دریافت مقاله: ۸۷/۴/۲
پذیرش مقاله: ۸۷/۷/۲

بررسی مقایسه‌ای تکنولوژی‌های مایع‌سازی گازطبیعی

علامعلی رحیمی[۱] ـ مهدیه علوی[۲]

چکیده

پیشرفت مداوم و مستمر در طراحی تأسیسات LNG، از طریق مقایسه تأسیسات بهره‌برداری شده قبلی با تأسیسات فعلی و برنامه‌ریزی شده آتی، کاملا مشهود است. با اینکه صنعت LNG در انحصار تکنولوژی PPMR متعلق به‌شرکت APCI می‌باشد، طی ۵ تا ۷ سال گذشته، تکنولوژی‌های مایع‌سازی از تنوع و گوناگونی زیادی برخوردار شده‌اند. افزایش رقابت منجر به‌افزایش ظرفیت واحدها و کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای شده است.

نکات کلیدی که تفاوت تکنولوژیهای مایع‌سازی در آنها تمرکز یافته عبارتند از:

۱- نوع سیال مبرد (خالص یا مخلوط)،

۲- نوع مبدل حرارتی (ابعاد، فشار عملیات، تنوع سازندگان و هزینه ساخت)،

۳- تعداد کمپرسورهای مورد نیاز و توان آنها.

تفاوت عمده دیگر این مبدل‌ها در نوع سیال مورد استفاده در بخش خنک‌کن (آب یا هوا) می‌باشد. هم‌اکنون به‌علت خوردگی ایجاد شده در مبدل‌های خنک‌کن آبی، اکثر مجتمع‌های تولید LNG از هوا استفاده می‌کنند.

بررسی تکنولوژی‌های مختلف مایع‌سازی، بیانگر این حقیقت است که هیچ یک از این تکنولوژی‌ها به‌تنهایی و به‌خودی خود، دارای کارایی بالایی نسبت به‌سایر تکنولوژی‌ها نیست، بلکه هر تکنولوژی مایع‌سازی، شرایط بهینه منحصر به‌فرد خود را داراست که

---

۱. کارشناس گروه پژوهشی مدلسازی و مطالعات بلندمدت انرژی، موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی
Alirahimigh2000@yahoo.com

۲. کارشناس اقتصاد m.alavy68@yahoo.com

توسط عوامل خاص موجود در پروژه، قابل دستیابی است. لذا تصمیم‌گیری نهایی در مورد اینکه کدام‌یک از تکنولوژی‌ها باید برای پروژه انتخاب شوند، به‌پارامترهای خاص آن پروژه و وضعیت پیشرفت بالقوه تکنولوژی‌های جدید بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: گازطبیعی مایع شده، تاسیسات مایع‌سازی، تکنولوژی، سیال مبرد، مبدل حرارتی.

۱. مقدمه

مرحله مایع‌سازی، یکی از قسمت‌های کلیدی و مهم صنعت LNG به‌شمار می‌رود. پیدایش فناوری مایع‌سازی گاز از طریق سردسازی، به‌اوایل قرن بیستم باز می‌گردد، ولی از سال ۱۹۶۰ با توسعه تکنولوژی سیستم‌های سردکننده و تکنیک‌های متعدد مهندسی در ساخت تأسیسات مایع‌سازی و تانکرهای حمل گازطبیعی، موضوع اقتصادی بودن طرح‌های LNG به‌شکل محسوسی نمایان گردید. در سال ۱۹۶۳ با تکمیل و شروع موفقیت‌آمیز تأسیسات آرزو[1] الجزایر، فصل جدیدی در صنعت LNG دنیا گشوده شد و در سال ۱۹۶۴، اولین محموله LNG این واحد به‌انگلستان صادر گردید.

مجموعه تاسیساتی که گازطبیعی را به‌مایع تبدیل می‌کنند، واحد LNG[2] نامیده می‌شوند. اکثر پروژه‌های LNG شامل ۲ (یا بیشتر) واحد مایع‌سازی می‌باشند که می‌توانند به‌صورت مستقل از یکدیگر، فعالیت کنند.

بزرگترین پروژه مایع‌سازی جهان، تأسیسات Bontang اندونزی است که در سال ۲۰۰۴، دارای ۸ واحد مایع‌سازی گاز درحال بهره‌برداری بود. دلایل متعددی برای احداث تأسیسات تولید LNG چند واحدی، وجود دارد:

۱. استفاده از صرفه‌های مقیاس و امکان استفاده از تاسیسات جانبی مشترک،

۲. محدودیت ظرفیت واحدهای مایع‌سازی،

۳. حداقل‌سازی ریسک توقف تولید؛ چون هر واحد به‌صورت مستقل و مجزا از سایر واحدها مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

البته به‌لحاظ افزایش ظرفیت واحدهای تولید LNG و همچنین قابلیت اطمینان بالاتر آنها، به‌مرور زمان توسعه پروژه‌های تک واحدی نیز به‌گزینه‌ای قابل قبول تبدیل

1. ARZEW
2. LNG Train

شده است. پروژه آتلانتیک LNG در ترینیداد وتوباگو، در ابتدا به‌صورت تک‌واحدی مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفت، ولی به‌مرور زمان، به‌تعداد واحدهای آن اضافه شد. پروژه‌های داروین LNG در استرالیا و SEGAS در مصر نیز به‌صورت تک‌واحدی گسترش یافته‌اند.

در یک طرح نمونه، گاز خوراک با فشار بالا (برای مثال بیش از ۱۳۰۰Psi یا ۹۰ بار) تولید شده در میادین گازی، پس از برخی فرآیندهای اولیه در سر چاه، از طریق خطوط فشار قوی وارد تأسیسات مایع‌سازی شده و میعانات گازی (Condensate) همراه آن جداسازی می‌شود. سپس گاز اندازه‌گیری شده و فشار آن جهت تطابق با فشار عملیاتی تأسیسات طراحی شده، کنترل می‌شود.

پس از تحویل، در ابتدا ناخالصی‌های موجود نظیر گازهای اسیدی و ترکیبات گوگردی (دی‌اکسیدکربن و سولفید هیدروژن)، آب و جیوه (که در فرآیند مایع‌سازی گاز ایجاد مشکل نموده و یا اینکه برای محصول نهایی نامطلوب می‌باشند)، جدا می‌گردند. پس از آن هیدروکربورهای سنگین‌تر، از گاز خشک و شیرین جدا می‌شوند. گاز باقیمانده عمدتا حاوی متان بوده و میزان پنتان و هیدروکربورهای سنگین‌تر معمولا با توجه به‌پروژه‌های مختلف در محدوده ۱۷- ۰/۲ درصد مولی قرار دارد. در نهایت گازطبیعی طی فرآیندی به‌مایع تبدیل می‌شود.

عمل سردسازی سیال مبرد، براساس پدیده ژول تامسون اتفاق می‌افتد. بدین صورت‌که با عبور این سیال از یک شیر انبساط و کاهش ناگهانی فشار، دمای سیال مبرد نیز ناگهان افت می‌یابد. سپس مجددا توسط کمپرسور متراکم می‌گردد و این چرخه مرتبا تکرار می‌شود. LNG تولیدی نهایتا در یک یا چند مرحله از طریق سیکل‌های مبرد تکمیلی، بیشتر سرد می‌شود تا ذخیره‌سازی آن در فشاری در حد فشار اتمسفر، به‌راحتی امکان‌پذیر شود.

یکی از اصول اصلی سردسازی و مایع‌سازی گاز، استفاده از سیال مبردی‌است که بتواند منحنی‌های سرمایش ـ گرمایش گاز فرآوری شده و ماده سردکننده را تا حدامکان با یکدیگر منطبق‌نماید. این‌عمل، کارایی ترمودینامیکی فرآیند مایع‌سازی را افزایش داده و در نتیجه، میزان انرژی مورد نیاز به‌ازای هر واحد LNG تولیدی را کاهش می‌دهد. این مساله درمورد همه تکنولوژی‌های مایع‌سازی صدق می‌کند. با مشاهده منحنی‌سردسازی یک فرآیند مایع‌سازی نمونه، ۳ مرحله در فرآیند تبدیل گاز به‌مایع بر جسته و نمایان است. این مراحل عبارتند از: ۱. سردسازی اولیه ۲. مایع‌سازی ۳. سردسازی تکمیلی[1].

1. Sub- Cooling

همه این بخش‌ها بواسطه شیب‌های مختلف منحنی از یکدیگر متمایز شده‌اند. همه فرآیندهای تولید LNG به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند تا به‌دقت منحنی‌های سرمایش ـ گرمایش را به‌هم نزدیک کنند تا گاز به‌مایع تبدیل شود. این کار با استفاده از مبردهای مخلوط که منحنی‌های مذکور را در مراحل مختلف فرآیند مایع‌سازی (جهت رسیدن به‌کارایی بالاتر عمل تبرید و کاهش مصرف انرژی) با یکدیگر مطابقت می‌دهند، صورت می‌پذیرد.

کارایی منحنی سرمایش فرآیند مایع‌سازی، معیار دیگری است که در مقایسه تکنولوژی‌های مختلف LNG، مورد بازبینی و توجه قرار می‌گیرد و در اغلب موارد، اشتباها به‌جای کارایی انرژی مربوط به‌هزینه فرآیند به‌کار می‌رود، بنابراین در هنگام این‌گونه مقایسه‌ها باید توجه و دقت کافی صورت پذیرد. اطلاعات دقیق طراحی هر یک از فرآیندهای مایع‌سازی، نتایجی که در سطوح مختلف کارایی در طول این منحنی قابل حصول است و تأثیر هزینه‌ای این نتایج، جهت انجام مقایسه این فرایندها، مورد نیاز خواهد بود.

۲. بررسی تکنولوژی‌های مایع‌سازی

بخش مایع‌سازی به‌طور کلی حدود ۳۰ تا ۴۰درصد از هزینه سرمایه‌ای کل تأسیسات مایع‌سازی (که خود حدود ۲۵ درصد تا ۳۵درصد کل هزینه‌های پروژه است)، را به‌خود اختصاص می‌دهد. روش مایع‌سازی و تجهیزات استفاده شده، تأثیر قابل توجهی بر کارایی، قابلیت اجرا، اطمینان و هزینه تأسیسات دارد. تجهیزات مهم و کلیدی مرحله مایع‌سازی شامل کمپرسورها (جهت به‌گردش در آوردن سیال مبرد)، موتورهای محرکه کمپرسورها، مبدل‌های حرارتی (که جهت سردسازی و مایع‌سازی گاز و تبادل حرارت میان سیال‌های مبرد مورد استفاده قرار می‌گیرد) می‌شوند.

