٢٧٢٩٨

# دانشگاه تهران

## دانشکده فنی

۱۳۷۸ /۱۰/ ۲۵

**پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد**

**مهندسی شیمی**

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تفکیک مدارک

## موضوع:

# تحلیل فرآیند واحدهای تصفیه گاز و بازیابی گوگرد مجتمع پتروشیمی رازی و بهبود آنها با استفاده از روش اکسرژی

4649

**استاد راهنما:**

**دکتر محمدحسن پنجه‌شاهی**

**نگارش:**

**مهدی سینائی**

دانشگاه تهران دانشکده فنی گروه مهندسی شیمی

دیماه ۱۳۷۸

۲۷۲۹۸

تقدیم به:

پدر و مادرم که همدلی و همرازی آنها

جاودان سرمایهٔ زندگی من است

آنان که به بلندای عمرم در پی سعادتم بوده‌اند.

## تقدیر و تشکر

در آغاز این پایان‌نامه، از زحمات بی‌دریغ استاد عزیز و ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد حسن پنجه شاهی که در تمامی مراحل این تحقیق، راهنمای دلسوز اینجانب بوده و سخنان روحیه بخش ایشان در مواقع دشواری تحقیق و تحصیل، بارقه امید و تلاش را در وجود من زنده کرده است تشکر و قدردانی می‌نمایم.

همچنین از اساتید گرامی، سرکار خانم دکتر گیتی ابوالحمد و جناب آقای دکتر حسین بهمنیار که زحمت بازخوانی این پایان‌نامه را تقبل فرمودند، کمال تشکر و سپاس را دارم.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول: مفاهیم اکسرژی**

۱-۱- تاریخچهٔ اکسرژی ..... ۱

۱-۲- تعریف اکسرژی ..... ۲

۱-۳- اتلافات اکسرژی و موازنه اکسرژی ..... ۳

۱-۳-۱- تغییر اکسرژی حرارتی بین دو حالت مختلف ..... ۳

۱-۳-۲- قانون اتلاف اکسرژی ..... ۶

۱-۳-۳- موازنه اکسرژی ..... ۸

۱-۳-۴- اکسرژی حرارت Q ..... ۱۰

۱-۴- محاسبه اکسرژی جریانهای مواد ..... ۱۲

۱-۴-۱- محاسبه اکسرژی شیمیایی ..... ۱۲

۱-۴-۲- محاسبه اکسرژی فیزیکی ..... ۱۴

۱-۴-۳- محاسبه تغییر اکسرژی در اثر اختلاط ..... ۱۸

۱-۵- محاسبه اتلاف اکسرژی ..... ۱۶

۱-۵-۱- روش جریانی ..... ۱۶

۱-۵-۲- روش Across the unit ..... ۱۷

۱-۶- بازده قانون دوم ..... ۱۷

**فصل دوم: کاربردهای ترمودینامیکی تحلیل اکسرژی**

۲-۱- تحلیل اکسرژی فرآیندها و واحدهای عملیاتی مختلف ..... ۱۹

۲-۱-۱- انتقال حرارت برگشت‌ناپذیر ..... ۱۹

۲-۱-۲- اصطکاک ..... ۲۰

| عنوان | صفحه |
|---|---|


۲-۱-۳- پدیده اختناق ..... ۲۱

۲-۱-۴- عمل نفوذ ..... ۲۲

۲-۱-۵- توربین و کمپرسور ..... ۲۳

۲-۱-۶- مبدل حرارتی ..... ۲۵

۲-۱-۶-۱- کمینه کردن برگشت‌ناپذیری در یک مبدل حرارتی ..... ۲۹

۲-۱-۶-۲- بازده اکسرژتیک مبدل حرارتی ..... ۳۵

۲-۱-۷- برج تقطیر ..... ۳۸


**فصل سوم: مطالعه موردی تحلیل اکسرژی و بهینه‌سازی فرآیندهای مختلف**


۳-۱- تهیه گاز سنتز از گاز طبیعی ..... ۴۵

۳-۱-۱- تئوری تهیه گاز سنتز ..... ۴۵

۳-۱-۲- فرآیندهای مختلف تهیه گاز سنتز برای تولید متانول ..... ۴۶

۳-۱-۲-۱- تبدیل کاتالیستی با بخار آب (فرآیند A1) ..... ۴۶

۳-۱-۲-۲- تبدیل کاتالیستی با بخار آب همراه با پیش‌تبدیل کننده (فرآیند A2) ..... ۴۸

