

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2021.283622.1110



DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.119.5.6



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Investigating the Application of Heat Pump in Isomerization Unit to Decrease the Energy Consumption by Means of Pinch Technology

Z. Ghazizahedi¹, M. Hayati-Ashtiani^{2*}

1- Ph. D. in Chemical Engineering, University of Kashan

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Kashan

Email: hayati@kashanu.ac.ir

Abstract

Pinch Technology is one of the effective and practical methods for energy consumption economization. In this research, Pinch Technology has been used for energy consumption optimization in the isomerization unit. As a result, heat pumps have been used for energy consumption optimization in this unit in which the amount of energy consumption in heating and cooling utilities has decreased from 128.61 GJ/h and 143.9 GJ/h to 127.8 GJ/h and 152.0 GJ/h, respectively. This energy-saving leads to a decrease in the amount of energy consumption and an increase in the efficiency of the unit. Heat pumps have been additionally applied to study the heat exchangers with the highest amount of cross-pinch heat transfer. This study resulted in a significant decrease in the cross-pinch heat transfer, from 22.47 GJ/h to 19.90 GJ/h (11.3% decline).

Received: 27 April 2021

Accepted: 21 June 2021

Page Number: 53-63

Keywords:

Pinch Technology,
Heat Pump,
Utilities,
Isomerization,
Carnot

Please Cite this Article Using:

Ghazizahedi, Z., Hayati-Ashtiani, M., "Investigating the Application of Heat Pump in Isomerization Unit to Decrease the Energy Consumption by Means of Pinch Technology", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. 119, pp. 53-63, In Persian, (2022).



DOI: 10.22034/ijche.2021.283622.1110



DOR: DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.119.5.6

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

بررسی استفاده از پمپ حرارتی در واحد ایزومریزاسیون برای کاهش مصرف انرژی با فناوری پینچ

زهره قاضی زاهدی^۱، مجید حیاتی آشتیانی^{۲*}

۱- دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان

پیام نگار: hayati@kashanu.ac.ir

چکیده

فناوری پینچ یکی از روش‌های مؤثر و پرکاربرد در بهینه‌سازی مصرف انرژی است. در تحقیق پیش رو، از فناوری پینچ برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحد ایزومریزاسیون کمک گرفته شد. در نتیجه، از یک پمپ حرارتی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی استفاده شد که در اثر اعمال آن میزان سرویس جانبی گرم و سرد از ۱۲۸/۶۱ و ۱۴۳/۹ GJ/h به مقادیر ۱۲۷/۸ و ۱۵۲ GJ/h تقلیل یافت که این کاهش باعث کاهش میزان مصرف انرژی و افزایش بازدهی واحد مذکور شد. به علاوه، استفاده از پمپ‌های حرارتی برای مطالعه مبدل‌هایی که بیشترین میزان عبور از پینچ را داشته‌اند منجر به کاهش میزان حرارت عبوری پینچ از ۲۲/۴۷ به ۱۹/۹۰ GJ/h شد که معادل ۱۱/۳٪ کاهش در انرژی مصرفی واحد است و این تغییر بسیار کارآمد و مفید است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

شماره صفحات: ۵۳ تا ۶۳

کلیدواژه‌ها:

فناوری پینچ،

پمپ حرارتی،

سرویس‌های جانبی،

ایزومریزاسیون،

کارنو

* کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

قاضی زاهدی، ز، حیاتی آشتیانی، م، "بررسی استفاده از پمپ حرارتی در واحد ایزومریزاسیون برای کاهش مصرف انرژی با فناوری پینچ"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۹، صص. ۶۳-۵۳، (۱۴۰۰).

فرایند ایزومریزاسیون یک فرایند شیمیایی است که منجر به تبدیل اجزای تشکیل دهنده به ساختارهای ایزومری اجزا می‌شود. این فرایند در پالایشگاه‌ها بر افزایش عدد اکتان بنزین به دلیل حضور هیدروکربن‌های سبک ایزومر شده بدون حضور مواد سمی و آروماتیک‌ها تمرکز دارد. در فرایند ایزومریزاسیون، آلاینده‌هایی مانند بنزن، اولفین‌ها و مواد آروماتیکی کاهش و عدد اکتان بنزین تولیدی حدود ۱۸ تا ۲۲ واحد افزایش می‌یابد و ضمن افزایش کیفیت بنزین عدد اکتان به حدود ۷۸ تا ۸۴ می‌رسد. افزایش جمعیت زمین نیاز به تولید بنزین با کیفیت‌تر و کاهش آلاینده‌ها را به همراه بهینه‌سازی مصرف انرژی افزایش می‌دهد [۱].

روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی و کاهش مصرف انرژی در واحدهای شیمیایی نظیر پالایشگاه‌ها هست. یکی از مهم‌ترین روش‌های طراحی، فناوری پینچ است که منجر به کاهش استفاده از مبدل‌های حرارتی و یا اندازه آن‌ها شده است و نتیجه آن، کمینه‌کردن مصرف انرژی در فرایندهای شیمیایی به صورت بسیار مؤثر و نتیجه‌بخش است. این روش که اساس آن روابط ترمودینامیکی است، راهکارهای جدیدی را ارائه می‌دهد که کمترین هزینه طراحی شبکه مبدل حرارتی (معادل با کمترین میزان مصرف انرژی) را بیان می‌کند. اساس کار فناوری پینچ رسم نمودار آنتالپی-دماست که در آن جریان‌های گرم (که منبع حرارت است) و سرد (که مصرف کننده گرماست) در کنار یکدیگر نمایش داده می‌شوند و تجمیع فرایندی به منظور طراحی اصلاحی و بهینه‌سازی مصرف انرژی انجام می‌گیرد [۲ و ۳].

