

Research Article



DOI: 10.22034/IJCHE.2021.290195.1121



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.123.1.7



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

Comparison of the Thermodynamic Effect of Ethane and Ethylene in the Mixed Refrigerant Cycle of the Natural Gas Liquefaction Process

E. Sayadmosleh¹, L. Shirazi^{2*}, M. Soleimani³, M. Sarmad⁴

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

3- Associate Professor of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology

4- B. Sc. in Chemical Engineering, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

E-mail: Shirazil@ripi.ir

Abstract

The type of mixed refrigerant components is one of the most important factors affecting the energy consumption of compressors in the natural gas liquefaction process. In the recent researches, various components have been used, which usually contain ethane or ethylene. So far, no comparison has been performed between the performance of these two components in the mixed refrigerant. In this research thermodynamic properties of ethane and ethylene were compared. Then PRICO process, as the most common small-scale liquefaction process, was simulated with three types of five-component refrigerants including ethane, and then optimized using the genetic algorithm tool in MATLAB 2019a. Then, the thermodynamic effect of ethylene replacement in these three refrigerants on the work consumption of compressors as an objective function was investigated. The results indicated ethane or ethylene presence in mixed refrigerant is necessary and their absence leads to work consumption of 3792.35 kW. This value is higher than all six cases that contain ethane or ethylene. Also, results showed that the use of ethylene reduces the work consumption of compressors, and in refrigerants with nitrogen, methane, ethane, propane, and i-butane components, replacing ethane with ethylene reduces process work consumption by 11.28%.

Received: 11 June 2021

Accepted: 2 August 2021

Page Number: 7-21

Keywords:

Natural Gas Liquefaction,
Mixed Refrigerant,
Ethane,
Ethylene,
Specific Heat Capacity,
Latent Heat of Vaporization

Please Cite this Article Using:

Sayadmosleh, E., Shirazi, L., Soleimani, M., Sarmad, M., "Comparison of the Thermodynamic Effect of Ethane and Ethylene in the Mixed Refrigerant Cycle of the Natural Gas Liquefaction Process", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 123, pp. 7-21, In Persian, (2022).



مقایسه رفتار ترمودینامیکی اتان و اتیلن در چرخه مبرد آمیخته فرایند مایع سازی گاز طبیعی

احسان صیادمصلح^۱، لاله شیرازی^{۲*}، منصوره سلیمانی^۳، مهران سرمد^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- کارشناس مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت

پیام نگار: Shirazil@ripi.ir

چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر انرژی مصرفی کمپرسورها در فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی، نوع اجزای مبرد آمیخته است. در پژوهش‌های اخیر اجزای مختلفی استفاده شده که اتان یا اتیلن در آن‌ها وجود داشته است. تاکنون بین عملکرد این دو جزء در مبرد آمیخته مقایسه‌ای انجام نشده است. در این مقاله ابتدا خواص ترمودینامیکی اتان و اتیلن مقایسه شد. سپس برای بررسی عملکرد آن‌ها در مبرد آمیخته، فرایند PRICO به‌عنوان رایج‌ترین فرایند مایع‌سازی مقیاس کوچک با سه نوع مبرد پنج‌جزئی شامل اتان، شبیه‌سازی و سپس با استفاده از ابزار الگوریتم ژنتیک در MATLAB 2019a بهینه‌سازی شد. در ادامه تأثیر ترمودینامیکی جایگزینی اتیلن در این سه مبرد بر کار مصرفی کمپرسورها به‌عنوان تابع هدف بررسی شد. نتایج نشان داد که وجود اتان یا اتیلن در مبرد ضروری است و استفاده نکردن از آن‌ها در فرایند، کار مصرفی را به ۳۷۹۲/۳۵ kW افزایش می‌دهد که از هر شش مورد مطالعه شده دارای اتان یا اتیلن بیشتر است. همچنین استفاده از اتیلن باعث کاهش کار مصرفی کمپرسورها و در مبردی با اجزای نیتروژن، متان، اتان، پروپان و ایزوبوتان، جایگزینی اتان با اتیلن باعث کاهش ۱۱/۲۸٪ در کار مصرفی فرایند می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

شماره صفحات: ۷ تا ۲۱

کلیدواژه‌ها:

مایع‌سازی گاز طبیعی،

مبرد آمیخته،

اتان،

اتیلن،

ظرفیت حرارتی ویژه،

گرمای نهان تبخیر

* تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده گاز

استناد به مقاله:

صیادمصلح، ا.، شیرازی، ل.، سلیمانی، م.، سرمد، م.، "مقایسه رفتار ترمودینامیکی اتان و اتیلن در چرخه مبرد آمیخته فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ویکم، شماره ۱۲۳، صص. ۲۱-۷، (۱۴۰۱).

گاز طبیعی یکی از پاک‌ترین سوخت‌های فسیلی در جهان است که مصرف آن روز به‌روز در حال افزایش است [۱]. خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده (LNG) دو روش اصلی انتقال گاز طبیعی است [۲]. با توجه به این که بیشتر دارندگان منابع گاز طبیعی - مانند استرالیا و خاورمیانه - از مناطق مصرف دور هستند و احداث خط لوله از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست، مایع‌سازی گاز می‌تواند راهی اقتصادی برای صادرات گاز باشد [۳]. همچنین در مناطقی که روند مصرف گاز نوسانی است یا به‌دلایل اقلیمی یا اقتصادی احداث خط لوله امکان‌پذیر نیست، از واحدهای LNG به‌منظور پیک‌سایی و گازرسانی به مناطق صعب‌العبور استفاده می‌شود [۴].

ساده‌ترین فرایند تولید LNG، فرایند مبرد آمیخته تک‌مرحله‌ای (SMR^۱) است که در آن تنها از یک چرخه مبرد آمیخته استفاده می‌شود و در مقایسه با سایر فرایندهای مبرد آمیخته تعداد تجهیزات کمتری دارد؛ از این رو رایج‌ترین نوع فرایند کاربردی در واحدهای مقیاس کوچک است [۵]. با توجه به انرژی‌بر بودن فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی و صرف حدود ۵۰-۴۰٪ کل هزینه در بخش مایع‌سازی، بهینه‌سازی فرایند الزامی است [۶]. بیش‌ترین مصرف انرژی در بین تجهیزات این فرایند متعلق به کمپرسورهاست که نوع مبرد گردش‌ی کمپرسور یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مصرف انرژی آن است. مبرد آمیخته معمولاً ترکیبی از نیتروژن و هیدروکربن‌های سبک (از متان تا پنتان) است [۷]. در پژوهش‌های اخیر اجزای متفاوتی برای استفاده در مبرد آمیخته استفاده شده که دلیل آن تشابه خواص ترمودینامیکی بین برخی از این هیدروکربن‌ها مانند اتان و اتیلن است.

فرایند PRICO رایج‌ترین فرایند مایع‌سازی در مقیاس کوچک است که در آن تنها از یک چرخه مبرد آمیخته استفاده و در پژوهش‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای مطالعه شده است. مکاری‌زاده حقیقی شیرازی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از اتان به‌همراه نیتروژن، متان، پروپان، ایزوبوتان و نورمال‌بوتان برای مبرد آمیخته، فرایند PRICO را با روش الگوریتم ژنتیک (GA^۳) بهینه‌سازی کردند. آن‌ها پس از بهینه‌سازی به مصرف انرژی ویژه $1092/4 \text{ kJ/kgLNG}$ دست یافتند [۸]. شریق خان و لی (۲۰۱۳) از اتان به‌همراه نیتروژن،

متان و پروپان برای مبرد آمیخته استفاده کردند و فرایند مایع‌سازی را با استفاده از روش مدل ازدحام ذرات (PSD^۴) با قیدهای غیرخطی بهینه‌سازی کردند و به مصرف انرژی ویژه 1370 kJ/kgLNG و بازدهی انرژی $50/77\%$ رسیدند [۹]. ژو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از GA فرایند PRICO را بهینه‌سازی کردند و به مصرف انرژی ویژه $1003/6 \text{ kJ/kgLNG}$ و بازدهی انرژی $43/9\%$ دست یافتند. آن‌ها برای اجزای مبرد آمیخته از اتیلن به‌همراه نیتروژن، متان، پروپان و ایزوپنتان استفاده کردند [۱۰].