۳-۱-۲-۳- ترکیبی از دو فرآیند تبدیل کاتالیستی در حضور بخار آب و فرآیند اکسیداسیون جزئی در حضور کاتالیست (فرآیند B) ..... ۴۸

۳-۱-۲-۴- ترکیب فرآیند تبدیل کاتالیستی با فرآیند اکسیداسیون جزئی بصورت موازی (فرآیند C) ..... ۴۹

۳-۱-۳- شبیه‌سازی و تحلیل اکسرژی ..... ۴۹

۳-۱-۴- بیان نتایج حاصل از تحلیل اکسرژی ..... ۵۲

۳-۱-۴-۱- فرآیند A1 ..... ۵۵

| عنوان | صفحه |
|---|---|


۳-۱-۴-۲- فرآیند A2 ..... ۵۵

۳-۱-۴-۳- فرآیند B ..... ۵۵

۳-۱-۴-۴- فرآیند C ..... ۵۵

۳-۱-۵- اکسرژی قابل استفاده واکنش و اتلاف اکسرژی در اثر واکنش ..... ۵۶

۳-۲- انتگراسیون یک فرآیند جدید با فرآیندهای موجود ..... ۶۱

۳-۲-۱- تحلیل اکسرژی ..... ۶۱

۳-۲-۱-۱- فرآیندهای تولید و مصرف بخار ..... ۶۲

۳-۲-۱-۲- واحد بخار ..... ۶۳

۳-۲-۱-۳- واحد اسید نیتریک ..... ۶۴

۳-۲-۲- بهبود هر یک از فرآیندها ..... ۶۷

۳-۲-۲-۱- فرآیندهای تولید و مصرف بخار ..... ۶۷

۳-۲-۲-۲- واحد تولید بخار ..... ۶۹

۳-۲-۲-۳- واحد اسید نیتریک ..... ۷۰

۳-۲-۳- انتگراسیون هر سه واحد ..... ۷۴

۳-۲-۳-۱- سیستم گرم کردن آب خوراک واحد بخار ..... ۷۶

۳-۲-۳-۲- واحد اسید نیتریک (تغییر وضعیت ۱) ..... ۷۶

۳-۳- استفاده از اکسرژی گاز طبیعی ..... ۷۹

۳-۳-۱- استفاده از اکسرژی گاز طبیعی برای بالا بردن فشار بخار ..... ۸۰

۳-۳-۲- استفاده از اکسرژی فشاری گاز طبیعی برای تولید هوای فشرده ..... ۸۰


**فصل چهارم: آشنایی با واحدهای تصفیه گاز و بازیابی گوگرد مجتمع پتروشیمی رازی**


۴-۱- واحد تصفیه گاز مجتمع پتروشیمی رازی ..... ۸۳

۴-۲- واحد بازیابی گوگرد مجتمع پتروشیمی رازی ..... ۸۷

عنوان | صفحه

**فصل پنجم: تحلیل اکسرژی فرآیندهای تصفیه گاز و بازیابی گوگرد**


۵-۱- شبیه‌سازی واحدهای تصفیه گاز و بازیابی گوگرد ..... ۹۰

۵-۲- محاسبه اکسرژی جریانهای مواد ..... ۹۰

۵-۳- محاسبه اتلاف اکسرژی ..... ۹۱


**فصل ششم: بهبود فرآیندهای تصفیه گاز و بازیابی گوگرد**


۶-۱- بهبود فرآیند تصفیه گاز ..... ۱۰۰

۶-۲- نتایج بهبود واحد تصفیه گاز ..... ۱۰۱

۶-۳- برآورد اقتصادی واحد تصفیه گاز ..... ۱۰۳

۶-۳-۱- برآورد هزینه تولید بخار ..... ۱۰۳

۶-۳-۲- برآورد هزینه سرمایشی ..... ۱۰۴

