بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی شیمی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد (گرایش پیشرفته)

بهینه‌سازی سیستمهای انتقال حرارت (مبدلهای حرارتی و کوره‌ها) در واحد هیدروکراکر (آیزوماکس) پالایشگاه اراک

نگارش:

مهدی چاوشی نجف‌آبادی

استاد راهنما:

دکتر منصور کلباسی

بهمن ۱۳۸۵

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا

شماره : .....
تاریخ : .....

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام ونام خانوادگی: مهدی چاوشی نجف آبادی **دانشجوی آزاد** ■ **بورسیه** □ **معادل** □

شماره دانشجویی ۸۳۱۲۲۱۳۱ **دانشکده:** مهندسی شیمی **رشته تحصیلی:** پیشرفته

نام ونام خانوادگی استاد راهنما : دکتر منصور کلباسی

عنوان به فارسی: بهینه‌سازی سیستمهای انتقال حرارت (مبدلهای حرارتی و کوره‌ها) در واحد هیدروکراکر (آیزوماکس) پالایشگاه اراک

عنوان به انگلیسی: Optimization and Retrofit of Heat Transfer Systems (HEX and Furnaces) In Arak Refinery Hydrocracking Unit

نوع پروژه کارشناسی ارشد / دکترا: **کاربردی:** ■ **بنیادی:** □ **توسعه‌ای:** □ **نظری:** □

تاریخ شروع: ۸۴/۷/۱ **تاریخ خاتمه :** ۸۵/۱۱/۱۷ **تعداد واحد:** ۶

سازمان تأمین کنندهٔ اعتبار:

واژه‌های کلیدی به فارسی : واحد هیدروکراکر؛ آنالیز پینچ؛ اصلاح شبکه مبدلها؛ یکپارچه‌سازی فرایند

واژه‌های کلیدی به انگلیسی: *Hydrocracking Unit; Pinch Analysis; HEXN retrofit; Process Integration*

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت های پژوهشی دانشگاه:تخصیص اعتبار مالی بیشتر به این بخش

استاد راهنما:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

نسخه ۱: معاونت پژوهشی

جانا حدیث حسنت در داستان نگنجد رمزی ز راز عشقت در صد زبان نگنجد
اندر ضمیر دلها گنجی نهان نهادی از دل اگر برآید در آسمان نگنجد
عطار

تقدیم به پدر و مادر عزیز، دانا و مهربانم

که پس از خداوند متعال

همواره راهنما و یاریگر من بوده‌اند.

با تشکر فراوان از *جناب آقای دکتر کلباسی*
و راهنمایی‌های ایشان
که در انجام این پروژه، مرا یاری نمودند.

با سپاس بی‌شمار از دوستان عزیزم
جناب آقای مهندس توسلی و جناب آقای مهندس موسوی
و جناب آقای مهندس توصیف
که معنای واقعی دوستی و کمال را به من نشان دادند.

از جان طمع بریدن آسان بود ولیکن از دوستان جانی، مشکل توان بریدن

چکیده:

مصرف روزافزون منابع انرژی و افزایش قیمت سوخت از یکسو، محدودیتهای محیط زیستی مبنی بر کاهش آلاینده‌ها از سوی دیگر سبب شده است که در سالهای اخیر صاحبان صنایع، به خصوص صنایع بزرگ که مصرف‌کنندگان عمده انرژی هستند، در صدد چاره‌جویی برای حل این مشکل باشند. در این راستا، روشهای گوناگونی برای کاهش مصرف انرژی و هزینه ها ارائه شده و توسعه یافته است. انتگراسیون یا یکپارچه‌سازی فرایند، مفهومی است که به استفاده از برخی از این روشها مانند آنالیز پینچ، برنامه‌ریزی ریاضی، هوش مصنوعی و غیره، در جهت کاهش تلفات، گفته می‌شود.

در این پروژه، امکان بهبود شبکه مبدلهای حرارتی و کوره‌های واحد هیدروکراکر یا آیزوماکس پالایشگاه اراک مورد بررسی قرار گرفته‌است. اطلاعات مورد نیاز، از واحد جمع‌آوری شده و با استفاده از مفاهیم پینچ و با استفاده از نرم‌افزارهای Hysys و Aspen Pinch ، مساله، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