معین و همکاران (۲۰۱۵) برای اجزای مبرد آمیخته از اتان به‌همراه نیتروژن، متان، پروپان و نورمال‌بوتان استفاده کردند و فرایند SMR شرکت APCI را با روش GA بهینه‌سازی کردند؛ نتایج نشان داد که رابطه کار مصرفی فرایند با ترکیب درصد مولی اجزای مبرد به‌صورت خطی تغییر می‌کند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییر در فشار خوراک ورودی واحد، تغییر ناچیزی بر ترکیب درصد اجزای مبرد آمیخته دارد؛ اما تأثیر آن بر کار مصرفی قابل ملاحظه است [۱۱]. گاک فام و همکاران (۲۰۱۶) روش جدیدی را بر مبنای خواص اجزای مبرد آمیخته برای بهینه‌سازی فرایند SMR توسعه دادند؛ آن‌ها نشان دادند که می‌توان با افزودن اجزای سنگینی مانند ایزوبوتان یا ایزوپنتان به مبرد آمیخته با اجزای نیتروژن، متان، اتان و پروپان و تجهیزاتی مانند کمپرسور خوراک به فرایند، کار مصرفی را کاهش داد [۱۲].

علی و همکاران (۲۰۱۸) فرایند PRICO را با استفاده از الگوریتم جستجوی گردابه‌ای فراابتکاری^۵ بهینه‌سازی کردند؛ آن‌ها از اتان به‌همراه نیتروژن، متان، پروپان و ایزوبوتان استفاده کردند و به مصرف انرژی ویژه و ضریب کارایی $965/16 \text{ kJ/kgLNG}$ و $2/96$ رسیدند [۱۳]. قیوم و همکاران (۲۰۱۸) برای مبرد آمیخته از اتان به‌همراه نیتروژن، متان، پروپان و ایزوبوتان بهره گرفتند و فرایند SMR را با استفاده از الگوریتم کاهشی مختصات اصلاح شده ترکیبی (HMCD^۶) بهینه‌سازی کردند و به مصرف انرژی ویژه $919/8 \text{ kJ/kgLNG}$ و ضریب کارایی $3/45$ رسیدند [۱۴].

وانگ و همکاران (۲۰۲۰) فرایند پیش‌سرد شده با پروپان و ایزوبوتان را به‌جای فرایند پیش‌سرد شده با پروپان (C3MR^۷) ارائه و فرایند را

4. Particle Swarm Paradigm
5. Metaheuristic Vortex Search Algorithm
6. Hybrid Modified Coordinate Descent Algorithm
7. Propane Pre-Cooled Mixed Refrigerant

1. Liquefied Natural Gas
2. Single Mixed Refrigerant
3. Genetic Algorithm

مقاله، ویژگی‌های ترمودینامیکی این دو ماده و تأثیر حضور هر یک از آن‌ها در مبرد آمیخته بررسی شده است. بدین منظور ابتدا فرایند PRICO به‌عنوان رایج‌ترین فرایند مبرد آمیخته تک‌مرحله‌ای در سه حالت مختلف مبرد آمیخته که حاوی اتان بود، شبیه‌سازی و با استفاده از GA بهینه‌سازی شد. سپس با جایگزینی اتان با اتیلن، تأثیر این جایگزینی بررسی و خواص ترمودینامیکی مؤثر بر عملکرد اتان و اتیلن مطالعه شد.

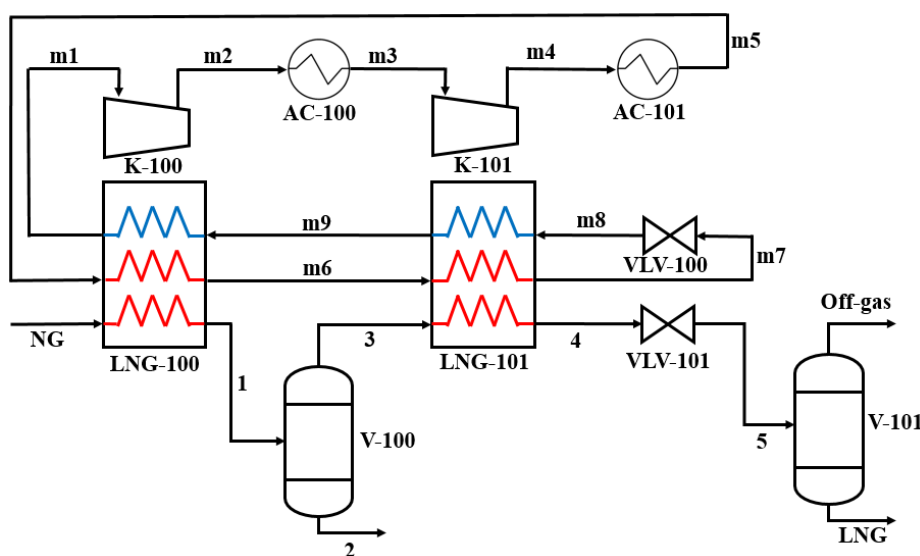
۲. شبیه‌سازی فرایند

در این مقاله، ابتدا فرایند PRICO به‌کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز فرایند شبیه‌سازی شد که در شکل (۱) نمایی از این فرایند رسم شده است. پیداست که خوراک گاز طبیعی (NG) ابتدا وارد مبدل حرارتی چندجریانه LNG-100 و تا 45°C - خنک می‌شود. سپس جریان خروجی (جریان ۱) وارد جداکننده V-100 می‌شود تا اجزای سنگین‌تر که بیشتر در فاز مایع قرار دارند از پایین آن خارج شوند (جریان ۲). در ادامه، جریان ۳ که بیشتر شامل نیتروژن و متان است، وارد مبدل حرارتی چندجریانه LNG-101 می‌شود تا دمای آن به 150°C - برسد (جریان ۴). این جریان با عبور از یک شیر فشارشکن (VLV-100) به حالت دوفازی در می‌آید و بیشتر نیتروژن از بالای جداکننده V-101 (جریان Off-gas) خارج و LNG تولیدی از پایین جداکننده به سمت مخازن نگهداری فرستاده می‌شود.

با استفاده از GA بهینه‌سازی کردند. کار مصرفی پس از بهینه‌سازی 0.301 kWh/kg به‌دست آمد که 18% نسبت به فرایند C3MR کمتر بود. آن‌ها از اتان به همراه نیتروژن، متان، پروپان و ایزوبوتان برای مبرد آمیخته استفاده کردند [۱۵]. هی و لین (۲۰۲۱) دو ترکیب برای ادغام فرایندهای SMR و جداسازی اتان ارائه و کار مصرفی کمپرسورها و پمپ‌ها را با استفاده از GA کمینه‌سازی کردند. آن‌ها اتان به همراه نیتروژن، متان، پروپان و ایزوبوتان را برای مبرد آمیخته انتخاب کردند و برای فرایندهای اول و دوم به ترتیب 0.4275 و 0.4175 kWh/Nm^3 را گزارش دادند [۱۶].

بر اساس نتایج پژوهش‌های اخیر، برای مبرد آمیخته از اجزای مختلفی استفاده شده و تنها نیتروژن و متان در تمام مردهای آمیخته حضور داشته است. بدین منظور هی و همکاران (۲۰۲۰) روشی مبتنی بر شبیه‌سازی را برای تعیین بهترین اجزا در مبرد آمیخته ارائه دادند تا کار مصرفی فرایند را کمینه کنند. بدین منظور فرایند SMR را با استفاده از GA بهینه‌سازی کردند و برای مردها با تعداد اجزای مختلف بهترین اجزا را پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد با افزایش تعداد اجزای مبرد آمیخته، مصرف انرژی ویژه فرایند می‌شود [۱۷].

بر اساس مطالب قبلی، یکی از برجسته‌ترین انتخاب‌ها برای اجزای مبرد آمیخته استفاده از اتان یا اتیلن بوده است. این انتخاب می‌تواند تأثیر چشمگیری بر مصرف انرژی ویژه فرایند داشته باشد. در این



شکل ۱. نمودار جریان فرایند PRICO.

Figure 1. PRICO process flow diagram.

۳. بهینه‌سازی فرایند

مابع‌سازی گاز طبیعی فرایندی انرژی بر است و معمولاً بین ۴۰ تا ۵۰٪ هزینه کل زنجیره تأمین LNG را به خود اختصاص می‌دهد [۱۳]؛ از این رو بهینه‌سازی آن امری ضروری است. تا به حال روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی فرایند استفاده شده است، با این حال با توجه به طبیعت غیرخطی و پیچیدگی ترمودینامیکی بالای فرایند LNG، بسیاری از این روش‌ها به جواب بهینه منجر نمی‌شوند. یکی از راهکارها برای بهینه‌سازی این نوع فرایندها، استفاده از روش‌های جستجوی جهانی مانند GA است که به مشتق و حدس اولیه نیازی ندارند. این روش، یک روش جستجوی ابتکاری است که از فرایند تکامل طبیعی تقلید می‌کند؛ به وسیله هولاند ابداع شد و به وسیله دانشجویانش توسعه یافت [۱۸]. از این رو برای بهینه‌سازی در این مقاله از ابزار GA در نرم‌افزار MATLAB 2019a استفاده شده است. در این روش در هر تولید^۱ میزان معینی جمعیت^۲ ایجاد می‌شود. از میان جمعیت تولیدشده، آن‌هایی که ویژگی مورد نظر (کمینه بودن) را دارند (نخبه‌ها)، برای نسل بعدی تولید استفاده می‌شوند. عمل زاد و ولد داده‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که حد اکثر تولید ایجاد شود و یا تفاوت در بهترین داده تولید هر نسل با نسل قبلی کمتر از حد اقل اختلاف داده‌های الگوریتم باشد [۱۸]. مؤلفه‌های کاربردی در الگوریتم ژنتیک در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول ۲. مؤلفه‌های کاربردی الگوریتم ژنتیک.