به‌دلیل اینکه در فرآیند مایع‌سازی، مقدار قابل توجهی انرژی جهت تبرید مورد نیاز است، لذا سیستم تبرید بخش عمده‌ای از تأسیسات LNG را به‌خود اختصاص می‌دهد. تفاوت عمده بسیاری از تکنولوژی‌های مایع‌سازی توسعه یافته کنونی، به‌سیکل سرمایش مورد استفاده آنها محدود می‌شود. به‌عنوان یک محدودیت در این صنعت، تکنولوژی مایع‌سازی LNG در حال حاضر در انحصار شرکت‌های محدودی قرار دارد که به‌طورکلی عبارتند از:

۱. تکنولوژی مایع‌سازی C3MCR (PPMR) متعلق به‌شرکت APCI،

۲. تکنولوژی مایع‌سازی AP-X™ متعلق به‌شرکت APCI ،

۳. تکنولوژی مایع‌سازی CasCade متعلق به‌شرکت Phillips ،
۴. تکنولوژی مایع‌سازی DMR متعلق به‌شرکت Shell،
۵. تکنولوژی مایع‌سازی MFCP متعلق به‌شرکت‌های Linde و Statoil،
۶. تکنولوژی مایع‌سازی Prico ،
۷. تکنولوژی مایع‌سازی Liquefin متعلق به‌شرکت‌های Axens و IFP،
۸. تکنولوژی مایع‌سازی Teal Arc،
۹. تکنولوژی مایع‌سازی اسنام پروجتی.

این تکنولوژی‌ها در پروژه‌های موجود و یا در دست ساخت، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نکات کلیدی تفاوت این تکنولوژیها عبارتند از:

- تفاوت در نوع مایع سردکننده یا سیال مبرد (خالص یا مخلوط) ؛
- تفاوت در نوع مبدل‌های حرارتی و تجهیزات مورد نیاز (در عوامل متفاوتی نظیر ابعاد، فشار عملیات، تنوع سازندگان و هزینه ساخت)؛
- تفاوت در تعداد کمپرسورهای مورد نیاز و توان آنها .

تفاوت عمده دیگر در برخی مبدل‌های مربوط به‌سردسازی مایع سردکننده، بویژه نوع سیال مورد استفاده در آنها (آب یا هوا) می‌باشد. هم اکنون به‌علت جلوگیری از خوردگی ایجاد شده (در طول زمان)، به‌جای مبدل‌هایی که از آب دریا برای خنک‌کردن استفاده می‌کنند، اکثر مجتمع‌های تولید LNG از هوا استفاده می‌کنند.

۲-۱. تکنولوژی مایع‌سازی[1] PPMR (C3MCR[2])

تکنولوژی PPMR که توسط شرکت APCI[3] توسعه یافته، از دهه ۱۹۷۰ بر صنعت LNG تسلط دارد. این تکنولوژی سهم قابل توجهی(حدود ۸۳درصد) از ظرفیت‌های در حال بهره‌برداری تولید LNG جهان را به‌خود اختصاص داده است. واحدهایی با ظرفیت تا حدود ۴/۷ میلیون تن در سال با استفاده از این تکنولوژی ساخته شده و یا درحال‌ساخت می‌باشند. پروژه‌هایی که BP در آنها سهیم بوده و از این تکنولوژی استفاده کرده‌اند عبارتند از: Das Island در ابوظبی، Bontang در اندونزی و North West Shelf در استرالیا.

1. Propane Pre-Cooled Mixed Refrigerant (PPMR).
2. Multi Component Refrigerant (MCR).
3. Air Products & chemical incorporated

در این تکنولوژی که در شکل ۱ نشان داده شده است، از دو عامل سردکنندهٔ پروپان و یک سیال مبرد مرکب[1] که دارای وزن مولکولی پایین‌تری است و مرکب از نیتروژن، متان، اتان و پروپان است، استفاده می‌شود. این فرآیند شامل دو سیکل سرمایش متوالی است که در یک سیکل آن از مبدل‌های مارپیچی و مبردهای مرکب و در سیکل دیگر (که وظیفهٔ پیش سردکردن را به‌عهده دارد) از پروپان و مبدل‌های معمولی پوسته و لوله[2] استفاده می‌شود. استفاده از مخلوطی از مواد سرماساز باعث می‌شود که فرآیند، ساده‌تر و قابل انعطاف‌تر گردد. همچنین یکی دیگر از مزایای تکنولوژی PPMR، انتقال انرژی از سیکل مبرد پروپان به‌سیکل مبرد مرکب می‌باشد.

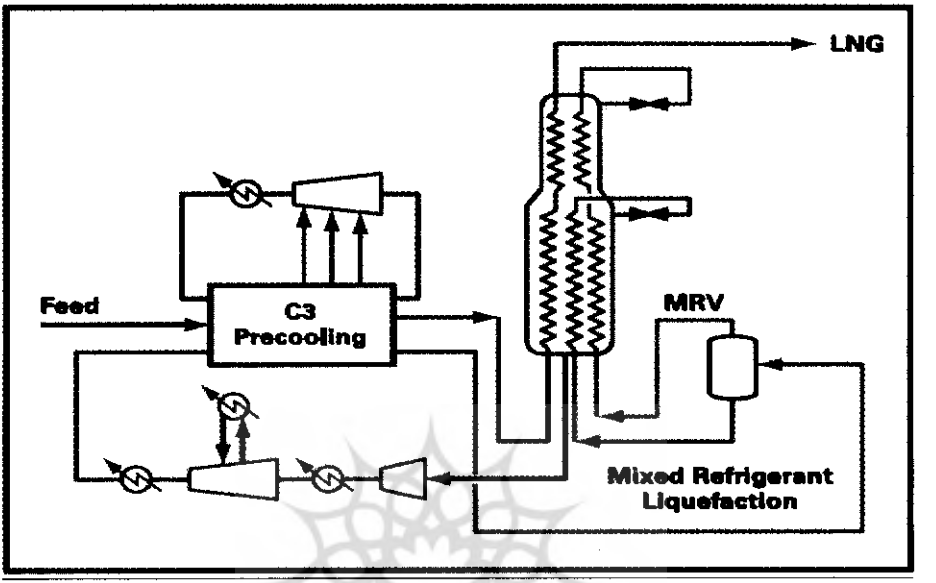
گازطبیعی خوراک ابتدا در یک‌چیلر مبرد مجزا تا دمای‌متوسط حدود ۳۵- درجه سانتی‌گراد (۳۱- درجه فارنهایت) سرد می‌شود، در نتیجه ترکیبات سنگین‌تر موجود در آن متراکم شده و به‌واحد جداکننده فرستاده می‌شود. سپس گازطبیعی به‌درون مبدل حرارتی اصلی(مرکب از تعداد زیادی مبدل‌های مارپیچی) فرستاده می‌شود. این عمل سبب می‌گردد تا دمای سیال مبرد و جریان گاز به‌یکدیگر نزدیک شود. سیال مبرد مرکب تا حدودی توسط چیلر پروپان قبل از ورود به‌اتاقک سرما[3] متراکم می‌شود. در نهایت مایع، جدا شده و جریانات بخار قبل از عبور از شیرهای ژول-تامسون (که عمل سردسازی را برای مایع‌سازی نهایی گاز به‌انجام می‌رسانند)، بیشتر سرد می‌شوند.

در پروژه‌های اخیر، معمولا همه مراحل متراکم‌سازی سیال مبرد مرکب توسط کمپرسورهای سانتریفیوژی صورت می‌پذیرد. اما در برخی پروژه‌ها، از کمپرسورهای محوری نیز برای مرحله کم فشار و سانتریفیوژ برای مرحله فشار بالا استفاده می‌شود. واحدهای جدید از محرکه‌های توربین گازی استفاده می‌کنند، در حالی‌که واحدهای پیشین از محرکه‌های توربین بخار استفاده می‌کردند.

امروزه بسیاری از تأسیسات تولید LNG در کشورهای لیبی، برونئی، اندونزی، مالزی، استرالیا، واحدهای GL1 و GL2 تأسیسات Arzew در الجزایر از این روش جهت مایع‌سازی استفاده می‌کنند.

1. Mixed refrigerant (MR)
2. shell-and-tuhe
3. Cold Box

شکل ۱. فرایند تولید LNG از طریق تکنولوژی PPMR



منبع:

UK Capability in the LNG Global Market, ENERGY INDUSTRIES AND TECHNOLOGY UNIT, 2006

۲-۲. تکنولوژی مایع‌سازی AP-X™ برای تأسیسات با ظرفیت بالا

واحدهای برنامه‌ریزی شده جهت استفاده از این تکنولوژی دارای ظرفیتی تا ۸ میلیون تن در سال می‌باشند. استفاده از این روش، صرفه‌جویی ۱۰درصدی را در هزینه‌های سرمایه‌ای واحد تولیدی LNG به‌همراه دارد (شکل ۲).

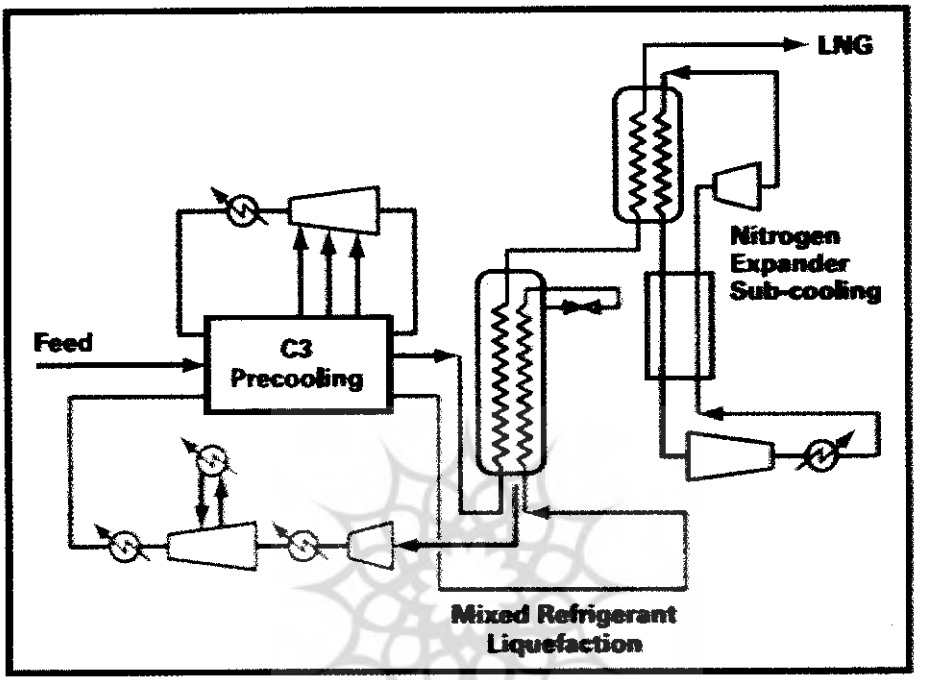
در این روش علاوه بر سیال مبرد مرکب (ترکیبی از نیتروژن، اتان و پروپان)[1] و پیش‌خنک‌کننده پروپان، از سیستم خنک‌کننده تکمیلی نیتروژن نیز استفاده می‌شود.

