) اطلاعات مربوط به توربین گازی و شکل (۲-۵) توان تولیدی توربین را نشان میدهد.

جدول ۲-۵ اطلاعات مربوط به تولید توان توربین

| توان تولیدی توربین | |
|--------------------|---|
| ۱۶۵۵۵۵ | توان خروجی توربین (kw) |
| ۱۵۹۱۱۱ | توان خالص خروجی توربین (kw) |
| ۷۴/۶۴ | بازده ژنراتور (%) |
| ۳۳/۷۱ | بازده الکتریکی (%) |
| ۱۰۱۲۲ | گرمای خالص خروجی فرایند ($\frac{BTU}{kwh}$) |
| ۷۷/۲۲ | درصد بازده HRSG |
| ۸۴/۶۳ | بازده سیکل تولید همزمان (CHP) (%) |



نمودار ۵-۱۳ توان تولیدی توربین (منبع: نرم افزار Thermo flow)

فصل ششم

نتایج و پیشنهادها

۶-۱ نتایج

۱. از آنجا که انرژی منشأ اصلی و اساس زندگی انسان‌ها است، بنابراین نیاز به تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک به منظور کاهش بحران مصرف انرژی بسیار حیاتی می‌باشد. امروزه بیوماس به عنوان بزرگ‌ترین منبع تجدیدپذیر در مقایسه با سایر منابع تجدیدپذیر، در تأمین انرژی اولیه جهان شناخته می‌شود. استفاده از گاز سنتز ناشی از گازی‌سازی زباله‌های شهری در ایران می‌تواند منتج به افزایش سهم تولید برق و انرژی و کاهش هزینه‌های دفن پسماند گردد. از این‌رو جهت رفع معضل زباله شهر تهران، یک روش تولید انرژی که دوست‌دار محیط زیست می‌باشد، ارائه شد. خوراک مورد استفاده در سیستم، زباله‌های جامد شهری تهران می‌باشد.

۲. فرایند گازی‌سازی از فرایندهای شناخته شده در دنیا برای استحصال انرژی می‌باشد این‌گونه سامانه‌ها در دنیا دارای جایگاه خواصی و کاربردهای فراوانی می‌باشد. از جمله مزیت‌های این سامانه‌ها سادگی در اجرا، امکان ایجاد در ظرفیت‌های گوناگون، حفظ محیط‌زیست از تولید متان و راهای در جو، در صورت وجود منابع امکان اجرا در مناطق مختلف که می‌توان از آن به‌صورت یک سامانه تولید انرژی محلی بهره برد. ۳. کشور ایران با توجه به وجود منابع مناسب به عنوان خوراک ورودی این سامانه‌ها می‌تواند با بومی‌سازی و گسترش و کاربردی کردن این تجهیزات بخشی از نیازهای انرژی را به‌صورت محلی در مناطق دور افتاده را تأمین و ضمن اشتغال‌زایی، گام مهمی در امر توسعه پایدار و جلوگیری از مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی بردارد.

۴. در پژوهش انجام شده ترکیب‌های مختلف هوا و بخار ورودی به راکتور بستر ثابت مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر این دو پارامتر بر رفتار گازی ساز در حالت‌های مختلف مشخص شده و شرایط تولید گاز سنتز با بالاترین ارزش حرارتی فراهم شود

۵. با توجه به نتایج به دست آمده و امکان سنجی صورت گرفته در زمینه استفاده از گاز سنتز به جای گاز طبیعی در توربین گازی مشخص شد که امکان استفاده از گاز تولیدی در سیستم‌های تولید برق وجود دارد.

۶-۲ پیشنهادات

۱. یکی از مهمترین فاکتورهایی که در امکان سنجی یک پروژه بایستی مد نظر قرار داده شود اقتصادی بودن آن است. بنابراین طرح تولید گاز سنتز به روش گازی‌سازی بایستی از لحاظ اقتصادی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از آنجایی که تاکنون در زمینه بررسی اقتصادی این سیستم‌ها تحقیقی صورت نگرفته است، پیشنهاد می‌شود در صورت فراهم بودن شرایط این امکان سنجی انجام گیرد تا در صورت داشتن توجیه اقتصادی برای بازگشت سرمایه گذاری انجام شده، نسبت به راه اندازی این سیستم در واحدهای مختلف صنعتی و نیروگاهی اقدام گردد.
۲. در این پروژه از هوا به عنوان سیال گازی ساز استفاده شده است، پیشنهاد می‌شود استفاده از گازهای دیگر از جمله H_2 و N_2 به عنوان سیال نیز که می‌تواند در تولید گاز بارارزش حرارتی بالا مفید باشد استفاده شود.
۳. هر منطقه در ایران دارای منابع و شرایط محیطی خاص می‌باشد و این تکنولوژی می‌تواند در مناطق مختلف با منابع موجود در آن منطقه مورد مطالعه قرار گیرد برای مثال در قسمت‌های شمالی کشور به دلیل وجود کارخانه‌های برش چوب مقادیر زیادی زائدات چوب بدون استفاده وجود دارد. مطالعه این تکنولوژی با خوراک زائدات چوب آن منطقه می‌تواند مفید باشد.
۴. یک از فاکتورهای مهم در جهت بومی‌سازی این فرایند وجود اطلاعات در مورد طراحی و ساختار رکتور گازی‌سازی و تجهیزات مرتبط می‌باشد در صورت امکان تحقیق در این مورد می‌تواند در جهت بومی‌سازی این دانش بسیار کاربردی باشد.
۵. رطوبت زیاد در خوراک‌های مورد استفاده در راکتورهای گازی ساز عامل مضر می‌باشد که باعث کاهش ارزش حرارتی گاز خروجی از راکتور می‌شود این خوراک باید قبل از ورود به راکتور خشک و رطوبت آن کاش داده شود مطالعه در مورد خشکن‌های خورشیدی در جهت کاهش رطوبت میتواند بسیار کاربردی باشد.