Table 2. Genetic algorithm parameters.

Max generations	300
Population size	300
Selection Fcn	tournament
Elite count	50
Mutation Fcn	Adapt feasible
Crossover Fcn	Two point

با توجه به این که کمپرسورها بیشترین سهم مصرف انرژی فرایند مابع‌سازی را به خود اختصاص می‌دهند، تابع هدف (f) در این مقاله کمینه‌سازی کار کمپرسورها قرار داده شد (رابطه (۱)):

1. Generation
2. Population

در قسمت مبرد آمیخته، جریان مبرد (m1) که بعد از عبور از مبدل حرارتی چندجریان‌ه LNG-100 دمای آن افزایش یافته، دو مرحله فشرده‌سازی و سردسازی (کمپرسورهای K-100 و K-101 و کولرهای هوایی AC-100 و AC-101) را طی می‌کند و جریان خروجی (m5) وارد مبدل حرارتی چندجریان‌ه LNG-100 می‌شود تا دمای آن به 45°C - برسد. سپس جریان خروجی (m6) وارد مبرد حرارتی چندجریان‌ه دوم (LNG-101) شده، تا 150°C - خنک می‌شود. جریان حاصل (m7) پس از عبور از یک شیر فشارشکن (VLV-100) ظرفیت لازم برای سردسازی جریان‌های گرم در مبدل‌های حرارتی چندجریان‌ه LNG-101 و LNG-100 را به دست می‌آورد و این چرخه به‌طور پیوسته ادامه می‌یابد.

برای پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی و مبرد آمیخته از معادله حالت پنگ-رابینسون و برای رسم منحنی‌های آنتالپی از معادله لی-کسلر استفاده شد. در جدول (۱) سایر اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی فرایند از جمله ترکیب درصد خوراک گاز طبیعی گزارش شده است.

جدول ۱. مؤلفه‌های شبیه‌سازی و شرایط خوراک گاز طبیعی.

Table 1. Simulation parameters and natural gas composition and conditions.

Minimum temperature approach in LNG ColdBox ($^{\circ}\text{C}$)	Value
Outlet temperature of air coolers ($^{\circ}\text{C}$)	75
Natural gas feed rate (kg/h)	$3 \leq$
Natural gas composition (mol%)	45
N ₂	5591
C ₁	
C ₂	2.50
C ₃	92.00
n-C ₄	3.00
i-C ₄	2.00
n-C ₅	0.2
i-C ₅	0.19
n-C ₆	0.03
n-C ₇	0.05
Natural gas feed temperature ($^{\circ}\text{C}$)	0.02
Natural gas feed pressure (kPa)	0.01
Minimum temperature approach in LNG ColdBox ($^{\circ}\text{C}$)	25
Outlet temperature of air coolers ($^{\circ}\text{C}$)	3,000

$$f(x) = W_{Comp1} + W_{comp2} \quad (1)$$

متغیرهای بهینه‌سازی دبی مولی اجزای مبرد آمیخته، فشارهای خروجی کمپرسورها و فشار خروجی از شیر فشارشکن VLV-100 بودند. با این حال تغییر این متغیرها نباید به ورود قطرات مایع به ورودی کمپرسور منجر شود و یا کمینه دمای نزدیکی (MTA) در مبدل‌های حرارتی چندجریانه بسیار کوچک شود؛ زیرا به بی‌نهایت شدن سطح مورد نیاز برای انتقال حرارت منجر می‌شود. MTA کمینه اختلاف بین جریان‌های گرم و سرد در مبدل حرارتی است که زیاد بودن آن به افزایش نیروی محرکه انتقال حرارت و اتلافات منجر می‌شود. از این رو باید دمای مبرد آمیخته ورودی به کمپرسورها حد اقل 3°C بیشتر از دمای شبنم این جریان‌ها باشد و MTA در دو مبدل حرارتی چندجریانه به کمتر از 3°C نرسد. در صورت نقض هر کدام از این موارد، مقادیر A, B, C و D در روابط (۲) تا (۵) مقداری غیر از صفر می‌شود و تابع هدف را مطابق رابطه (۶) جریمه می‌کند.

$$A = \max(0, 3 - T_{m2,dew} - T_{m2}) \quad (2)$$

$$B = \max(0, 3 - T_{m4,dew} - T_{m4}) \quad (3)$$

$$C = \max(0, 3 - MTA_1) \quad (4)$$

$$D = \max(0, 3 - MTA_2) \quad (5)$$

$$P(x) = f(x) \times e^{(A+B+C+D)} \quad (6)$$

۴. خصوصیات ترمودینامیکی اتان و اتیلن

پیش از بررسی عملکرد اتان و اتیلن در مبرد آمیخته لازم است تا ابتدا خواص ترمودینامیکی آن‌ها به صورت خالص مقایسه شود. مهم‌ترین خواص ترمودینامیکی در انتخاب اجزای هر مبردی دمای جوش، ظرفیت حرارتی ویژه، گرمای نهان تبخیر، دمای انجماد، هدایت حرارتی و گرانیوی هستند که در ادامه برای اتان و اتیلن مقایسه شده است.

۴-۱ دمای جوش

هدف از کاربرد مبرد آمیخته به جای مبرد خالص، کمینه‌سازی فاصله دمایی بین جریان‌های گرم و سرد در مبدل‌های حرارتی چندجریانه است تا برگشت‌ناپذیری به حد اقل مقدار ممکن برسد. برگشت‌ناپذیری در مبدل‌های حرارتی باعث افزایش اتلاف و افت عملکرد سامانه می‌شود؛ از این رو اجزای مبرد باید به گونه‌ای انتخاب شوند که فاصله بین نقاط جوش کمینه باشد و منحنی‌های مخلوط گرم و سرد تا حد ممکن بر یکدیگر منطبق شوند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، دو جریان گرم (گاز طبیعی و مبرد آمیخته فشار بالا) وجود دارد که منحنی مخلوط گرم را تشکیل می‌دهد. تنها جریان سرد، جریان مبرد آمیخته فشار پایین است که منحنی مخلوط سرد را تشکیل می‌دهد.

اجزای مبرد آمیخته را می‌توان بر اساس نقاط جوش آن‌ها به دو دسته اجزای سبک و اجزای سنگین تقسیم‌بندی کرد. اجزای سبک شامل نیتروژن، متان، اتان و اتیلن نقطه جوش پایینی دارند و دمای تبرید مورد نظر فرایند را بر عهده دارند. در سوی دیگر اجزای سنگین شامل پروپان، نرمال بوتان، ایزوبوتان، نرمال پنتان و ایزوپنتان هستند که دمای جوش بالاتری نسبت به اجزای سبک دارند و باعث افزایش دمای شبنم مبرد آمیخته می‌شوند. به عبارت دیگر با انتخاب اجزای مناسب برای مبرد آمیخته می‌توان محدوده دوفازی را به حداکثر مقدار ممکن رساند. این امر باعث افزایش سهم انتقال حرارت نهان نسبت به انتقال حرارت محسوس می‌شود و فرایند انتقال حرارت را تسهیل می‌کند.

با توجه به مطالب فوق، نقطه جوش پایین‌تر در اجزای سبک باعث عملکرد بهتر مبرد آمیخته می‌شود. دمای جوش اتان و اتیلن در فشار 100 kPa به ترتیب برابر $81/06^{\circ}\text{C}$ و $96/95^{\circ}\text{C}$ است. از این رو اتیلن در کلیدی‌ترین خاصیت انتخاب اجزای مبرد، ویژگی بهتری از اتان دارد.

۴-۲ ظرفیت حرارتی ویژه

انتقال حرارت در سیالات به دو صورت محسوس و نهان رخ می‌دهد. همان‌طور که در رابطه (۷) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار c_p مقدار گرمای منتقل شده نیز بیشتر خواهد بود.

۳-۴ گرمای نهان تبخیر

با توجه به این که حرارت منتقل شده به صورت نهان بیشتر از انتقال حرارت به صورت محسوس است، در فرایند انتقال حرارت معمولاً سعی می شود مبرد در حالت دوفازی یا در حال تبخیر باشد تا بیشترین بازدهی حاصل شود. چنان که در رابطه (۸) مشاهده می شود، برای دستیابی به مقدار معینی انتقال حرارت، هرچه گرمای نهان تبخیر (λ) بیشتر باشد، مقدار مبرد کمتری نیاز است.

