

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2021.248772.1048



DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.116.1.6

## Power and Steam Production Using Exhaust Gas Recovery to the Flare of Jam Petrochemical LLDPE Unit

S. R. Ghorbani Khoshkroudi<sup>1,3</sup>, Y. Rabbani<sup>2,3</sup>, O. Tavakoli<sup>4\*</sup>

1- Process Expert, Jam Petrochemical Company

2- Production Technician, Petropars Operation and Management Company

3- Ph.D. Student in Chemical Engineering, University of Tehran

4- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Tehran

Email: otavakoli@ut.ac.ir

### Abstract

*Due to the separation of light and heavy phases in the distillation towers of the petrochemical industries, some hydrocarbons have been burned in the flare. Combustion of these gases produces toxic and dangerous gases by the flare and vent into the environment. In the stripping tower of Jam Petrochemical LLDPE Unit, a large number of hydrocarbons is released from the top of the tower. In this study, by providing a suitable solution, toxic and dangerous gases can be prevented from entering the atmosphere, and also the energy of fossil fuels and their compounds can be used from an economic point of view. Therefore, the combined cycle has been used to produce power and water vapor useful for the unit itself. To enable power and steam production, the output results of the unit, as well as the combined cycle, have been simulated using ASPEN-PLUS software. The results showed that the use of the combined cycle produces 29.9 MW of power and also 3500 kg/h of steam. From this amount of power generated, all the required electricity related to the compressor of the linear light polyethylene unit can be supplied, and also the generated steam can cover the steam related to the steamer area and prevent the entry of toxic and dangerous gases into the environment.*

Received: 18 September 2020

Accepted: 25 February 2021

Page Number: 7-20

### Keywords:

LLDPE Unit,  
Flare,  
Combined Cycle,  
Gas Turbine,  
Steam Cycle

### Please Cite this Article Using:

Ghorbani Khoshkroudi, S. R., Rabbani, Y., Tavakoli, O., "Power and Steam Production Using Exhaust Gas Recovery to the Flare of Jam Petrochemical LLDPE Unit", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. 116, pp. 7-20, In Persian, (2021).

## تولید توان و بخار با استفاده از بازیابی گازهای خروجی به سمت مشعل واحد پلی اتیلن سبک خطی پتروشیمی جم

سید روح الله قربانی خشکرودی<sup>۱</sup>، یحیی ربانی<sup>۲</sup>، امید توکلی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس فرایند، شرکت پتروشیمی جم

۲- کارشناس ارشد تولید، شرکت بهره برداری و مدیریت پتروپارس

۳- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۴- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

پیام نگار: otavakoli@ut.ac.ir

### چکیده

با توجه به این که ترکیبات سبک و سنگین در برج های تقطیر مربوط به صنعت پتروشیمی، نفت و گاز جداسازی مناسب ندارند؛ مقادیری هیدروکربن در مشعل<sup>۱</sup> سوزانده می شود. احتراق این گازها در مشعل موجب تولید گازهای سمی و خطرناک در محیط زیست می شود. در برج عاری ساز واحد پلی اتیلن سبک خطی پتروشیمی جم، میزان زیادی هیدروکربن از بالای مشعل سوزانده می شود. در این مقاله، راهکاری مناسب برای جلوگیری از ورود گازهای سمی و خطرناک به اتمسفر و همچنین استفاده از انرژی سوخت فسیلی و ترکیبات آن از منظر اقتصادی ارائه شده و از چرخه ترکیبی، برای تولید توان و بخار آب مفید برای خود واحد استفاده شده است. برای امکان سنجی تولید توان و بخار، نتایج خروجی از واحد و همچنین چرخه ترکیبی به کمک نرم افزار اسپن شبیه سازی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از چرخه ترکیبی، به میزان ۲۹/۹ مگاوات توان و همچنین به میزان ۳۵۰۰ کیلوگرم بر ساعت بخار تولید می کند. توان تولید شده می تواند برق مورد نیاز کمپرسور واحد پلی اتیلن سبک خطی و همچنین بخار مربوط به ناحیه استیمر را تأمین کند. با اجرای این طرح، می توان علاوه بر برتری های اقتصادی، مانع از ورود گازهای سمی و خطرناک به محیط زیست شد.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۰۷

شماره صفحات: ۷ تا ۲۰

### کلیدواژه ها:

واحد پلی اتیلن سبک خطی،

مشعل،

چرخه ترکیبی،

توربین گازی،

چرخه بخار

\* تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده های فنی

### استناد به مقاله:

قربانی خشکرودی، س. ر.، ربانی، ی.، توکلی، ا.، "تولید توان و بخار با استفاده از بازیابی گازهای خروجی به سمت مشعل واحد پلی اتیلن سبک خطی پتروشیمی جم"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۶، صص. ۷-۲۰، (۱۴۰۰).

## ۱. مقدمه

آزادشدن فزاینده گازهای گلخانه‌ای از فرایندهای سوختن گاز محیط‌زیست را در معرض خطر جدی قرار داده است. در حال حاضر، حجم کل گازهای شعله‌ور شده در سطح جهان سالانه ۱۰۰ میلیارد متر مکعب (BCM) است [۱]. در کاربردهای صنعتی، برای کنترل فشار سامانه و ابزارهای ایمنی، از شبکه‌های گازی استفاده می‌شود. در انتهای این شبکه، گازهای اضافی در برج مشعل سوزانده می‌شوند، که زیان‌های بسیاری بر محیط زیست وارد می‌کند. سوزاندن این گازها یکی از بحث برانگیزترین موضوعات امروزی صنعت نفت و گاز است [۲]. گازهای سوزانده‌شده در مشعل را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله، توزیع مجدد در شبکه‌های توزیع گاز طبیعی، حمل و نقل از راه خط لوله، تزریق مجدد برای بازیافت بیشتر گاز به‌عنوان مواد اولیه برای تولید محصولات پتروشیمی و هم‌چنین برای تولید برق به‌منظور کاهش و یا بازیابی استفاده کرد [۳].

نیروگاه چرخه ترکیبی شامل توربین بخار و توربین گازی است که ژنراتور توربین گازی برق را تولید می‌کند و بخار مورد نیاز توربین بخار از انرژی حرارتی تلف‌شده از توربین گاز (به‌وسیله محصولات احتراق) تأمین و سپس به برق اضافی تبدیل می‌شود. راه حل کارآمد، قابل اعتماد، اقتصادی و سازگار با محیط زیست برای تولید برق، استفاده از نیروگاه‌های چرخه ترکیبی است. با استفاده از این چرخه، بهره‌وری نیروگاه افزایش پیدا می‌کند. بازده الکتریکی این چرخه از یک چرخه ساده نیروگاه برق بدون استفاده از اتلاف گرما از حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد به حدود ۶۰ درصد می‌رسد.

مطالعات زیادی بر روی تجزیه فرایندها برای تولید برق با استفاده از واحد پیش احتراق [۴]، واحد ریفرمینگ حرارتی [۵-۶]، واحد ریفرمینگ متان و بخار [۷] انجام شده است. هم‌چنین تجزیه سامانه‌های لوپ شیمیایی با تمرکز بیشتر بر روی تولید هیدروژن در ریفرمینگ متان و بخار انجام شده است [۸].

جعفری نصر و همکاران در سال ۱۳۹۴ به شبیه‌سازی واحد بهسازی یک پارچه چرخه ترکیبی با هدف تولید توان و کاهش گازهای گلخانه‌ای پرداختند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند ریفرمینگ یک پارچه چرخه ترکیبی نشان داد که میزان بازده ۵۰/۸ درصد بوده

که ۶/۱ درصد افزایش را نسبت به متوسط بازده نیروگاه‌های چرخه ترکیبی نشان می‌دهد که این مقدار افزایش بازده برای نیروگاه‌ها حائز اهمیت است. هم‌چنین مقدار کل برق ناخالص حاصل از فرایند به ۵۳۴ مگاوات رسید [۹].

جهانکه و همکاران در سال ۱۹۹۸ به بررسی فناوری با بازده بالا IGCC در صنعت M501G ژاپن با استفاده از توربین‌های پیشرفته و واحد جداسازی هوا و فناوری گاززدایی پرداختند. نتایج بهینه‌سازی برای سودآوری معادل ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ دلار بر هر کیلووات بر مبنای هزینه کلی بود [۱۰].