به دلیل ماهیت جریانها و شرایط عملیاتی، واحد به دو بخش مجزای فشار بالا(راکتورها) و قسمت فشار پایین (جداسازی) تقسیم و بررسی شد. در قسمت فشار بالا (فشار حدود ۲۰۰ بار)، به دلیل اینکه فشار و میزان ترکیبات خورنده زیاد است، در ساخت تجهیزات از مواد گران‌قیمت و خاص استفاده شده است و تغییر در ساختار اجزاء به سادگی امکان پذیر نمی‌باشد. پیشنهاد ارائه شده در این قسمت، افزایش یک جفت مبدل می‌باشد. در قسمت جداسازی چندین راهکار پیشنهاد شد و میزان صرفه‌جویی اقتصادی آن نیز محاسبه گردید. که از جمله این تغییرات، حذف بخار فشار متوسط در جوشاننده برج تثبیت‌کننده نفتای سبک و جوشاننده برج عریان‌کننده نفتای سنگین و جایگزینی آن با محصولات دیزل و نفت‌سفید و نیز تولید بخار فشار پایین از دو جریان محصولات دیزل و نفت‌سفید می‌باشد. همچنین پیشنهاد شد که در یکی از کوره‌ها، به منظور کاهش مصرف سوخت، دمای هوای ورودی و میزان پیش-گرم آن افزایش یابد.

کلمات کلیدی *: واحد هیدروکراکر؛ آنالیز پینچ؛ اصلاح شبکه مبدلها؛ یکپارچه‌سازی فرایند.*

Keywords: *Hydrocracking Unit; Pinch Analysis; HEXN retrofit; Process Integration.*

فهرست مطالب

چکیده: ..... أ
فهرست مطالب ..... ب
فهرست شکلها ..... د
فهرست جداول ..... ه

۱) بخش اول: مفاهیم نظری ۱

۱-۱) پیشگفتار ۲
۱-۲) مروری بر کارهای انجام شده ۴
۱-۳) مفاهیم اساسی ۹
۱-۳-۱) هدفگذاری انرژی ۹
۱-۳-۱-۱) روش گرافیکی ۱۰
۱-۳-۱-۲) روش بازه های دمایی (TI) ۱۵
۱-۳-۱-۳) برنامه ریزی خطی: ۱۹
۱-۳-۱-۴) ساختن شبکه ای از مبدلها به منظور برآورده شدن هدف MER ۲۰
۱-۳-۲) هدفگذاری سطح ۳۲
۱-۳-۳) هدفگذاری حداقل تعداد واحدها ۳۴
۱-۳-۴) اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی ۳۵
۱-۳-۴-۱) مقدمه ۳۵
۱-۳-۴-۲) اصلاح به وسیله روش طراحی پینچ(PDM) ۳۵
۱-۳-۵) کوره ها ۴۲
۱-۳-۵-۱) شرح فرآیند عملکرد گاز داخل کوره ۴۲

۲) بخش دوم: بررسی اطلاعات واحد ۴۷

۲-۱) شرح واحد هیدروکراکر یا آیزوماکس ۴۸
۲-۱-۱) مقدمه ۴۸
۲-۱-۲) شرح مختصری از کاتالیستهای هیدروکراکینگ ۴۹
۲-۱-۳) شرح فرآیند ۵۰
۲-۱-۳-۱) بخش شامل راکتور (Reactor Section) ۵۰
۲-۱-۳-۲) قسمت جدا سازی (Fractionation) ۵۲
۲-۲) مشخصات مبدلهای و کورهها و منابع تاسیساتی موجود ۵۶
۲-۲-۱) مبدلها ۵۶

۲-۲-۱-۱) قیمت مبدلها ۵۷
۲-۲-۲) کوره ها ۵۸
۲-۲-۳) منابع تاسیساتی وقیمت آنها ۵۸
۲-۳) هدفگذاری ۶۰
۲-۳-۱) بخش راکتور ۶۰
۲-۳-۲) بخش جداسازی ۶۸

۳) بخش سوم: بحث و نتیجه گیری ۷۴

۳-۱) قسمت راکتور ۷۵
۳-۲) قسمت جداسازی ۸۲
۳-۲-۱) راهکارهای پیشنهادی ۸۳
۳-۲-۱-۱) راهکار اول : تولید بخار فشار پایین از محصولات دیزل و نفت سفید ۸۴
۳-۲-۱-۲) راهکار دوم: استفاده از محصولات دیزل و نفت سفید در جوشانندههای HN و LN ۸۶
۳-۲-۱-۳) راهکار سوم : استفاده از دیزل در جوشاننده LN و محصول نفت سفید در جوشانندههای HN و نیز تولید LPS از دیزل ۸۸
۳-۳) بررسی کوره H-633 ۹۰
مراجع ۹۳
مراجع پیشنهادی ۹۵
ضمیمه ا: (نمای فرایندی ساده شده واحد) ۹۶
Abstract ۹۸

