

## گاز طبیعی، مایع سازی

### Liquefied Natural Gas (LNG)

کاهش حجم گاز طبیعی از طریق تبدیل آن به مایع، برای سهولت در ذخیره سازی و انتقال.

جزء اصلی در ترکیب گاز مایع شده (الان جی) متان است. دمای بحرانی متان ۱۹۰/۵۸ کلوین است؛ از این رو تبدیل آن به مایع در دما و فشار اتاق، امکان پذیر نیست؛ بنابراین پس از اجرای فرآیندهای اصلی روی گاز، نظیر آبزدایی و حذف گازهای خورنده، دمای آن در فشار حدود ۰/۱ MPa کاهش می یابد [۱]. در این فرآیند، الان جی از سردسازی گاز طبیعی در دمایی حدود ۱۶۱- درجه سلسیوس به دست می آید. در این تبدیل، حجم گاز به یک ششصدم تقلیل می یابد؛ این کاهش حجم، باعث می شود تا انتقال گاز به مناطق دوردست که خط لوله وجود ندارد، اقتصادی باشد. برای انتقال الان جی در این مسیرها از کشتی ها و تانکرهایی استفاده می شود که به صورت ویژه، برای این منظور ساخته شده اند و به وسیله آنها می توان گاز طبیعی را به بازار فروش منتقل کرد [۲]. از الان جی بیشتر در صنایع انرژی استفاده می شود [۳]. الان جی مایعی بدون رنگ و بو است و خواص سمی یا خوردندگی ندارد. میزان وزن مخصوص آن حدود ۰/۴۵ است؛ بنابراین مانند بسیاری دیگر از هیدروکربن ها اگر در آب ریخته شود، روی آب شناور می ماند. پس از تبدیل شدن به گاز باعث سرمای شدید می شود و البته گاز حاصل از آن نیز آتش گیر و خفه کننده است. از آنجا که الان جی عموماً از متان تشکیل شده است، نسبت مولی آن برای سوختن در هوا حدود ۴ الی ۱۶ درصد است [۴، ۵].

سپس دوباره به وسیله کمپرسور متراکم و این چرخه تکرار می شود. یکی از عوامل مهم در این فرآیند، انتخاب سیال مبرد است. این سیال اگر به صورت مناسب انتخاب شود، می تواند با انرژی کمتری مایع سازی را انجام دهد و در نتیجه، هزینه نهایی را کاهش دهد.

### روش های مایع سازی

امروزه شرکت های مختلفی با روش هایی منحصر به فرد، در زمینه مایع سازی فعالیت دارند. تفاوت عمده آنها در انتخاب سیال سردکننده، نوع مبدل های حرارتی و تجهیزات مورد نیاز از نظر ابعاد، فشار، عملیات و هزینه ساخت و تعداد کمپرسورها و توان آنها است. قبلاً برای سرد کردن مایع سردکننده، از آب دریا استفاده می شد. اما به علت ایجاد خوردگی ناشی از آن در تأسیسات، اکنون هوا جایگزین آن شده است [۶]. در ادامه رایج ترین روش های مایع سازی گاز به همراه نکات اصلی آن، مرور خواهد شد [۷]:

### فناوری مایع سازی Propane Precooled/ Mixed Refrigerant (PPMR)

این فناوری به وسیله شرکت Air Products and Chemicals, Inc (APCI) توسعه یافته است و حدود ۸۴ درصد کل تولید الان جی را در جهان دربر می گیرد. از دو عامل سردکننده، پروپان و ترکیبی از نیتروژن، متان، اتان و پروپان استفاده می کند. در این روش از دو چرخه سرمایشی متوالی استفاده می شود. در این فرآیند، یک بار گاز تا دمای ۳۱- درجه سرد و ترکیبات سنگین آن جدا می شود. در مرحله بعد تا ۱۶۱- درجه خنک و مایع می شود.

### پژوهشگاه مواد و فناوری مایع سازی AP-X

از این فناوری برای مقیاس بزرگ استفاده می شود. سیال مبرد در آن، ترکیبی از نیتروژن، اتان و پروپان است و پیش خنک کننده آن، نیتروژن است.