۲-۳. تکنولوژی مایع‌سازی بهینه شده Cascade[2]

شرکت نفت فیلیپس برای اولین بار نسخه اصلی تکنولوژی بهینه شده Cascade را در دهه ۱۹۶۰ ارائه داد. هدف از این کار مصرفی نوعی تکنولوژی مایع‌سازی بود که برای

1. Multi Component Refrigerant (MCR)
2. Optimized Cascade LNG Process (OCLP)

شکل ۲. فرایند تولید LNG از طریق تکنولوژی AP-X™



منبع:

UK Capability in the LNG Global Market, ENERGY INDUSTRIES AND TECHNOLOGY UNIT, 2006

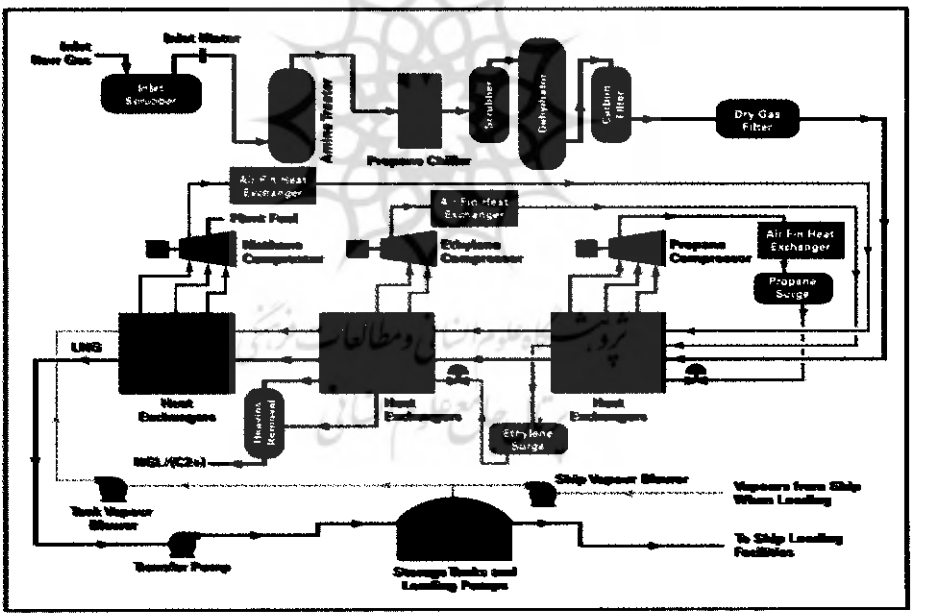
طیف وسیعی از انواع گاز خوراک به‌آسانی قابل راه‌اندازی بوده و بهره‌برداری از آن بدون مشکل و راحت باشد. این تکنولوژی برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ در تأسیسات LNG Kenai شرکت نفت فیلیپس در آلاسکا مورد استفاده قرار گرفت. این تأسیسات توسط Bechtel ساخته شد و ژاپن اولین محموله LNG خود را از این تأسیسات وارد نمود. این پروژه اولین پروژه جهانی است که توانسته به‌رکورد ۳۴ ساله عرضه بدون وقفه LNG به‌مشتریان ژاپنی خود، دست یابد.

این تکنولوژی شامل سه سیکل سردسازی است که از سیال‌های مبرد مختلف نظیر پروپان(C_3)، اتیلن(C_2) و متان (C_1) استفاده می‌کند. هر یک از سیال‌های مبرد به‌ترتیب نقطه‌جوش پایین‌تری دارند. به‌عنوان مثال پروپان۳۳- درجه سانتی‌گراد، اتیلن ۹۰- درجه سانتی‌گراد و متان ۱۵۰- درجه سانتی‌گراد. سیکل خنک‌کننده انتهایی (۱۵۰- درجه سانتی‌گراد) جهت کاهش بیشتر دما تا حدود ۱۶۱- درجه سانتی‌گراد

تعبیه شده است. شکل ۳ مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازی POCLP[1] را نشان می‌دهد.

این تکنولوژی به‌منظور حداکثرسازی تولید LNG از توربینهای گازی نوع 6 Frame 5D استفاده می‌نماید. هر سیکل از دو کمپرسور (که در حالت عادی ۵۰درصد ظرفیت اسمی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد)، با تجهیزات و تکنولوژی رایج استفاده می‌کند. در این سیستم، حداقل به ۳ کمپرسور جداکننده و مقادیر زیادی مایع سردکنندهٔ مختلف نظیر پروپان، اتیلن و متان نیاز می‌باشد. کمپرسورهای مورد استفاده از نوع سانتریفوژی بوده و توربین‌ها و کمپرسورها، ساخت شرکت ایتالیایی Nuovo Pignone of Florence می‌باشند. در این تکنولوژی از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از جنس آلومینیوم سخت[2] (آلیاژی از آلومینیوم و برنج) و مبدل‌های نوع

شکل ۳. مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازی بهینه شده (POCLP) Cascade



منبع:

UK Capability in the LNG Global Market, ENERGY INDUSTRIES AND TECHNOLOGY UNIT, 2006

1. Phillips Optimized Cascade LNG Process
2. Brazed aluminum heat exchangers

Core-in-Kettle در سیکل‌های جریان گاز خوراک، پروپان، اتیلن و متان استفاده می‌شود. همه این مبدل‌های حرارتی به‌استثنای چیلرهای پروپان، درون ۲ اتاقک سرما تعبیه شده‌اند. LNG پس از آخرین مرحله مایع‌سازی از طریق پمپ‌های LNG به‌درون تانکرها فرستاده می‌شود، که در آنجا تحت فشار اتمسفر و دمای ۱۶۱- درجه سانتی‌گراد، ذخیره‌سازی می‌شود.

تکنولوژی POCLP دارای معایب و مزایایی است. مزیت این تکنولوژی هزینه‌های پایین تأسیسات مورد نیاز آن می‌باشد. همانگونه که در پروژه آتلانتیک LNG در ترینیداد انجام شده، در این روش می‌توان با به‌کارگیری دو کمپرسور موازی همزمان بر روی هر مبرد، از یک واحد مایع‌سازی به‌جای دو واحد مجزا استفاده نمود و هزینه‌های تاسیسات را به‌میزان قابل‌توجهی کاهش داد. یکی از معایب این روش وجود تعداد زیاد کمپرسور و توربین گازی است که می‌تواند هزینه تعمیر و نگهداری را افزایش دهد؛ به‌علاوه در این روش محدودیت ظرفیت واحدها نیز وجود دارد. بزرگترین واحد در حال بهره‌برداری POCLP دارای ظرفیت ۵/۲ میلیون تن در سال می‌باشد. بعلاوه، این تکنولوژی به‌اتیلن جهت ساخت سیال مبرد دارد، چراکه دارای سه سیکل سردسازی مجزا بوده و از سیال‌های مبرد مختلف نظیر پروپان (C_3)، اتیلن (C_2) و متان (C_1) استفاده می‌نماید.

تکنولوژی POCLP می‌تواند طرح‌هایی با راندمان حرارتی بالا عرضه نموده و به طراحی‌هایی دست یابد که برای اقتصاد پروژه بهینه شده‌اند. این تکنولوژی از فناوری‌ها و تجهیزات آزمون شده و تأیید شده استفاده می‌نماید و انعطاف‌پذیری اجرایی بسیار وسیعی دارد. همچنین به‌علت استفاده از سیستم‌هایی با ترکیبات خالص، راه‌اندازی و بهره‌برداری تأسیسات آسان بوده و در نتیجه کادر عملیاتی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن نیز کاهش می‌یابد.

از این تکنولوژی در واحد Camel-GL4 (تأسیسات مایع‌سازی Arzew الجزایر) و نیز تأسیسات آلاسکا و همچنین در واحدهای مایع‌سازی آتلانتیک LNG در ترینیداد و توباگو استفاده شده است.

۲-۴. تکنولوژی مایع‌سازی DMR[1]

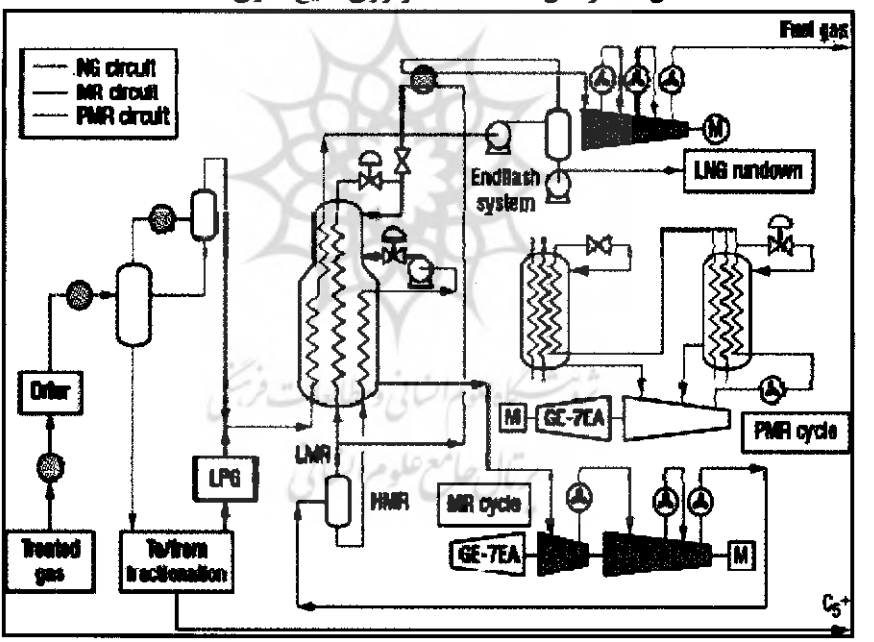
شرکت شل فرآیند مایع‌سازی خاص خود با سیال مبرد دوگانه که متشکل از دو سیکل

1. Double Mixed refrigerant Process (DMR)

مجزای سردسازی با استفاده از دو سیال مبرد می‌باشد را توسعه داده است. یک سیکل جهت پیش‌سردسازی گاز تا حدود ۵۰- درجه سانتی‌گراد (سیکل PMR[1]) و سیکل دیگر برای سردسازی نهایی و مایع‌سازی (سیکل MR) به‌کار گرفته می‌شود. این تکنولوژی از تجهیزات معتبر و آزمون شده نظیر مبدلهای حرارتی Spiral-Wound، در فرایند مایع‌سازی استفاده می‌نماید. از این تکنولوژی در پروژه LNG ساخالین که ظرفیت هر واحد آن ۴/۸ میلیون تن می‌باشد استفاده شده است.