فهرست منابع و مآخذ

۱. صادقی، حسن. *رهیافتهای توسعه کارگروه‌های بهینه‌سازی مصرف سوخت*. سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت، نشر پیک ادبیات، ۱۳۸۸.
۲. میرزائی، محمد. *انرژی‌های تجدیدپذیری*. مدیر شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی منطقه تربت حیدریه، ۱۳۸۹.
3. M. Fatih Demirbas. "Biofuels from algae for sustainable development". *Applied Energy* 88 (2011) 3473-3480
۴. فصلنامه آماری مدیریت مواد زائد جامد شهر تهران، شماره دوم، سازمان بازیافت و تبدیل مواد، تابستان ۱۳۸۲.
5. Klein, Alexander. "Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes". Columbia University, 2002.
6. Arnavat, maria puig. "performance modeling and validation of biomass fasifrs for trigeneration plant doctoral thesis". department of mechanical engineering, 2011.
۷. عمرانی، قاسمعلی. *مواد زائد جامد*. جلد ۱ و ۲، تهران: مرکز انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۳۸۳.
8. European Renewable energy council (EREC). www.erec.org/media/publication/2040scenario.html.
9. Christopher Higman Maarten van der Burgt, *Gasification* 2nd Edition, Gulf Professional Publishing, 26th February 2008.
10. Basu, Prabir. ***Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory***, Published by Elsevier In, 2010.
11. Schuster g [et al]. "biommass steam gasification – an extensive parametric modeling study biosourr technol". vol.77, no.1, 2001, pp:71-9.
12. plis p & wilk rk. "Theoretical and experimental in a fixed bed gasifir energy". *Oxford*, vol. 36, no. 6, 2011, pp. 3838-3845.
13. jarungthammachotes s & dutta a. "Tthermodynamic equilibriun model and second law analysis of a downdraft waste gaifier". *Energy*, vol.32, 2007, pp:1660-9.
14. Zainal Za.; Ali r; Lean ch & Seetharamu Kn. "prediciton of the performance of a downdraft gasifrer using eguilibrium modeling for different biomass materials energy convers manage". Vol.42, 2001, pp:1499-515.
15. pellegrini jr lf. *exergy energy*. vol. 32, no.4, 2007, pp:314-27.
16. Spliethoff H. "Investigations on high temperature gasification and gas cleaning". *8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification (HiTACG)*, July 2010, pp: 5-7, Poznan, Polen.