فهرست شکلها

شکل(۱-۱) چگونگی تشکیل منحنی ترکیبی ۱۱
شکل(۱-۲) شکل منحنی ترکیبی مربوط به مثال(۱) ۱۲
شکل(۱-۳) نحوه تغییرات نمودار آبشاری. ۱۶
شکل(۱-۴) منحنی ترکیبی مثال (۱) به همراه تقسیمبندی فواصل دمایی ۱۷
شکل(۱-۵) نمودار فواصل دمایی برای مثال(۱) ۱۸
شکل(۱-۶) نمودار آبشاری و فرمولاسیون ریاضی برای تعیین MER ۲۰
شکل(۱-۷) تاثیر انتقال حرارت در عرض پینچ بر روی انرژی مورد نیاز ۲۲
شکل(۱-۸) شباهت بین مدل حمل ونقل مرکب وشبکه مبدل های حرارتی ۲۳
شکل(۱-۹) : نمودار جریان حرارت از بازه k ام درمدل ترابریغیر مستقیم ۲۶
شکل(۱-۱۰) مدل ساده شده ترابری غیرمستقیم برای تشکیل جفتها در شبکه ۳۰
شکل(۱-۱۱) انتقال حرارت عمودی بین منحنی های ترکیبیی منجر به کمترین مساحت سطح شبکه می شود ۳۲
شکل(۱-۱۲) اصلاح بر اساس حد وسط هدف انرژی- سرمایه گذاری ۳۵
شکل(۱-۱۳) مفهوم بازده سطح ۳۶
شکل(۱-۱۴) منحنی صرفه جویی- سرمایه گذاری ۳۷
شکل(۱-۱۵) شکل روشی برای اصلاح با استفاده از نمودار انرژی- $\Delta T_{\min}$ ۳۸
شکل(۱-۱۶) تاثیر شکل منحنی های ترکیبی بر روی مقدار بهینه $\Delta T_{\min}$ فرایند ۳۹
شکل(۱-۱۷) منحنی آنتالپی-دما برای گاز داخل کوره و هوای ورودی به کوره ۴۴
شکل(۱-۱۸) حالت اول: دمای نقطه شبنم اسید (T_{ADP}) تعیین کننده دمای دودکش می باشد. ۴۴
شکل(۱-۱۹) حالت دوم: دمای پینچ (T_{Pinch}) تعیین کننده دمای دودکش می باشد. ۴۵
شکل(۱-۲۰) حالت سوم: فرایندی دور از دمای پینچ تعیین کننده دمای دودکش می باشد. ۴۶
شکل(۲-۱) نمودار ترکیبی بخش راکتور برای حالت موجود ۶۱
شکل(۲-۲) نمودار نقطه ای بخش راکتور در حالت موجود ۶۲
شکل(۲-۳) نمودار ترکیبی ساده شده بخش راکتور برای حالت موجود ۶۴
شکل(۲-۴) نمودار ترکیبی ساده شده بخش راکتور با تغییر دمای نهایی جریان خروجی از V-636 ..... ۶۵
شکل(۲-۵) نمودار ترکیبی ساده شده بخش راکتور با برای حداکثر بازیافت انرژی با اعمال محدودیتها ۶۷
شکل(۲-۶) نمودار ترکیبی بخش جداسازی بدون هیچ تغییر ۶۹
شکل(۲-۷) نمودار ترکیبی جریانهای بخش جداسازی در حالت موجود با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده ۷۱
شکل(۲-۸) نمودار نقطه ای (Grid diagram) برای بخش جداسازی در حالت موجود ۷۳
شکل(۳-۱) PFD ساده برای قسمت مرتبط کننده دو بخش فشار بالا و فشار پایین واحد ۷۵
شکل(۳-۲) نمودار مقدار صرفه جویی سالانه بر حسب سرمایه گذاری ۸۱
شکل(۳-۳) نمودار نقطه ای برای قسمت جداسازی با $HRAT = 42.3^{\circ}C$ ۸۲
شکل(۳-۴) شکل ساده کوره و سیستم پیشگرم هوای آن ۹۰

فهرست جداول

جدول(۱-۱) تشابه بین مدل ترابری غیرمستقیم و شبکه مبدلها ۲۳
جدول(۱-۲) مقادیر $\Delta T_{\min}$ برای فرایند های مختلف ۴۰
جدول(۱-۳) مقادیر $\Delta T_{\min}$ برای انتخاب تناظر بین جریان های فرایند ۴۰
جدول(۱-۴) مقادیر $\Delta T_{\min}$ برای اصلاح فرایند های مختلف پالایشگاهی ۴۱
جدول(۲-۱) مقایسه واکنشهای اصلی هیدروکراکینگ ۴۹
جدول(۲-۲) لیست برجهای قسمت اصلی جداسازی ۵۲
جدول(۲-۳) مشخصات مبدلها ۵۶
جدول(۲-۴) مشخصات فرایندی مبدلهای واحد ۵۶
جدول(۲-۵) قیمت تاسیسات جانبی ۵۸
جدول(۲-۶) آنالیز سوخت گاز پالایشگاه ۵۹
جدول(۲-۷) برخی از خواص سوخت گازپالایشگاه در شرایط معمولی ۵۹
جدول(۲-۸) جریانهای بخش راکتور ۶۰
جدول(۲-۹) جریانهای بخش جداسازی ۶۸
جدول(۲-۱۰) ظرفیت منابع تاسیساتی به کار رفته در قسمت جداسازی ۶۹
جدول(۲-۱۱) مشخصات فرایندی مبدلهای قسمت جداسازی ۷۱
جدول(۳-۱) مشخصات جریانهای مربوط به مدل قسمت راکتور ۷۵
جدول(۳-۲) آنالیز سوخت گاز پالایشگاه ۹۰