۶-۳-۳- برآورد کاهش هزینه ..... ۱۰۴

۶-۴- بهبود فرآیند بازیابی گوگرد ..... ۱۰۴

۶-۴-۱- پیشنهاد اول ..... ۱۰۶

۶-۴-۱-۱- محاسبه اتلاف اکسرژی مبدلها در پیشنهاد اول ..... ۱۰۸

۶-۴-۱-۲- کاهش هزینه‌ها در پیشنهاد اول ..... ۱۰۸

۶-۴-۲- پیشنهاد دوم ..... ۱۰۸

۶-۴-۲-۱- محاسبه اتلاف اکسرژی مبدلها در پیشنهاد دوم ..... ۱۰۹

۶-۴-۲-۲- کاهش هزینه‌ها در پیشنهاد دوم ..... ۱۱۰

۶-۴-۳- پیشنهاد سوم ..... ۱۱۰

۶-۴-۳-۱- آشنایی با توربین‌های بخار صنعتی ..... ۱۱۱

۶-۴-۳-۲- ارائه روش بهبود و طراحی شبکه مبدل جدید ..... ۱۱۲

| عنوان | صفحه |
|---|---|


۶-۴-۳-۳- انتخاب توربین و محاسبه میزان برق تولیدی ..... ۱۱۶

۶-۴-۳-۴- محاسبه اتلاف اکسرژی در واحد بازیابی گوگرد - پس از بهبود ..... ۱۱۹

۶-۴-۳-۵- برآورد اقتصادی پیشنهاد سوم ..... ۱۱۹

۶-۵- نتایج و پیشنهادات ..... ۱۲۴

مراجع ..... ۱۲۵

ضمیمه ۱ ..... ۱۲۸

ضمیمه ۲ ..... ۱۴۷

ضمیمه ۳ ..... ۱۶۳

ضمیمه ۴ ..... ۱۸۴

ضمیمه ۵ ..... ۱۹۰

ضمیمه ۶ ..... ۱۹۶

ضمیمه ۷ ..... ۲۰۲

# فهرست اشکال


شکل (۱-۱) مدل برای محاسبه تغییر اکسرژی حرارتی بین دوحالت ..... ۴

شکل (۱-۲) تغییر حالت جریان در یک مسیر آیزنتروپیک و دما ثابت ..... ۵

شکل (۱-۳) مدل برای محاسبه اتلاف اکسرژی ..... ۶

شکل (۱-۴) پخش دما در یک پیش‌گرمکن هوا ..... ۹

شکل (۱-۵) مدل برای محاسبه اکسرژی حرارت Q ..... ۱۱

شکل (۱-۶) مدل برای محاسبه اکسرژی سرمای Q ..... ۱۱

شکل (۱-۷) تغییر شرایط یک جریان ماده غیر مخلوط از حالت حقیقی به حالت مبنا ..... ۱۵

شکل (۱-۸) مسیر محاسبه اکسرژی ..... ۱۷

شکل (۲-۱) مقایسه حرارت اصطکاک با اتلاف اکسرژی در یک ماشین آدیاباتیک ..... ۲۰

شکل (۲-۲) اتلاف اکسرژی در اثر اختناق یک گاز ایده‌آل ..... ۲۲

شکل (۲-۳) اتلاف اکسرژی در انبساط آدیاباتیک برگشت‌ناپذیر ..... ۲۴

شکل (۲-۴) اثر فشرده شدن روی اتلاف اکسرژی در کندانسوریک یخچال ..... ۲۶

شکل (۲-۵) اتلاف اکسرژی در اثر انبساط برگشت‌ناپذیر در یک سیکل تبرید گازی ..... ۲۶

شکل (۲-۶) اتلاف اکسرژی در یک مبدل حرارتی ..... ۲۷

شکل (۲-۷) برگشت‌ناپذیری در مبدل حرارتی ..... ۳۰

شکل (۲-۸) برگشت‌ناپذیری در مبدل حرارتی با در نظر گرفتن برگشت ناپذیری مواد ..... ۳۲