برای کاهش مصرف انرژی در یک واحد ایزومریزاسیون، فنگ^۱ و همکارانش از فناوری پینچ استفاده کردند و میزان استفاده از سرویس جانبی گرمایشی را از ۶۶۹۰۰ KW به ۴۴۰۳/۵ KW کاهش دادند (۳۴/۲٪ کاهش) و علاوه بر آن میزان استفاده از سرویس جانبی سرمایشی از ۸۷۴۵۰ KW به ۶۴۵۸۰ KW کاهش یافت (۲۶/۲٪ کاهش). آنان برای تولید انرژی گرمایی فقط از حرارت تولیدشده در فرایند استفاده کردند و به استفاده از هیچ سرویس جانبی گرمایشی اضافه‌ای نیازمند نشدند [۴]. در تحقیقی دیگر، فرایند ایزومریزاسیون به‌عنوان یکی از انرژی برترین واحد پالایشگاهی معرفی شده است که نیاز به طراحی اصلاحی برای

کاهش مصرف انرژی دارد. مطالعات بر روی این فرایند ایزومریزاسیون نشان داد که در مقایسه با سایر روش‌های صرفه‌جویی انرژی در اثر بهینه‌سازی فرایند، استفاده از فناوری پینچ علاوه بر کاهش مصرف انرژی به میزان PJ ۳۵ باعث کاهش میزان گوگرد در گازوییل و بنزین تولیدی شد. میزان کاهش مصرف انرژی در این واحد مطالعه‌شده با استفاده از فناوری پینچ حدود ۲۰٪ گزارش شده است [۵]. پژوهشگران در پژوهشی به انتقال گرما به کمک چرخه کارنو پرداختند و به بازده الکتریکی ۶۰٪ دست یافتند. آن‌ها با افزایش دمای جریان دارای گرمای زائد، کاهش سرویس جانبی هوای سرد و کاهش انتقال گرما با پمپ حرارتی به بازده بیشتری دست یافتند [۶]. جارالله و همکارانش فرایند جدیدی برای ایزومریزاسیون نفتا پیشنهاد دادند، آن را با ۸ فرایند ایزومریزاسیون صنعتی دیگر از نظر عدد اکتان، بازده و هزینه‌ها مقایسه کردند و برای بررسی فرصت‌های ذخیره‌سازی انرژی از فناوری پینچ بدون استفاده از پمپ حرارتی کمک گرفتند. آن‌ها نشان دادند که در فرایند جدید پیشنهادی‌شان، ۳۵٪ فرصت کاهش انرژی مصرفی وجود دارد و می‌توان عدد اکتان بنزین تولیدی را به ۹۰/۹۳ رسانید که امکان استفاده از پمپ حرارتی برای دستیابی به صرفه‌جویی بیشتر انرژی و افزایش عدد اکتان بنزین قابل بررسی بود [۷]. استفاده از برج‌های تقطیر مختلف به جای فرایند جذب سطحی در فرایند ایزومریزاسیون تحت لیسانس شرکت AXENS از عوامل مؤثر در افزایش ظرفیت تولید بنزین با عدد اکتان بالاتر است [۸]. این افزایش ظرفیت تولید برای سناریوهای مختلف از ۸ تا ۱۶٪ در مقایسه با حالت پایه می‌تواند متغیر باشد که با افزایش ۹ واحدی عدد اکتان نیز همراه است؛ اما منجر به افزایش مصرف انرژی خواهد شد که استفاده از پمپ‌های حرارتی برای برطرف کردن این ضعف قابل بررسی است.

هدف از انجام این پژوهش بررسی استفاده از پمپ حرارتی در واحد ایزومریزاسیون مورد مطالعه برای صرفه‌جویی انرژی است؛ بدین منظور، ابتدا طراحی پایه واحد مذکور بررسی شد تا شبکه مبدل‌های حرارتی، میزان مصرف سرویس‌های جانبی گرمایشی و سرمایشی، حرارت عبوری از نقطه پینچ تعیین شود. به دنبال آن، با قراردادن پمپ حرارتی در طرفین نقطه پینچ به بررسی میزان کاهش سرویس‌های جانبی پرداخته شد تا میزان کاهش حرارت عبوری از پینچ بررسی شود.

۲. مفاهیم و روش تحقیق

۲-۱ شرح فرایند

ایزومریزاسیون نفتای سبک یکی از بهترین روش‌ها برای تولید بنزین با عدد اکتان بالا است که در آن با شاخه‌دار کردن اجزای نفتای سبک، بنزینی با کیفیت مطلوب تولید می‌شود. بنزین تولیدی دارای مشخصات مطابق با قوانین محیط زیستی برای جلوگیری از تولید آلودگی هاست. در حقیقت هیدروکربن‌های شاخه‌دار نفتای سبک نسبت به هیدروکربن‌های راست‌زنجیر عدد اکتان بالاتری دارند و در واحد ایزومریزاسیون غنی می‌شوند [۹ و ۱۰]. قسمت‌های اصلی واحد ایزومریزاسیون مطالعه‌شده در شکل (۱) آمده است.

۲-۱-۱ ستون دی ایزوپنتان زدا

برای تغلیظ ایزوپنتان و بهبود عدد اکتان بنزین تولیدی، یک ستون تقطیر با نام DIP^۱ به کار رفته که وظیفه آن این است که نرمال پنتان را برمی‌گرداند و باعث افزایش غلظت آن می‌شود. افزایش غلظت نرمال پنتان منجر به جابه‌جایی واکنش تعادلی $(n-C5 \leftrightarrow i-C5)$ برای تولید بیشتر پنتان شاخه‌دار (ایزوپنتان‌ها) و در نتیجه افزایش عدد اکتان بنزین تولیدی می‌شود [۹ و ۱۰].