ساختار این تکنولوژی شبیه تکنولوژی PPMR است با این تفاوت که در این روش، سردسازی اولیه با استفاده از یک سیال مبرد مرکب (عمدتا اتان و پروپان) به‌جای پروپان خالص، صورت می‌پذیرد. بخار سیال مبرد مرکب (در سیکل PMR) از درون

شکل ۴. مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازی DMR



منبع:

Global LNG Report,Process selection is critical to onshore LNG economics, Saeid Mokhatab, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, and Michael J. Economides, University of Houston, Houston.

1. Pre- Cooled Mixed refrigerant Process (PMR)

مبدل‌های سیکل سردسازی اولیه، توسط لوله‌های تخلیه به‌درون یک کمپرسور سانتریفیوژی دو مرحله‌ای فرستاده می‌شود. خنک‌سازی، مایع‌سازی و سردسازی تکمیلی سیال مبرد در مرحله پیش‌سرمایش (PMR) با استفاده از سردکننده‌های هوایی induced-draft صورت می‌پذیرد.

کمپرسور مورد استفاده سیال مبرد در مرحله پیش سرمایش، توسط یک توربین گازی کار می‌کند. تفاوت مهم دیگر این است که سردسازی اولیه درون مبدل‌های حرارتی Spiral- Wound[1] صورت می‌پذیرد.

مبدل‌های مورد استفاده از این نوع در مرحله سردسازی و مایع‌سازی، توسط شرکت Linde عرضه می‌شوند. کمپرسورهای سیال مبرد توسط دو توربین گازی نوع Frame 7 که هر یک به‌طور مجزا با یک موتور راه‌انداز ـ کمکی، با دورهای متفاوت تجهیز شده‌اند، به‌حرکت در می‌آیند. همچنین یک کمپرسور محوری[2] نیز به‌عنوان بخشی از مراحل متراکم‌سازی سیال مبرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مرحله بعدی سردسازی جهت مایع‌سازی گازطبیعی، از طریق دومین سیکل سردسازی با سیال مبرد مرکب (سیکل MR) صورت می‌پذیرد. سیال مبرد این سیکل، ترکیبی از نیتروژن، متان، اتان و پروپان می‌باشد. بخار سیال مبرد از روی پوسته مبدل حرارتی اصلی عملیات تبرید، درون یک کمپرسور محوری که توسط یک کمپرسور سانتریفیوژی دو مرحله‌ای نیز پشتیبانی می‌شود، متراکم می‌گردد. سردسازی بیشتر و مایع‌سازی جزئی، از طریق سیکل سردسازی اولیه PMR انجام می‌شود. بخار سیال مرکب و مایع از یکدیگر جدا می‌شوند و سردسازی بیشتر در مبدل حرارتی اصلی به‌وقوع می‌پیوندد.

شرکت شل همچنین تکنولوژی دیگری را جهت افزایش بیشتر ظرفیت تکنولوژی PPMR با به‌کارگیری تجهیزات دو جداره به‌جای تک جداره، توسعه داده است. این روش معتبر و قابل اطمینان، ظرفیت تکنولوژی PPMR را تا حدود ۵ میلیون تن در سال افزایش می‌دهد.

۲-۵. تکنولوژی مایع‌سازی MFCP[3]

دو شرکت Statoil و Linde همکاری مشترکی را در زمینه توسعه‌تکنولوژی مایع‌سازی

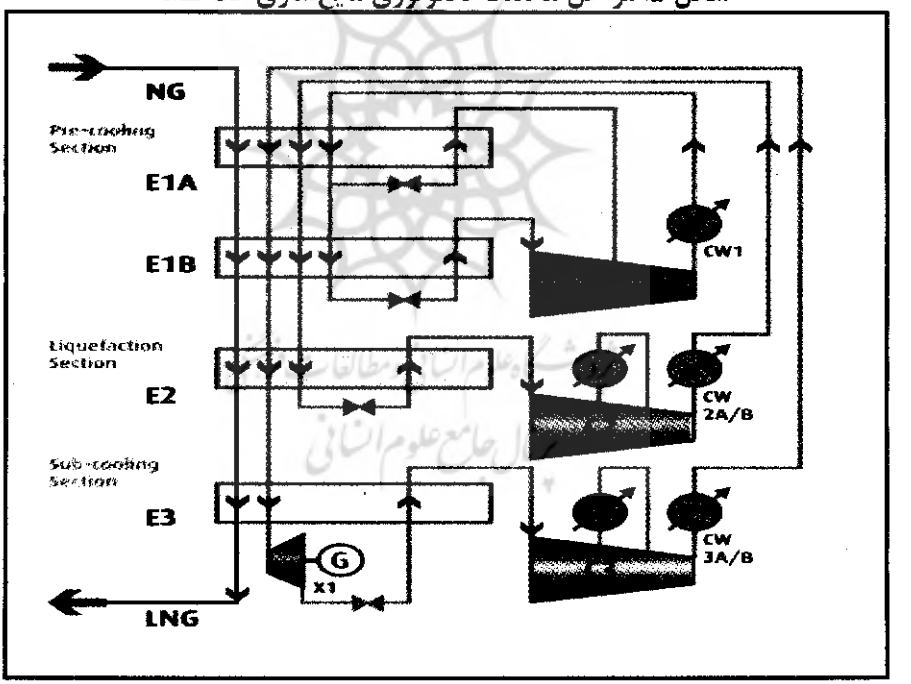
1. Spiral- Wound Heat Exchanger (SWHE)
2. Axial Compressor
3. Mixed Fluid Cascade Process (MFCP)

آغاز نموده‌اند. با این تلاش، یک فرآیند کاملا جدید برای تولید LNG ابداع شده که MFCP نامیده می‌شود. از این تکنولوژی در تاسیسات مایع‌سازی Snohvit نروژ با ظرفیت ۴/۲ میلیون تن، که در پایان سال ۲۰۰۷ به‌بهره‌برداری رسیده، استفاده‌شده‌است.

در این روش، گازطبیعی تصفیه شده توسط سه سیکل مجزا و متفاوت (سردسازی با سیال مبرد مرکب پیش سردسازی)[1]، پس از مایع‌سازی و سردسازی تکمیلی به‌LNG تبدیل می‌شود.

برودت سیکل پیش‌سردکن از طریق دو مبدل حرارتی Plate-Fine[2] به‌گازطبیعی خوراک انتقال می‌یابد، در حالی‌که برودت حاصل از دو سیال مبرد دیگر به‌منظور تامین برودت مورد نیاز مرحله مایع‌سازی و سیکل سرمایش تکمیلی، توسط دو مبدل حرارتی Spiral- Wound، انتقال می‌یابد.

شکل ۵. مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازی MFCP



منبع: Linde Technology, Reports on Science and Technology, January 2003

1. Pre-cooling
2. Plate-Fine Heat Exehanger (PFHE)

مبدل حرارتی Spiral-Wound ، مبدل اختصاصی شرکت Linde است. از این مبدل حرارتی ممکن است برای پیش‌سرمایش نیز استفاده شود. سیال‌های مبرد از ترکیبات متان، اتان، پروپان و نیتروژن ساخته می‌شوند. سیستم‌های متراکم سازی این سه سیال مبرد می‌توانند محرکه‌های مجزا و جداگانه‌ای داشته باشند و یا اینکه به‌صورت یکپارچه، دارای دو رشته فرآیند متراکم‌سازی باشند. برای واحدهای بزرگ LNG (بزرگتر از ۴ میلیون تن در سال) محرکه‌های توربین گازی Frame6 و Frame7 مدنظر قرار گرفته‌اند.

تکنولوژی مایع‌سازیMFCP همان تکنولوژی مرسوم Cascade است با این تفاوت مهم که در آن از سیکل‌های مبرد مرکب[1] به‌جای سیکل‌های مبرد خالص استفاده شده است، لذا کارایی ترمودینامیکی، بهبود یافته و انعطاف‌پذیری عملیاتی آن نیز افزایش یافته است. این تکنولوژی سه مرحله سردسازی را شامل می‌شود:

۱. سردسازی اولیه تا دمای ۵۰- درجه سانتی‌گراد؛

۲. مایع‌سازی تا دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد و در فشار ۶۰ بار؛

۳. سردسازی تکمیلی تا دمای ۱۵۵- درجه سانتی‌گراد و در فشار ۶۰ بار.

تکنولوژی MFCP جدید بوده و در کل بدون هر گونه مرجع صنعتی است، ولی با این حال طراحی فرآیندها و تجهیزات آن بهینه و کارا می‌باشد. علاوه بر این، اندازه مبدله‌ای حرارتی Spiral-Wound اختصاصی که در این تکنولوژی به‌کار می‌روند، به‌میزان قابل توجهی در مقایسه با مبدل‌های حرارتی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، کوچکتر بوده و دارای پیچیدگی کمتری هستند. بعلاوه، مبدل‌های حرارتی Spiral- Wound در مقیاس صنعتی، عملا از سال ۱۹۹۸، از نظر مکانیکی، هیدرولیکی و گرمایی، در یک واحد تولید LNG در آفریقای‌جنوبی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در نهایت، تکنولوژی MFC این امکان را فراهم می‌آورد که کمپرسورهای مجزا و بزرگتر، سیال مبرد را در مقیاس گرمایی بزرگتری مورد استفاده قرار دهند.