۱) بخش اول:

مفاهیم نظری

۱-۱) پیشگفتار

در چند دهه اخیر با توجه به کاهش منابع انرژی و رشد روز افزون هزینه انرژی ، صرفه‌جویی در مصرف انرژی جزء برنامه‌های اصلی واحدهای صنعتی به شمار می‌رود. چراکه مصرف بالای انرژی علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین، باعث افزایش آلاینده‌های محیطی می‌گردد که این امر با مخالفت شدید سازمانهای حامی محیط زیست، مواجه گردیده است.

در پی تلاشهای صاحبنظران برای رفع این معزل، روشهای متعددی پیشنهاد گردید که از جمله این روشها، استفاده بهینه از انرژی تلف شده در فرایندها می‌باشد. در این راستا مفاهیم متعددی، گسترش یافته، مورد استفاده قرار گرفت. انتگراسیون فرایند یکی از این مفاهیم می‌باشد.

انتگراسیون یا یکپارچه‌سازی فرایند، مفهوم نسبتا جدیدی است که از دهه ۸۰ میلادی آغاز و در دهه ۹۰ به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت به منظور اینکه بخشی خاص از فعالیتهای سیستماتیک را که عمدتا مربوط به طراحی فرایند هستند را مورد شرح و بررسی قرار دهد.

آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) از انتگراسیون فرایند در سال ۱۹۹۳ تعریفی ارائه داد که به دلیل تحولاتی که در انتگراسیون فرایند طی ۱۵ سال اخیر رخ داده است، تعریف مجددی از انتگراسیون فرایند توسط آژانس ارائه شد[1]:

" انتگراسیون فرایند یک مفهوم عمومی است، برای کاربرد اسلوب گذاری‌های که بر مبنای سیستم و با دیدگاه جامع و کلی به طراحی واحد، بناشده و گسترش یافته‌اند. و مورد استفاده آنها در طراحی‌های جدید و اصلاحی می‌باشد. این اسلوب‌ها می‌توانند مدلها، روشها و تکنیک‌های ریاضی، ترمودینامیکی و اقتصادی باشند که هوش مصنوعی، آنالیز سلسله مراتبی، آنالیز پینچ و برنامه‌ریزی ریاضی نمونه این روشها می‌باشند. یکپارچه‌سازی فرایند به طراحی بهینه (از لحاظ سرمایه‌گذاری اولیه، بازده انرژی، خروجی‌های زائد، کارایی، انعطاف‌پذیری، قابلیت کنترل، ایمنی، بازده همچنین از جنبه عملیاتی و پایداری) اتلاق می‌شود."

یکپارچه‌سازی فرایند در موارد زیر کاربرد دارد:

- صرفه‌جویی در مصرف انرژی
- کم کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای (Greenhouse Gas Emission)
- رفع گلوگاههای ایجاد شده در فرایند

- بهینه‌سازی فرایندهای ناپیوسته
- بهینه‌سازی مصرف هیدروژن
- طراحی راکتور و بهبود شرایط عملیات
- حداقل نمودن میزان مصرف آب و میزان تولید پساب
- بهینه‌سازی فرایندهای متوالی جداسازی
- کم کردن پسماند
- بهینه‌سازی سیستم تأسیسات جانبی
- کاهش هزینه سرمایه‌گذاری

می‌توان شروع یکپارچه‌سازی فرایند را پیدایش روش بازیافت حرارت در نقطه پینچ (heat recovery pinch) دانست که به طور جداگانه توسط Hohmann و همکارانش در سال ۱۹۷۱ و توسط Umeda و نیز Linnhoff و همکارانش در سال‌های (۱۹۷۹-۱۹۷۸) ابداع شد.

پس از آن، استفاده از روشهای یکپارچه‌سازی فرایند در فرایندهای صنعتی در دهه ۸۰ توسعه و گسترش یافت و روشهای جدیدی در این راستا ابداع شد. از مهمترین این روشها می‌توان به روش آنالیز پینچ و روش برنامه‌ریزی ریاضی اشاره نمود که خلاصه‌ای از این روشها به‌همراه پیشینه تاریخی آن، در قسمتهای بعد ارائه شده است.

همانطور که گفته شد، این روشها در موارد مختلفی کاربرد دارند ولی در این پایان‌نامه با توجه به موضوع آن، تنها به موضوع طراحی و اصلاح مبدلهای حرارتی بسنده می‌شود.