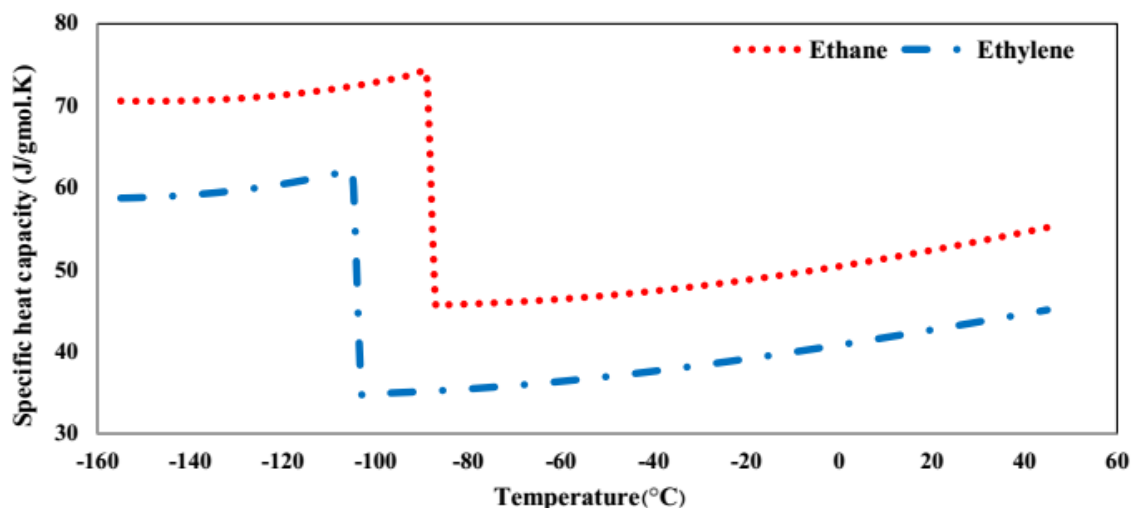
$$q = m\lambda \quad (8)$$

در شکل (۳) تغییرات آنتالپی تبخیر اتان و اتیلن رسم شده است که نسبت مستقیمی با گرمای نهان تبخیر دارد. بر اساس این شکل اتان آنتالپی تبخیر بیشتری دارد، با این حال باید توجه شود که اتان و اتیلن هر دو در دسته اجزای سبک قرار دارند و وظیفه افزایش اثر تبرید ویژه بیشتر بر عهده اجزای دسته سنگین تر است. بنابراین با وجود بهتر بودن اتان در این خاصیت، تأثیر آن چشمگیر نیست.

$$q = mc_p dT \quad (7)$$

از آنجا که فرایند PRICO با سامانه تبرید تراکم بخار استاندارد^۱ کار می کند، هر چه c_p مایع مبرد کمتر باشد، درجه زیرسرد شوندگی^۲ بیشتر می شود و در نتیجه اتلاف خفقان کاهش می یابد. از طرفی هرچه c_p گاز مبرد بیشتر باشد، اتلاف مربوط به نوک فوق گرم^۳ در نمودار دما-آنتالپی فرایند کمتر می شود.

در شکل (۲) نمودارهای ظرفیت حرارتی اتان و اتیلن در محدوده دمایی عملکرد فرایند تولید LNG رسم شده است. نقطه ای که در آن نمودارها دچار شکست می شوند، نقطه ای است که سیال تغییر فاز می دهد. همان طور که مشاهده می شود ظرفیت حرارتی ویژه مایع و گاز اتان بیشتر از اتیلن است؛ اما با توجه به این که این دو ماده در دسته اجزای سبک قرار دارند و در محدوده دمایی پایین به انتقال حرارت می پردازند، ظرفیت حرارتی ویژه مایع اهمیت بیشتری دارد؛ بنابراین در این خاصیت نیز اتیلن خاصیت ترمودینامیکی بهتری دارد.

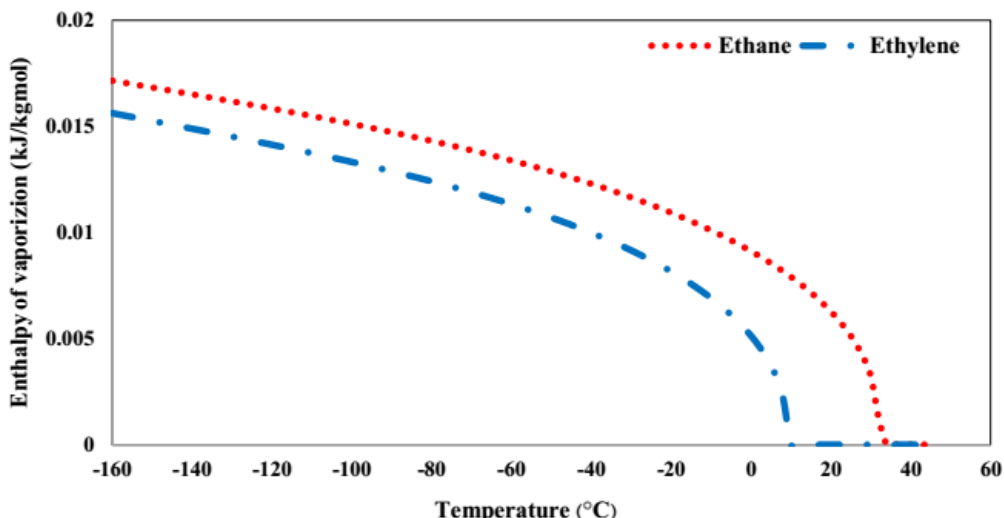


شکل ۲. نمودار ظرفیت حرارتی ویژه برای اتان و اتیلن در فشار ۱۰۰ kPa (بانک اطلاعاتی ASPEN Plus).

Figure 2. Specific heat capacity diagram for ethane and ethylene at 100 kPa pressure (Aspen Plus database).

1. Standard Vapour Compression Refrigeration System
3. Superheat Horn

2. Degree of Subcooling



شکل ۳. تغییرات آنتالپی تبخیر اتان و اتیلن با دما در فشار ۱۰۰ kPa (بانک اطلاعاتی ASPEN Plus).

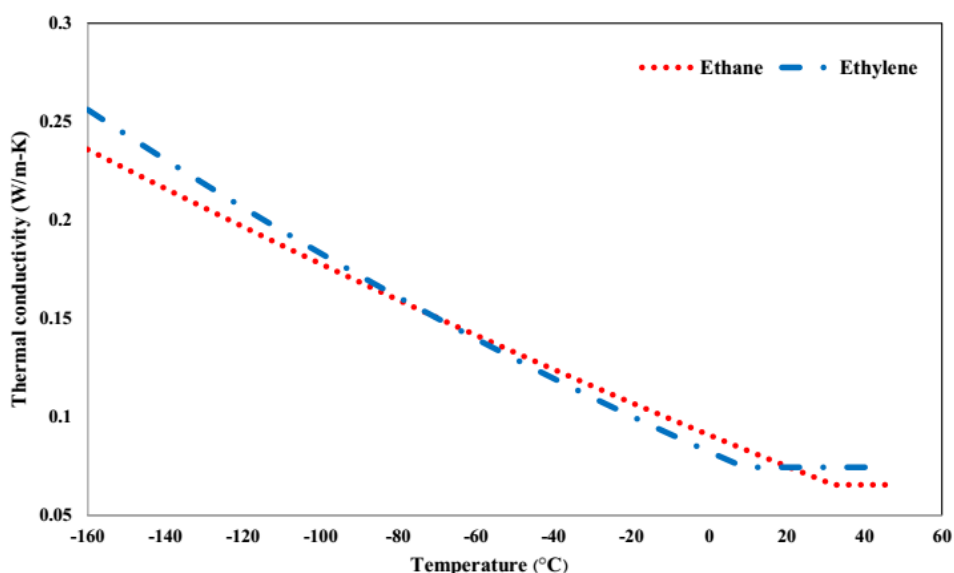
Figure 3. Changes of enthalpy of vaporization of ethane and ethylene versus temperature at 100 kPa pressure (Aspen Plus database).

در این رابطه q مقدار حرارت منتقل شده (J)، k ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)، A مساحت مورد نیاز برای انتقال حرارت (m^2)، dT اختلاف دما ($^{\circ}C$) و dx طول گرمای انتقال یافته (m) است. بر اساس شکل (۴) مقدار هدایت حرارتی اتیلن در دماهای کمتر از $80^{\circ}C$ - بیشتر از اتان است، با توجه به دمای جوش اتان و اتیلن، در این خاصیت اتیلن خصوصیات بهتری دارد.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

۴-۴ هدایت حرارتی

انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی به دو صورت هدایت و همرفت انجام می‌شود. محاسبه ضریب همرفت به هندسه مبدل و سرعت سیال در طول آن بستگی دارد و باید برای هر مبدل و سیال به صورت جداگانه حساب شود، در حالی که نمودار مربوط به ضریب هدایت برای مواد مختلف بدون در نظر گرفتن هندسه مبدل قابل ترسیم است. طبق رابطه (۹) هر چه این ضریب بیشتر باشد، سطح مورد نیاز برای مقدار معینی انتقال حرارت کاهش می‌یابد.