شکل (۲-۹) تغییرات عدد برگشت ناپذیری بصورت تابعی از NTU ..... ۳۴

شکل (۲-۱۰) تغییرات عدد برگشت‌ناپذیری با NTU در یک مبدل حرارتی با جریان متقابل ..... ۳۵

شکل (۲-۱۱) تغییرات $NTU^*$ بصورت تابعی از $\omega$ و $\gamma$ در یک مبدل حرارتی با جریان متقابل ..... ۳۶

# فهرست اشکال


شکل (۲-۱۲) بازده اکسرژتیک برای مبدل حرارتی ..... ۳۷

شکل (۲-۱۳) بازده اکسرژتیک یک مبدل با جریان متقابل ..... ۳۸

شکل (۲-۱۴) موازنه اکسرژی در برج تقطیر ..... ۳۹

شکل (۲-۱۵) برج آدیاباتیک که فقط در بالا و پایین برج تبادل حرارت دارد و برج ایده‌آل که در تمام مراحل، تبادلات حرارت دارد. ..... ۴۰

شکل (۲-۱۶) یک مرحله از برج ایده‌آل ..... ۴۱

شکل (۳-۱) نمودار فرآیند تبدیل کاتالیستی با بخار آب (فرآیندA1) ..... ۴۷

شکل (۳-۲) نمودار فرآیند ترکیبی کاتالیستی و اکسیداسیون جزئی (فرآیندB) ..... ۵۰

شکل (۳-۳) نمودار فرآیند ترکیبی کاتالیستی و اکسیداسیون جزئی (فرآیندC) ..... ۵۱

شکل (۳-۴) مرزهای سیستم مورد استفاده در تحلیل اکسرژی ..... ۵۲

شکل (۳-۵)اکسرژی قابل استفاده واکنش فرآیندهای مختلف ..... ۵۷

شکل (۳-۶) تغییرات در اکسرژی شیمیایی و فیزیکی در اثر واکنش کلی ..... ۵۹

شکل (۳-۷) نمودار اتلاف اکسرژی برحسب اکسرژی قابل استفاده واکنش ..... ۵۹

شکل (۳-۸) نمودار بخار تولیدی و مصرف شده در فرآیندها ..... ۶۲

شکل (۳-۹) نمودار واحد بخار ..... ۶۴

شکل (۳-۱۰) نمودار فرآیند اسید نیتریک طراحی شده با استفاده از مفاهیم اکسرژی ..... ۶۵

شکل (۳-۱۱) فرآیند اصلاح شده تولید و مصرف بخار ..... ۶۹

شکل (۳-۱۲) واحد بخار و نحوه گرم کردن آب خوراک برای تغییر وضعیت ۱ ..... ۷۲

شکل (۳-۱۳) منحنی سرد کردن گاز کنورتور و استفاده از گرمای آن ..... ۷۳

شکل (۳-۱۴) واحد اسید نتیریک - تغییر وضعیت ۱ ..... ۷۳

شکل (۳-۱۵) واحد بخار و پیش‌گرم کن آب خوراک برای تغییر وضعیت ۴ ..... ۷۹

# فهرست اشکال

شکل (۳-۱۶) واحد بخار و پیش‌گرم کن آب خوراک برای تغییر وضعیت ۷ ..... ۸۰

شکل (۳-۱۷) نمودار بازیابی بخارها بوسیله کمپرس کردن - استفاده از اکسرژی گاز طبیعی ..... ۸۱