محدنظر و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تجزیه چرخه ترکیبی تولید برق با استفاده از اصلاح حلقه ریفرمینگ از گاز طبیعی و کربن‌دی‌اکسید دریافت‌شده از واحد پیش‌احتراق پرداختند و شبکه‌های مختلفی برای تولید برق طراحی و ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که این شبکه‌ها قابلیت افزایش تا ۴۷ درصد را با تولید بخار با فشار بالا و بازیابی حرارتی از واحد پیش‌احتراق و ارسال آن به واحد تولید برق و بازیابی بخار دارد [۱۱]. روبرت‌بات و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از دو روش بهینه سوزاندن گازهای ارسالی به مشعل را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از میکرو توربین‌ها برای تولید برق و استفاده از کمپرسور برای تراکم گاز یک روش مناسب برای بازیافت گازهای مازاد در پالایشگاه انتخاب کردند و به بررسی فنی و اقتصادی آن پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از کاهش گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده فرایند بود [۱۲].

قربانی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با تحقیق در مورد بازیابی گازهای فلر و تبدیل آن به انرژی برق و ارائه راهکارهایی برای مدیریت و کنترل فلرینگ پالایشگاه و کاهش آلودگی محیط نتیجه گرفتند که تولید جریان برق با استفاده از کمپرسورهای رفت و برگشتی، بهترین روش اقتصادی برای بازیابی گازهای فلر خواهد بود [۱۳].

شایان و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به مقایسه چهار روش برای بازیابی گازهای مشعل از جمله تولید بخار فشار بالا، توربین بخار، تولید برق و گرما و چرخه ترکیبی با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزار اسپن‌هایسیس پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش چرخه ترکیبی بازده اقتصادی بالاتر و ذخیره انرژی بیشتری دارد [۱۴].

1. Billion Cubic Meters

کاتالیست‌های زیگلر-ناتا (تیتانیوم بر پایه منیزیم کلرید) و راکتورهای فاز گازی برای تولید گریدهای بسیار متنوع پلی‌اتیلن سبک خطی بهره می‌گیرد. در شکل (۱) نمودار جعبه‌ای واحد پلی‌اتیلن سبک خطی پتروشیمی جم ارائه شده است و با استفاده از شیشه‌سازی، چرخه ترکیبی مورد نظر برای تولید بخار و توان ارائه شده است. در این مقاله سعی شده است که به منظور حفظ محیط زیست و ذخیره انرژی‌های فسیلی از هدر رفت این میزان از انرژی استفاده بهینه شده، انرژی پاک مانند برق به وسیله چرخه ترکیبی تولید شود.

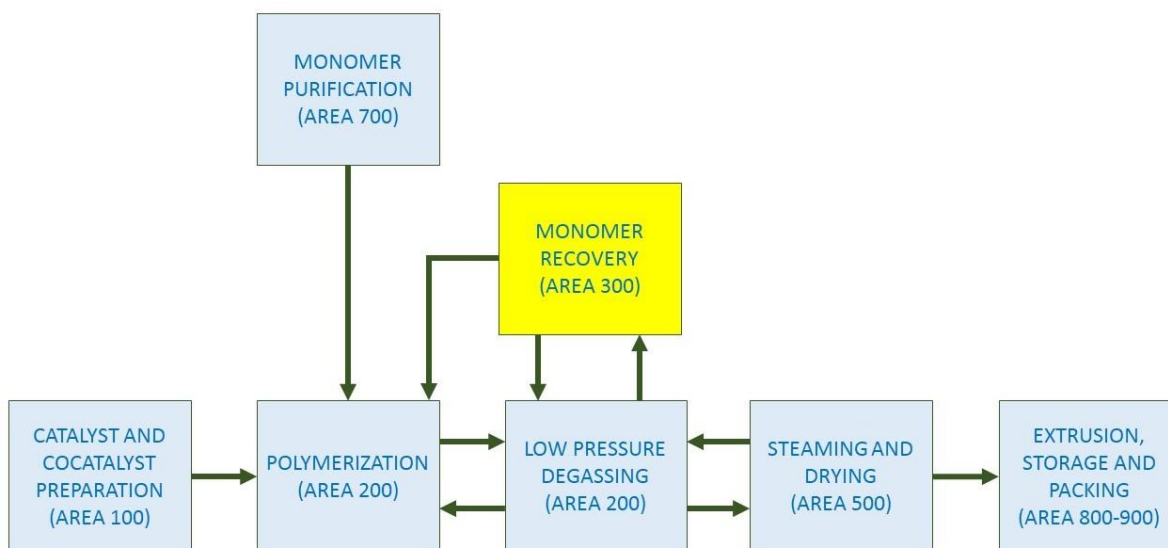
شرکت پتروشیمی مبین برای تأمین سرویس‌های جانبی پتروشیمی‌های واقع در عسلویه با استفاده از روش چرخه ترکیب بخار میزان توان برق و بخار آب توانسته تأمین کند؛ لذا اگر پتروشیمی جم بتواند درون واحد خود میزان خرید سرویس‌های جانبی‌اش را کم کند در عمل توانسته هم حاشیه سود بیشتری برای خود شرکت ایجاد و هم از هدر رفت سوخت جلوگیری کند.

همچنین خروجی گازهای‌های راکتور فاز گازی دوم از راه کمپرسور (Pk-3002) وارد مبدل و سپس درام (D-3021) می‌شود که این موارد که شامل جریان‌های ورودی و خروجی به درام‌ها هستند در شکل (۳) نشان داده شده است.

به طور کلی در این مقاله با توجه به سوزانده شدن مقادیر زیادی از هیدروکربن‌ها در فلر، با هدف بازیابی انرژی و رعایت مسائل زیست‌محیطی راهکار لازم برای واحد پلی‌اتیلن سبک خطی پتروشیمی جم ارائه شده است و با استفاده از شیشه‌سازی، چرخه ترکیبی مورد نظر برای تولید بخار و توان ارائه شده است. در این مقاله سعی شده است که به منظور حفظ محیط زیست و ذخیره انرژی‌های فسیلی از هدر رفت این میزان از انرژی استفاده بهینه شده، انرژی پاک مانند برق به وسیله چرخه ترکیبی تولید شود. شرکت پتروشیمی مبین برای تأمین سرویس‌های جانبی پتروشیمی‌های واقع در عسلویه با استفاده از روش چرخه ترکیب بخار میزان توان برق و بخار آب توانسته تأمین کند؛ لذا اگر پتروشیمی جم بتواند درون واحد خود میزان خرید سرویس‌های جانبی‌اش را کم کند در عمل توانسته هم حاشیه سود بیشتری برای خود شرکت ایجاد و هم از هدر رفت سوخت جلوگیری کند.