۱-۲) مروری بر کارهای انجام شده

طرحی شبکه مبدلهای حرارتی یکی از مهمترین مباحث مطرح شده است که بیشترین کاربرد را در بخش طراحی مهندسی شیمی دارد. این مساله از این جهت اهمیت پیدا می نماید که برای تعیین هزینه انرژی و ارتقاء بازیافت حرارت در فرایند های شیمیایی به کار می رود.

در سال ۱۹۸۸ بررسی جامعی از کارهای انجام شده تا آن زمان توسط Gunderson و Naess [2] صورت گرفت. می‌توان گفت که مساله طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی علاوه بر اهمیت اقتصادی زیادش با تعدادی از مشکلات کلیدی همراه است که برخی از آنها عبارتند از:

- محدودیت پتانسیل ایجاد ترکیب برای دو جریان که تبادل حرارت می نمایند.
- جفتها و تناظرهای(match) ممنوع ، مورد احتیاج و محدود
- انتخاب ساختار بهینه شبکه مبدل های حرارتی
- دمای نهایی ثابت ومتغیر برای جریانهای فرایندی
- وابستگی دمایی خواص فیزیکی و انتقالی(Physical &Transport Property)
- وجود انواع مختلف جریانها در متن فرایند (اعم از مایع، بخار و مایع-بخار)
- انواع مختلف مبدلهای حرارتی از نظر نوع جریانها (مثل هم جهت، غیر هم جهت وچند جریانه) ، از نظر ساختمان مواد سازنده و ازنظر میزان فشار

بیشترین تحقیقات سه دهه اخیردر زمینه طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی، درجهت حل مشکلات بالا در قالب روشهای مختلف بوده است. مطالعه طراحی و ساخت شبکه مبدلهای حرارتی به صورت سیستماتیک، در خلال سالهای ۱۹۶۰ تا اوایل ۱۹۷۰ آغاز شد.

از پیشگامان موضوع می‌توان Westbrook[i] و Hwa[ii] را نام برد که ابرساختارهایی (Superstructures) بر پایه برنامه‌ریزی ریاضی تولید کردندکه مساله طراحی شبکه مبدل های حرارتی را به صورت یک مساله تک‌عملکرد(Single task)، یعنی نشکستن مساله به زیر مساله ها، مورد بررسی قراردادند. پس از آنها نیز Masso و Rudd[iii] که از روشهای ابتکاری (Heuristic) برای ساخت شبکه استفاده کردند، از پیشگامان، به شمار می‌آیند[1].

[1] برای اطلاعات بیشتر به قسمت مراجع پیشنهادی مراجعه گردد.

پس از آن Kesler و Parker[iv]، پیشنهاد ایجاد یک برنامه‌ریزی خطی بر پایه یک الگوریتم همزمان را دادند. در این روش هر جریان در شبکه به چندین جریان کوچک مساوی با بار حرارتی مشخص تقسیم می‌شود. پس از آن خرده‌جریانهای گرم به خرده‌جریانهای سرد مرتبط می‌شوند. هدف، حداقل نمودن مجموع هزینه‌های مربوط به همه ارتباطهای موجود می‌باشد. برای گسترش بیشتر، باید شبکه‌ای اجرایی ساخت که تمام خرده‌جریانها را در بر گیرد.

روشهای جستجوی درختی (Tree-Searching) و نیز روشهای تجزیه(Decomposition)، در زمره الگوریتمهای متوالی(Sequential) محسوب می‌گردند. در سال ۱۹۷۳ توسط Pho و Lapidus[v] یک روش جستجوی درختی پیشنهاد شد که در نهایت به نمودار درختی کامل برای شبکه می‌انجامید ولی ضعف این روش این بود که تنها برای سیستمهایی که کمتر از ده جریان دارند، قابل استفاده می‌باشد. برای اینکه بتوان از این روش برای تعداد جریانهای بیشتر استفاده کرد، باید آن را با روشهای ابتکاری و یا روشهای کراندار نمودن(Bounding)، ترکیب کرد. نمونه این کار توسط Ponton و Donaldson [vi] ارائه شد که در آن جریان گرمی که بالاترین دمای اولیه را دارد با سردترین جریانی که بالاترین دمای هدف را دارد، جفت می‌شود.

بعلت ضعف مبانی تئوری والگوریتم های حل روش های بهینه سازی درآن زمان، استفاده از روشهای ریاضی با محدودیت مواجه شد. در نتیجه، تحقیقات بر روی شناخت اهداف (Targets) بر اساس هزینه منابع تاسیساتی و حداقل تعداد تناظرهای دوتایی برای انتقال حرارت عمودی(Vertical Heat Transfer) و غیر عمودی(Non-Vertical) متمرکز شد.