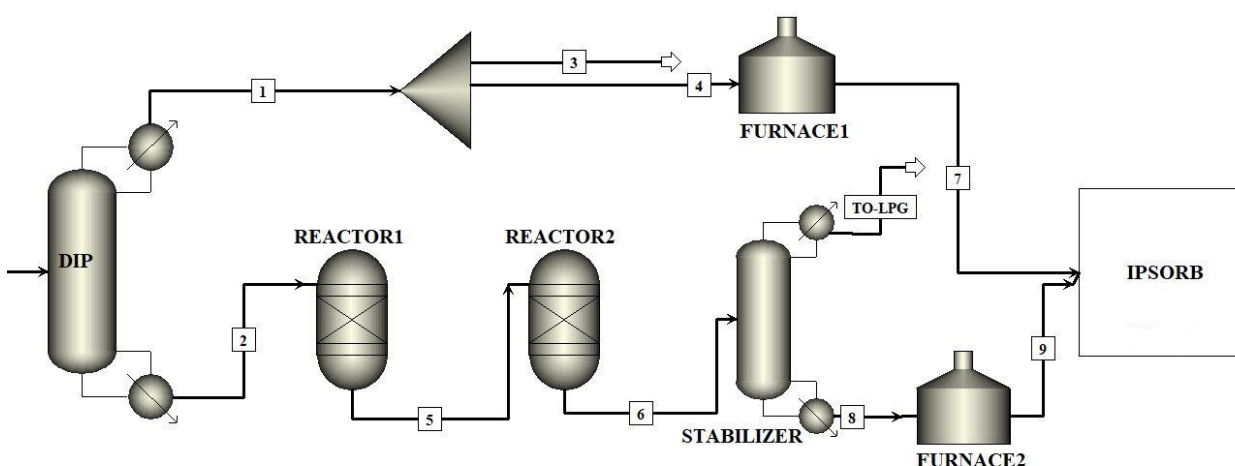
۲-۱-۲ راکتورهای ایزومریزاسیون

این مرحله دو راکتور بستر ثابت دارد؛ در راکتور اول، واکنش‌های

گرماده اشباع آروماتیک‌ها در حضور هیدروژن اتفاق می‌افتد و واکنش‌های ایزومریزاسیون C5-C6 در این راکتور ادامه می‌یابد. در دومین راکتور بستر ثابت، واکنش‌های ایزومریزاسیون تکمیل می‌شود و ترکیبات شاخه‌دار به دست می‌آیند [۹ و ۱۰].

۲-۱-۳ قسمت IPSORB

در برخی از طراحی‌های موجود مانند آنچه شرکت AXENS پیشنهاد می‌کند، پس از راکتورهای ایزومریزاسیون و عبور از چند مرحله مهم، محصولات ایزومریزاسیون وارد قسمت IPSORB (فناوری بر اساس استفاده از فرایند جذب سطحی برای جداسازی) می‌شوند تا پارافین‌های نرمال خطی تبدیل نشده از ایزوپارافین‌های شاخه‌دار جدا شوند و به این ترتیب کیفیت بنزین تولیدی باز هم افزایش یابد. در این مرحله به‌منظور جداسازی پارافین‌های نرمال و شاخه‌دار از تکنیک غربال مولکولی استفاده می‌شود. سپس، نرمال هگزان و نرمال پنتان به‌وسیله یک پمپ گردشی به ستون دی ایزوپنتان زدا بر می‌گردند تا در آنجا با افزایش غلظت باعث جابه‌جایی واکنش تعادلی به سمت راست و افزایش تولید ایزومر شاخه‌دار شوند. در برخی دیگر از واحدهای ایزومریزاسیون به جای استفاده از قسمت IPSORB، با جایگزینی یک یا دو برج تقطیر با هدف بازیابی حلال، فرایند ایزومریزاسیون تکمیل می‌شود.



شکل ۱. نمایش نمودار فرایندی جریان‌ها و قسمت‌های مهم واحد ایزومریزاسیون.

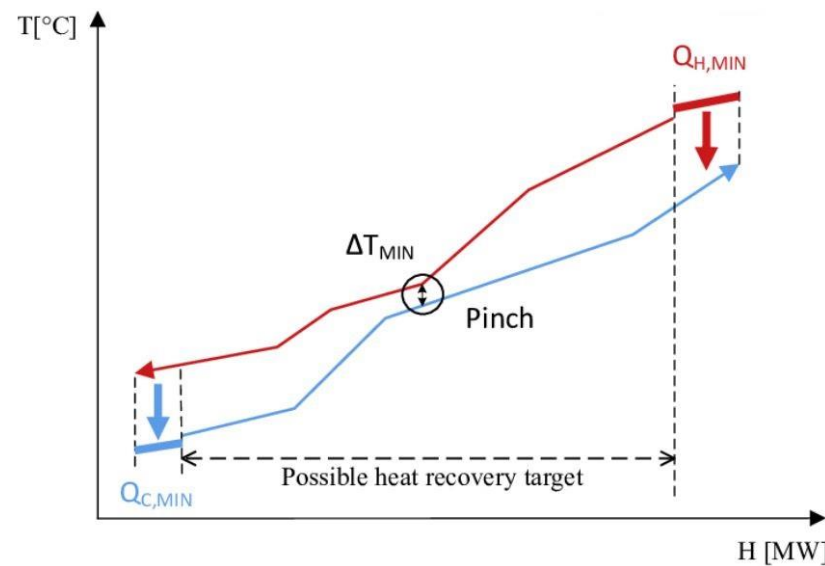
Figure 1. Representation of Process Flow Diagram and Important Parts of Isomerization Unit.

1. Deisopentimizer

۲-۲ فناوری پینچ

روش‌های مختلفی برای کاهش مصرف انرژی در واحدهای شیمیایی نظیر پالایشگاه‌ها به کار رفته است. یکی از بهترین روش‌های خلاقانه ذخیره انرژی، روش طراحی پینچ است که روشی قابل اطمینان، مفید و مناسب برای بهینه‌سازی مصرف انرژی بر پایه ترمودینامیک پیشنهاد می‌دهد. با استفاده از این روش می‌توان به خوبی به مقدار سرویس‌های جانبی کمینه دست یافت و آشکارا هزینه تولید را کاهش داد [۹ و ۱۲]. اساس و پایه روش پینچ رسم نمودار آنتالپی-دماست که در آن جریان گرم (که قرار است با از دست دادن گرما خنک شود) و جریان سرد (که با گرفتن حرارت گرم می‌شود) در کنار یکدیگر رسم می‌شوند (شکل (۲)). این نمودار، نمودار ترکیبی^۱ نامیده می‌شود [۱۳]. کمترین فاصله عمودی بین جریان‌های گرم و سرد در نمودار ترکیبی، ΔT_{min} نامیده می‌شود که نشان‌دهنده نقطه پینچ است. بالای نقطه پینچ به دلیل نیاز به انرژی گرمایشی جریان‌های سرد، چاه حرارتی و پایین آن به دلیل گرمای اضافی جریان‌های سرد، منبع انرژی نامیده می‌شود. فناوری پینچ با استفاده از تجمیع فرایندی، میزان سرویس جانبی گرمایشی در بالای پینچ و سرویس جانبی سرمایشی در پایین پینچ را به حداقل می‌رساند.