۲-۶. تکنولوژی مایع‌سازی Prico

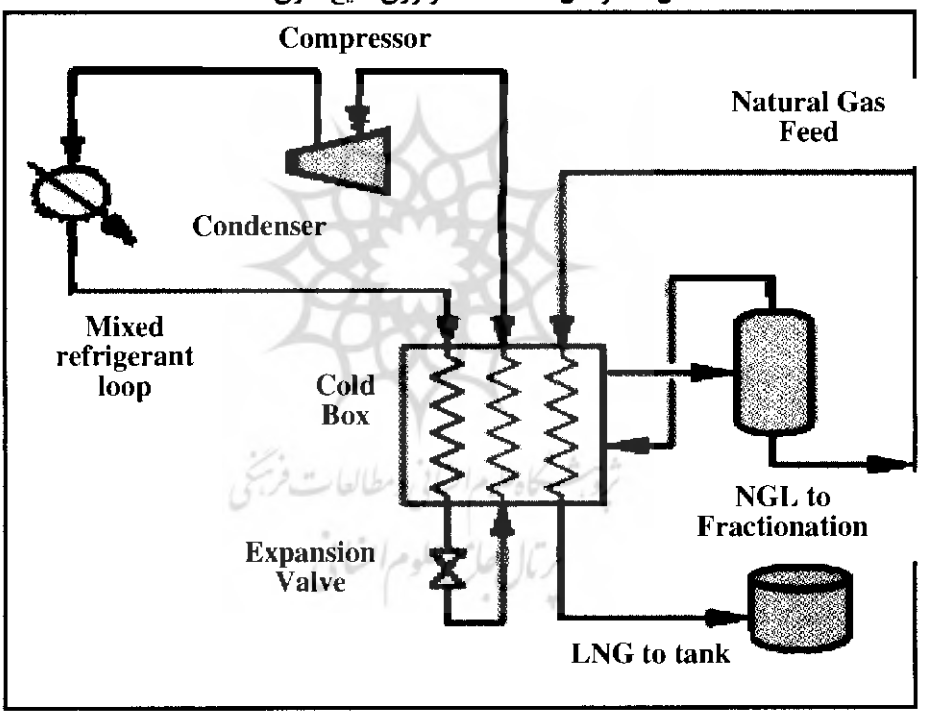
Black و Veatch یک فرآیند مایع‌سازی با سیال مبرد مرکب (Prico) را توسعه دادند که با موفقیت در واحدهای بزرگ[2] تولید و صادرات LNG (و نیز واحدهای کوچکتر

1. Mixed Componet refrigerant cycles
2. Base load Plant

به‌عنوان عامل پیک‌سایی)[1] مورد استفاده قرار گرفته است. این فرآیند متشکل از یک سیکل سردسازی با سیال مبرد مرکب[2] و یک سیستم تراکمی سردسازی است که در یکی از واحدهای مایع‌سازی اصلی الجزایر، مورد استفاده قرار گرفته است.

سیال مبرد مورد استفاده در این روش، مخلوطی از نیتروژن، متان، اتان، پروپان و ایزوپنتان می‌باشد. سهم هریک از اجزای‌تشکیل‌دهنده این سیال به‌نحوی‌انتخاب شده‌اند که منحنی گرمایش سیال با منحنی‌سرمایش گاز خوراک تا حد امکان با یکدیگر منطبق شوند. تطابق بیشتر این منحنی‌ها، کارایی بیشتر فرآیند مایع‌سازی را به‌دنبال دارد.

شکل ۶. مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازیPrico



منبع:

Global LNG Report,Process selection is critical to onshore LNG economics, Saeid Mokhatab, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, and Michael J. Economides, University of Houston, Houston.

1. Peak Shaving
2. Mixed refrigerant Loop

سیال مبرد قبل از ورود به‌محیط ایزوله شده مبدل‌های حرارتی Plate-fine با راندمان بالا که در مجموع اتاقک سرما نامیده می‌شوند، متراکم شده و تا حدودی تغلیظ می‌شود. این اتاقک سرما حاوی تعدادی مبدل حرارتی Plate-fine است که باعث می‌شود جریانات متعددی (جریان سیال مبرد و گاز خوراک) گرم و سرد شوند تا در نهایت، از نظر دما به‌یکدیگر نزدیک شوند. سپس سیال مبرد مرکب قبل از عبور ناگهانی از میان یک شیر انبساطی، کاملا تغلیظ و متراکم می‌شود، این عمل باعث کاهش ناگهانی و زیاد دمای آن می‌شود. این جریان خیلی سرد به‌منظور متراکم‌سازی جریان سیال مبرد همچنین جریان گاز خوراک، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از آن جریان گرم و کم فشار سیال مخلوط به‌درون یک کمپرسور جهت متراکم‌سازی مجدد فرستاده می‌شود. جریان گاز خوراک وارد اتاقک سرما شده و ابتدا تا حدود ۳۵- درجه سانتی‌گراد، سرد می‌شود. سپس گاز به‌درون یک جدا کننده به‌منظور جداسازی ترکیبات سنگین‌تر فرستاده می‌شود. در پایان سیال مبرد منبسط شده و ترکیبات سبک (عمدتا متان) را تا دمای مایع‌سازی، سرد می‌کند.

تکنولوژی Prico تا حد زیادی لوله کشی، نظارت و کنترل و تجهیزات واحد مایع‌سازی را ساده و مختصر می‌کند، که در نتیجه آن تا حدود ۳۰درصد در هزینه سرمایه‌ای، صرفه‌جویی می‌شود.

۲-۷. تکنولوژی مایع‌سازی Liquefin

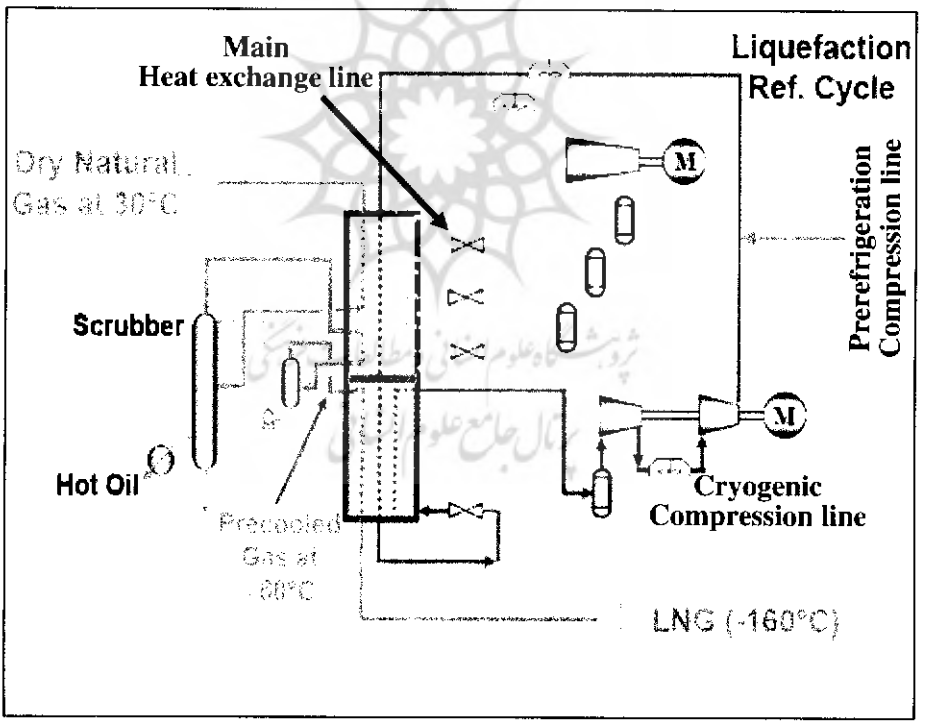
دو شرکت IFP و Axens تکنولوژی مایع‌سازی Liquefin را جهت تولید LNG ارزان‌تر توسعه داده‌اند. با استفاده از این روش، ظرفیت‌های بالا، با طراحی ساده و استفاده از کمپرسورهای استاندارد، قابل دسترسی خواهد بود. این خصوصیات، تکنولوژی Liquefin را به‌عنوان گزینه مطلوبی برای پروژه‌های تولید LNG امروزی مطرح می‌سازد. این تکنولوژی شامل یک فرآیند مایع‌سازی با دو سیال مبرد مرکب است که برای پروژه‌های بزرگ تولید LNG با ظرفیت هر واحد تا حدود ۸ میلیون‌تن در سال پیشنهاد شده‌است. در این تکنولوژی کل‌فرآیند سردسازی و مایع‌سازی‌در یک مبدل حرارتی Plate-Fine صورت می‌گیردکه درون اتاقک سرما تعبیه شده است. این مبدل حرارتی در قلب این تکنولوژی مایع‌سازی طراحی شده و به‌عنوان اصلی‌ترین و مهم‌ترین بخش آن به‌شمار می‌رود. تلاشهای زیادی به‌منظور تضمین و اطمینان از بهره‌برداری بهینه و بی‌نقص از این مجموعه صورت گرفته است.

سیال‌های مبرد از ترکیب متان، اتان، پروپان، بوتان و نیتروژن ساخته شده‌اند.

اولین سیال مبرد مرکب در سه سطح تراکمی مختلف (در سه مرحله با فشارهای مختلف) جهت پیش‌سردسازی گاز فرآوری شده و پیش‌سردسازی و مایع‌سازی دومین سیال مبرد مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرد. دومین سیال مبرد مرکب نیز به‌منظور مایع‌سازی و سردسازی تکمیلی گاز فرآوری شده، به‌کار برده می‌شود.

با استفاده از سیال مبرد مرکب در مرحله پیش‌سردسازی، دما با توجه به‌ترکیب سیال تا حدود ۵۰- الی ۸۰- درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. در این دما، سیال مبرد مرکب می‌تواند کاملا متراکم و تغلیظ شود (جداسازی مورد نیاز نمی‌باشد) به‌علاوه حجم سیال بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نسبت وزنی سیال مبرد و LNG، می‌تواند کمتر از واحد باشد.

شکل ۷. مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازی Liquefin



منبع:

1st Russia & CIS Gas Technology Conference RGTC 2004 - Moscow 28 & 29 September

با کاهش مقدار سیال مبرد، انرژی مصرفی نیز کاهش می‌یابد و سهم قابل توجهی از انرژی مورد نیاز جهت متراکم سازی از سیکل سیال مبرد به‌سیکل پیش‌سردسازی انتقال می‌یابد. بعلاوه، این انتقال انرژی امکان توزیع مجدد و بهتر بارهای مورد مبادله را فراهم می‌آورد. یکی از مزایای عمده این تکنولوژی جدید، امکان برقراری تعادل انرژی میان دو سیکل تبرید است که استفاده کامل از انرژی را که به‌وسیله دو توربین گازی یکسان ومشابه تامین می‌شود، ممکن می‌سازد.

تکنولوژی Liquefin بسیار انعطاف‌پذیر است. این تکنولوژی دستیابی به‌ظرفیت‌های بالا و رقابتی را امکان‌پذیر می‌سازد. توربین‌های گازی نوع Frame7 برای واحدهای بزرگ LNG در این تکنولوژی ارائه شده‌اند. توربین‌های گازی نوع Frame9 نیز اخیرا برای محرکه‌های مکانیکی، مناسب تشخیص داده شده‌اند. با استفاده از تکنولوژی Liquefin، ظرفیتهای ۷ تا ۸ میلیون تن فقط با استفاده از دو محرکه اصلی قابل دسترسی خواهند بود.