### فناوری مایع سازی CasCade

برای نخستین بار، شرکت فلیپس از آن استفاده کرد و با این هدف راه اندازی شد که برای طیف وسیعی از خوراکها قابل استفاده باشد. این فناوری سه چرخه خنک کننده دارد که در

برای مایع سازی گاز، ابتدا فرآورده های سنگین تر آن جدا می شود و گاز نهایی عمدتاً شامل متان باقی می ماند. مقدار فرآورده های سنگین تر از متان، با توجه به نوع پروژه بین ۱۷-۲۰ درصد خواهد بود. در این فرآیند عموماً طی دو مرحله، دمای گاز به حدود ۱۶۱- درجه سلسیوس کاهش می یابد. شیوه کاهش دما، استفاده از مایع مبرد و اثر ژول تامسون است؛ بدین گونه که به کمک شیر انبساطی و کاهش ناگهانی فشار، دمای سیال به صورت ناگهانی افت می کند؛

کاهش هزینه انرژی را در پی دارد؛ علاوه بر آن، با افزایش ظرفیت تأسیسات و طراحی یکپارچه و به هم فشرده آن، موجب کاهش یافتن بیشتر در هزینه‌ها شده است.

### فناوری مایع‌سازی Teal Arc

در این فرآیند، تنها نیاز به یک کمپرسور است. در آن گاز طبیعی مشابه سیال مبرد متراکم می‌شود دمای آن کاهش می‌یابد و سپس به صورت ناگهانی، منبسط می‌شود. با این حال، این فناوری اغلب در مقیاس کوچک به کار برده می‌شود.

### فناوری مایع‌سازی snamprogetti

این فرآیند از فرآیند ابتدایی Teal Arc گرفته شده و دارای دو چرخه سرماساز است.

### ذخیره‌سازی و انتقال ال‌ان‌جی

انتقال گاز طبیعی معمولاً به وسیله خط لوله انجام می‌پذیرد. در یک خط لوله پرفشار، انتقال گاز سرعت بسیار بیشتری از سرعت انتقال نفت دارد، اما به علت ارزش حرارتی پایین گاز منتقل شده، تنها حدود یک پنجاهم پتانسیل انرژی نفت منتقل شده را دارد.

معمولاً ال‌ان‌جی به دو شکل دریایی (کشتی، در مسیرهای بین‌المللی با حجم ۱۲۰-۱۶۰ هزار متر مکعب حجم در هر کشتی) و زمینی (تانکر در فواصل کوتاه ۲۰۰ تا هزار کیلومتر و با حجم ۲۷-۴۰ متر مکعب و قطار در فواصل ۱۰۰۰-۴۰۰۰ کیلومتر و با تانکرهایی به حجم ۴۰-۸۰ متر مکعب) به بازار یا محل مصرف منتقل می‌شود. در هر دو مورد، باید تانکر مخصوص حمل ال‌ان‌جی ساخته و روی کشتی، کامیون، یا قطار نصب شود [۱]. عموماً مخازن حمل ال‌ان‌جی به صورت کروی ساخته می‌شوند. علاوه بر آن برای مخازن ذخیره‌سازی در محل مصرف، می‌توان از مخازن بتنی نیز استفاده کرد.

### مخازن کروی

این نوع مخازن، رایج‌ترین نوع مخازن هستند. عموماً از ۴-۶ لایه آلیاژ آلومینیوم تشکیل شده‌اند و ظرفیتی حدود

آنها از متان، اتیلن و پروپان به مثابه خنک‌کننده استفاده می‌شود. در این روش، از توربین‌ها و کمپرسورهای زیادی استفاده می‌شود که هزینه تعمیر و نگهداری زیادی را تحمیل می‌کند.

### فناوری مایع‌سازی Dual Mixed Refrigerant (DMR)

شرکت شل این فناوری را توسعه داد. در آن از ترکیبی از اتان و پروپان برای سردسازی استفاده می‌شود. دارای دو چرخه است که یکی دما را تا ۵۰- درجه سلسیوس کاهش می‌دهد و دیگری گاز را تا نقطه مایع شدن، سرد می‌کند.

### فناوری مایع‌سازی Mixed Fluid Cascade Process (MFCCP)

این فناوری محصول مشترک دو شرکت Statoil و Linde است. در آن سه چرخه وجود دارد که شامل پیش سرد سازی، مایع‌سازی و سردسازی تکمیلی است. سیال سردکننده آن از متان، اتان، پروپان و نیتروژن تشکیل شده است. در چرخه اول دما تا ۵۰- درجه سلسیوس خنک می‌شود؛ سپس در دمای ۸۰- درجه سلسیوس و فشار ۶۰ بار مایع‌سازی انجام می‌شود و در نهایت در دمای ۱۵۵- درجه سلسیوس و فشار ۶۰ بار سردسازی تکمیلی صورت می‌گیرد.