برای رسیدن به این تجمیع فرایندی، ابزار سودمندی به نام نمودار ترکیبی جامع^۲ وجود دارد که از روی نمودار ترکیبی به دست می‌آید. بدین ترتیب که جریان گرم را به اندازه نصف ΔT_{min} به سمت پایین و جریان سرد را به همین اندازه به طرف بالا منتقل می‌کند تا این دو نمودار در یک نقطه به هم برسند (شکل (۳))؛ این نقطه معرف نقطه پینچ فرایندی است، سپس با حرکت افقی نقطه پینچ تا محور عمودی - که معرف دماست - و به همین ترتیب سایر نقاط نمودار، نمودار ترکیبی جامع حاصل می‌شود [۱۴]. در این نمودار مکان چاه انرژی در بالای نقطه پینچ و منبع انرژی در پایین نقطه پینچ قرار دارد و قسمت‌هایی که ظرفیت بازیابی انرژی و یا تولید انرژی دارند؛ پاکت انرژی نامیده می‌شود. پاکت‌های انرژی زمانی به وجود می‌آیند که مکان سرویس جانبی گرمایشی و یا سرمایشی در محدوده مناسبی از دما قرار گرفته باشد و امکان تولید انرژی یا استفاده از سرویس جانبی ارزان تر به وسیله پاکت انرژی مهیا شود. بنابراین با کمک نمودار ترکیبی جامع می‌توان موقعیت‌های مناسب بازیابی انرژی را شناسایی کرد [۱۵].

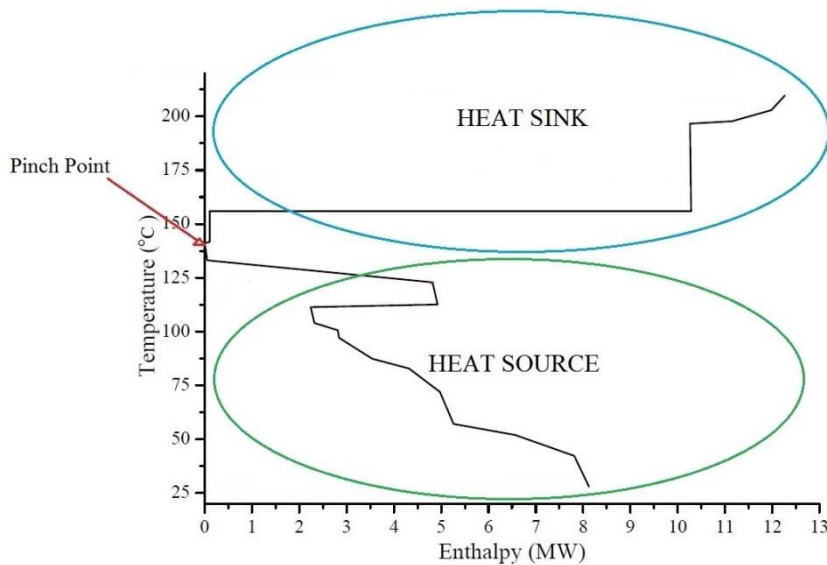


شکل ۲. نمودار ترکیبی.

Figure 2. Composite Curves.

1. Composite Curve

2. Grand Composite Curve



شکل ۳. نمودار جامع ترکیبی.

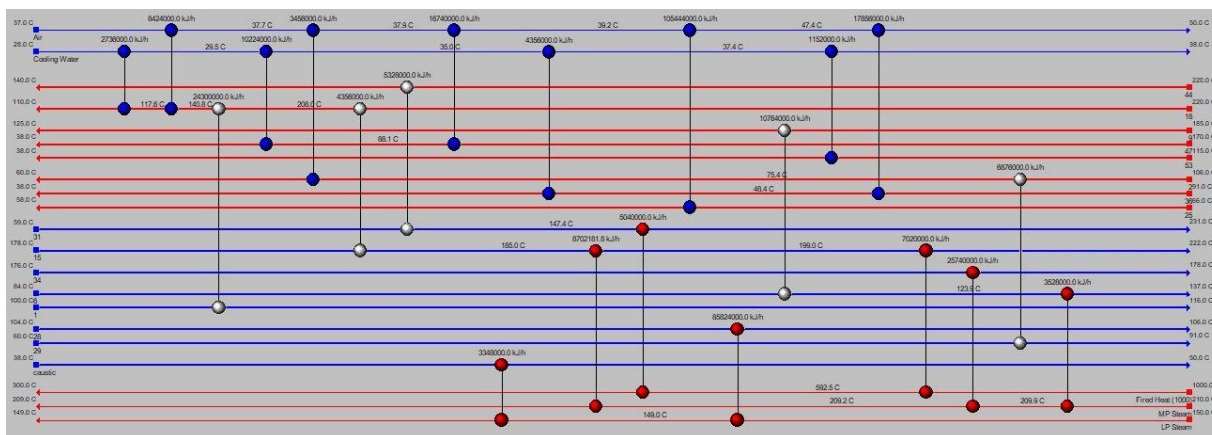
Figure 3. Grand Composite Curve.

شکل (۴)، تعداد مبدل فرایندی، هیتر و کولر به ترتیب ۵، ۷ و ۹ عدد است. واحد مطالعه شده به ترتیب ۱۱ و ۱۰ عدد جریان گرم و سرد دارد. شکل (۵) جریان‌های ورودی و خروجی، دمایی گرم و سرد آن‌ها و آنتالپی مصرفی هر مبدل حرارتی را نمایش می‌دهد. مطابق با شکل (۵)، ۲ عدد از هیترها در واقع کوره هستند.

۳. نتایج و بحث نتایج

۳-۱ استخراج داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل و انجام انتگرال‌یون فرایندی، لازم است که شبکه مبدل‌های حرارتی رسم شود. شکل (۴) شبکه مبدل‌های حرارتی واحد ایزومریزاسیون مورد بررسی را نشان می‌دهد که به کمک نرم‌افزار Aspen Energy Analyzer V10 رسم شده است. مطابق با



شکل ۴. شبکه مبدل‌های حرارتی واحد فعلی

Figure 4. Heat Exchanger Network of Existing Unit.

دمای خروجی آن 300°C است. میزان سرویس جانبی گرم کل واحد $128/61 \text{ GJ/h}$ است که بیشترین مقدار آن، متعلق به جریان بخار آب LP است ($81/90 \text{ GJ/h}$). میزان جریان بخار آب MP برابر $34/02 \text{ GJ/h}$ است و بقیه آن به میزان $12/69 \text{ GJ/h}$ متعلق به کوره‌های حرارتی است.