شکل ۴. تغییرات هدایت حرارتی اتان و اتیلن بر حسب دما در فشار ۱۰۰ kPa (بانک اطلاعاتی ASPEN Plus).

Figure 4. Changes of Thermal conductivity of ethane and ethylene versus temperature at 100 kPa pressure (Aspen Plus database).

۴-۵ گرانروی

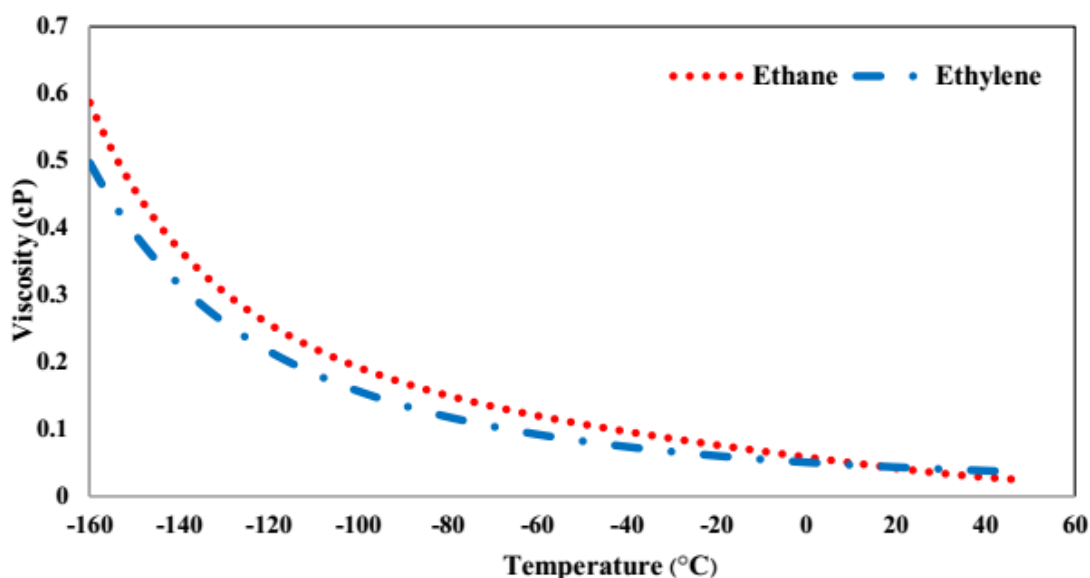
مجموعه افت فشارها در بخش‌های مختلف فرایند به کاهش ظرفیت سامانه و افزایش توان مصرفی منجر می‌شود. از این رو هرچه گرانروی کمتر باشد، افت فشار سامانه کمتر می‌شود و عملکرد سامانه بهبود می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود اتان گرانروی بالاتری نسبت به اتیلن دارد؛ بنابراین اتیلن بهتر از اتان عمل می‌کند.

۴-۶ نقطه انجماد

یخ‌زدگی در طول مبرد باعث افزایش افت فشار سامانه و تشدید آن باعث توقف فرایند می‌شود. از این رو دمای اجزای مصرفی در مبرد آمیخته نباید به کمتر از دمای انجماد آن‌ها برسد. دمای انجماد تمام اجزای سبک از جمله اتان و اتیلن کمتر از حد اقل دمای جریان مبرد در فرایند مایع‌سازی (-165°C) است، نگرانی از بابت یخ‌زدگی آن‌ها وجود ندارد؛ اما در دسته اجزای سنگین نرمال‌پنتان با دمای انجماد $138/29^{\circ}\text{C}$ - و نرمال‌پنتان با دمای انجماد $129/73^{\circ}\text{C}$ - احتمال یخ‌زدگی مبرد را افزایش می‌دهند. از این رو در مقایسه عملکرد اتان و اتیلن در مبرد آمیخته، از بررسی مبردهای شامل این دو ماده صرف نظر شده است.

۵. مقایسه عملکرد اتان و اتیلن در مبرد آمیخته

به‌منظور مطالعه ضرورت وجود اتان و اتیلن در مبرد آمیخته و همچنین مقایسه این دو ماده در مبرد آمیخته، فرایند PRICO در هفت حالت مختلف مبرد بهینه‌سازی شد که اطلاعات مربوط به این حالات شامل نرخ جریان و ترکیب درصد اجزای مبرد به همراه فشارهای عملیاتی و کار مصرفی فرایند در جدول (۳) گزارش شده است. با توجه به طبیعت الگوریتم ژنتیک که مبتنی بر زاد و ولد داده‌هاست و امکان تغییرات جزئی در هر اجرای الگوریتم وجود دارد، هر حالت ۵ بار اجرا و بهترین نتیجه در جدول (۳) گزارش شد. برای مقایسه عملکرد اتان و اتیلن لازم است تا سایر اجزا ثابت نگه داشته شوند و با جایگزینی اتان با اتیلن، تأثیر جایگزینی مطالعه شود. از این رو ابتدا مبرد آمیخته در سه حالت (اول، دوم و سوم در جدول (۳)) به همراه اتان بهینه‌سازی شد و سپس با جایگزینی اتان با اتیلن (چهارم، پنجم و ششم در جدول (۳))، عملکرد این دو جزء مقایسه شد. همچنین برای اثبات کلیدی بودن حضور این اجزا در مبرد آمیخته یک بار مبرد آمیخته بدون این دو جزء (حالت هفتم در جدول (۳)) بهینه‌سازی شد و کار مصرفی آن با سایر حالات مقایسه شد.



شکل ۵. تغییرات گرانروی بر حسب دما برای اتان و اتیلن در فشار ۱۰۰ kPa (بانک اطلاعاتی Aspen Plus).

Figure 5. Changes of Viscosity of ethane and ethylene versus temperature at 100 kPa pressure (Aspen Plus database).

جدول ۳. نتایج بهینه‌سازی فرایند PRICO با استفاده از انواع مبردهای پنج جزئی.

Table 3. PRICO process optimization results using five component mixed refrigerants.

MR cases	F _{tot} (kgmol/h)	X _{N2} (%)	X _{C1} (%)	X _{C2} (%)	X _{C2*} (%)	X _{C3} (%)	X _{i-C4} (%)	X _{i-C5} (%)	P _{m2} (kPa)	P _{m4} (kPa)	P _{ms} (kPa)	W _{tot} (kW)
1	1231.27	8.11	36.18	16.65	-	5.58	26.92	-	1578.05	4019.73	460.13	2838.22
2	1236.47	10.64	32.87	32.41	-	6.61	-	17.47	999.19	3135.56	439.24	2585.26
3	979.17	9.66	37.66	28.40	-	-	9.96	14.32	1003.94	3731.62	402.17	2358.94
4	1161.96	9.16	28.83	-	25.49	1.95	34.57	-	1374.88	3305.73	422.37	2518.10
5	1170.17	9.61	35.98	-	21.64	17.19	-	15.58	1073.82	3346.08	502.21	2344.98
6	1194.55	8.91	24.30	-	37.13	-	15.66	14.00	967.19	2664.01	439.58	2263.55
7	1828.17	8.79	46.34	-	-	35.21	1.83	7.84	1539.48	3600.40	473.84	3792.35

۱-۵ ضرورت وجود اتان یا اتیلن در مبرد آمیخته

دلیل اصلی استفاده از مبرد آمیخته به جای مبرد خالص کمینه‌سازی برگشت‌ناپذیری سامانه به‌وسیله تطابق منحنی‌های مخلوط گرم و سرد است؛ در نتیجه نوع و ترکیب درصد این اجزا باید به نحوی انتخاب شوند که منحنی مبرد در نمودار منحنی‌های مخلوط با منحنی گاز طبیعی، منطبق و نیز تغییرات شیب کمینه باشد. همچنین مقدار کل جریان حرارتی باید کمینه باشد. در نمودارهای مخلوط، جریان حرارتی نشان‌دهنده گرمای دریافت‌شده جریان سرد از دو جریان گرم در مبدل‌های حرارتی است.

در صورتی که اتان و اتیلن در اجزا نباشند (حالت هفتم)، خلأ دمایی در حدود ۱۱۹ °C بین متان و پروپان به وجود می‌آید؛ در نتیجه برای جبران نقش انتقال حرارت اتان و اتیلن در این بازه دمایی، درصد متان و پروپان در مبرد افزایش می‌یابد و تطابق منحنی‌های گرم و سرد در بازه دمایی محدودی انجام می‌شود.