این تکنولوژی بویژه برای واحدهایی با ظرفیت ۴ تا ۸ میلیون‌تن بسیار مناسب بوده و دارای گزینه‌های قابل اجرای فراوانی برای طراحی و راه‌اندازی تأسیساتی می‌باشد که بطور کامل پاسخگوی نیاز مشتریان است. ساخت واحدهای LNG با ظرفیت حدود ۶ میلیون تن در سال با استفاده از این تکنولوژی، جهت ساخت در ایران هدف‌گذاری شده است.

۲-۸. تکنولوژی مایع‌سازی Teal Arc

در این سیستم تنها یک کمپرسور مورد نیاز است و سیال لازم برای ایجاد هر سطح برودت از طریق انقباض اجزای تشکیل‌دهندهٔ گازطبیعی ورودی به‌تأسیسات تأمین می‌شود. در این سیستم اگرچه فشار مورد نیاز ممکن است ۲۰ درصد بیش از فشار مورد نیاز در سیستم PPMR باشد، ولی سرمایهٔ لازم جهت اجرای این سیستم، کمتر از سیستم‌های دیگر خواهد بود. در این فرآیند، سرمایش گازطبیعی مایع و میعان اجزاء سبک در مخلوط سرماساز در مراحلی شبیه به‌هم انجام می‌شود. از این فرآیند برای واحدهای کوچک مثل واحدهای کاهش بار پیک (Peak-Shaving Plants) نیز استفاده می‌شود.

۲-۹. تکنولوژی مایع‌سازی Technip-Snamprogetti

فرآیند دیگری که برای مایع‌سازی گاز وجود دارد ، فرآیند Technip-Snamprogetti

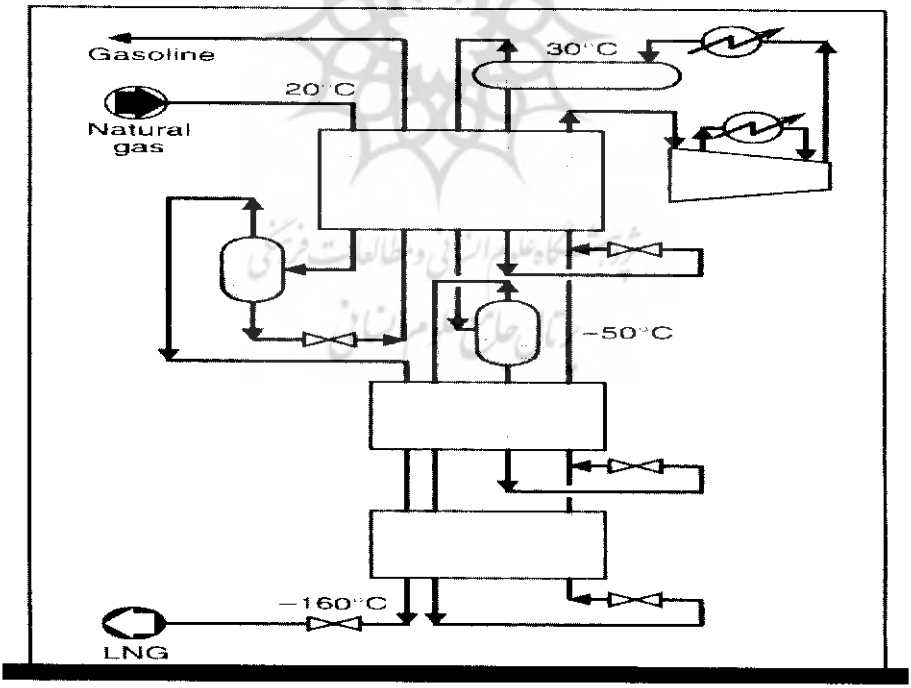
است کـه از فرآینـد ابتـدایی TEALARC اقتبـاس شـده و دارای دو سـیکل سرماسـاز مختلط متوالی می‌باشد. این امر باعث انعطاف‌پذیری زیاد این فرآیند است.

۳. مقایسه تکنولوژی‌های مختلف مایع‌سازی

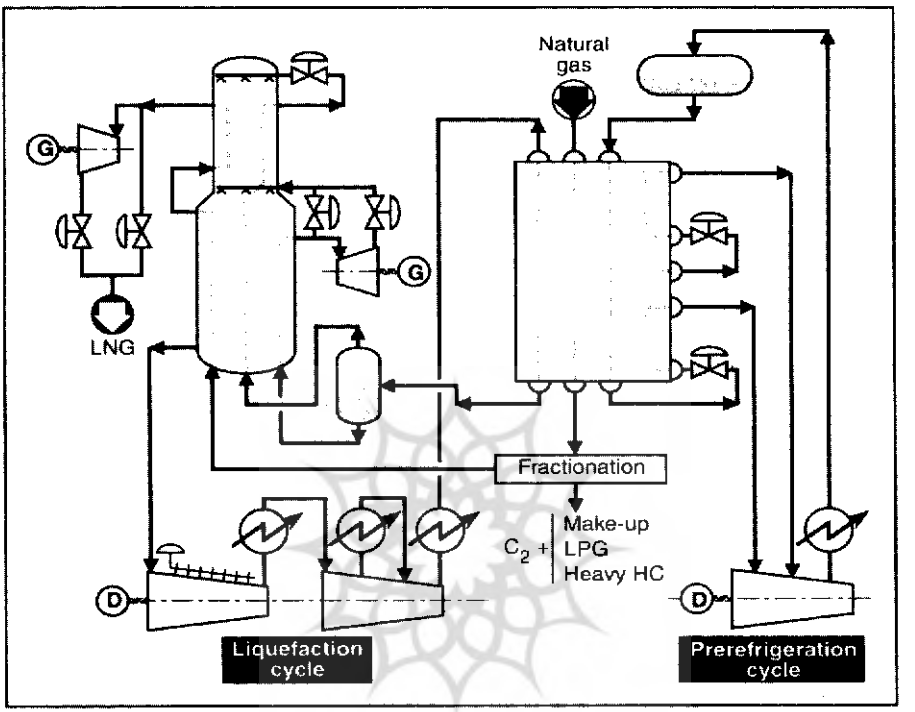
طراحی بهتر تجهیزات به‌همراه واحدهای مایع‌سازی بزرگتر، بهـره‌وری تاسیـسات تولیـد LNG را به‌میزان قابل توجهی افزایش داده ولـی انتـشار مـداوم و فزاینـده آلاینـده‌هـای CO_2، محدودیت‌هایی را در استفاده از توربین‌های گازی بزرگتر جهت تولید برق مصرفی کمپرسور مبردهای واحدهای مایع‌سازی بوجود آورده است.

در نتیجه روند رو به‌رشدی در استفاده از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی تولیـد بـرق برای تأمین انرژی برق کمپرسور واحدهای مایع‌سازی بـه‌جـای اسـتفاده از تـوربین‌هـای

شکل ۸. مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازی TEALARC



شکل ۹. مراحل مختلف تکنولوژی مایع‌سازی Technip-Snamprogetti



گازی وجود دارد و بدین ترتیب میزان گاز مصرفی واحدهای مایع‌سازی کاهش می‌یابد. دیگر راه‌های بهبود راندمان واحدهای مایع‌سازی شامل بهینه‌سازی نصب تجهیزات نظیر واجد تولید بخار، پمپ انتقال آب دریا، تانکرهای ذخیره و تجهیزات بارگیری می‌شود.

پیشرفت‌های آتی صنعت LNG (شامل تأسیسات مایع‌سازی، ذخیره‌سازی و انتقال) گستره استفاده از تأسیسات LNG را خصوصا در زمینه تولید و انتقال گاز از نقاط دور افتاده به‌شدت افزایش خواهد داد. این پیشرفت‌ها دسترسی به‌میادین دریایی دور افتاده را به‌منظور احداث تأسیسات مایع‌سازی و پایه‌های دریافت LNG ، آسانتر نموده و موانع موجود را برطرف خواهند نمود.

جدول ۱. تکنولوژی‌های مایع‌سازی مورد استفاده در واحدهای جدید تولید LNG

کشور	پروژه	شروع بهره‌برداری	ظرفیت (میلیون تن در سال)	تعداد واحدها	تکنولوژی مایع‌سازی
نیجریه	Nigeria LNG (Train3)	۲۰۰۲	۳/۲	۱	APCI-C3/MCR
	Nigeria LNG (Train4&5)	۲۰۰۵	۸/۲	۲	APCI-C3/MR
مصر	SEGAS – Damietta	۲۰۰۴	۵	۱	APCI-C3/MR
	Egyptian LNG – Idku (Train1&2)	۲۰۰۵	۷/۲	۲	Optimized Cascade
ترینیداد و توباگو	Atlantic LNG (Train2)	۲۰۰۲	۳/۲	۱	Optimized Cascade
	Atlantic LNG (Train3)	۲۰۰۳	۳/۲	۱	Optimized Cascode
	Atlantic LNG (Train4)	۲۰۰۵	۵/۲	۱	Optimized Cascade
مالزی	MLNG- Tiga	۲۰۰۳	۶/۸	۲	APCI-C3/MCR
استرالیا	Australian LNG-NWS (Train4)	۲۰۰۴	۴/۵	۱	APCI-C3/MCR
	Darvin LNG- Baya undan	۲۰۰۶	۳	۱	Optimized Cascade
قطر	RasGas2(Train1)	۲۰۰۴	۴/۷	۱	APCI-C3/MR
	RasGas2(Train2)	۲۰۰۵	۴/۷	۱	APCI-C3/MCR
عمان	Oman LNG-Qalhat (Train3)	۲۰۰۶	۳/۵	۱	APCI-C3/MCR
نروژ	Snohvit	۲۰۰۷	۴/۲	۱	Statoil-Linde

منبع:

1. Report of Programme Committee D, Chairperson Chawki Mohamed Rabal Algeria, June 2006
2. Encyclopedia of LNG, 2005
3. LNG Journal, April 2007

پیشرفت مداوم و مستمر در طراحی تأسیسات LNG، از طریق مقایسه تأسیسات بهره‌برداری شده قبلی با تأسیسات فعلی و برنامه‌ریزی شده آتی، کاملا مشهود است. با اینکه صنعت LNG در انحصار تکنولوژی PPMR می‌باشد، طی ۵ تا ۷ سال گذشته، تکنولوژی‌های مایع‌سازی، از تنوع و گوناگونی زیادی برخوردار شده‌اند. افزایش رقابت منجر به افزایش ظرفیت واحدها، بهبود یکپارچگی موتورهای محرک و کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای شده است.