مطابق با جدول (۱)، دو نوع سرویس جانبی سرد هوا و آب خنک‌کن به ترتیب برای کولرهای هوایی و کولرهای آبی وجود دارد. تغییرات دمای هوا در کولرهای هوایی از 37°C به 50°C فرض می‌شود که مقدار بار حرارتی کولرهای هوایی $143/9 \text{ GJ/h}$ می‌شود. تغییرات دمای سرویس جانبی آب خنک‌کن از $29/5^{\circ}\text{C}$ تا 38°C است که مقدار بار حرارتی کولرهای آبی $7/285 \text{ MJ/h}$ می‌شود؛ بنابراین بیشترین مقدار میزان مصرف سرویس جانبی سرد متعلق به هوا است.

نمودار آنتالپی-دما با نام نمودار ترکیبی شامل جریان‌های گرم و سرد، اختلاف دمای کمینه و دماهای گرم و سرد نقطه پینچ در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. فرایند به دو قسمت تقسیم شده است: بالا و پایین نقطه پینچ به ترتیب چاه و منبع حرارتی هستند. برای افزایش هدف بازیابی انرژی، لازم است که میزان حرارت عبوری از پینچ را کمینه کنیم. میزان کل حرارت عبوری از پینچ $22/47 \text{ GJ/h}$ است. سهم حرارت عبوری از پینچ در بالای نقطه پینچ $19/046 \text{ GJ/h}$ است که متعلق به مبدل‌های E-1855، E-1861 و E-1863 است و بقیه متعلق به مبدل‌های E-1860 و E-1875 در پایین نقطه پینچ است.

در صورتی که تعداد مبدل‌های حرارتی شبکه مبدل‌های حرارتی از تعداد کمینه بیشتر باشد، به تعدادی که بیشتر است حلقه مستقل در شبکه موجود است که تعداد این حلقه‌های مستقل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N_{loop} = N_x - N_s \quad (1)$$

که N_x و N_s به ترتیب تعداد کل مبدل‌های حرارتی و جریان‌ها (فرایندی و سرویس‌ها) در شبکه مبدل‌های حرارتی است. در شبکه مبدل‌های حرارتی شکل (۴)، حلقه‌ای مشاهده نشد و یا به عبارتی دیگر تعداد کل مبدل‌های حرارتی (فرایندی، هیتر و کولر) و جریان‌ها با هم برابر و برابر با عدد ۲۱ شد.

در جدول (۱)، مساحت سطح هر مبدل با توجه به بار حرارتی مبدل‌ها که در نمودار جریان فرایند موجود است از تساوی (۲) با نرم‌افزار حساب شود:

$$A_{ht} = \frac{Q}{U \times LMTD} \quad (2)$$

که A_{ht} مساحت سطح انتقال حرارت مبدل حرارتی، Q بار حرارتی کل مبدل حرارتی، U ضریب انتقال حرارت و $LMTD$ اختلاف دمای میانگین لگاریتمی است.

جدول (۱) نشان می‌دهد که سرویس‌های جانبی گرم به ترتیب عبارت‌اند از جریان بخار آب LP (با دمای 150°C)، جریان بخار آب MP (با دمای 210°C) و کوره که دمای ورودی آن 1000°C و

Heat Exchanger	Cold Stream	Cold T in [C]	Tied	Cold T out [C]	Tied	Hot Stream	Hot T in [C]	Tied	Hot T out [C]	Tied	Load [kJ/h]	Area [m2]	Fouling [C-h-m2/kJ]	dT Min Hot [C]	dT Min Cold [C]
E-1851		28	104.0	106.0		LP Steam	150.0	149.0	149.0		8.582e+007	2766.9	0.0000	44.00	45.04
E-1855		6	84.0	123.9			9	185.0	125.0		1.076e+007	593.5	0.0000	61.08	41.00
E-1875	Cooling Water	37.4	38.0	38.0			53	115.0	38.0		1.152e+006	106.3	0.0000	77.00	0.6238
E-1863		31	59.0	147.4			44	220.0	140.0		5.328e+006	132.9	0.0000	72.61	81.00
E-1865	Air	37.0	37.7	37.7			18	140.8	117.6		8.424e+006	358.6	0.0000	103.2	80.56
E-1861	Air	37.9	39.2	39.2			47	170.0	88.1		1.674e+007	774.6	0.0000	130.8	50.13
E-1858	Air	47.4	48.8	48.8			36	91.0	48.4		1.786e+007	6368.9	0.0000	42.18	0.9647
E-1860	caustic	38.0	50.0	50.0		LP Steam	149.0	149.0	149.0		3.348e+006	45.8	0.0000	99.04	111.0
H-1851		15	199.0	210.3		Fired Heat (1000)	1000.0	592.5	592.5		7.020e+006	48.0	0.0000	789.7	393.5
E-1862	Cooling Water	29.5	35.0	35.0			47	88.1	38.0		1.022e+007	614.5	0.0000	53.03	8.519
E-1853	Air	37.7	37.9	37.9			2	75.4	60.0		3.456e+006	459.7	0.0000	37.46	22.34
E-1857		34	176.0	178.0		MP Steam	209.9	209.2	209.2		2.574e+007	1134.4	0.0000	31.91	33.23
E-1859	Cooling Water	35.0	37.4	37.4			36	48.4	38.0		4.356e+006	1036.4	0.0000	11.02	2.982
E-1873		15	185.0	199.0		MP Steam	209.2	209.0	209.0		8.702e+006	773.5	0.0000	10.23	23.99
H-1852		31	147.4	231.0		Fired Heat (1000)	592.5	300.0	300.0		5.040e+006	81.0	0.0000	361.5	152.6
E-1854	Air	39.2	47.4	47.4			25	66.0	58.0		1.054e+008	2.1975e+04	0.0000	18.57	18.77
E-1852		29	60.0	91.0			2	106.0	75.4		6.876e+006	1257.2	0.0000	15.00	15.39
E-1856		6	123.9	137.0		MP Steam	210.0	209.9	209.9		3.528e+006	63.8	0.0000	73.00	85.99
E-1864		15	178.0	185.0			18	220.0	208.0		4.356e+006	373.3	0.0000	34.99	29.97
E-1874		1	100.0	116.0			18	208.0	140.8		2.430e+007	1071.8	0.0000	91.97	40.83
E-1866	Cooling Water	28.0	29.5	29.5			18	117.6	110.0		2.736e+006	47.1	0.0000	88.08	82.00