17. Puig amavat, Maria. "performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials". *Energy Convers Manage*, vol.42, 2001, pp: 1499- 515.
18. Higman C, van der Burgt MJ. Gasification. USA: Gulf Professional Pub, 2003.
19. School of environment, resources and development. municipal solid waste management in asia/ asian regional research program on environmental technology (arpet), asian institute of technology, Thailand, 2004.
20. Klein, Alexander. "Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes". Columbia University.
21. Korsgren, J.G. et al. *Characterization of Alkali Metal emission from fuels and samples*. 1999.
22. Collected from Fluidized bed gasification. "Proceedings of the 15th annual conference on fluidized bed combustion". Savannah, GA.
23. Ramanan, M.V. [et al]. "Performance prediction and validation of equilibrium modelling for gasification of cashew nut shell char". *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 25. 2008, pp: 585-601.
24. Sharma A.Kr. "Equilibrium and kinetic modelling of char reduction reactions in adowndraft biomass gasifier: A comparison". *Solar Energy*, vol. 52, 2008, pp: 918-928.
25. Gøbel, B. [et al]. "The development of a computer model for a fixed bed gasifier and its use for optimization and control". *Bioresourcetchnology*, vol. 98, 2007, pp: 2043-52.
26. Channiwala, S. A. & Parikh, P. P. "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels". *Fuel*, vol.81, 2002, pp: 1051-63.
27. Sheng, C. & Azevedo, J.L.T. "Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data". *Biomass and Bioenergy*, vol.28, 2005, pp: 499-507.
28. Baratieri, M. [et al]. "The use of biomass 28- Syngas in IC engines and CCGT plants: a comparative analysis". *Applied Thermal Engineering*, 29: 3309-18, 2009.
29. TenWolde, A.; McNatt, J.D.& Krahn, L. "Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings". DOE/USDA-21697/1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 1988.
30. Fock, F. & Thomsen, K. "Modellering af tottrinsforgasser", *Institut for Energiteknik, Technical University of Denmark*, Denmark, ET-EP 99-10A, 1999.
31. Jarungthammachote, S. & Dutta, A. "Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier". *Energy*, vol, 32, 2007, pp:1660-69.
32. Gøbel, B & Bentzen, J.D. "Dynamisk model af tottrinsforgasningsprocessen". *Laboratoriet for Energiteknik*, Technical University of Denmark, Denmark. ET-PER 95-13, 1995.
33. Gøbel, B. & Bentzen, J.D. Dynamisk model af tottrinsforgasningsprocessen, *Laboratoriet for Energiteknik*, Technical University of Denmark, Denmark, ET-PER 95-13, 1995.
34. Knack, O & Barin, I. *Thermodynamic properties of inorganic substances*. Berlin: Springer-Verlag, 1973.

35. Bentzen, J.D[et al]. "100kWTottrinsforgasningsanlæg på DTU Resultater til og med foråret", *Institut for Energiteknik*, Technical University of Denmark, Denmark, ET-ES 98-11,1998.
۳۶. شرکت توسلی، منصوره [و دیگران]. مروری بر واحدهای عملیاتی و پالایشگاه‌های گازی. دانشگاه تهران: دانشکده شیمی، آزمایشگاه پدیده‌های انتقال و فناوریهای نانو، تیر ۱۳۹۳.
37. Giampaolo, Tony; MSME, PE. Gas ***Turbine Handbook: Principles and ractices***. 3rd Edition. 2006.
38. W.Gas; P.Fletcher. ***Turbine Performance***. 2nd ed, 2004.
۳۹. شریفی، حسین. «بویلرهای بازیافت حرارتی». شرکت مدیریت‌های پروژه‌های نیروگاهی ایران (مپنا)، ۱۳۹۰.

Abstract

Cogeneration of power and heat using gas turbine and renewable fuel (biomass) energy recovery system with

The expenses, which caused by pollution and limited fossil resources, have convinced scientists to concentrate on renewable resources such as biological waste. Conversion of bio waste to syntheses gas produces higher heating values in comparison to conventional bio energy production methods.

To produce energy from bio waste, it is important to study on existing technology and using CHP and gas turbines. In this thesis a plan for producing electricity and heat at the same time by using bio waste has been proposed.

This plan provides a method to produce hybrid gas (combined gas) by using solid bio waste of Tehran in two forms of wet and dry as a renewable energy resource and steam in a fixed bed gas reactor. This gas is a combination of Hydrogen, Carbon monoxide, Carbon dioxide Water and some amount of Methane. Selected temperature and pressure for the reactor respectively is 1900 [°F] and 390 [Psi].

The produced hybrid gas (combined gas) after purification process will be injected to the gas turbine as fuel. All the procedure has been simulated in thermo fluid software by using GT pro major.

This thesis has high concentration on recognizing and producing flammable gas with high heating value from bio waste.

The best air and steam combination entering to fixed bed reactor among 60 different combinations that have been studied for dry waste is:

0.2% of entering fuel volume for steam

0.25% of entering fuel volume for air

Heating value for this combination is 6471 [BTU/lb.]

The best moisture and weight percentage combination for input water in wet waste among the 40 different combinations that have been studied is:

Moisture relative to input fuel ratio is 0.2, with weight percentage of 10% and 15% for water and heating value of 6242 [BTU/lb.]

By using the produced synthesis gas provided from dry waste in Siemens V94.2 gas turbine, 16555 [KW] output power and 212[lb./s] steam in CHP system is produced.

Key words: Biomass, Gasifier fixed bed, Gasification, Downdraft, solid wastes.



Energy Institute For Higher Education
Faculty Of Engineering
Departement Of Mechanical Engineering- Energy Conversion
Thesis For
Degree Of Master Of Science (M. Sc)

Title:

**Cogeneration of power and heat using gas
turbine and energy recovery system
renewable fuel (biomass) with**

Suoervisor:

Dr. Mirzaee

Advisor:

Dr. Allaii

By:

Ehsan Sobhanio

Winter 2017