تکنولوژی PPMR که در همه تـأسیسات LNG شرکت شل در سراسر دنیا به‌کار گرفته شده است، در واقع به‌عنوان پایه و اساس طراحی تأسیـسات مـایع‌سـازی در نظـر گرفته شده بود. بطور کلی این تکنولوژی به‌عنـوان یـک تکنولـوژی قابـل اطمینـان و در دسترس برای تولید LNG و از لحاظ هزینه‌ای نیز بسیار کـارا، پذیرفتـه شـده بـود. ایـن تکنولوژی در بیش از ۹۰ درصد کل واحدهای تولیـد LNG کـه تـا پایـان سـال ۲۰۰۳ به‌بهره‌برداری رسیده بودند به‌کار گرفته شده است.

در فاصله سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۴ حدود ۴۷میلیون تن ظرفیت‌جدید تولید LNG به‌بهره‌برداری رسیده‌که ۳۱/۷ میلیون تن از آن از تکنولوژی PPMR(APCI-C3/MR) و حدود ۱۵/۴ میلیون تن نیز از تکنولوژی Optimized Cascade استفاده کرده‌اند.

با بهره‌برداری از ظرفیت‌های جدیـد تولیـد LNG، سـهم تکنولـوژی مـایع‌سـازی شرکت APCI در بازار از بیش از ۹۰درصد به‌کمتر از ۸۳درصد کاهش یافته، درحالی‌کـه سهم تکنولوژی شرکت Phillips از ۳/۵درصد به‌حدود ۱۴/۶درصد افزایش یافته است.

جدول ۲. تکنولوژی‌های مایع‌سازی و سهم آنها از تولید LNG در پایان سال ۲۰۰۶

صاحب امتیاز	تکنولوژی مایع‌سازی	تعداد کل واحدها	کل تولید (میلیون تن در سال)	سهم از تولید بازار	شروع بهره‌برداری	ظرفیت بزرگترین واحد (میلیون تن در سال)
APCI	PMR	۶۱	۱۵۰/۵	۸۱	۱۹۷۲ تا ۲۰۰۶	۵
APCI	SMR	۴	۲/۶	۱/۴	۱۹۷۰	۰/۶۵
Technip-L'air Liquide	TEAL(dual Pressure SMR)	۳	۲/۱	۱/۱۳	۱۹۷۲	۰/۹۵
Technip-Lair Liquide	Classical Cascade	۳	۰/۹	۰/۴۸	۱۹۶۴	۰/۴
Pritchard	PRICO (SMR)	۳	۲/۶	۱/۴	۱۹۸۱	۱/۲
Phillips	Optimized Cascade	۸	۲۷/۱	۱۴/۶	۱۹۶۹ تا ۲۰۰۶	۵/۲

منبع:

1. Alaska Natural Gas Development Agency, All Alaska LNG Project, Initial Report, October 2004
2. Encyclopedia of LNG, 2005
3. LNG Journal, April 2007

از تکنولوژی Optimized Cascade در پروژه آتلانتیک LNG در ترینیداد و توباگو، داروین LNG در استرالیا و LNG مصر (Idku) استفاده شده و تنها تکنولوژیی است که در مناطق قطبی مورد استفاده قرار گرفته است.

تکنولوژی DMR به‌عنوان کاراترین تجهیزات و کمترین هزینه شناخته می‌شود. از این تکنولوژی در تاسیسات درحال ساخت تولید LNG در ساخالین روسیه استفاده شده است. همچنین اخیرا در برخی از پروژه‌های درحال ساخت از سایر تکنولوژی‌های جدید مایع‌سازی نظیر APCI (AP-X) و Statoil-Linde MFc Process نیز استفاده شده است.

جدول ۳. تکنولوژی‌های مایع‌سازی مورد استفاده در پروژه‌های درحال ساخت و برنامه‌ریزی شده

	پروژه	تکنولوژی مایع‌سازی	ظرفیت بزرگترین واحد (میلیون تن‌درسال)	شروع بهره‌برداری
روسیه	Sakhalin	DMR	۴/۸	۲۰۰۸
قطر	Qatargas 2(T 4&5)	APCI (AP-X)	۷/۸	۲۰۰۸
	Qatargas 3(T6)	APCI (AP-X)	۷/۸	۲۰۰۹
	Qatargas 4(T7)	APCI (AP-X)	۷/۸	۲۰۱۲
	Rasgas 2(T5)	APCI	۴/۷	۲۰۰۷
	Rasgas 3(T6&7)	APCI	۷/۸	۲۰۰۹
استرالیا	NWS T5	Statoil-Linde	۴/۳	۲۰۰۸
مصر	ELNG T3	POCLP	۳/۶	۲۰۰۸
اندونزی	Tangguh LNG	APCI	۷/۶	۲۰۰۸
نیجریه	Brass LNG	POCLP	۵	۲۰۰۹
ترینیداد و توباگو	Atlantic LNG (T5)	POCLP	۵/۲	۲۰۰۸
گینه نو	Bioko Island	POCLP	۳/۴	۲۰۰۷
ایران	Iran LNG	Statoil-Linde	۵	۲۰۱۰
	Pars LNG	Liquefin (Axens)	۵	۲۰۱۲
	Persian LNG	DMR	۷/۵	۲۰۱۴
یمن	Yemen LNG (T1&2)	APCI	۶/۸	۲۰۰۹
ونزوئلا	Mariscal Sucre	APCI	۴/۷	۲۰۰۹

منبع:

1. Alaska Natural Gas Development Agency, All Alaska LNG Project, Initial Report, October 2004
2. Encyclopedia of LNG, 2005
3. LNG Journal, April 2007

شکل ۱۰ تاریخچه استفاده از تکنولوژی‌های مایع‌سازی را در طول زمان از سال ۱۹۶۴ که اولین تاسیسات مایع‌سازی در Arzew الجزایر به‌بهره‌برداری رسید، نشان می‌دهد.

۳-۱. معیار انتخاب تکنولوژی مایع‌سازی

تفاوت‌های مهم تکنولوژی‌های مایع‌سازی عبارتند از:

۱. نوع سیال مبرد (خالص یا مخلوط)،

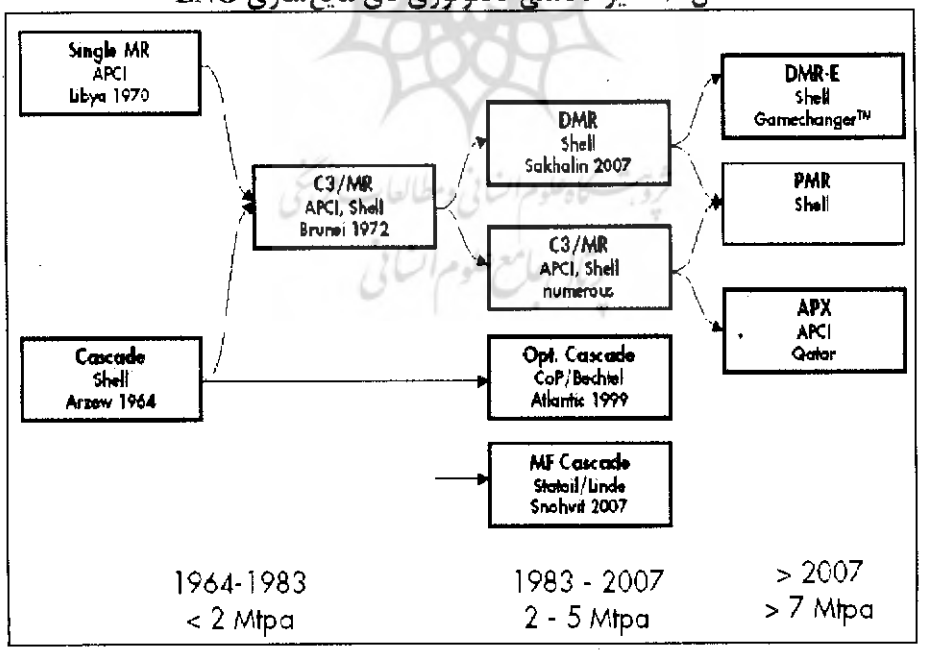
۲. نوع مبدل حرارتی (ابعاد، فشار عملیات، تنوع سازندگان و هزینه ساخت)،

۳. تعداد کمپرسورهای مورد نیاز و توان آنها.

مسئله مهم در مورد مبدل‌ها، نوع سیال مورد استفاده در بخش خنک‌کن آنها (آب یا هوا) می‌باشد. هم‌اکنون به‌علت خوردگی ایجاد شده در مبدل‌های خنک‌کن آبی، اکثر مجتمع‌های تولید LNG از هوا استفاده می‌کنند.

به‌طورکلی انتخاب تکنولوژی مایع‌سازی مناسب علاوه بر دسترسی به‌تکنولوژی، به‌چهار عامل مهم و تاثیرگذار بستگی دارد که عبارتند از:

شکل ۱۰. سیر تکاملی تکنولوژی‌های مایع‌سازی LNG



۱. هزینه‌های سرمایه‌ای مورد نیاز،
۲. بازده انرژی،
۳. شرایط جغرافیایی پروژه،
۴. قابلیت اطمینان تکنولوژی مایع‌سازی.

۳-۲. هزینه‌های سرمایه‌ای

از میان دو تکنولوژی اصلی مایع‌سازی (تکنولوژی متعلق به‌شرکت APCI و تکنولوژی POCLP متعلق به‌شرکت Phillips)، تکنولوژی مایع‌سازی APCI سرمایه‌بری کمتری دارد به‌عبارت دیگر هزینه تجهیزات و دستگاه‌ها در تکنولوژی POCLP در مقایسه با تکنولوژی APCI بسیار بیشتر است. متوسط هزینه واحد تولید LNG با استفاده از تکنولوژی APCI در حدود ۱۷درصد کمتر از تکنولوژی POCLP می‌باشد[1]. این نتیجه احتمالا به‌میزان قابل توجهی تحت‌تاثیر بزرگترین واحدهای مایع‌سازی جهان در قطر که از تکنولوژی مایع‌سازی شرکت APCI استفاده می‌نمایند، قرار گرفته است.

۳-۳. بازده حرارتی

فرآیند مایع‌سازی به‌شدت انرژی بر است. بیش از ۱۴درصد انرژی مصرفی، در فرآیند مایع‌سازی به‌دلیل عدم انتقال کارا و بهینه حرارت میان سیال مبرد و گاز درحال فرآوری درون مبدل‌های حرارتی و توربین‌های گازی، به‌هدر می‌رود.