شکل (۳-۱۸) نمودار تهیه هوای فشرده با استفاده از اکسرژی فشاری گاز طبیعی ..... ۸۲

شکل (۴-۱) نمودار فرآیند تصفیه گاز ..... ۸۶

شکل (۴-۲) نمودار فرآیند بازیابی گوگرد ..... ۸۹

شکل (۵-۱) اختلاف پتانسیل حرارتی در مبدلها ..... ۹۷

شکل (۵-۲) تغییرات اتلاف اکسرژی در کوره واکنش با دمای خوراک ..... ۹۸

شکل (۶-۱) شبکه مبدلهای حرارتی - وضعیت موجود ..... ۱۰۵

شکل (۶-۲) شبکه مبدلهای حرارتی - پیشنهاد اول ..... ۱۰۷

شکل (۶-۳) شبکه مبدلهای حرارتی - پیشنهاد دوم ..... ۱۰۹

شکل (۶-۴) شبکه مبدلهای حرارتی - پیشنهاد سوم ..... ۱۱۵

شکل (۶-۵) نمودارهای انتخاب قسمتهای ورودی و خروجی توربین ..... ۱۱۸

# فهرست جداول


جدول (۲-۱) مشخصات جریانها در جداکننده اتیلن - اتان ..... ۴۲

جدول (۲-۲) موازنه آنتالپی و اکسرژی برای برج تقطیر آدیاباتیک و ایده‌آل ..... ۴۳

جدول (۲-۳) نتایج تحلیل اکسرژی برج جداسازی اتیلن - اتان ..... ۴۳

جدول (۳-۱) نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیندهای تهیه گاز سنتز ..... ۵۲

جدول (۳-۲) مقادیر انرژی و اکسرژی فرآیندهای تهیه گاز سنتز ..... ۵۳

جدول (۳-۳) اتلاف اکسرژی در هر یک از قسمت‌های فرآیند (GJ/t MeOH) ..... ۵۴

جدول (۳-۴) واکنش کلی فرآیندها ..... ۵۶

جدول (۳-۵) بخار تولیدی و مصرف شده در فرآیندها ..... ۶۱

جدول (۳-۶) موازنه انرژی و مواد واحد اسید نیتریک ..... ۶۵

جدول (۳-۷) مقایسه تغییر وضعیت‌های مختلف با حالت مبنا ..... ۷۷

جدول (۵-۱) جریان جرم، انرژی و اکسرژی در واحد بازیابی گاز ..... ۹۲

جدول (۵-۲) جریان جرم، انرژی و اکسرژی در واحد بازیابی گوگرد ..... ۹۳

جدول (۵-۳) اتلاف اکسرژی و بازده قانون دوم در واحد تصفیه گاز ..... ۹۴

جدول (۵-۴) اتلاف اکسرژی و بازده قانون دوم در واحد بازیابی گوگرد ..... ۹۵

جدول (۶-۱) اتلاف اکسرژی و بازده قانون دوم در واحد تصفیه گاز - پس از بهبود ..... ۱۰۲

جدول (۶-۲) نتایج بهبود واحد تصفیه گاز ..... ۱۰۴

جدول (۶-۳) تولید و مصرف بخار ..... ۱۰۶

جدول (۶-۴) اتلاف اکسرژی شبکه مبدل حرارتی - پیشنهاد اول ..... ۱۰۸

جدول (۶-۵) اتلاف اکسرژی شبکه مبدل حرارتی - پیشنهاد دوم ..... ۱۱۰

جدول (۶-۶) مشخصات توربین‌های back-pressure ..... ۱۱۲

جدول (۶-۷) سطح تبادل حرارت مبدلهای جدید ..... ۱۱۶

جدول (۶-۸) اتلاف اکسرژی و بازده قانون دوم در واحد بازیابی گوگرد - پیشنهاد سوم ..... ۱۲۰

جدول (۶-۹) قیمت تجهیزات خریداری شده ..... ۱۲۲

## چکیده

بعلت افزایش نیاز صنایع به انرژی از یک سو و افزایش روز افزون قیمت سوخت و محدود بودن منابع انرژی از سوی دیگر، اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی و جلوگیری از اتلاف آن در صنایع، بیش از پیش به چشم می‌خورد. روش اکسرژی یک ابزار قوی و کارآمد برای تحلیل سیستم انرژی فرآیندهای صنعتی می‌باشد. هدف اصلی از تحلیل اکسرژی، تعیین بزرگی و محل اتلاف اکسرژی در یک فرآیند، یافتن علتها و نهایتاً ارائه روشی به منظور کاهش اتلافات اکسرژی می‌باشد. این کار، به تصمیم‌گیری در بهبود فن‌آوری فرآیند، برای کاهش مصرف انرژی منتهی می‌شود.