### فناوری مایع‌سازی Prico

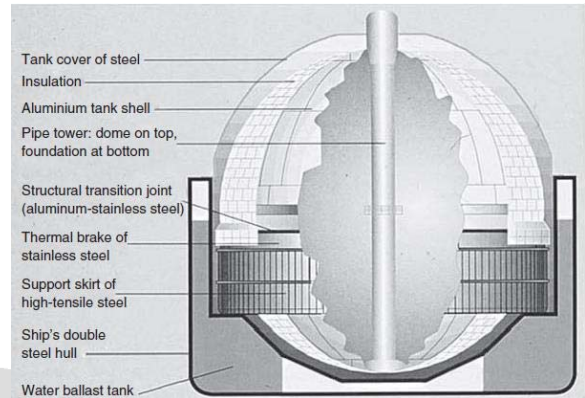
این روش مرکب از یک چرخه سردسازی مرکب و یک روش تراکمی است. شرکت پیک‌سا آن را مورد استفاده قرار داده و سیال مبرد آن مخلوطی از نیتروژن، متان، اتان، پروپان و ایزوپنتان است. این فرآیند لوله‌کشی نظارت و کنترل تجهیزات را تا حدی ساده و حدود ۳۰ درصد در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌کند.

### فناوری مایع‌سازی Liquefin

دو شرکت Institut Francais du Petrole (IFP) و Axens این فناوری را به گونه‌ای طراحی کردند که ظرفیت‌های بالا به آسانی و با استفاده از کمپرسورهای استاندارد قابل دسترسی باشد. در این فناوری امکان انتقال انرژی بین چرخه‌های پیش سرد سازی و مایع‌سازی قرار دارد که



شکل ۲. نمایی از مخازن بتنی ذخیره سازی [۹].



شکل ۱. برش مقطعی از مخازن کرومی [۵].

زمانی که زلزله ادامه پیدا می کند، تخریب افزایش می یابد [۸]. در شکل ۲ نمایی از این مخازن دیده می شود. ۳۰-۵ درصد کل هزینه های الان جی مربوط به انتقال آن است. ساخت کشتی های حمل الان جی معمولاً بسیار پرهزینه است و بیش از دو برابر ساخت یک کشتی حمل نفت خام نیاز به سرمایه دارد. با طولانی شدن مسیر انتقال، این هزینه افزایش می یابد. به طور کلی رعایت استانداردهای بالای کشتی سازی و به کارگیری فرآیندهای دقیق نگهداری این کشتی های پیچیده، از مهم ترین عوامل توسعه صنعت الان جی است. این کشتی ها دوجداره هستند؛ جداره خارجی به مثابه ضربه گیر عمل می کند و الان جی در جداره داخلی نگهداری می شود. برای تعادل کشتی، بین دو جداره با آب پر و به صورت مناسب و ایمن عایق بندی شده است. دمای حمل الان جی در این کشتی ها در ۱۶۱- درجه سلسیوس نگهداری می شود و روزانه مقدار اندکی از آن حدود ۰/۱ درصد تبخیر می شود تا به عنوان سوخت کشتی مورد استفاده قرار گیرد. این تبخیر به سرد داشتن مخزن کمک می کند. معمولاً مخازن درون کشتی، به صورت کرومی ساخته می شوند. اگرچه کرومی ساختن مخازن، هزینه ای بیش از ساخت آنها به صورت مکعب مستطیل تحمیل می کند، ولی این مخازن قابلیت تحمل فشار بیشتری دارند. برای مسائل ایمنی تنها ۹۹/۲ درصد از ظرفیت هر مخزن پر می شود [۱۰]. در شکل ۳ نمونه ای از کشتی های حمل الان جی دیده می شود.

۱۲۵ هزار متر مکعب دارند. کمترین ظرفیت آنها ۲۰ هزار و بیشترین ظرفیت، ۱۵۰۰۰۰ متر مکعب است. لایه های آلومینیومی روی کمربندی از فولاد نصب شده اند و پوشش دیگری از فولاد روی آنها قرار دارد تا از آنها در مقابل عوامل خارجی محافظت کند. روی این لایه فولاد را نیز می توان با پوششی از رزین یا پلیمر پوشاند تا در مقابل عوامل گوناگون محافظت شود [۵]. در شکل ۱ نمایی از این مخازن دیده می شود.