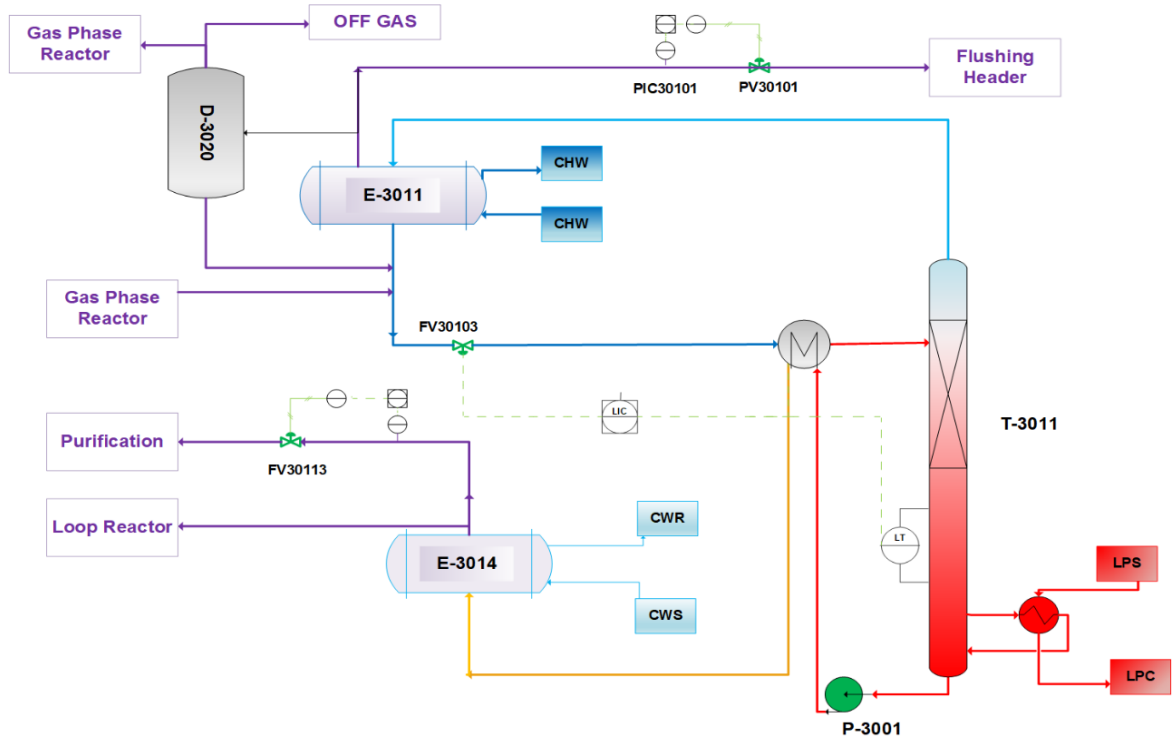
## ۲. شرح فرایند و روش انجام کار

واحد پلی‌اتیلن سبک خطی شرکت پتروشیمی جم، تحت لیسانس بازل و به ظرفیت سالانه ۳۰۰ هزار تن است. این واحد از



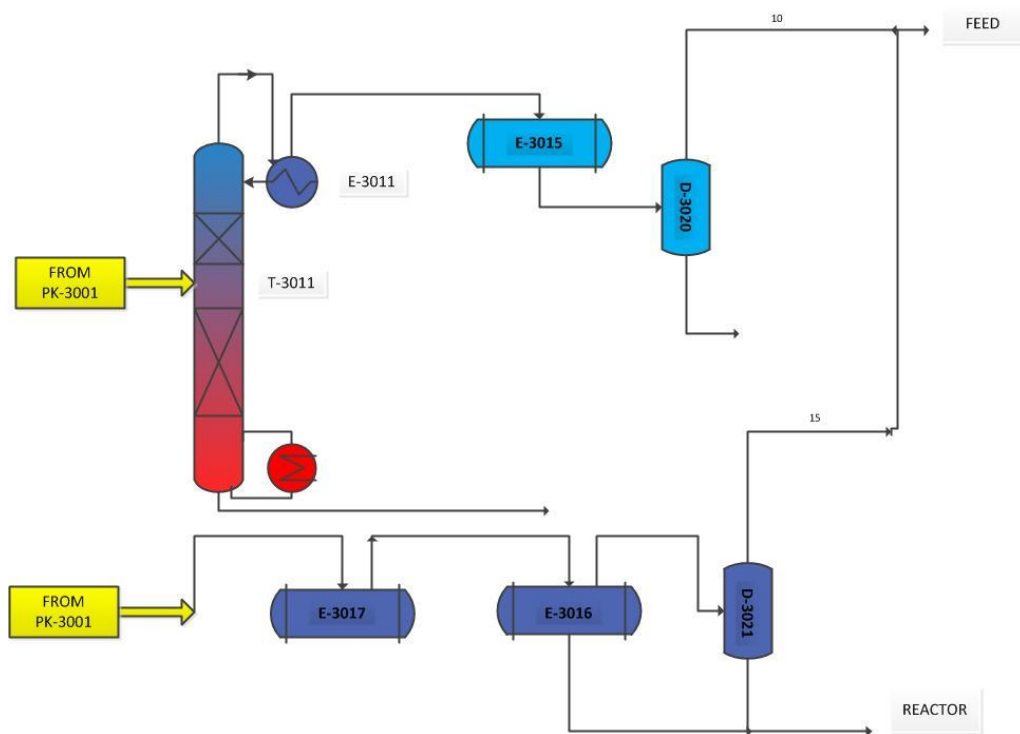
شکل ۱. نمودار جعبه‌ای واحد پلی‌اتیلن سبک خطی جم.

Figure 1. LLDPE Block Diagram Phase.



شکل ۲. بخش برج عاری‌ساز و خروجی جریان‌ها.

Figure 2. The stripping tower section.



شکل ۳. طرحواره جریان ورودی و خروجی به درام‌های D-3020 و D-3021.

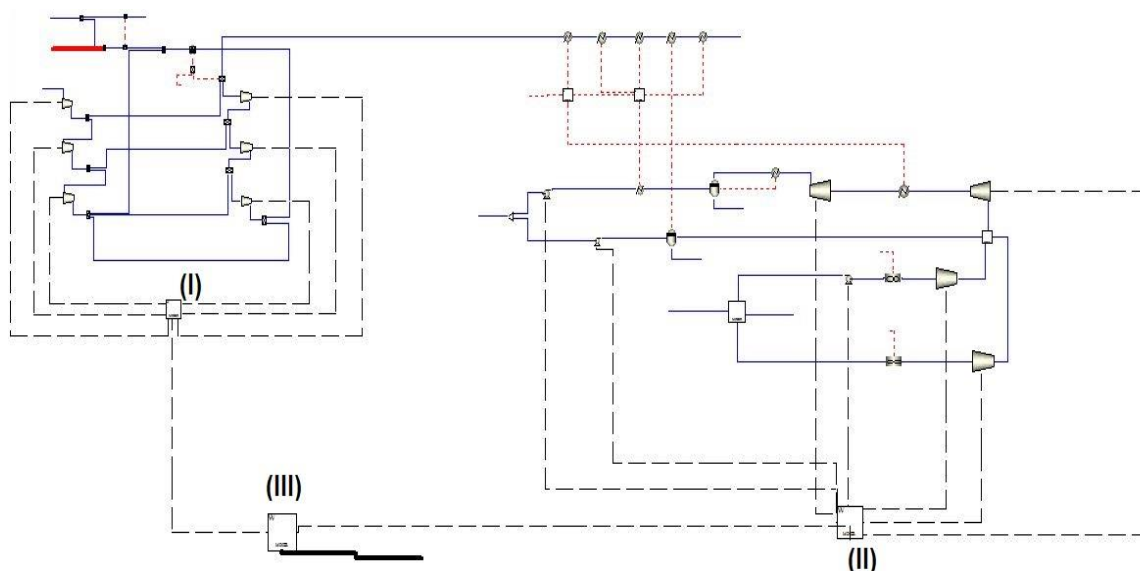
Figure 3. Input/output stream to D-3020 and D-3021 configuration.

### ۳. شبیه‌سازی فرایند و تحلیل نتایج

هدف اصلی تولید انرژی حرارتی به انرژی جنبشی و تبدیل آن به انرژی مکانیکی و تولید برق است که برای رسیدن به آن نیاز است تا خوراک خروجی از دو درام ذکر شده (Feed)، سوزانده شود و سپس از گرمای حاصل از سوختن به وسیله توربین‌های موجود به توان تبدیل شود که این مهم در دو بخش آتی به تفصیل بیان شده است. با استفاده از نرم‌افزار ASPEN- PLUS جریان خروجی از درام‌ها و همچنین معادله حالت RKS-BM<sup>۱</sup> به دلیل غیرقطبی بودن خوراک تعریف شده است [۱۶-۱۵]. شبیه‌سازی این بخش مطابق با شکل (۵) انجام شده است. جریان خروجی درام به سمت فلر به عنوان خوراک (Feed) نام‌گذاری شده است. خوراک با استفاده از بخار داغ به حالت اشباع تبدیل شده است؛ دلیل اشباع کردن خوراک، هم برای تنظیم دمای خود خوراک و هم به منظور تبدیل فاز آن‌ها به حالت اشباع است. با استفاده از Design Spec دمای خوراک ورودی را با استفاده از دبی بخار داغ بر روی ۲۹۸ درجه سلسیوس تنظیم شده و میزان اشباع شدن بخار به دست آمده است.