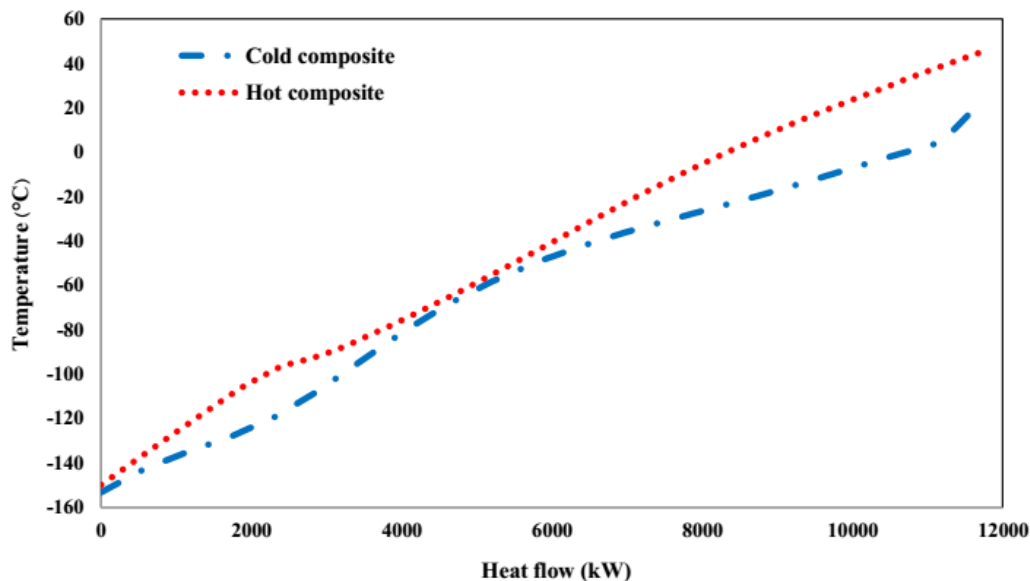
در شکل (۶) منحنی مخلوط مبرد با اجزای نیتروژن، متان، پروپان، ایزوبوتان و ایزوپنتان رسم شده است. بر اساس جدول (۳)، بیش از ۸۱٪ مبرد به متان و پروپان اختصاص داده شده است تا عدم حضور اتان و اتیلن در مبرد جبران شود. از این رو تنها در بازه دمایی خاصی (۴۰ °C تا -۸۰ °C) تطابق مناسبی بین منحنی‌های مخلوط وجود دارد. طبق جدول (۳)، کار مصرفی این حالت ۳۷۹۲/۳۵ kW است که از کلیه حالات دارای اتان یا اتیلن، بیشتر است. این نتیجه ضرورت حضور اتان یا اتیلن در اجزای مبرد را نشان می‌دهد.

۲-۵ مقایسه عملکرد اتان و اتیلن در مبرد آمیخته

برای مقایسه عملکرد اتان و اتیلن در مبرد با ثابت‌نگه‌داشتن اجزای سنگین، عملکرد این دو جزء مقایسه شد. در مبردهای پنج جزئی می‌توان دو جزء از اجزای سنگین را در مبرد استفاده کرد که در ادامه هر سه حالت پروپان- ایزوبوتان (اول و چهارم)، پروپان- ایزوپنتان (دوم و پنجم) و ایزوبوتان- ایزوپنتان (سوم و ششم) گزارش شده است.

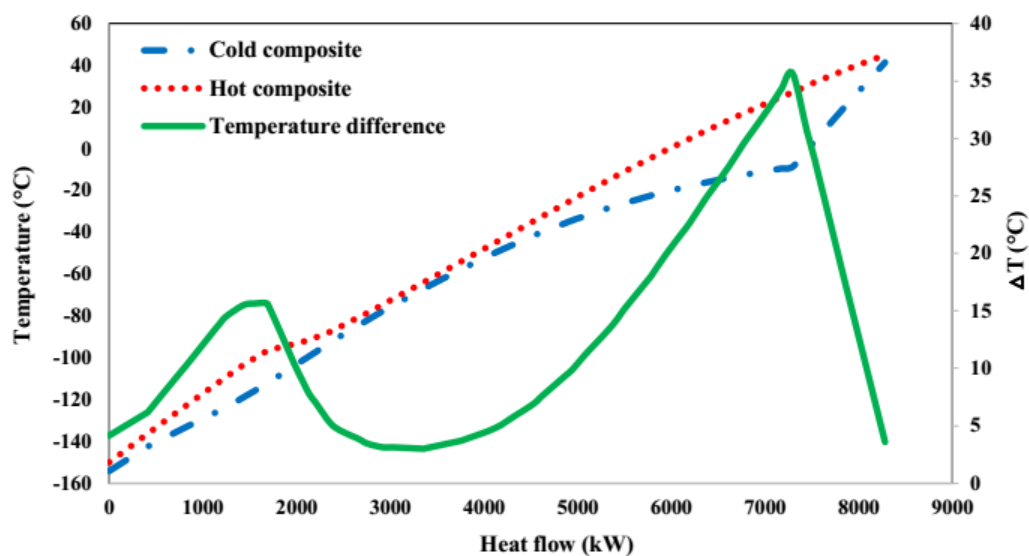
۱-۲-۵ اجزای سنگین: پروپان- ایزوبوتان

در این حالت، اجزای سنگین در سبک‌ترین حالت خود قرار دارد. اجزای ثابت مبرد نیتروژن، متان، پروپان و ایزوبوتان است و اتان به آن‌ها اضافه می‌شود. در حالت اول، کار مصرفی فرایند ۲۸۳۸/۲۲ kW است و طبق شکل (۷) منحنی‌های مخلوط در دو نقطه از یکدیگر فاصله گرفته‌اند و باعث برگشت‌ناپذیری در سامانه شده‌اند. نقطه اول در دمای حدود ۱۰۰ °C - جریان گاز طبیعی است که دو جریان تا ۱۵ °C اختلاف دما پیدا می‌کنند. این دمای حساب گاز طبیعی است و جابه‌جایی مکان وقوع این برگشت‌ناپذیری امکان‌پذیر نیست. برگشت‌ناپذیری دوم در دمای ۵ °C - جریان مبرد فشار پایین رخ می‌دهد که نقطه شبنم مبرد است و اختلاف دما به ۳۵ °C می‌رسد. این برگشت‌ناپذیری قابل جابه‌جایی است و هرچه به سمت راست نمودار حرکت کند، برگشت‌ناپذیری را کاهش می‌دهد.



شکل ۶. منحنی‌های مخلوط گرم و سرد در حالت هفتم.

Figure 6. Hot and cold composite curves in Case 7.

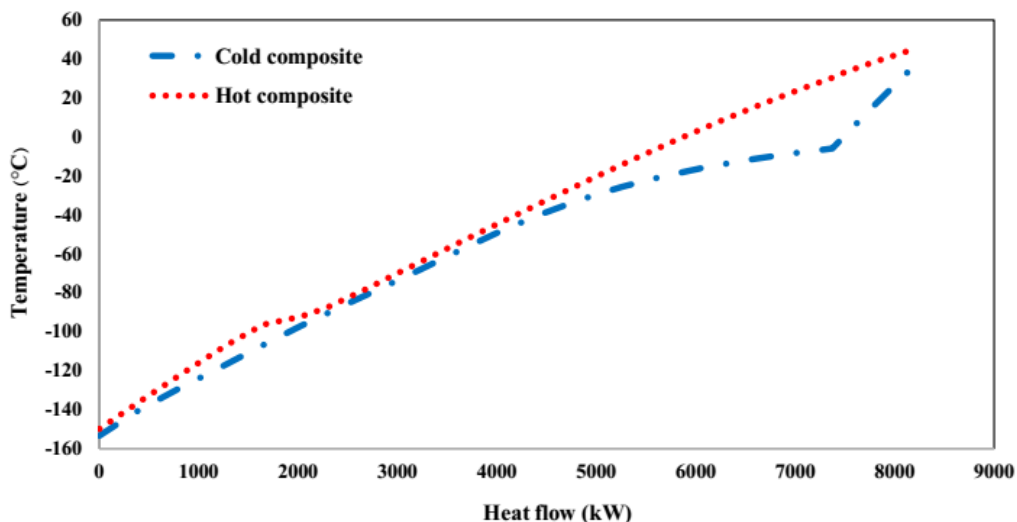


شکل ۷. منحنی‌های مخلوط گرم و سرد در حالت اول.

Figure 7. Hot and cold composite curves in Case 1.

در 2°C دمای شبینم مبرد، منجر و مطابق شکل (۸) در حالت چهارم برگشت‌ناپذیری به سمت راست نمودار جابه جا شده و تطابق بین منحنی‌ها بهبود یافته است.