در دهه ۱۹۷۰، سه مفهوم اساسی و پایه ساخت شبکه مبدلهای حرارتی، کشف شد. دو مفهوم آن توسط Hohmann [vii] معرفی شد. او اولین روش تعیین حداقل انرژی مصرفی، قبل از طراحی را ارائه داد. همچنین او قانون N-1، برای تعیین حداقل تعداد واحد مورد نیاز را ارائه داد که N در اینجا بیانگر تعداد جریانها می‌باشد. چندی بعد Linnhoff و همکارانش[viii] دو مفهوم بالا را گسترش داده، به صورت سیستماتیک ارائه نمودند. مفهوم سوم، کشف "بازیافت حرارت در نقطه پینچ"(Heat Recovery Pinch)، به عنوان گلوگاهی برای یکپارچه‌سازی حرارتی بود که در دو کار مستقل توسط Linnhoff و همکاران[viii] و نیز Umeda و همکاران[ix] ارائه شد. مبنای کار آنها اصول ترمودینامیکی می‌باشد. پس از آن Linnhoff و Hindmarsh [xi] روش معروف "طراحی به روش پینچ"(PDM) را ارائه دادند.

این مساله باعث شدکه مسایل طراحی از فرم روشهای یک‌عملکرد(Single task)، به فرم روشهای چندعملکرد(Multitask)، تغییر پیدا کنند. بدین منظور تکنیک‌های ساده‌ای برای تجزیه ناحیه‌ای (Local Decomposing) مساله اولیه به زیرمساله هایی که به نام اهداف شناخته می شوند، توسعه یافت. اغلب روشهای طراحی بر اساس تکنیک تجزیه ناحیه‌ای، مساله را به زیر مساله های جداگانه زیر تبدیل می کنند:

۱. حداقل هزینه منابع تاسیساتی
۲. حداقل تعداد جفت ها
۳. حداقل هزینه سرمایه گذاری ساختار شبکه مبدلهای حرارتی

که این اهداف با استفاده از روشهای ترمودینامیکی، روشهای بهینه‌سازی و قواعدتجربی محاسبه می‌گردند.

مزیت اصلی روش تجزیه ناحیه‌ای، شکستن مساله به عملکردها(subtasks) می باشد که این موضوع باعث ساده تر نمودن مسایل در قالب اهداف می‌شود. ولی این مزیت از سوی دیگر باعث بروز تعدادی محدودیت می‌گردد. محدودیت اصلی روش تجزیه منطقه ای این است که اثر متقابل بین هزینه منابع تاسیساتی، تعداد جفتها، سطح مورد نیاز وحداقل هزینه سرمایه گذاری را بدرستی نمی تواند در نظر بگیرد.

به طور کلی، تصمیم‌گیری‌های اولیه بر روی میزان بازیافت انرژی و تصمیم‌گیری برای تجزیه مساله اصلی به مسایل کوچکتر که بر اساس موقعیت نقطه(نقاط) پینچ انجام می شود، ساختار بهینه شبکه مبدلهای حرارتی راتعیین نمی‌کند. بنابراین به خاطر این محدودیتها ، محققان در اواخر دهه ۱۹۸۰ واوایل ۱۹۹۰با توسعه جنبه‌های الگوریتمی و تئوری در بهینه‌یابی، بر روی روشهای بهینه یابی همزمان که با مساله طراحی، به صورت یک مساله منفرد برخورد می‌کند متمرکز شدند. در این روشها همه اثرهای متقابل هزینه عملیاتی وسرمایه گذاری در نظر گرفته می شود.

روشهای برنامه‌ریزی ریاضی که از تکنیکهای بهینه سازی کمک می‌گیرد، از برنامه‌ریزی خطی(LP) شروع شده، رفته رفته روشهای دیگر مانند برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح (MILP) و برنامه ریزی غیرخطی(NLP) گسترش یافت. این روشها جایگزین روشهایی هستند که بر مبنای هدف‌گذاری بنا شده‌اند. از کارهای انجام شده در این راستا می‌توان به مقالات ارائه شده توسط Papoulias و Grossmann

در سال ۱۹۸۳ [4]،]5[، [6] و مقاله Floudas و همکاران [xii] و نیز Gundersen و Grossmann [xiii] اشاره کرد که این افراد و شاگردان آنها، در زمره پیشگامان این روشها می‌باشند.

روشهایی که به طور همزمان، انواع هدف‌گذاری و بهینه‌سازی بین آنها را مورد توجه قرار می-داد، با گسترش روشهای برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح (MINLP) به‌وجود آمدند.