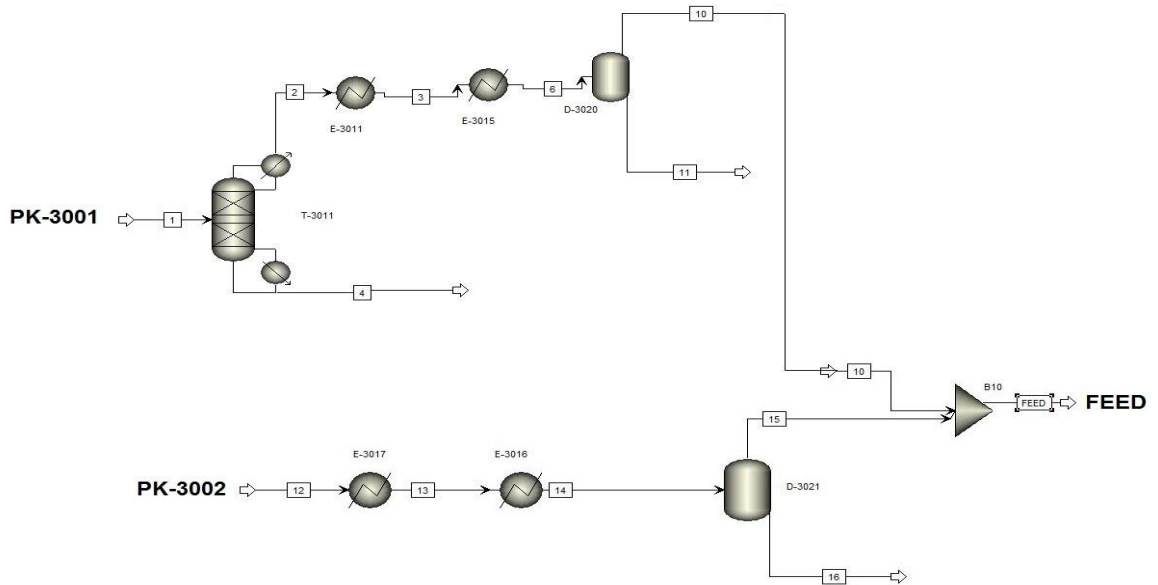
هدف اصلی در این مقاله، تولید توان و بخار با استفاده از چرخه ترکیبی است. تولید هم‌زمان این دو انرژی کاری بسیار مفید هم در ذخیره‌سازی انرژی و هم در جلوگیری از هدر رفت سوخت فسیلی است. از آنجایی که تمامی سرویس‌های جانبی پتروشیمی جم از پتروشیمی مبین دریافت می‌شود؛ لذا با استفاده از این فناوری دیگر نیازی به تأمین دو انرژی بسیار گران خود را نخواهد داشت و همچنین استفاده از این روش مانع ورود هیدروکربن‌های سمی به محیط زیست و سوزاندن آن می‌شود. استفاده از این چرخه ترکیبی از طرح‌های نو و ابداعی است که شبیه‌سازی آن با استفاده از نرم‌افزار اسپن‌هایسیس در این مقاله انجام و در ادامه به جزئیات آن پرداخته شده است.

همان‌طور که بیان شد از خروجی جریان به سمت فلر به عنوان ورودی این چرخه استفاده خواهد شد؛ ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ASPEN- PLUS شبیه‌سازی شده است تا جریان خروجی از درام‌ها به دست آید. در مقاله حاضر تولید توان از ۳ بخش تشکیل شده است: بخش I که شامل توان‌های مورد نیاز در قسمت توربین‌گازی است، بخش II شامل قسمت چرخه بخار است و در آخر، بخش III که جمع تمامی توان‌های دو ناحیه قبلی است که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. طرحواره‌ای از چرخه ترکیبی طراحی شده برای تولید توان در واحد پلی‌اتیلن سبک خطی جم.

Figure 4. Combined cycle configuration for generation power of LLDPE unit.



شکل ۵. شبیه‌سازی جریان ورودی و خروجی به درام‌های D-3021 و D-3020.

Figure 5. Simulation of D-3020 and D-3021 with input/output streams.

خروجی از این درام‌ها عمدتاً شامل هیدروکربن‌های سبک است. بازگردانده نمی‌شود و این گازهای خروجی از درام‌های D-3020 و D-3021 به سمت فلر هدایت می‌شوند که به‌عنوان خوراک ورودی به چرخه ترکیبی در نظر گرفته شده است. ترکیب درصد اجزای این خروجی در جدول (۱) آورده شده است. هیدروکربن‌های موجود در خروجی درام‌ها به سامانه

جدول ۱. مواد و ترکیب درصد گازهای خروجی (خوراک ورودی به چرخه ترکیبی).

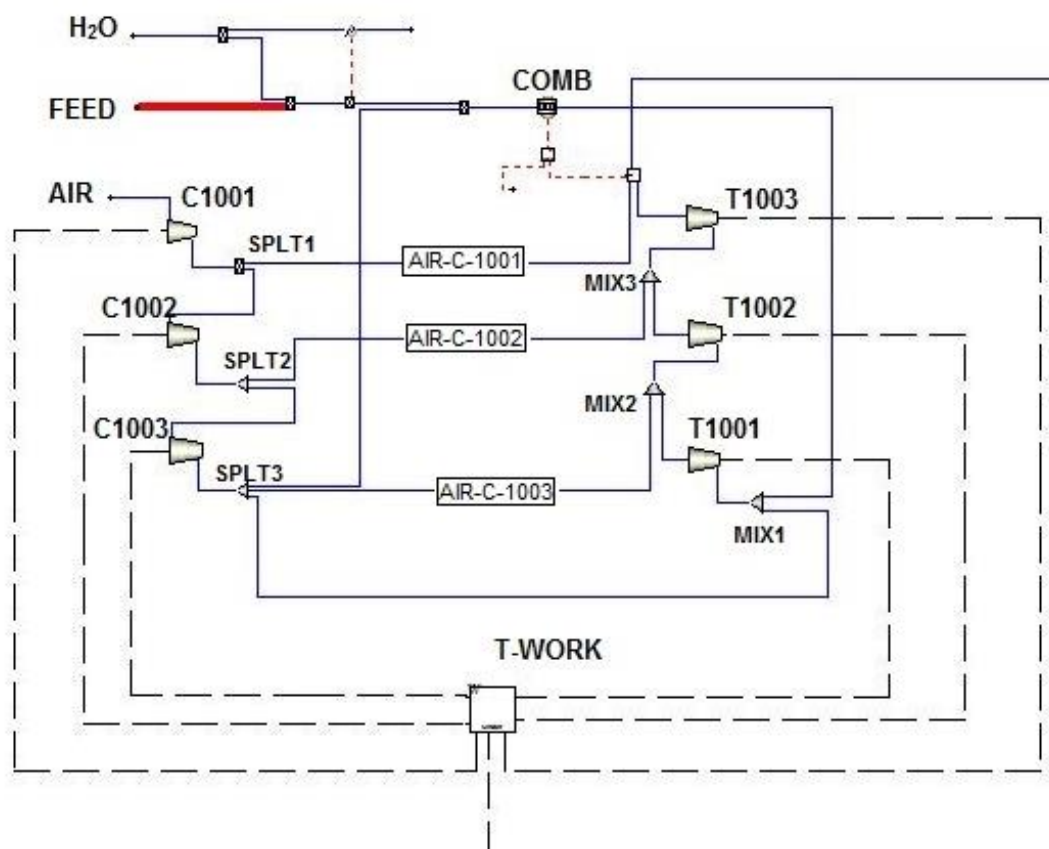
Table 1. Components and composition of exhaust gas (Input to combined cycle).