با جایگزینی اتان با اتیلن در حالت چهارم، کار مصرفی $11/28\%$ کاهش یافته است؛ یکی از دلایل این اتفاق، عمل‌کرد بهتر اتیلن در تأمین حد اقل دمای تبرید است. با جایگزینی اتیلن درصد اجزای سنگین از $32/50\%$ به $36/52\%$ رسیده است. این امر به افزایش



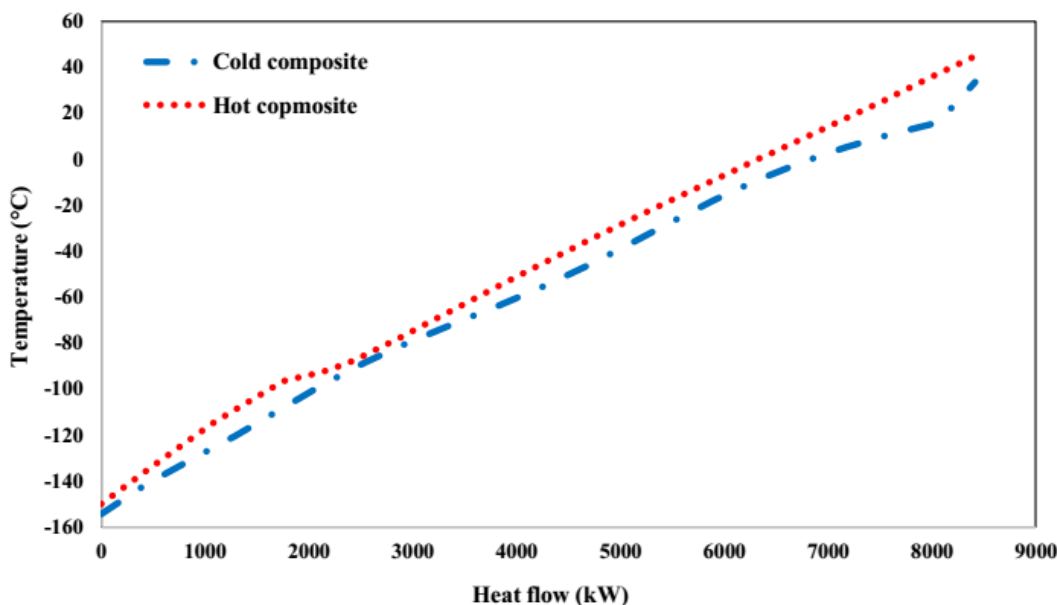
شکل ۸. منحنی‌های مخلوط گرم و سرد در حالت چهارم.

Figure 8. Hot and cold composite curves in Case 4.

فرایند، کاهش و درصد اجزای سنگین ۳۲/۷۷٪ افزایش می‌یابد، در نتیجه اثر تبرید ویژه فرایند افزایش می‌یابد. هم‌چنین تطابق بین منحنی‌های مخلوط در بازه 20°C تا 80°C بهبود چشمگیری دارد.

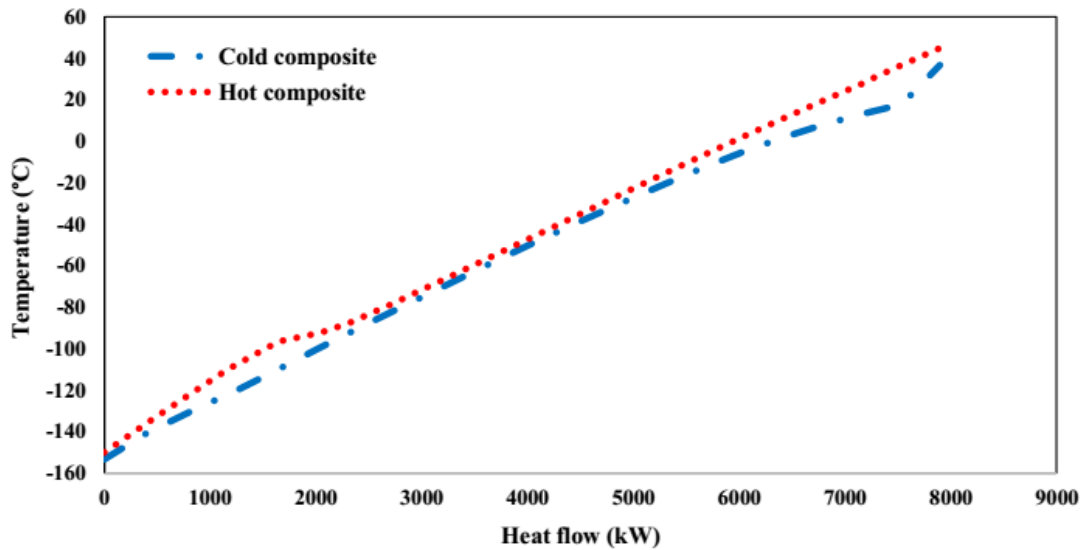
۲-۲-۵ اجزای سنگین: پروپان-ایزوپنتان

در حالت دوم که اتان در مبرد وجود دارد، ۲۴/۰۸٪ از مبرد، اجزای سنگین هستند و کار مصرفی فرایند برابر ۲۵۸۵/۲۶ kW می‌شود. طبق جدول (۳)، با جایگزینی اتان با اتیلن ۹/۲۹٪ از کار مصرفی



شکل ۹. منحنی‌های مخلوط گرم و سرد در حالت دوم.

Figure 9. Hot and cold composite curves in Case 2.



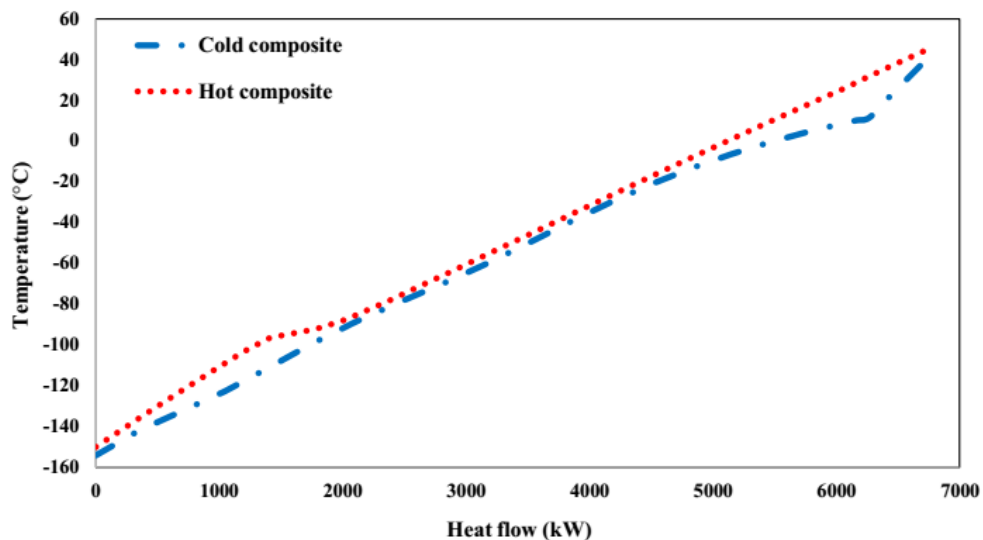
شکل ۱۰. منحنی‌های مخلوط گرم و سرد در حالت پنجم.

Figure 10. Hot and cold composite curves in Case 5.

(حالت ششم)، ۴/۲۱٪ از کار مصرفی فرایند، کاهش و درصد اجزای سنگین به ۲۹/۶۶٪ افزایش می‌یابد. چنان‌که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، تطابق بین منحنی‌های مخلوط گرم در حالت ششم مخصوصاً در بازه دمایی 80°C تا 120°C بهبود یافته و برگشت‌ناپذیری کم شده است.