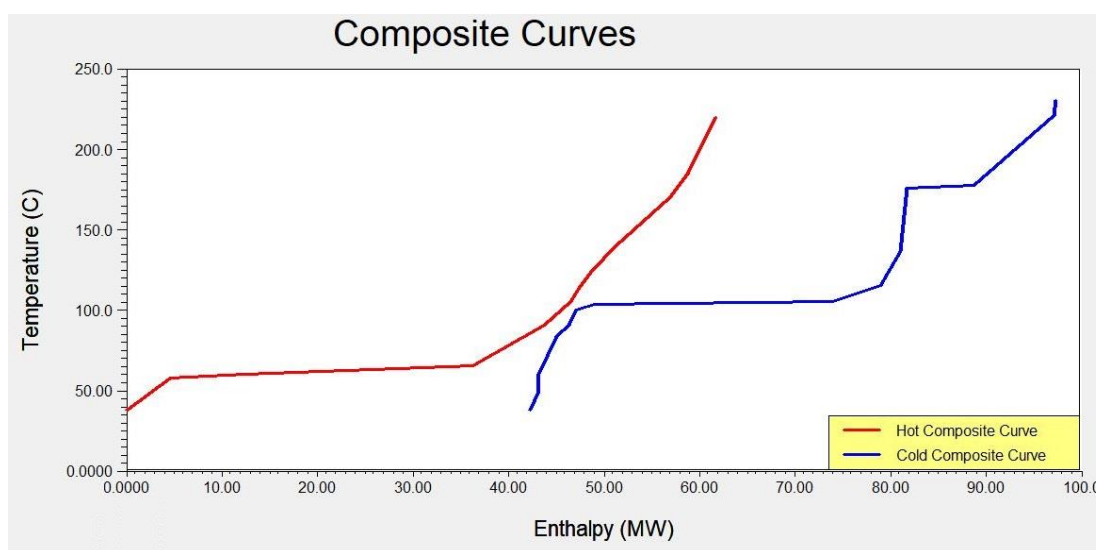
شکل ۵. جریان‌های گرم و سرد، دماها و آنتالپی‌های مربوط به هر مبدل.

Figure 5. Hot and Cold Streams, Temperatures, Enthalpy of each Heat Exchanger.

جدول ۱. داده‌های سرویس‌های جانبی گرم و سرد.

Table 1. Data of Hot and Cold Utilities.

Utility	Hot Utilities			Cold Utilities	
	LP Steam	MP Steam	Fired Heat (1000)	Cooling Water	Air
Load (KJ/h)	8.190e+007	3.402e+007	1.269e+007	7.285e+006	1.439e+008
Cost Index (Cost/s)	4.322e-002	2.079e-002	1.498e-002	4.299 e-004	3.998 e-005
Total Targets (KJ/h)	Heating Target 1.286e+008			Cooling Target 1.525e+008	
Total Costs (Cost/s)	Heating 7.900e-002			Cooling 4.699e-004	

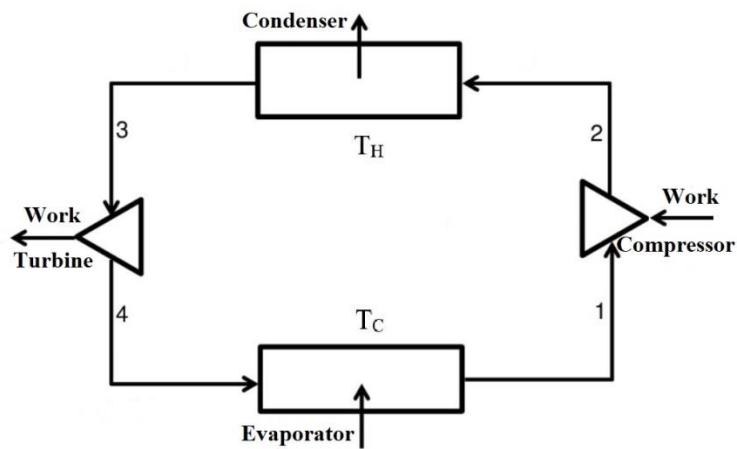


شکل ۶. نمودار آنتالپی-دما (نمودار ترکیبی).

Figure 6. Enthalpy-Temperature Curves (Composite Curves).

از یک تبخیرکننده با دمای ثابت T_C ممکن می‌شود. بنابراین در این مرحله حرارت از فرایند، گرفته و به سیال عامل منتقل می‌شود و در واقع سرمایه‌های فرایندی اتفاق می‌افتد. سپس سیال عامل به وسیله کمپرسور به بخش کندانسور فرستاده می‌شود که در آن حرارت Q_H به سیال عامل با دمای ثابت T_H انتقال می‌یابد. بنابراین در کندانسور فرایند گرمایشی واحد اتفاق می‌افتد. سپس سیال عامل در حالت ترمودینامیکی مایع اشباع به یک شیر فشارشکن یا توربین وارد می‌شود و به دمای اولیه T_C بازمی‌گردد. این عمل بر طبق سیکل‌های ترمودینامیکی مختلف ممکن می‌شود و سیکل مورد استفاده در اینجا از دو فرایند دما ثابت بهره گرفته، مطابق با سیکل کارنو عمل می‌کند.

برای افزایش بازدهی انرژی واحد با استفاده از فناوری پینچ، می‌توان از روش‌هایی استفاده کرد که منجر به کاهش میزان حرارت عبوری از پینچ شوند. حرارت عبوری از پینچ باعث فاصله گرفتن واحد عملیاتی از کمینه مصرف سرویس‌های جانبی (اهداف) می‌شود. یکی از راهکارهای افزایش بازیابی انرژی استفاده از پمپ حرارتی است؛ روش کار در پمپ حرارتی انتقال انرژی از یک منبع دمای پایین به یک منبع دمای بالا مطابق با شکل (۷) است که به دلیل مغایرت با قانون دوم ترمودینامیک، این کار با استفاده از یک نیروی خارجی انجام می‌پذیرد. نیروی خارجی با یک کمپرسور تأمین می‌شود؛ لذا حالت ترمودینامیکی ورودی به آن، باید به صورت بخار باشد تا تجهیزات کمپرسور دچار تخریب نشود. این عمل با استفاده