Stream Position	10 (Drum 1)	15 (Drum 2)	Feed
Flow rate (kg/h)	2261	4400.98	6600.908
Phase	Vapor	Vapor	Vapor
Operation Temperature (°C)	15	20	15.9
Operation Pressure (barg)	28	29	29
Density (kg/m <sup>3</sup> )	30.61	56.4	69.7
Molecular Weight	41.13	37.62	43.6
Hydrogen (kg/h)	1	118	119
Ethylene (kg/h)	780	1520	2300
Ethane (kg/h)	80	310	390
Propane (kg/h)	1400	2400	3800

### ۳-۱ بخش چرخه توربین گازی (ناحیه I)

در این بخش خوراک وارد محفظه احتراق<sup>۱</sup> شده، با هوا سوزانده می‌شود و پس از آن با استفاده از توربین‌ها (T1001، T1002 و T1003) گرمای حاصل به توان تبدیل می‌شود. به هوایی با فشار ۱۵/۵ بار و دمای محیط نیاز است؛ لذا برای تبدیل فشار هوا از ۱ به ۱۵/۵ بار نیاز به ۳ مرحله متراکم کردن هواست. در مرحله نخست هوا وارد کمپرسور C1001 می‌شود و فشار خروجی از مرحله اول به ۲/۳۶ بار می‌رسد؛ سپس این جریان ۲ قسمت می‌شود، یک قسمت (۵٪) برای خنک‌سازی گازهای خروجی از توربین T1003 که با نام AIR-C-1001 معرفی شده است و مابقی آن یعنی AIR3 وارد C1002 می‌شود و فشار خروجی از کمپرسور مرحله دوم به ۵/۶۵ بار می‌رسد؛ سپس مانند مرحله اول، خروجی را به ۲ شاخه تبدیل می‌کند و ۵٪ از آن را که با نام AIR4 معرفی شده است برای خنک‌کردن گازهای خروجی از توربین T1002 فرستاده می‌شود و

باقی جریان یعنی AIR5 وارد مرحله آخر می‌شود و فشار هوا به ۱۵/۵ بار می‌رسد و وارد محفظه احتراق می‌شود، با توجه به گرمازا بودن واکنش، دما به ۱۲۸۸ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. سپس گاز خروجی وارد توربین‌های T1001، T1002 و T1003 شده، باعث تولید توان می‌شود. حاصل جمع توان تولیدشده منهای توان مصرف‌شده در کمپرسورها، توان مفید در قسمت توربین و کمپرسور را نتیجه می‌دهد. به‌منظور مطلوب‌بودن واکنش سوختن خوراک و هوا لازم است که دبی هوا ۲۵-۱۸٪ دبی خوراک باشد؛ چرا که اگر دبی هوا کم باشد احتراق ناقص است و هم‌چنین اگر دبی هوا زیاد باشد موجب می‌شود که هوا از خروجی بیشتر شده، منجر به کاهش دمای واکنش شود که این پدیده برای واکنش نامطلوب است. مقدار دبی هوا ۱۸٪ دبی خوراک برای بهینه‌سازی شرایط در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. دیاگرام شبیه‌سازی چرخه توربین گازی (ناحیه I).

Figure 6. Simulation of gas turbine flowsheet (I section).



همان‌طور که از جدول بالا مشاهده می‌شود میزان توان مفید تولیدی برابر با ۱۸/۸۴ مگاوات خواهد شد.

### ۳-۲ بخش چرخه بخار (ناحیه II)

چرخه بخار شامل بخش بازیافت حرارتی<sup>۱</sup> (HRSG)، توربین بخار و سایر تجهیزات کمکی است. گازهای احتراقی داغ خروجی از توربین به بخش تولید بخار با استفاده از بازیافت حرارتی فرستاده می‌شود. به‌منظور تولید بخار دما بالا از حرارت گازهای داغ خروجی از توربین استفاده می‌شود. بخار تولیدشده در توربین بخار، منبسط و در نتیجه کار شفت تولید می‌شود و در نهایت به توان تبدیل می‌شود.

بخش بازیافت حرارتی شامل مبدل‌های حرارتی گاز-گاز، گرم‌کن‌ها، تبخیرکننده‌ها و سوپرهیت‌هاست که گرمای محسوس گازهای داغ خروجی از توربین گاز را بازیابی و به‌وسیله آن بخار آب تولید می‌کند. به‌منظور پیش‌گرم‌کردن آب تغذیه جوش‌آور، گرم‌کردن دوباره بخار آب فشار متوسط، تولید بخار بالا و فشار ۷ بار و سوپرهیت کردن بخار فشار بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمودار جریان بخش بازیافت حرارتی در شکل (۷) نمایش داده شده است.

بخش بازیافت حرارتی شامل یک سوپرهیت با فشار کاری ۱۰۰ بار، یک گرم‌کن با دمای کاری ۵۳۵ درجه سلسیوس، دو اکونومایزر، یک جوش‌آور فشار بالا و یک جوش‌آور فشار پایین است. جوش‌آور فشار پایین به‌منظور تولید بخار برای قسمت هواگیری برای گاز دودکش که در دمای ۱۸۵ درجه سلسیوس اکونومایزر را ترک می‌کند به‌کار می‌رود. اتلاف حرارتی فرایند HRSG از راه بلاک QSPLIT شبیه‌سازی شده است. فرایند سردسازی گازهای داغ خروجی از توربین گاز از راه یک سری مبدل‌های حرارتی به‌نام‌های SH-HRSG، HRSG، HP-HRSG، E2-HRSG، LP-HRSG و E1-HRSG شبیه‌سازی شده است. گرمای بازیافت‌شده از مبدل‌های حرارتی SH-HRSG، E1-HRSG و E2-HRSG به‌وسیله یک میکسر به‌نام QMIX جمع می‌شود. هم‌چنین باقیمانده گرمای بازیافت‌شده با مبدل حرارتی SH-HRSG به‌وسیله بلاک QSPLIT به سه جریان گرمایی تقسیم می‌شود که یکی از این سه جریان نمایش‌دهنده اتلاف حرارتی است. جریان گرمایی دیگر به بخش توربین بخار فرستاده می‌شود و جریان گرمایی آخر نیز در بلاک QMIX با سایر جریان‌های گرمایی جمع می‌شود.

1. Heat Recovery Steam Generator

محفظه احتراق به‌وسیله یک بلاک راکتور استوکومتری شبیه‌سازی شده است. افت فشار محفظه احتراق برابر با ۴٪ فشار ورودی به محفظه احتراق در نظر گرفته می‌شود. گازهای داغ حاصل از احتراق در یک توربین منبسط‌کننده سه مرحله‌ای منبسط می‌شود که به‌وسیله بلاک‌های T1001، T1002 و T1003 شبیه‌سازی شده است. مشابه حالت قبل، نسبت فشار در هر یک از مراحل توربین، یکسان فرض می‌شود. بنا بر این نسبت فشار را در هر مرحله می‌توان به‌صورت معادله زیر حساب کرد که در آن نسبت فشار هر یک از مراحل با  $r_{T,i}$ ، نسبت فشار کل توربین با PR و تعداد مراحل توربین نیز با  $i$  نمایش داده شده است. در واقع فشار خروجی از هر مرحله با استفاده از نسبت فشار و فشار ورودی، قابل محاسبه است [۱۴].