در تحقیق حاضر، واحدهای تصفیه‌گاز و بازیابی گوگرد مجتمع پتروشیمی رازی، بدین منظور انتخاب شده‌اند.

قسمت تئوری، جهت آشنایی با واحدهای فوق و مفاهیم اکسرژی در نظر گرفته شده است. سپس جهت دستیابی به اطلاعات کافی برای تحلیل، واحدهای فوق توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز PRO/II شبیه‌سازی شده است. پس از محاسبه اتلاف اکسرژی در کلیه تجهیزات، ضمن بحث در مورد دلایل زیاد بودن اتلاف اکسرژی در برخی از تجهیزات، روشهایی برای بهبود و نهایتاً صرفه‌جویی در مصرف انرژی ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی برای واحد تصفیه گاز، کاهش میزان دی‌اتانول آمین در گردش و افزایش فشار برج جذب به منظور کاهش اتلاف اکسرژی می‌باشد.

در مورد واحد بازیابی گوگرد، سه پیشنهاد ارائه شده است. در دو پیشنهاد اول، با تغییر در سیستم تولید بخار، با تجهیزات موجود، ضمن تولید بیشتر بخار MP، اتلاف اکسرژی نیز کاهش می‌یابد. پیشنهاد سوم، عبارتست از افزایش دما و فشار بخار تولیدی و استفاده از آن برای تولید انرژی الکتریکی می‌باشد. این امر، با اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی و افزودن مبدلهای جدید امکان‌پذیر است. برآوردهای اقتصادی این طرح جهت تولید انرژی الکتریکی در انتهای تحقیق، ارائه شده است.

## مقدمه

امروزه، رشد و توسعه صنایع و نیاز قابل توجه فرآیندهای صنعتی به انرژی از یک سو، و افزایش روزافزون قیمت سوخت و انرژی و محدود بودن منابع طبیعی انرژی از سوی دیگر، ایجاب می‌کند، که توجه زیادی به چگونگی مصرف انرژی و توسعه یک روش مناسب برای ارزیابی آن، معطوف شود.

روش متداول برای ارزیابی یک فرآیند فیزیکی یا شیمیایی از لحاظ انرژی، نوشتن موازنه انرژی، براساس قانون اول ترمودینامیک می‌باشد که از آن برای کاهش اتلاف حرارت و یا افزایش بازیابی حرارتی، می‌توان استفاده کرد. در حالی که هیچ اطلاعی در مورد افت کیفیت انرژی که در یک فرآیند اتفاق می‌افتد، نمی‌دهد. همچنین، بیانگر سودمندی حرارت موجود در جریانهایی که فرآیند را ترک می‌کنند، نمی‌باشد.

روش تحلیل اکسرژی، براین محدودیتهای قانون اول ترمودینامیک غلبه می‌کند. روش اکسرژی، یک روش آنالیز ترمودینامیکی است که اتلافات ترمودینامیکی را براساس هر دو قانون اول و دوم ترمودینامیک برآورد می‌کند. از آنجایی که قانون دوم ترمودینامیک کنترل کننده محدودیتها در تبدیل صورتهای مختلف انرژی به یکدیگر است، بخوبی می‌توان با استفاده از آن، میزان فقدان انرژی را در فرآیندهای واقعی تعیین کرد. کاربرد این روش، محل اتلاف انرژی را در یک فرآیند مشخص می‌کند و واحدهای عملیاتی را که برای بهبود در اولویت قرار دارند، نشان می‌دهد. این کار، منتهی به تغییر و بهبود شرایط عملیاتی یا تجهیزات فنی فرآیند می‌شود. بنابراین، با استفاده از روش تحلیل اکسرژی می‌توان میزان استفاده از منابع طبیعی انرژی را، کاهش داد.