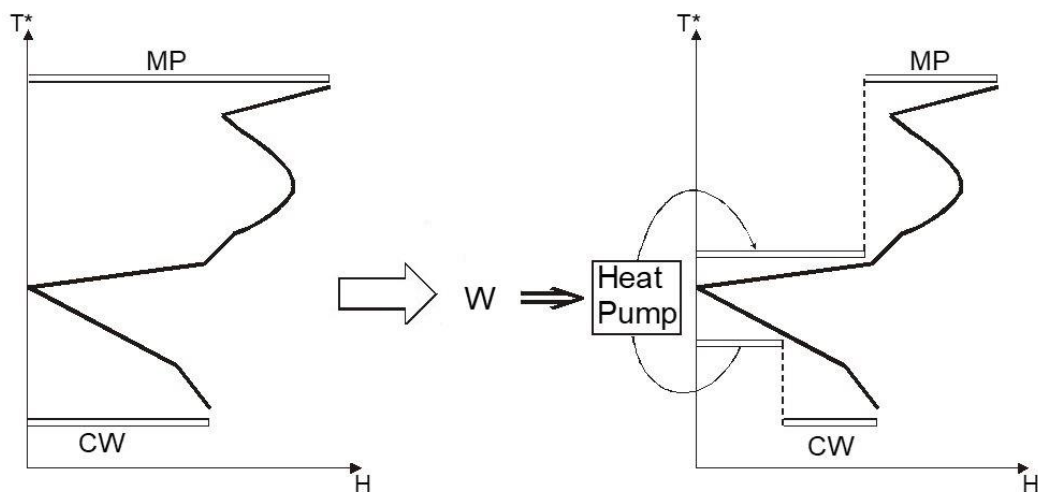
شکل ۷. پمپ حرارتی و قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده آن.

Figure 7. Heat Pump and its Different Parts.

منتقل شود، می‌توان هم میزان حرارت عبوری از پینچ را کاهش داد و هم به بازیابی انرژی بیشتر و مصرف کمتر تجهیزات گرمایشی و سرمایشی رسید. در اینجا با تشکیل پمپ حرارتی میان دو مبدلی که در بالا و پایین پینچ هستند و هر دو حرارت عبوری از پینچ دارند، این هدف محقق می‌شود. دو مبدل انتخاب شده مبدل E-1860 در پایین پینچ (که حرارت عبوری از پینچ آن ۰/۹۳ MW است) و با مبدل E-1861 (با میزان ۳/۴۰۵ MW حرارت عبوری از پینچ) است و دارای بیشترین میزان عبور از پینچ است که در بالای پینچ تشکیل پمپ حرارتی می‌دهد. شرایط توضیح داده شده در شکل (۹) با استفاده از نرم‌افزار Aspen HYSYS V10 بررسی شده است.

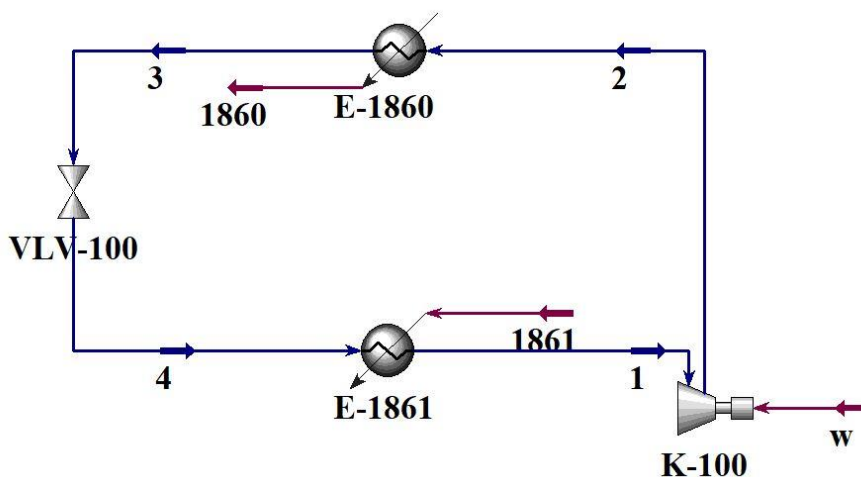
اگر بتوان در اطراف پینچ فرایندی پمپ حرارتی را به کار برد، می‌توان با استفاده از آن به بازیابی حرارتی کمک کرد. در واقع همان‌طور که از شکل (۸) پیداست، استفاده از پمپ حرارتی در اطراف پینچ فرایندی منجر به کاهش مصرف سرویس جانبی گرمایشی و سرمایشی می‌شود.

حال اگر بتوان در سرمایش و گرمایش فرایندی از مبدلهایی که در بالا و پایین برج حرارت عبوری از پینچ دارند، استفاده کرد؛ می‌توان میزان حرارت عبوری از پینچ را در آن‌ها و در نتیجه برای کل فرایند کاهش داد؛ بنا بر این، با به‌کاربردن یک پمپ حرارتی در اطراف پینچ فرایندی، به‌گونه‌ای که حرارت از پایین پینچ به بالای پینچ



شکل ۸. نمودار ترکیبی جامع با پمپ حرارتی (سمت چپ) و بدون پمپ حرارتی (سمت راست).

Figure 8. Grand Composite Curve with (Left-Side) and without (Right-Side) Heat Pump.



شکل ۹. شبیه‌سازی پمپ حرارتی بین بالا و پایین پینچ.
Figure 9. Heat pump simulation between top & bottom pinch.

۱۴۳/۹ GJ/h به ترتیب با ۰/۶۳ و ۰/۳۳٪ کاهش، به مقادیر ۱۲۷/۸ GJ/h و ۱۵۲ GJ/h تقلیل می‌یابد.

۴. نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های بازیابی انرژی و کمک به کاهش مصرف تجهیزات گرمایشی و سرمایشی، استفاده از پمپ‌های حرارتی است؛ در این پژوهش، دو مبدل حرارتی E-1861 و E-1860 دارد برای بازیابی انرژی در نظر گرفته شد. به کارگیری پمپ حرارتی منجر به کاهش میزان حرارت عبوری از پینچ به میزان ۱۱/۳٪ شد که کاهش چشمگیری است. علاوه بر این، میزان سرویس‌های جانبی گرم و سرد، به ترتیب با ۰/۶۳٪ و ۰/۳۳٪ کاهش داشتند که اهمیت به‌سزایی در کاهش میزان مصرف انرژی و افزایش بازدهی آن در واحد مذکور دارد و بسیار کاربردی و مفید است. استفاده از پمپ حرارتی را می‌توان در سایر واحدهای صنعتی و پالایشگاهی نیز بررسی کرد و از برتری‌های آن در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط و نیز کاهش میزان حرارت عبوری از پینچ بهره گرفت.