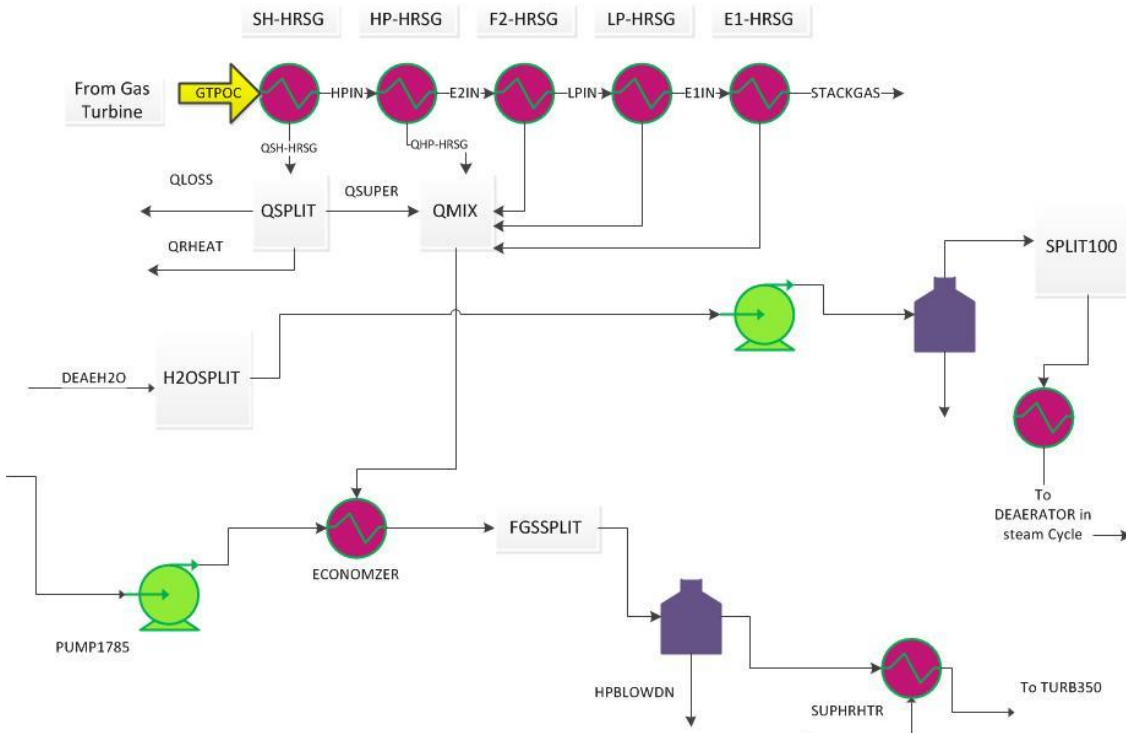
$$r_{T,i} = PR^{1/3} \quad (1)$$

قبل از هریک از مراحل توربین گازی یک بلاک اختلاط‌کننده قرار دارد که به‌وسیله بلاک‌های MIX1، MIX2 و MIX3 شبیه‌سازی شده است. در این بلاک‌ها هوای خنک‌کاری فرستاده شده از کمپرسور با جریان گاز ورودی به هریک از مراحل توربین مخلوط می‌شود. گازهای داغ خروجی از آخرین مرحله توربین به‌منظور تولید بخار با دما و فشار بالا به بخش چرخه بخار فرستاده می‌شود (تیترا ۲-۳ - ناحیه ۲). پس از شبیه‌سازی نهایی، می‌توان کار تولیدی و مصرفی هریک از توربین‌ها و کمپرسورها را جمع کرد که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. مقدار کار تولیدی و مصرفی در بخش‌های مختلف چرخه توربین گازی.

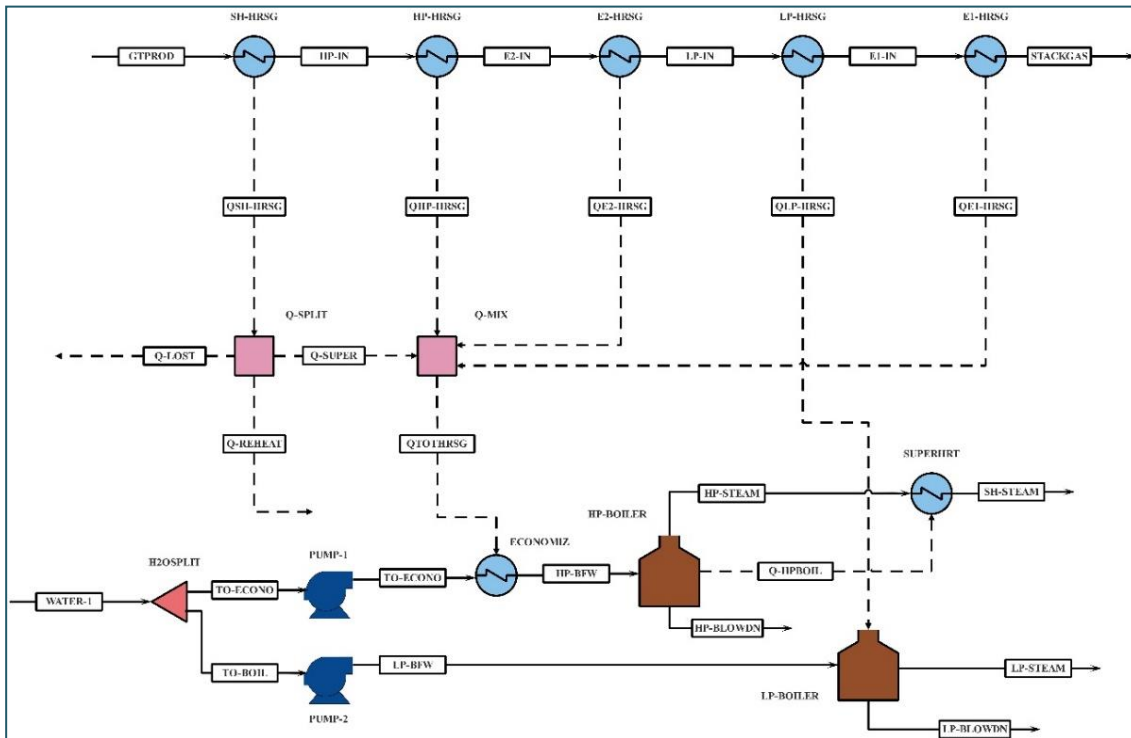
Table 2. Power generation and consumption by various section of turbine gas system.

Equipment name	Power (w)
C3001	5290400
C3002	7080455
C3003	8884273
T3001	-11139232
T3002	-13483904
T3003	15474471
Total	-18842479



شکل ۷. طرحواره کلی جریان واحد بازیافت حرارتی.

Figure 7. The schematic diagram of the heat recovery system.

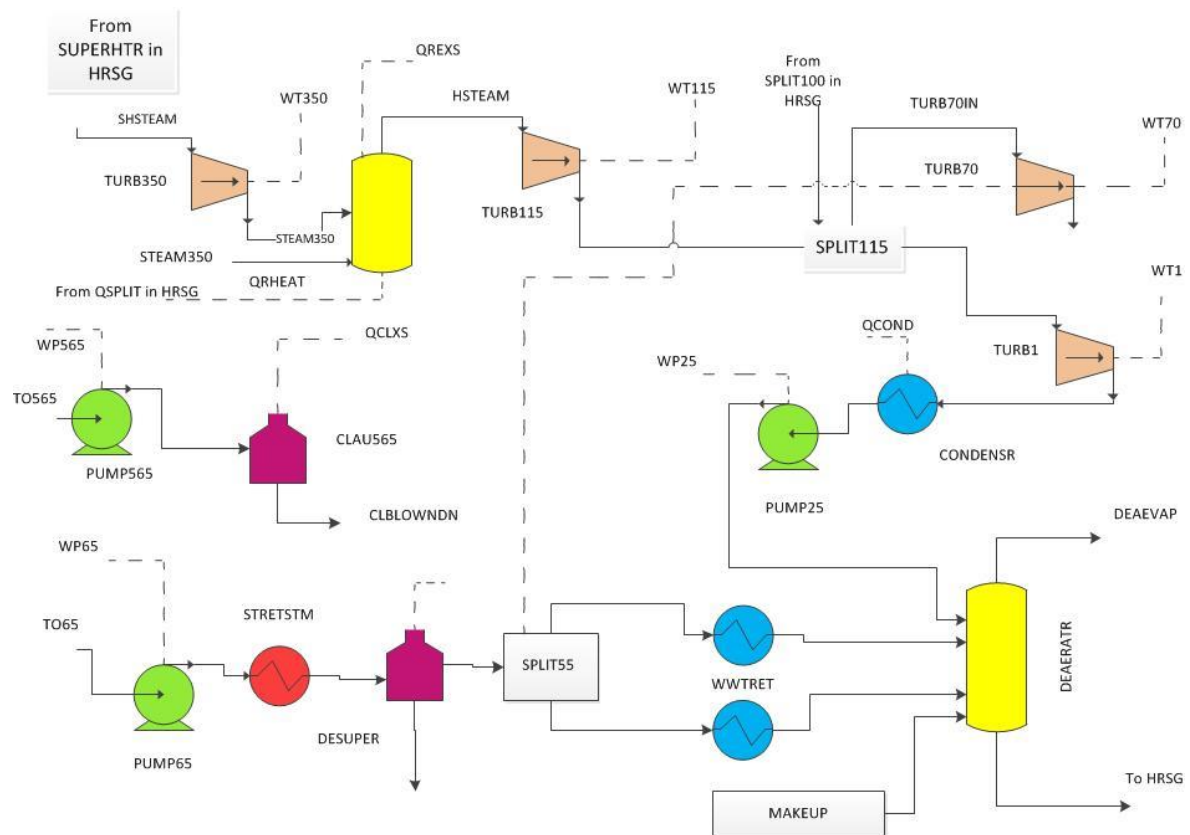


شکل ۸. شبیه‌سازی واحد HRSG با نرم‌افزار اسپین پلاس.

Figure 8. Simulation of HRSG unit by Aspen-Plus software.