### مخازن بتنی

علاوه بر تانکرهای فلزی، می توان از مخازن بتنی نیز در محل مصرف استفاده کرد. این مخازن به شکل استوانه ساخته می شوند و حجم زیادی دارند. اندازه تقریبی آنها به تنهایی اندازه یک استادیوم ورزشی است و حدود ۱۸۰۰۰۰ متر مکعب گنجایش دارند. اما به علت تحمل فشار پایین تر، تأثیرات زیاد دمای پایین بر بتن و خطرپذیری بیشتر در بلایای طبیعی، مانند زلزله محبوبیت منابع فلزی را ندارند. منابع بتنی در مقابل لرزه، آسیب پذیری بالایی دارند. این آسیب پذیری خصوصاً در قسمت پایینی آن بیشتر می شود. طبق تحقیقات تا شتاب لرزه ای  $250 \text{ cm/s}^2$  عموماً این منابع امن هستند، اما در این شتاب تخریب شروع می شود. اگر زلزله ای این شتاب را وارد کند، از پایین مخزن ترک شروع می شود و به سمت بالا حرکت می کند و با توجه به مدت

LNG tanker polystyrene foam insulation failure under fire exposure". Univ. Arkansas, 2015.

- [6] Kidnay, A.J.; Parrish, W.R.; McCartney, D.G. *Fundamentals of Natural Gas Processing*, 2nd. CRC Press. 2011.
- [7] Ding, M.; et al. "Direct conversion of liquid natural gas (LNG) to syngas and ethylene using non-equilibrium pulsed discharge". *Appl. Energy*, 104, 2013.
- [8] Li, J.; et al. "Analysis of large concrete storage tank under seismic response". *J. Mech. Sci. Technol*, no. 29, 2015.
- [9] Financial Tribune. *LNG Storage Tank Contract*. *Financ. Trib.*  
<http://financialtribune.com/articles/energy/20737/lng-storage-tank-contract%2%A0> (accessed 12.19.15), 2015.
- [10] Mokhatab, S.; Poe, W.A. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. Gulf Professional Publishing, 2012.

[۱۱] یفیموف، ویمیر. چشم‌انداز تعامل گازی بین روسیه و ایران. خبرگزاری روسیه، ۲۰۱۴.

[http://pers.iran.ru/news/analytcs/80309/f\\_h\\_p\\_f\\_P\\_V\\_p\\_l\\_P\\_f\\_d\\_n\\_d\\_f](http://pers.iran.ru/news/analytcs/80309/f_h_p_f_P_V_p_l_P_f_d_n_d_f) گرفته شده در 2015.07.08



شکل ۳. کشتی حمل ال. ان جی با چهار مخزن کرووی [۱۱].

احسان خامه‌چی

## تبدیل مجدد ال‌ان‌جی به گاز

برای استفاده از ال‌ان‌جی باید آن را مجدداً به گاز تبدیل کرد. به‌این منظور با استفاده از آب دریا و یا مخازن احتراق، دمای آن را در فشار ۶۰ تا ۱۰۰ بار افزایش می‌دهند و از آن استفاده می‌کنند. احداث نیروگاه برق در کنار این تأسیسات، موجب افزایش راندمان هر دو تأسیسات ال‌ان‌جی و تولید برق می‌شود. این گاز قبل از تزریق به شبکه توزیع با افزایش سایر گازها دارای ارزش حرارتی مطلوب می‌شود [۳].

### مداخل مرتبط

گاز طبیعی و فرآورده‌ها؛ گاز طبیعی، فرآیندهای پالایش؛ گاز طبیعی، فشرده‌سازی؛ متان.

### کتاب‌شناسی

#### بژوهشگاه مواد و انرژی

- [1] Yang, S.; et al. "The research about storage and transportation of natural gas based on LNG technology". *Nat. Resour*, 06, 2015.
- [2] Puppo, A.; et al. "LNG storage distribution and regasification in a single plant an innovative Challenge for the Italian market. offshore mediterr". *Conf. Exhib*, 2015.
- [۳] رحیمی، غلامعلی. نگاهی به صنعت LNG در جهان. تهران: مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، ۱۳۸۶.
- [4] Afrianto, H.; et al. "A numerical investigation on LNG flow and heat transfer characteristic in heat exchanger". *Int. J. Heat Mass Transf*, 68, 2014.
- [5] Martinez, J. "A computational study of the potential for