۵. قدردانی

نویسندگان از جناب آقای مهندس حسین یگانگی دستگردی که در ارتقای کیفیت مقاله همکاری مؤثری داشتند، تشکر و قدردانی می‌کنند.

شکل (۹) شبیه‌سازی یک پمپ حرارتی را مطابق با سیکل تراکمی ایده‌آل (دارای دو فرایند فشار ثابت در دو مرحله تبادل حرارت، یک فرایند آنتروپی ثابت در کمپرسور و یک فرایند آنتالپی ثابت در شیر فشارشکن) بین بالا و پایین پینچ که باعث کاهش میزان حرارت عبوری از پینچ می‌شود نمایش می‌دهد. جریان گرم در مبدل E-1861 تمایل به خنک‌شدن و کاهش دمایی دارد؛ بنابراین در این مرحله حرارت Q_C از این مبدل خارج و به سیال عامل که همان آب‌خنک‌کن است، داده می‌شود. این فرایند مطابق با سیکل تراکمی ایده‌آل، در فشار ثابت و در دمای 28°C انجام می‌شود و در نقطه ۱ به حالت ترمودینامیکی بخار اشباع می‌رسد. سپس سیال عامل به‌وسیله کمپرسور در نقطه ۲ به دمای مربوط به جریان بخار آب LP یعنی 150°C می‌رسد و در مبدل E-1860 تبادل حرارتی می‌کند. مبدل E-1860 حاوی سیال سرد است که تمایل به گرمایش دارد، پس حرارت لازم Q_H را از سیال عامل دریافت می‌کند و سیال عامل در فرایند فشار ثابت به نقطه ۳ که حالت ترمودینامیکی آن مایع اشباع است می‌رسد. سیال عامل از نقطه ۳ به نقطه ۴ با استفاده از یک شیر فشارشکن کم‌فشار می‌شود و به دمای 28°C کاهش دمایی می‌یابد. با استفاده از پمپ حرارتی طراحی‌شده هم میزان استفاده از تجهیزات حرارتی و هم میزان حرارت عبوری از پینچ کم می‌شود. با استفاده از این پمپ حرارتی میزان حرارت عبوری از پینچ از $47/22$ GJ/h با $11/3$ ٪ کاهش به $19/90$ GJ/h کاهش می‌یابد و میزان سرویس‌های جانبی گرم و سرد از $128/61$ GJ/h

- [1] Ghazizahedi, A., "Simulation and retrofit Design of Isomerization Process", Ph.D. Dissertation (Supervisor: Dr. Majid Hayati-Ashtiani), University of Kashan, In Persian, (2021).
- [2] Martín, Á., Mato, F. A., "Hint: An Educational Software for Heat Exchanger Network Design with the Pinch Method",. Education of Chemical Engineering, Vol. 3, pp. 6-14, (2008).
- [3] Mehdizadeh-Fard, M., Pourfayaz, F., Kasaeian, A. B., "Mehrpooya, M., A Practical Approach to Heat Exchanger Network Design in a Complex Natural Gas Refinery", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 40, pp. 141-177, (2017).
- [4] Feng, X., Pu, J., Yang, J., Chu, K. H., "Energy Recovery in Petrochemical Complexes through Heat Integration Retrofit Analysis", Applied Energy, Vol. 88, pp. 1965-1982, (2011).
- [5] Szklo, A., Schaeffer, R., "Fuel Specification, Energy Consumption and CO₂ Emission in Oil Refineries", Energy, Vol. 32, pp. 1075-1092, (2007).
- [6] Jarullah, A. T., Abed, F. M., Ahmed, A. M., Mujtaba, L. M., "Optimisation of Several Industrial and Recently Developed AJAM Naphtha Isomerization Processes Using Model Based Techniques", Computers and Chemical Engineering, Vol. 126, pp. 403-420, (2019).
- [7] Jarullah, A. T., Abed, F. M., Al-Tabbakh, B. A., Mujtaba, I. M., "Optimisation of several industrial and recently developed AJAM naphtha isomerization processes using model based techniques", Computer & Chemical Engineering, Vol. 126, pp. 403-420 (2019).
- [8] Ghazizahedi, Z., Hayati-Ashtiani, M., "Retrofitting isomerization process to increase gasoline quality and decrease CO₂ emission along with energy analysis using Pinch Technology", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, (2020). DOI: 10.1080/15567036.2020.1859008
- [9] Mohamed, M. F., Shehata, W. M., Abdel Halim, A. A., Gad, F. K., "Improving Gasoline Quality Produced from MIDOR Light Naphtha Isomerization Unit", Egyptian Journal of Petroleum, Vol. 26, pp. 111-124 (2017).
- [10] Chekantsev, N. V., Gyngazova, M. S., Ivanchina E. D., "Development of Complex Mathematical Model of Light Naphtha Isomerization and Rectification Processes", Chemical Engineering Journal, Vol. 238, pp. 120-129, (2014).
- [11] Dhar, A., Vekariya, R. L., Sharma, P., "Kinetics and Mechanistic Study of n-Alkane Hydroisomerization reaction on Pt-doped γ -alumina catalyst", Petroleum, Vol. 3, pp. 489-495, (2017).
- [12] Ebrahim, M., Kawari, A., "Pinch Technology: an Efficient Tool for Chemical-plant Energy and Capital-cost Saving", Applied Energy, Vol. 65, pp. 45-49, (2000).
- [13] Kang, H., Wang, T., Zheng, H., "Comparative Analysis of Regenerative and Air-extraction Multi-stage Humidification-dehumidification Desalination System Using Pinch Technology", Desalination, Vol. 385, pp. 158-166, (2016).
- [14] Manan, Z. A., Nawi, W. N. R. M., Alwi, Sh. R. W., Klemes, J. J., "Advances in Process Integration Research for CO₂ Emission Reduction-A Review", Journal of Clean Production, Vol. 167, pp. 1-13, (2017).
- [15] Gu, K., Vassiliadis, V. S., "Limitations in Using Euler's Formula in the Design of Heat Exchanger Networks with Pinch Technology", Computers and Chemical Engineering, Vol. 68, pp. 123-127, (2014). DOI: 10.1080/15567036.2020.1859008