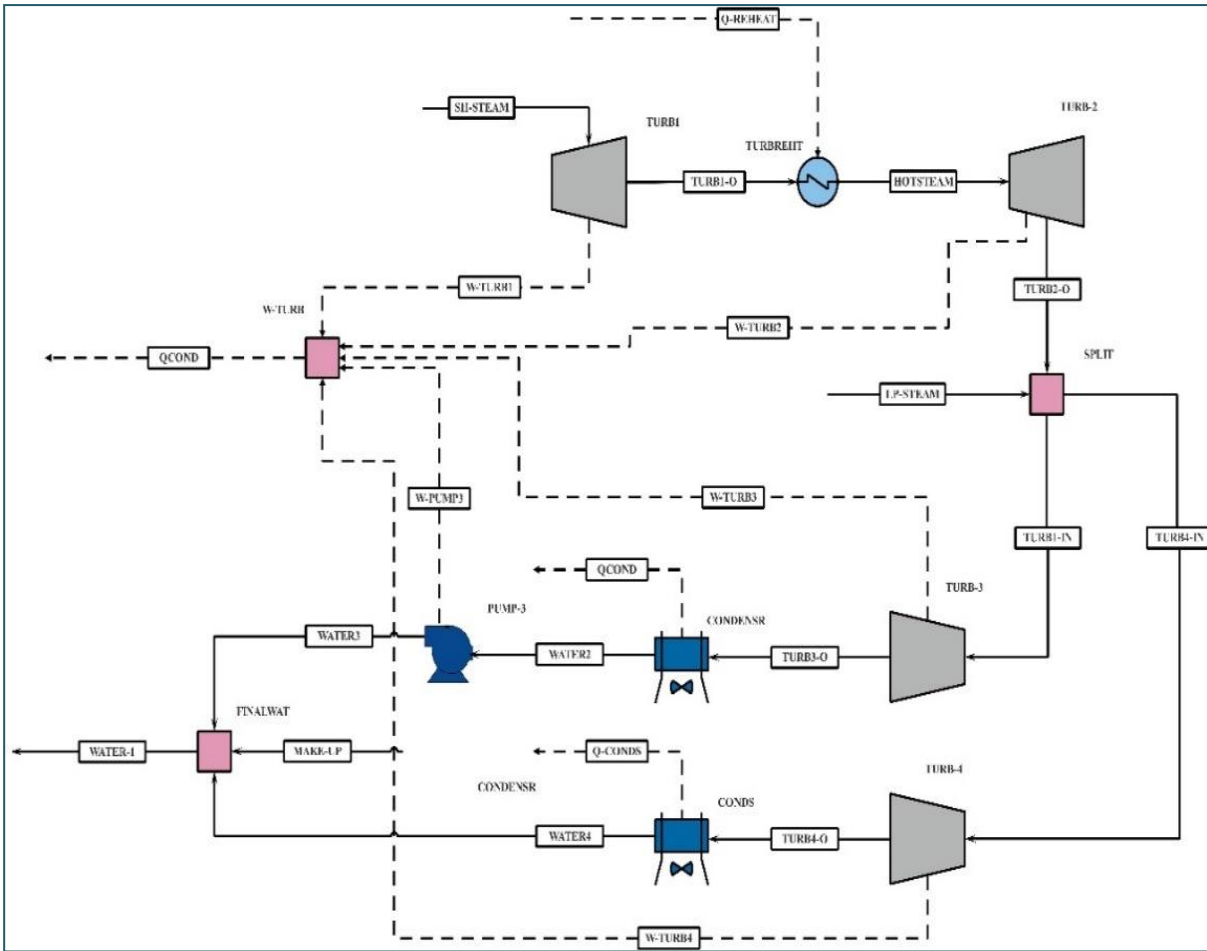
چهار توربین بخار (TURB115، TURB350، TURB70، TURB1) در این بخش شبیه‌سازی شده است. بخار خروجی از بخش HRSG در سه مرحله منبسط می‌شود؛ این سه مرحله عبارت‌اند از: توربین فشار بالا (۲۴ بار)، توربین فشار متوسط (۸ بار) و در ادامه دو توربین فشار پایین موازی (۵ و ۰/۱ بار). از بلاک SUPERHTR بخار فشار بالای خشک وارد توربین بخار فشار بالای TURB350 می‌شود. بخار خشک در در توربین TURB350 منبسط می‌شود و فشار خروجی آن به ۲۴ بار می‌رسد. در ادامه در بلاک TURBHEAT جریان بخار خروجی STEAM350 با جریان بخار STEAM565، مخلوط و با استفاده از جریان گرمایی QREHEAT گرم می‌شود. در ادامه جریان بخار گرم‌شده HOTSTEAM با فشار ۲۴ بار وارد توربین بعدی یعنی TURB115 می‌شود. جریان خروجی از این توربین با فشار ۸ بار به وسیله یک تقسیم‌کننده به دو بخش، تقسیم و هریک از جریان‌ها

جریان گرمایی تجمیع‌شده در بلاک QMIX، به اکونومایزر که به وسیله یک مبدل حرارتی به نام ECONOMZR شبیه‌سازی شده است، فرستاده می‌شود. ECONOMZR آب را تا دمای ۲۹۰ درجه سلسیوس، گرم می‌کند. در ادامه آب گرم‌شده در اکونومایزر به منظور تولید بخار فشار بالا به جوش‌آور HPBOILER فرستاده می‌شود. بخار تولیدشده در جوش‌آور فشار بالا به سوپرهیتر SUPERHTR فرستاده می‌شود و در پایان، بخار خشک با دمای ۵۳۵ درجه سلسیوس تولید می‌شود که برای تولید کار به توربین بخار فشار بالا فرستاده می‌شود. هم‌چنین با استفاده از جوش‌آور فشار پایین که به وسیله بلاک BOIL100 شبیه‌سازی شده است، بخار آب تولیدشده ۳۵۰۰ کیلوگرم بر ساعت با فشار ۷ بار تولید می‌شود که این میزان از بخار آب تولیدشده برای استفاده در تجهیز استیمر<sup>۱</sup> است. نمودار جریانی چرخه بخار در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۹. نمودار جریان چرخه بخار

Figure 9. The schematic diagram of the steam cycle.



شکل ۱۰. شبیه‌سازی واحد توربین بخار با نرم‌افزار اسپن‌پلاس.

Figure 10. Simulation of steam turbine unit by Aspen-Plus software.

برق و بخار و جلوگیری از هدر رفتن سوخت و انتشار آلاینده به محیط‌زیست می‌شود.

به‌منظور اجرای برنامه میزان برگشت سرمایه برای امکان‌سنجی لازم است که هزینه‌های ثابت با میزان هزینه‌ای که برای خرید انرژی از شرکت پتروشیمی مبین (تولیدکننده برق) بررسی شود؛ لذا چنان که در جدول (۳) پیداست بعد از پنج سال حاشیه سود برای شرکت پتروشیمی جم ایجاد می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که قیمت انرژی با گذشت زمان با ارزش‌تر می‌شود و یک روند خطی و ثابتی نخواهد داشت؛ لذا حاشیه سود حساب شده به‌عنوان حداقل سود برآورد شده لحاظ می‌شود. هم‌چنین می‌توان به استقلال این واحدهای پتروشیمی برای تولید توان اشاره کرد که در صورتی که واحدهای تولیدکننده برق به مشکل برخورد کنند، مشکلی در تولید این واحد پتروشیمی به‌وجود نخواهد آمد.

به یک توربین فشار پایین (TURB1 و TURB70) فرستاده می‌شود. جریان خروجی از توربین فشار پایین TURB1، با یک هیتر به‌نام CONDENSR خنک می‌شود. جریان میعان مایع خروجی نیز به‌وسیله یک پمپ تا ۲ بار فشرده و به واحد هواگیری فرستاده می‌شود. در واحد هواگیری تمامی جریان‌ات، میعان و هم‌چنین جریان آب جبرانی، تجمیم و دوباره برای تولید بخار به واحد HRSG فرستاده می‌شود و این چرخه ادامه دارد. در این بخش میزان توان تولیدی برابر با ۱۱/۰۷۴ مگاوات شده است.