در سال ۱۹۸۹ Floudas و Ciric [7] یک مدل MINLP برای در نظر گرفتن همزمان اهداف (۱)و(۲) توسعه دادند که زمینه ای برای حل هدف گذاری(۳) شد. پس از آن Ciric و Floudas [8] نشان دادند که فرض تجزیه بر اساس نقطه پینچ ثابت غیر طبیعی است و بجای آن از پینچ مجازی برای هدف گذاری های (۲) و (۳) استفاده کردند.در مقاله دیگری، Ciric و Floudas [9] مساله طراحی شبکه مبدل های حرارتی را به صورت یک مساله بهینه‌یابی واحد در نظر گرفتد که در آن مصرف منابع تاسیساتی، جفتها و ساختار شبکه مبدلها، به صورت متغیرهای تصمیم‌گیری بوده، به طور همزمان حل می‌شوند.

در این سالها گروه دیگری نیز در این زمینه تحقیقاتی را انجام دادند. در سال ۱۹۹۰، Yee و Grossmann [11]، یک مدل MINLP ازیک ابر ساختار (Superstructure) ساده شده، بر اساس فرض آمیختن همدما برای بهینه یابی همزمان شبکه مبدل های حرارتی توسعه دادند. فرض آنها از اختلاط همدما باعث یک مجموعه ی خطی از محدودیتها می شود که این موضوع هم باعث نادیده گرفتن تعدادی از ساختارهای جایگزین برای طراحی می گردد. انواع دیگری از ابرساختارها توسط Yee و Grossmann [10]،[12] برای کوپل نمودن فرایند با سیستم بازیافت حرارتی ارائه شد.

مشکل اصلی مسائل غیرخطی این است که به طور عمومی نمی‌توان نقطه بهینه کلی را تعیین نمود و زمان حل آنها، با بزرگ شدن ابعاد مساله به صورت نمایی افزایش می‌یابد. زیرا معمولا این نوع مسائل از نوع NP Hard می‌باشند به این معنی که زمان حل این مسائل به صورت غیرچندجمله‌ای (Non Polynomial) به ازای افزایش تعداد پارامترهای مساله، افزایش می‌یابد[17].

تاکنون افراد مختلف، روشهای گوناگونی برای حل مسایل خاصی از این نوع با *فرضهای ساده-کننده‌ای ارائه کرده‌اند*. همچنین از روشهای دیگری برای بهینه‌سازی این مسایل استفاده شده است. مثالهایی از این روشها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. کار Dolan و همکاران [xiv] که با استفاده از روش Simulated Annealing به طراحی شبکه مبدل های حرارتی پرداختند. در سال ۱۹۹۸ توسط Lewin و همکاران [13]، روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (GA) برای ساخت شبکه مبدلهای حرارتی ارائه دادند. استفاده از روش Tabu Search در ساخت شبکه مبدلهای حرارتی توسط Lin و Miller [14] ارائه شد که

در این مقاله ضمن مقایسه اجمالی روشهای قطعی(Deterministic) با روشهای تصادفی(Stochastic) و مقایسه زمان حل مسایل MINLP با این روشها، نشان داده شده است که در مسائل غیر خطی، با بزرگ شدن ابعاد مساله زمان محاسبات افزایش یافته به علاوه اینکه احتمال توقف در نقاط بهینه موضعی وجود دارد. ولی در روشهای تصادفی، زمان حل کمتر بوده، با کنترل صحیح آن می‌توان به جوابهای بهینه کلی دست یافت. با الگوریتم TS که در این مقاله آمده، در موارد مورد بررسی، جواب بهینه کلی با احتمال ۹۰ درصد، تضمین شده است. و نیز ذکر شده است که چون در این الگوریتم لازم نیست که تابع هدف به فرم مشخصی باشد، این روش می‌تواند در خیلی از موارد بهینه سازی مورد استفاده قرار گیرد.

از جدیدترین مقاله‌هایی که در راستای حل مسائل MINLP منتشر شده، مقاله‌ای است که توسط Pariyani و همکاران [15] در سال ۲۰۰۶ منتشر شده است که در آن از الگوریتم تصادفی (Randomized Algorithm) به منظور ساخت شبکه مبدلهای حرارتی استفاده شده است. این کار که در ادامه کارهای قبلی نویسندگان [16]، انجام شده است، تقسیم جریانها را نیز در بر می‌گیرد. نویسندگان این مقاله ادعا کرده‌اند که الگوریتم ارائه شده توسط آنان هرچند از بعضی روشهای تصادفی که تاکنون وجود داشته، مثل الگوریتم TS که در بالا به آن اشاره شد، کندتر است ولی جوابهای بهتری را نتیجه می-دهد.

مسایل ساخت و طراحی شبکه مبدلهای حرارتی را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی نمود:

- طراحی مبنا (Gross Root Design)
- طراحی اصلاحی (Retrofit Design)

همانطور که از اسم آنها مشخص است، اولی در مواقعی کاربرد دارد که طراحی پایه و اولیه برای یک فرایند که هنوز ساخته نشده، صورت می‌گیرد و دومی برای مواقعی به کار می‌رود که یک شبکه، در حالت حاضر وجود دارد و هدف بهبود آن است. این پروژه از نوع اصلاحی محسوب می‌گردد.