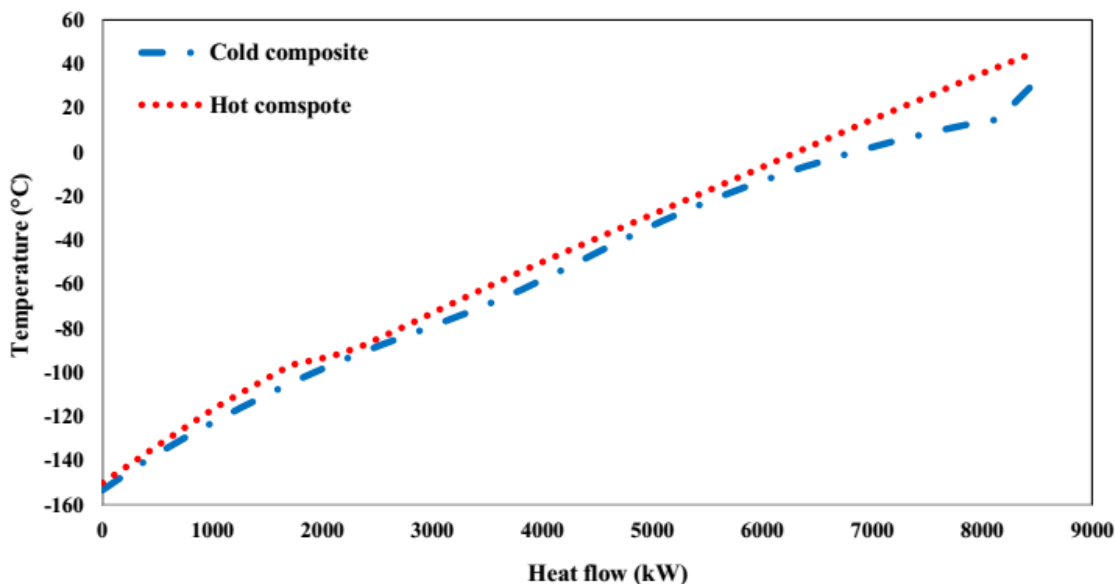
۳-۲-۵ اجزای سنگین: ایزوبوتان- ایزوپنتان

در این بخش نیتروژن، متان، ایزوبوتان و ایزوپنتان اجزای ثابت هستند؛ با افزودن اتان به این اجزا (حالت سوم) و بهینه‌سازی فرایند، کار مصرفی $2358/94\text{ kW}$ می‌شود و ۲۴/۲۸٪ از مبرد به اجزای سنگین اختصاص می‌یابد (شکل (۱۱)). با جایگزینی اتان با اتیلن



شکل ۱۱. منحنی‌های مخلوط گرم و سرد در حالت سوم.

Figure 11. Hot and cold composite curves in Case 3.



شکل ۱۲. منحنی‌های مخلوط گرم و سرد در حالت ششم.

Figure 12. Hot and cold composite curves in Case 6.

۶. نتیجه‌گیری

فرایند PRICO برابر با ۳۷۹۲/۳۵ kW می‌شود که از تمام حالت دیگر که اتان یا اتیلن را در اجزای خود دارند، بیشتر است.

فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی فرایندی انرژی‌بر است و مؤلفه‌های متعددی بر مصرف انرژی فرایند مؤثر هستند. در پژوهش‌های اخیر بیشتر، بهینه‌سازی فشارهای عملیاتی و ترکیب درصد اجزای مبرد آمیخته مورد توجه قرار گرفته و تغییر اجزای مبرد آمیخته به‌عنوان متغیر در نظر گرفته نشده است. نتایج این مقاله نشان داد که انتخاب اجزای مبرد آمیخته یکی از کلیدی‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر کار مصرفی این فرایند است. با توجه به نقطه جوش و خواص ترمودینامیکی نزدیک اتان و اتیلن، معمولاً یکی از این دو ماده در اجزای مبرد استفاده می‌شود. برای مقایسه عملکرد اتان و اتیلن، ابتدا فرایند مایع‌سازی در سه حالت مبرد آمیخته دارای اتان، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شد؛ سپس با جای‌گزینی اتیلن به جای اتان، تأثیر آن بر کار مصرفی بررسی شد. نتایج نشان داد که این جای‌گزینی همواره به کاهش کار مصرفی فرایند منجر می‌شود. در حالتی که اجزای مبرد نیتروژن، متان، پروپان و ایزوبوتان (حالت اول) بودند، کار مصرفی فرایند ۲۸۳۸/۲۲ kW به دست آمد و پس از جای‌گزینی اتان با اتیلن کار مصرفی ۱۱/۲۸٪ کاهش یافت.

هم‌چنین نتایج نشان داد که استفاده از حد اقل یکی از این دو ماده الزامی است و در صورت عدم حضور این اجزا در مبرد، کار مصرفی

فهرست علائم و اختصارات

A	سطح انتقال حرارت (m^2)
c_p	ظرفیت حرارتی ویژه ($J/gmol.K$)
dT	اختلاف دما ($^{\circ}C$)
F_{tot}	دبی مولی مبرد آمیخته ($kgmol/h$)
f	تابع هدف
K	ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m.K$)
m	نرخ جریان مولی ($kgmol/h$)
P	فشار (kPa)
q	گرما (J)
W_{comp}	کار مصرفی کمپرسور (kW)
X	ترکیب درصد مولی
x	متغیر بهینه‌سازی
C_1	متان
C_2	اتان
C_2^*	اتیلن
C_3	پروپان
i- C_4	ایزوبوتان

- [10] Xu, X., Liu, J., Cao, L., "Optimization and analysis of mixed refrigerant composition for the PRICO natural gas liquefaction process", *Cryogenics*, 59, pp. 60-69. (2014).
- [11] Moein, P., Sarmad, M., Ebrahimi, H., Zare, M., Pakseresht, S., Zandie Vakili, Sh., "APCI- LNG single mixed refrigerant process for natural gas liquefaction cycle: Analysis and optimization", *Natural Gas Science and Engineering*, 26, pp. 470-479, (2015).
- [12] Ngoc Pham, T., Van Duc Long, N., Lee, S., Lee, M., "Enhancement of single mixed refrigerant natural gas liquefaction process through process knowledge inspired optimization and modification", *Applied Thermal Energy*, 110, pp. 1230-1239, (2017).
- [13] Ali, W., Qyyum, M., Qadeer, K., Lee, M., "Energy optimization for single mixed refrigerant natural gas liquefaction process using the metaheuristic vortex search algorithm", *Applied Thermal Engineering*, 129, pp. 782-791, (2018).
- [14] Qyyum, M., Van Duc Long, N., Quang Minh, L., Lee, M., "Design optimization of single mixed refrigerant LNG process using a hybrid modified coordinate descent algorithm", *Cryogenics*, 89, pp. 131-140, (2018).
- [15] Wang, X., Li, M., Cai, L., Li, Y., "Propane and isobutane pre-cooled mixed refrigerant liquefaction process for small scale skid-mounted natural gas liquefaction", *Applied Energy*, 275, p. 115333, (2020).
- [16] He, T., Lin, W., "Design and analysis of dual mixed refrigerant processes for high ethane content natural gas liquefaction", *Chinese journal of chemical engineering*, 29, pp. 54-364, (2021).
- [17] He, T., Mao, N., Liu, Z., Abdul Qyyum, M., Lee, M., Pravez, A. M., "Impact of mixed refrigerant selection on energy and exergy performance of natural gas liquefaction processes", *Energy*, 199, p. 117378, (2020).
- [18] Moein, P., Sarmad, M., Khakpour, M., Delaram, H., "Methane addition effect on a dual nitrogen expander refrigeration cycle for LNG production", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, pp. 1-7, (2016).
- [1] Dudley, B., "BP Energy Outlook. Technical report", *British Petroleum*, (2019).
- [2] Lin, W., Zhang, N., Gu, A., "LNG (Liquefied natural gas): A necessary part in China's future energy infrastructure", *Energy*, 35, pp. 4383-4391, (2010).
- [3] He, T., Liu, Z., Ju, Y., Parvez, A. M., "A comprehensive optimization and comparison of modified single mixed refrigerant and parallel nitrogen expansion Liquefaction process for small scale mobile LNG plant", *Energy*, 167, pp. 1-12, (2019).
- [4] Shirazi, L., Sarmad, M., Moghadasi Rostami, R., Moein, P., Zare, M., Mohammadbeygi, Kh., "Feasibility study of the small scale LNG plant infrastructure for gas supply in north of Iran (Case Study)", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, pp.220-229, (2019).
- [5] Lee, W., An, J., Lee, J. M., Lim, Y., "Design of single mixed refrigerant natural gas liquefaction process considering load variation", *Chemical Engineering Research and Design*, 139, pp. 89-103, (2018).
- [6] Ali, W., Abdul Qyyum, M., Qadeer, K., Lee, M., "Energy optimization for single mixed refrigerant natural gas liquefaction process using the metaheuristic vortex search algorithm", *Applied Thermal Engineering*, 129, pp. 782-79, (2018).
- [7] Xu, X., Liu, J., Cao, L., "Optimization and analysis of mixed refrigerant composition for the PRICO natural gas liquefaction process", *Cryogenics*, 59, pp. 60-69, (2014).
- [8] Mekarizadeh Haghighi Shirazi, M., Mowla, D., "Energy optimization for liquefaction process of natural gas in peak shaving plant", *Energy*, 35, pp. 2878-2885, (2010).
- [9] Shariq Khan, M., Lee, M., "Design Optimization of single mixed refrigerant natural gas liquefaction process using the particle swarm paradigm with nonlinear constraints", *Energy*, 49, pp. 146-155, (2013).

ایزوپنتان	i-C ₅
نیتروژن	N ₂
نرمال بوتان	n-C ₄
نرمال پنتان	n-C ₅
گرمای نهان تبخیر (kJ/kgmol)	λ

مراجع