در انتها تمامی کارهای مصرفی و تولیدی را وارد دیاگرام شبکه GT-WORK کرده و کار مفید کل برابر با ۲۹/۹ مگاوات می‌شود که این میزان از توان تولیدی را می‌توان برای کمپرسورهای گریز از مرکز واحد راکتورهای گازی واحد پلی‌اتیلن سبک خطی شرکت پتروشیمی جم استفاده کرد. استفاده از روش بالا باعث تولید

توان کل مفید که ۲۹/۹ مگاوات به دست آمده است. از این توان، می‌توان برق مربوط به کمپرسورهای واحد پلی‌اتیلن سبک خطی جم را تأمین کرد، هم‌چنین از بخار به وجود آمده به‌میزان حدود ۳۵۰۰ کیلوگرم بر ساعت می‌توان در دیگر واحدهای پالایشگاه استفاده کرد. با اجرای این طرح علاوه بر برتری‌های اقتصادی طرح، از هدر رفت گازهای فسیلی به اتمسفر نیز جلوگیری و موجب کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌شود.

#### ۵. تعریف اصطلاحات و علائم

علائم موجود در تصاویر	توضیحات
CHW	جریان آب یخچال
CWS	آب ورودی خنک
CWR	آب برگشتی خنک
P-3001	پمپ شماره ۳۰۰۱
E-3011	کندانسور شماره ۳۰۱۱
D-3020	ظرف استوانه‌ای شکل به شماره ۳۰۲۰
T-3011	برج عاری‌ساز به شماره ۳۰۱۱
E-3014	مبدل شماره ۳۰۱۴
LPS	فشار بخار پایین
LPC	فشار میعان پایین
Purification	ناحیه خالص سازی
Gas Phase Reactor	راکتورهای بسترسیال فاز گازی
Loop Reactor	راکتورهای دوغایی
Flushing Header	لوله اصلی مسیر فلاشینگ
Feed	خوراک
C1001/1002/1003	کمپرسورهای شماره ۱۰۰۳/۱۰۰۲/۱۰۰۱
T1001/1002/1003	توربین‌های شماره ۱۰۰۳/۱۰۰۲/۱۰۰۱
T-Work	مجموع کارهای مصرفی و تولیدی
SUPHRHTR	بخار فوق اشباع
ECONOMIZER	اکونومایزر
H2OSPLIT	خط ارسالی آب
HPIN	مسیر ورودی فشار بخار بالا
LPIN	مسیر ورودی فشار بخار پایین
WT350/115/70/1	کار تولیدی توربین شماره ۱۷۰/۱۱۵/۳۵۰
WP565/25/65	کار مصرفی پمپ شماره ۶۵/۲۵/۵۶۵

#### جدول ۳. محاسبات اقتصادی استفاده از چرخه ترکیبی.

Table 3. Economic calculation for using combined cycle system.

Title	Cost estimating (\$)
Feed price per ton	550
Steam price per ton	15
Electricity price per megawatt	60
Rotary and fixed equipment price	40000
Instrumentation equipment and valves price	40000
The whole price is over	80000
Annual income	16000
Return on investment	5 years

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

در ناحیه بازیابی مونومر واحد پلی‌اتیلن سبک خطی پتروشیمی جم مقدار چشمگیری گاز سوزانده می‌شود که موجب زیان به محیط زیست و هم‌چنین هدر رفت سوخت فسیلی می‌شود. برای استفاده بهینه از این میزان از هیدروکربن‌های فرستاده شده به مشعل و جلوگیری از ورود گازهای سمی و خطرناک به محیط زیست و پیش‌گیری از هدر رفت انرژی سوخت فسیلی، راه‌کاری مناسب ارائه شده است. با استفاده از چرخه ترکیبی، نحوه جلوگیری از سوختن هیدروکربن‌ها در مشعل شرح داده شد تا بتوان از آن هیدروکربن‌های سوزانده شده توان و بخار مفید برای مصرف داخل واحد پلی‌اتیلن سبک خطی جم تولید شود. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اسپن ناحیه خروجی از PK-3001 و PK-3002 تا ناحیه خروجی D-3020 و D-3021 شبیه‌سازی شده است و ترکیبات به‌همراه شرایط دمایی و فشاری خوراک چرخه ترکیبی به دست آمده است. پس از شبیه‌سازی ناحیه بازیابی مونومر، چرخه ترکیبی به دو قسمت تقسیم شده است. در بخش اول، چرخه توربین گازی؛ خوراک اشباع با هوای متراکم وارد محفظه احتراق می‌شود تا از گرمای حاصل آن در توربین‌های T1001 و T1002 و T1003 توان تولید شود. در بخش دوم با استفاده از چرخه بخار از گرمای سوختن سوخت با آب، تبادل حرارت ایجاد می‌شود تا بتوان از آن میزان چشمگیری بخار تولید کرد تا این میزان از بخار در واحد استیمر مصرف شود. توان‌های کل در بخش اول و دوم جمع شده، میزان

## مراجع

- [1] Ojjiagwo, E., Emekwuru, N., "Economics of gas to wire technology applied in gas flare management", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, pp. 2109-2118, (2016).
- [2] Zolfaghari, M., Pirouzfard, V., Sakhaeinia, H., "Technical characterization and economic evaluation of recovery of flare gas in various gas-processing plants", *Energy*, 124, pp. 481-491, (2017).
- [3] Semmari, H., Filali, A., Aberkane, S., Feidt, R., Feidt, M., "Flare Gas Waste Heat Recovery: Assessment of Organic Rankine Cycle for Electricity Production and Possible Coupling with Absorption Chiller", *Energies*, 13, pp. 1-16, (2020).
- [4] Martínez, I., Murillo, R., Grasa, G., Fernández, J. R., Abanades, J. C., "Integrated combined cycle from natural gas with CO<sub>2</sub> capture using a Ca-Cu chemical loop", *AIChE J.*, 59, pp. 2780-2794, (2013).
- [5] Nord, L. O., Anantharaman, R., Bolland, O., "Design and off-design analyses of a pre-combustion CO<sub>2</sub> capture process in a natural gas combined cycle power plant", *Int. J. Greenh. Gas Control*, 3, pp. 385-392, (2009).
- [6] Lozza, G., Chiesa, P., "Natural gas decarbonization to reduce CO<sub>2</sub> emission from combined cycles—Part I: Partial oxidation", *J. Eng. Gas Turbines Power*, 124, pp. 82-88, (2000).
- [7] Martínez, I., Murillo, R., Grasa, G., Fernández, J. R., Abanades, J. C., "Integrated combined cycle from natural gas with CO<sub>2</sub> capture using a Ca-Cu chemical loop", *AIChE J.*, 59, pp. 2780-2794, (2013).
- [8] Diglio, G., Hanak, D. P., Bareschino, P., Mancusi, E., Pepe, F., Montagnaro, F., Manovic, V., "Techno-economic analysis of sorption-enhanced steam methane reforming in a fixed bed reactor network integrated with fuel cell", *J. Power Sources*, 364, pp. 41-51, (2017).
- [9] Jafari Nasr, M., Kokhayi, M. "Simulation of an integrated combined cycle optimization unit with the aim of generating electricity". *Quarterly Journal of Extension Science*, In Persian, (2015).
- [10] Fred, C., Jahnke, E., "High Efficiency IGCC Using Advanced Turbine, Air Separation Unit, And Gasification Technology, Mitsubishi Heavy Industries, Gasification Technologies Conference", pp. 4-7, (1998).
- [11] Mohd Nazir, Sh., Bolland, O., Amini, Sh., "Analysis of Combined Cycle Power Plants with Chemical Looping Reforming of Natural Gas and Pre-Combustion CO<sub>2</sub> Capture", *Energies*, 11, p. 147, (2018).
- [12] Robert, D., "Flaring-Questions and answers, Second edition, Canadian Centre for Energy Information", (2007).
- [13] Ghorbani, A., Jafari, M., Rahimpou, H., "A comparative simulation of a novel gas to liquid (GTL) conversion loop as an alternative to a certain refinery gas flare", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 11, pp. 23-38, (2013).
- [14] Shayan, M., Pirouzfard, V., Sakhaeinia, H., "Technological and economical analysis of flare recovery methods, and comparison of different steam and power generation systems", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* volume 139, pp. 2399-2411, (2020).
- [15] Christopher, G., Akunuri, N., "Probabilistic Modeling and Evaluation of the Performance, Emissions, and Cost of Texaco Gasifier Based Integrated Gasification Combined Cycle Systems Using ASPEN, Center for Energy and Environmental Studies", Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, (2001).
- [16] Soave, G., "Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state, *Chemical Engineering Science*", 27, pp. 1197-1203, (1972).