۱-۳) مفاهیم اساسی

در این قسمت به بررسی یک سری مفاهیم و انواع هدف‌گذاریها پرداخته می‌شود:

۱-۳-۱) هدف‌گذاری انرژی

پس از جمع آوری اطلاعات لازم از فرآیند، می توان حداقل انرژی مورد نیاز یا حداکثر انرژی بازیافتی (MER) را مشخص نمود. هدف، ساختن شبکه مبدلهای حرارتی به گونه‌ای است که کمترین مقدار انرژی اضافی توسط منابع تآسیساتی،مورد نیاز باشد.

ولی باید توجه نمود که بازیافت حرارت بیشتر توسط تبادل حرارت میان جریانهای فرآیند، (مبدلهای فرایند-فرایند)، مستلزم داشتن تعداد مبدلهای بیشتر و سطح انتقال حرارت بالاتر است.

پس باید یک عامل محدود کننده در نظر گرفته شود عاملی که این مقدار را کنترل و تنظیم می‌کند ، حداقل اختلاف دمای ممکن در مبادله انرژی بین جریانهای باشد.

می‌توان چند نوع اختلاف دما تعریف کرد [8]:

- حداقل اختلاف دمای بازیافت حرارت (Heat Recovery Approach Temperature) که به منظور تعیین حداقل مقدار انرژی (منبع تاسیساتی) به کار می‌رود و معمولا با HRAT نشان داده می‌شود. گاهی اوقات نیز با $\Delta T_{\min}$ فرایند، بیان می‌شود.
- حداقل دمای نزدیکی در مبدلها (Exchanger Minimum Approach Temperature) که به عنوان حد پایین اختلاف دمای مجاز در مبدلها به کار می‌رود و با EMAT و یا $\Delta T_{\min}$ نشان داده می‌شود.
- یک نوع دیگر ΔT نیز تعریف می‌شود که در مدل ترابری غیرمستقیم (Transshipment) که توسط Papoulias و Grossmann [4] ارائه شد کاربرد دارد که در بازه‌های دمایی که دراین مدل استفاده می‌شود، نشانگر حداقل اختلاف دمای ممکن است. این دما TIAT به معنای حداقل دمای نزدیکی در بازه‌های دمایی (Temp. Interval Approach Temp) می‌باشد. و پسماند حرارتی خروجی از بازه‌های دمایی را کنترل می نماید.

بین این سه نوع اختلاف دما، رابطه زیر برقرار است:

$$HRAT \geq TIAT \geq \Delta T_{\min} \qquad (۱.۰)$$

در مواردی که HRAT با TIAT برابر باشد، تعریف پینچ صریح(Strict-Pinch) را داریم و در مواقعی که TIAT کمتر از HRAT باشدتعریف پینچ مجازی(Pseudo-Pinch) را داریم. برای تعیین حداقل انرژی مورد نیاز از HRAT استفاده می‌شود.

نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد میزان کار هدر رفته در یک فرآیند انتقال حرارت است. فرض کنید که بین دو منبع سرد (T_c) و گرم(T_h) حرارت Q منتقل می شود. از ترکیب قانون اول و دوم ترمودینامیک مقدار کار هدر رفته به دست می آید[18]:

$$\begin{aligned} LW &= (1-\frac{T_\infty}{T_h})Q + (1-\frac{T_\infty}{T_c})(-Q) \\ &= Q(\frac{T_\infty}{T_c}-\frac{T_\infty}{T_h}) = QT_\infty(\frac{T_h-T_c}{T_hT_c}) \\ &= QT_\infty(\frac{\Delta T}{T_hT_c}) \end{aligned} \qquad (۲.۰)$$

در فرآیندهای سردسازی به دلیل اینکه دما پایین است و همچنین با توجه به فرمول "LW"، با مربع دما نسبت معکوس دارد ، برای کاهش اتلاف کار، ΔT باید کوچک در نظر گرفته شود . تا اثر پایین بودن دما را جبران کند. در دماهای بالا این اثر کمتر می‌شود ولی به هر حال کوچک بودن ΔT، باعث کاهش کار تلف شده می‌شود.

به منظور تعیین MER برای یک HRAT مشخص، سه روش اصلی وجود دارد:

- روش گرافیکی
- روش بازه‌ها یا فواصل دمایی (TI)
- برنامه‌ریزی خطی

۱-۳-۱-۱) روش گرافیکی

این روش توسط Umeda و همکاران [ix] ارائه شد برای نشان دادن وضعیت جریانها نسبت به یکدیگر از منحنی T-H جریانها استفاده می شود . برای نشان دادن جریانهای سرد یا گرم با هم و وضعیت