تکنولوژی‌های‌مایع‌سازی APCI و POCLP در راندمان ترمودینامیکی کم و بیش

جدول ۴. اندازه واحدهای مایع‌سازی آتی LNG به‌تفکیک تکنولوژی‌های مایع‌سازی

	حداقل	متوسط	حداکثر
APCI	۳/۴	۴/۶	۷/۸
POCLP	۳/۴	۴	۵/۲
Linde	۴/۱	۴/۱	۴/۱
DMR	۴/۸	۴/۸	۴/۸

منبع: Simmons & Company International, Integrated Oil Research, April 7, 2005

1. Simmons & Company International, Integrated Oil Research, April 7, 2005

جدول ۵. میزان انرژی مورد نیاز یک واحد مایع‌سازی با ظرفیت یک میلیارد فوت مکعب در روز به‌تفکیک تکنولوژی‌های مورد استفاده

تکنولوژی مایع‌سازی	انرژی مورد نیاز (کیلووات ساعت)
APCI	۲۵۰۵۱۳
POCLP	۲۵۶۶۷۴
DMR	۲۳۶۱۴۰

منبع: Simmons & Company International, Integrated Oil Research, April 7, 2005

برابرند، اما نکته اصلی، تعداد و طراحی کمپرسورهای موردنیاز است. این‌مسئله به‌خصوص در شرایط خاص (نظیر پروژه‌هایی که با محدودیت مخازن گازی همراه‌اند و یا مواردی که احتمال به‌کارگیری واحدهای شناور LNG وجود دارد) می‌تواند تفاوت محسوسی در نتایج ایجاد کند. اگرچه تکنولوژی‌های مایع‌سازی LNG با ایجاد تغییرات در شکل و طراحی تجهیزات می‌توانند به‌یک راندمان تقریبا مساوی برسند، اما هر تکنولوژی مایع‌سازی، شرایط بهینه منحصر به‌فرد خود را داراست که توسط عوامل خاص موجود در پروژه قابل دستیابی است. این بدان معنی است که لازم است تکنولوژی‌های متفاوت تولید LNG در پروژه‌های مختلف LNG به‌کار گرفته شوند و لزوما نمی‌توان این تکنولوژی‌ها را بدون در نظر گرفتن عوامل جانبی نظیر موقعیت مکانی طرح، قابلیت اطمینان تکنولوژی مورد نظر، پیش‌بینی‌های بازار و همچنین میزان گاز موجود در مخزن به‌طور جامع مقایسه نمود.

۳-۴. شرایط و محدودیت‌های مکانی

عواملی نظیر دمای محیط، وسعت زمین در دسترس و زیر ساختهای موجود نیز می‌توانند تاثیرات مهم و قابل ملاحظه‌ای بر انتخاب تکنولوژی مناسب مایع‌سازی برای یک پروژه خاص داشته باشند.

۳-۵. قابلیت اطمینان

دوره زمانی‌که هر تکنولوژی مایع‌سازی طی آن بدون نقص‌فنی و وقفه، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، عامل مهمی در حداکثرسازی میزان بازگشت سرمایه تاسیسات مایع‌سازی به‌شمار می‌رود. تکنولوژی مایع‌سازی شرکت فیلیپس (OPCLP) با طولانی‌ترین زمان

بهره‌برداری بدون مشکل در تاسیسات LNG آلاسکا، در این‌زمینه دارای رکورد می‌باشد. میزان دسترسی و قابلیت بهره‌برداری تاسیسات آلاسکا به‌طور متوسط بیش از ۹۵درصد و قابلیت اطمینان توربین‌های گازی آن بیش از ۹۹درصد بوده است. تکنولوژی مایع‌سازی شرکت APCI نیز رایج‌ترین و مقبول‌ترین تکنولوژی مایع‌سازی بوده و رکورد بلندمدتی را در زمینه پیاده‌سازی و اجرای موفق از خود برجای گذاشته است.

۴. مقایسه اقتصادی دو تکنولوژی Liquefin و APCI/MR

تکنولوژی Liquefin پیشرفت غیرمنتظره‌ای را پیش روی سرمایه‌گذاران تاسیسات مایع‌سازی قرار می‌دهد، ظرفیت تأسیسات می‌تواند با در نظر گرفتن امکانات و تسهیلات اقتصادی و بازاریابی بدون هیچ‌گونه نگرانی از موانع فنی، انتخاب شود. کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری به‌ازای هر تن LNG در مقایسه با تکنولوژی APCI/MR حدود ۲۰درصد گزارش شده است. این کاهش هزینه‌ها عمدتا ناشی از عوامل زیر می‌باشد:

۱. افزایش ظرفیت تأسیسات،
۲. کاهش هزینه مبدل‌های حرارتی،
۳. طراحی یکپارچه و بهم فشرده و در نتیجه کاهش فضای مورد نیاز،
۴. استفاده از تجهیزات با لیسانس‌های مختلف.

تکنولوژی Liquefin همه مزایای تکنولوژی MFCP را به‌علاوه کارایی بالاتر و میزان تجهیزات چرخشی کمتر، داراست.

جدول ۶. مقایسه اقتصادی تکنولوژی‌های مایع‌سازی Liquefin و APCI/MR

	C3/MR	Liquefin	تفاوتها
هزینه تجهیزات(میلیون دلار)	۱۲۹/۸	۱۱۲/۱	-۱۳/۶٪
تجهیزات نصب شده (میلیون دلار)	۲۵۹/۷	۲۵۸/۲	-۱۲/۷٪
ظرفیت (میلیون تن در سال)	۳/۸۵	۴/۴۸	+۱۶/۴٪
سرمایه گذاری ویژه	۷۶/۶	۵۷/۶	-۲۵٪
کل سرمایه گذاری	۸۶۸	۸۲۳	-۵٪
کل سرمایه گذاری ویژه	۲۲۵	۱۸۴	-۱۸٪

منبع:

The Challenges of Further Cost Reductions for New Supply Options (Pipeline, LNG, GTL), 22nd World Gas Conference, 1-5 June 2003, Tokyo, Japan

۵. نتیجه‌گیری

مطالعه تکنولوژی‌های مختلف مایع‌سازی بیانگر این حقیقت است که هیچ‌یک از این تکنولوژی‌ها به‌تنهایی و به‌خودی خود، کارایی چندان بیشتری نسبت به‌سایر تکنولوژی‌ها ندارد، بلکه هرتکنولوژی مایع‌سازی، شرایط بهینه‌منحصر به‌فرد خود را داراست‌که توسط عوامل خاص موجود در پروژه قابل دستیابی است. لذا تصمیم‌گیری نهایی در مورد اینکه کدام یک از تکنولوژی‌ها باید برای پروژه تولید LNG انتخاب شوند، به‌پارامترهای خاص آن پروژه و وضعیت پیشرفت بالقوه تکنولوژی‌های جدید بستگی خواهد داشت. جدول ۷ مشخصات تکنولوژی‌های مختلف مایع‌سازی را به‌طور مختصر نشان می‌دهد.

جدول ۷.خلاصه مشخصات تکنولوژی‌های مایع‌سازی

تکنولوژی مایع‌سازی	انتخاب سیال مبرد			مبدلهای حرارتی			توربین‌ها	صاحب امتیاز
	سردسازی اولیه	مایع‌سازی	سردسازی جایگزین	سردسازی اولیه	مایع‌سازی	سردسازی جایگزین		
Pre-Cooled Mixed Refrigerant	پروپان	مبرد مرکب[1]		Core-in-Kettle	MCHE*		Frame 6 or 7	Air Products
Phillips Optimized Cascade	پروپان	اتیلن	متان	PFHE***	PFHE	PFHE	Frame 5	Phillips
Mixed Fluid Cascade (MFCP)	مبرد مرکب[2]	مبرد مرکب[2]	مبرد مرکب[2]	PFHE	SWHE****	SWHE****	Frame 6 or 7	Statoil/Linde
Double Mixed Refrigerant (DMR)	مبرد مرکب[3]	مبرد مرکب		SWHE****	SWHE****	SWHE****	Frame 7	Shell
Liquefin	مبرد مرکب	مبرد مرکب		PFHE	PFHE	PFHE	Frame 7	Axens
PRICO	فرآیند مایع‌سازی تک مرحله ای با سیال مبرد مرکب[2]			PFHE	PFHE	PFHE	steam	Black & Veatch

۱. نیتروژن، متان، اتان و پروپان
۲. فرآیند سه مرحله ای با سیال مبرد مرکب
۳. اتان و پروپان
۴. نیتروژن، متان، اتان، پروپان و ایزوپنتان

* Main Cryogenic Heat Exchanger (MCHE)- متعلق به شرکت Air Products . البته لازم است متذکر شویم که تکنولوژی جدید APX برخی سردسازی‌های جایگزین را خارج از MCHE تعبیه نموده است.

** برخی واحدهای جدید از کمپرسورهای محوری استفاده نموده‌اند.

*** (Plate- Fin heat exchanger)- سردسازی اولیه از طریق مبدل‌های Core-in-Kettle نیز می‌تواند انجام شود.

**** Spiral Wound Heat Exchanger (SWHE) -- متعلق به شرکت Linde .

منابع و ماخذ

۱. رحیمی، غلامعلی، نگاهی به‌صنعت LNG در جهان، موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، تهران، چاپ اول، زمستان ۱۳۸۶ .

2. Overview of LNG in the United States, Natural Gas Conference,

Louisiana State University, October 27, 2003

3. Evaluating Liquefied Natural Gas (LNG) Options for the State Of Hawaii, April 2007

4- UK Capability in the LNG Global Market, ENERGY INDUSTRIES AND TECHNOLOGY UNIT, 2006

5. K Trade & Investment Briefing:Natural Gas Liquefaction, M Josten,25th October 2005

6. Global LNG Report,Process selection is critical to onshore LNG economics, Saeid Mokhatab, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, and Michael J. Economides, University of Houston, Houston

7. Linde Technology, Reports on Science and Technology, January 2003

8. 1st Russia & CIS Gas Technology Conference RGTC 2004 - Moscow 28 & 29 September

9. Finn, A.J.; Johnson, G.L.; Tomlinson, T.R.: 'Developments in natural gas liquefaction', Hydrocarbon Processing, April 1999, Vol. 78, No. 4

10. The Challenges of Further Cost Reductions for New Supply Options (Pipeline, LNG, GTL), 22nd World Gas Conference, 1-5 June 2003, Tokyo, Japan

11. Report of Programme Committee D, Chairperson Chawki Mohamed Rabal Algeria, June 2006

12. Encyclopedia of LNG, 2005

13. LNG Journal, April 2007

14. Alaska Natural Gas Development Agency, All Alaska LNG Project, Initial Report, October 2004

15. www.shana.ir

16. Simmons & Company International, Integrated Oil Research, April 7, 2005

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی