دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش تبدیل انرژی

آنالیز اگزرژی سیکل‌های بازیاب انرژی سرد گاز طبیعی مایع (LNG)

استاد راهنما: **دکتر جزایری**

نگارش: **رسول عباسی**

خرداد ۱۳۸۹

به نام حضرت دوست

که

هر چه داریم از اوست

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس خدایی را که انسان را آفرید و خلقت او را به تعلیم با قلم زینت بخشید و به انسان آموخت آنچه را که انسان نمی‌دانست.

والاترین سپاس خود را پیش‌کش استاد محترم جناب آقای دکتر جزایری می‌نمایم که پرتو علم و دانش بیکرانشان روشنایی بخش راهم بوده است و همچنین از دوستانی که مرا در انجام این پروژه یاری کردند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

گاز طبیعی مایع علاوه بر چگالی انرژی بالا، به خاطر آلودگی کم آن با محیط نیز سازگار است و به همین دلیل به عنوان سوخت سبز در نیروگاه‌ها و اتومبیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.LNG در دمای ۱۱۰ درجه کلوین و فشار نرمال ذخیره می‌شود و علاوه بر انرژی شیمیایی، به خاطر کار و انرژی که هنگام مایع سازی صرف می‌شود، دارای اگزرژی فیزیکی زیادی نیز می‌باشد. با یک تخمین ساده و ابتدایی می‌توان گفت برای تولید یک تن گاز LNG حدود ۸۵۰ کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی نیاز است و هنگام مصرف که مایع LNG به گاز تبدیل می‌شود، با بازیاب انرژی سرد می‌توان به ازای هر تن LNG حدود ۲۴۰ کیلووات-ساعت کار تولید کرد و این اهمییت موضوع بازیاب انرژی سرد را می‌رساند. در این گزارش ابتدا به مقدمه‌ای درباره LNG و خواص آن می‌پردازیم سپس چگونگی پاک‌سازی و آماده‌سازی گازطبیعی برای ورود به بخش مایع‌سازی دستگاههای تولید LNG را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در انتها سیکل بازیاب انرژی سرد LNG و آنالیز اگزرژی آن و همچنین پارامترهای موثر بر عملکرد این سیکل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: گاز طبیعی ، اگزرژی فیزیکی، LNG، سیکل بازیاب انرژی سرد

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

۱- مقدمه‌ای بر LNG ۴

۱-۱- خواص LNG ۴

۱-۲- انواع مخاطرات LNG ۷

۱-۲-۱- انفجار ۸

۱-۲-۲- ابرهای بخار ۸

۱-۲-۳- انجماد مایع ۹

۱-۲-۴- غلطیدن به روی هم ۹

۱-۲-۵- تبدیل فاز سریع ۱۰

۱-۳- استخراج و تولید ۱۰

۱-۴- مایع‌سازی گازطبیعی ۱۳

۱-۵- ذخیره‌سازی LNG ۱۴

۱-۶- انتقال LNG ۱۹

۱-۶-۱- انتقال دریایی ۱۹

۱-۶-۲- انتقال زمینی ۲۱

۱-۷- بخارسازی ۲۲

۱-۸- هزینه‌های صنعت LNG ۲۳

۱-۹- پیک‌سایی ۲۶

۲- آماده‌سازی گازطبیعی برای تغذیه به دستگاههای تولید LNG ۳۰

۲-۱- مقدمه ۳۰

۲-۲- حذف آب از گازطبیعی ۳۱

۲-۲-۱- حجم آب در گازطبیعی ۳۱

۲-۲-۲- فرآیند حذف آب از گازطبیعی ۳۲

۲-۳- حذف CO_2 از گاز طبیعی ۳۵

۲-۳-۱- فرآیندهای جذب فیزیکی ۳۶

۲-۳-۲- فرآیندهای جذب شیمیایی ۳۷

۲-۳-۳- فرآیندهای جذب سطحی ۳۸

۲-۳-۴- جداسازی فیزیکی ۳۹

۲-۳-۵- فرآیندهای جداسازی هیبریدی ۴۱

۲-۴- حذف ترکیبات سولفوری ۴۲
۲-۴-۱- فرآیند Claus ۴۳
۲-۴-۲- فرآیند Scot ۴۳
۲-۴-۳- فرآیند Shell-Paques ۴۴
۲-۴-۴- فرآیند Sulferox ۴۴

۲-۵- حذف جیوه از گازطبیعی ۴۵
۲-۶- حذف نیتروژن از گازطبیعی ۴۶

۳- آنالیز اگزرژی سیکل‌های بازیاب انرژی سرد LNG ۴۸

۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- آنالیز اگزرژی ۴۸
۳-۳- آنالیز اگزرژی فیزیکی گاز LNG ۵۰
۳-۴- سیکل انبساط مستقیم ۵۳
۳-۵- سیکل توان ترکیبی ۵۵
۳-۶-آنالیز اگزرژی سیکل توان ترکیبی ۵۶

۴- نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار *HYSYS* ۵۸

۴-۱- مقدمه ۵۸
۴-۲- شبیه‌سازی نرم‌افزاری سیکل انبساط مستقیم ۵۸
۴-۳- نتایج کلی شبیه‌سازی سیکل انبساط مستقیم ۶۰
۴-۴- شبیه‌سازی نرم‌افزاری سیکل توان ترکیبی ۶۲
۴-۵- نتایج کلی شبیه‌سازی سیکل و تحلیل نتایج ۶۳
۴-۶- بررسی پارامترهای موثر روی بازده اگزرژی و توان خروجی سیکل ۶۷
۴-۶-۱- دمای LNG خروجی از مبدل حرارتی ۶۷
۴-۶-۲- فشار ورود به منبسط‌کننده ۶۸
۴-۶-۳- بازده آدیاباتیک پمپ P_۱ ..... ۷۰
۴-۶-۴- بازده آدیاباتیک پمپ P_۲ ..... ۷۱
۴-۶-۵- بازده آدیاباتیک منبسط‌کننده K_۱ ..... ۷۳
۴-۶-۶- بازده آدیاباتیک منبسط‌کننده K_۲ ..... ۷۴

۴-۷- استفاده از مبدل حرارتی دومرحله‌ای ۷۷
۴-۸- استفاده از منبسط‌کننده دو مرحله‌ای ۸۱
۴-۹-تأثیر ناخالصی ترکیب گاز طبیعی مایع (LNG) در آنالیز ۸۳

نتیجه‌گیری کلی ۹۵

مراجع ۹۷

فهرست شکل‌ها

شکل **صفحه**

شکل ۱-۱- مقایسه ترکیب LNG، NGLs، CNG، GTL، LPG ۷
شکل ۱-۲- جزئیات مخزن Double Containment ۱۷
شکل ۱-۳- جزئیات مخزن Full Containment ۱۸
شکل ۱-۴- هزینه های صنعت LNG ۲۴
شکل ۱-۵- تغییر تقاضای روزانه گاز با فصول سال ۲۷
شکل ۱-۶- ذخیره‌سازی در گودالهای درون زمینی ۲۸
شکل ۲-۱- فرآیند جذب آب بوسیله محلول گلیکول ۳۳
شکل ۳-۱.شاخص اگزرژی در دیاگرام T-S طی فرآیند تغییر دما ۵۱
شکل ۳-۲.سیکل انبساط مستقیم ۵۴
شکل ۳-۳.سیکل توان ترکیبی بازیاب انرژی سرد گاز LNG ۵۵
شکل ۴-۱- شبیه‌سازی سیکل انبساط مستقیم در نرم‌افزار hysys ۵۹
شکل ۴-۲- نمودار تغییرات اگزرژی در مراحل مختلف سیکل انبساط مستقیم ۶۰
شکل ۴-۳- شبیه‌سازی سیکل توان ترکیبی بازیاب اگزرژی فیزیکی گاز LNG بر مبنای انرژی سرد در نرم‌افزار *hysys* ۶۲
شکل ۴-۴- نمودار تغییرات اگزرژی در مراحل مختلف سیکل انبساط مستقیم ۶۴
شکل ۴-۵- نمودار تغییرات اگزرژی در مراحل مختلف سیکل ثانویه رانکین ۶۵
شکل ۴-۶- نمودار توان خروجی سیکل بر حسب دمای LNG خروجی از مبدل حرارتی ۶۷
شکل ۴-۷- نمودار بازده اگزرژی سیکل بر حسب دمای LNG خروجی از مبدل حرارتی ۶۸
شکل ۴-۸- نمودار توان خروجی سیکل بر حسب فشار ورود به منبسط‌کننده ۶۹
شکل ۴-۹- نمودار بازده اگزرژی سیکل بر حسب فشار ورود به منبسط‌کننده ۶۹
شکل ۴-۱۰- نمودار توان خروجی سیکل انبساط مستقیم بر حسب بازده آدیاباتیک پمپ ۷۰
شکل ۴-۱۱- نمودار بازده اگزرژی سیکل انبساط مستقیم بر حسب بازده آدیاباتیک پمپ ۷۱
شکل ۴-۱۲- نمودار توان خروجی سیکل رانکین ثانویه بر حسب بازده آدیاباتیک پمپ ۷۲
شکل ۴-۱۳- نمودار بازده اگزرژی سیکل رانکین ثانویه بر حسب بازده آدیاباتیک پمپ ۷۲
شکل ۴-۱۴- نمودار توان خروجی سیکل انبساط مستقیم بر حسب بازده آدیاباتیک منبسط‌کننده ۷۳
شکل ۴-۱۵- نمودار بازده اگزرژی سیکل انبساط مستقیم بر حسب بازده آدیاباتیک منبسط‌کننده ۷۴
شکل ۴-۱۶- نمودار توان خروجی سیکل رانکین ثانویه بر حسب بازده آدیاباتیک منبسط‌کننده ۷۴
شکل ۴-۱۷- نمودار بازده اگزرژی سیکل رانکین ثانویه بر حسب بازده آدیاباتیک منبسط‌کننده ۷۵
شکل ۴-۱۸- نمودار توان خروجی کل برحسب بازده آدیابتیک پمپ‌ها و منبسط‌کننده‌ها ۷۶
شکل ۴-۱۹- نمودار بازده اگزرژی کل برحسب بازده آدیابتیک پمپ‌ها و منبسط‌کننده‌ها ۷۶

شکل ۴-۲۰- سیکل بازیاب انرژی سرد LNG باز استفاده از مبدل دو مرحله‌ای ۷۸
شکل ۴-۲۱- درصد اتلاف اگزرژی مبدل حرارتی را بر حسب دمای میانی مبدل حرارتی ۷۸
شکل ۴-۲۲- بازده اگزرژی مبدل حرارتی بر حسب دمای میانی مبدل حرارتی ۷۹
شکل ۴-۲۳- بازده اگزرژی سیکل را بر حسب دمای میانی مبدل حرارتی ۷۹
شکل ۴-۲۴- دبی سیال جاری در سیکل رانکین ثانویه بر حسب دمای میانی مبدل حرارتی ۸۰
شکل ۴-۲۵- سیکل بازیاب انرژی سرد LNG باز استفاده از مبدل دو مرحله‌ای ۸۱
شکل ۴-۲۶- نمودار بارده اگزرژی سیکل انبساط مستقیم بر حسب فشار میانی منبسط‌کننده‌ها ۸۲
شکل ۴-۲۷- نمودار توان خروجی سیکل انبساط مستقیم بر حسب فشار میانی منبسط‌کننده‌ها ۸۲

فهرست جدول‌ها

جدول **صفحه**

جدول ۱-۱- منابع گازطبیعی جهان ۱۱
جدول ۲-۱- حد مجاز ناخالصی‌ها در دستگاه تولید LNG ۳۱
جدول ۴-۱- نتایج شبیه‌سازی سیکل انبساط مستقیم در نرم‌افزار *hysys* ۶۰
جدول ۴-۲- مشخصات و بازده اگزرژی و درصد اتلاف اگزرژی اجزای سیکل ۶۱
جدول ۴-۳- بازده اگزرژی و توان خروجی سیکل انبساط مستقیم ۶۱
جدول ۴-۴- نتایج شبیه‌سازی سیکل توان ترکیبی (قسمت سیکل انبساط مستقیم) در نرم‌افزار *hysys* ۶۳
جدول ۴-۵- نتایج شبیه‌سازی سیکل توان ترکیبی (قسمت سیکل رانکین ثانویه) در نرم‌افزار *hysys* ۶۴
جدول ۴-۶- مشخصات و بازده اگزرژی و درصد اتلاف اگزرژی اجزای سیکل توان ترکیبی ۶۵
جدول ۴-۷- بازده اگزرژی و توان خروجی سیکل‌های انبساط مستقیم و رانکین ثانویه ۶۶
جدول ۴-۸- زیر تاثیر افزایش بازده آدیاباتیک اجزای سیکل ۷۷

مقدمه

در سالهای اخیر افت فشار شبکه در روزهای سرد سال منجر به قطع گاز در برخی از مناطق کشور شده است. تا جایی که برای جبران این کمبود، صدور گاز به برخی از کشورهای همسایه متوقف شده و برخی از نیروگاهها مجبور به استفاده از سوخت دوم شده بودند. اندیشیدن تمهیداتی برای جلوگیری از بروز دوباره این مشکلات ضروری به نظر می‌رسد. ساخت دستگاههای پیک‌سایی LNG، یکی از راههایی است که در بسیاری از کشورهای جهان برای سالها مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه ایران هم اکنون با چالش تامین سوخت وسایل نقلیه شهری مواجه می‌باشد و با توجه به سیاست‌های دولت برای کاهش مصرف سوخت در کشور و بهینه‌سازی مصرف انرژی، یافتن راهکارهای مناسب از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده تا سال ۱۴۰۰، تولید خودروها در کشور به بیش از ۱۵ میلیون دستگاه خواهد رسید که تامین سوخت آن‌ها بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار هزینه در برخواهد داشت. از طرف دیگر با توجه به محدودیت ظرفیت پالایشگاهها برای تامین بنزین، محدودیت منابع ارزی و نبود زیر ساخت‌های لازم برای واردات سوخت و همچنین آلودگی زیاد هوای شهرهای کشور، به نظر می‌رسد که باید به دنبال جایگزین مناسبی برای بنزین بود. وجود ذخایر عظیم گازطبیعی و زیرساخت‌های لازم مانند لوله‌کشی گازطبیعی در بیشتر شهرها و استان‌های کشور، استفاده از آن را به عنوان سوخت در خودروهای کشور منطقی و اقتصادی جلوه می‌دهد. گازطبیعی یکی از انواع سوخت‌های فسیلی است که به طور عمده از

متان تشکیل می‌شود و هنگام سوختن، آب و دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند، ازاین‌رو پاکترین سوخت فسیلی به شمار می‌آید. گازطبیعی به صورت عادی قابل استفاده در خودروها نیست. گازطبیعی می‌تواند به سه صورت جذبی با علامت اختصاری ANG، مایع شده با علامت اختصاری LNG و فشرده شده با علامت اختصاری CNG در خودروها مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از تمهیداتی که در سالهای اخیر اندیشیده شده است گازسوزکردن خودروهای عمومی و شخصی می‌باشد. به همین منظور ساخت جایگاههای گازطبیعی فشرده شده (CNG) روز به روز در حال افزایش می‌باشد. گازطبیعی در ایستگاه‌های سوخت‌گیری تا فشار ۲۰۰ اتمسفر متراکم شده و در مخزن یا مخازن خودرو ذخیره می‌شود. سپس گاز ذخیره شده پس از عبور از شیر ایمنی وارد فشارشکن شده و پس از کاهش فشار، برای مخلوط شدن با هوا به مخلوط‌کننده انتقال می‌یابد. سپس این گاز به درون محفظه احتراق موتورهدایت شده و در آنجا می‌سوزد. تغییر ساختار این جایگاه‌ها و استفاده از روش سوختگیری LCNG بجای سیستم سوختگیری CNG کنونی، می‌تواند بسیارمفید باشد. در این روش گازطبیعی به صورت کرایجنیک مایع شده و ذخیره می‌شود (LNG) و سپس برای تولید گازطبیعی فشرده شده (CNG) به گاز تبدیل می‌شود. این سیستم سوختگیری نسبت به سیستمهای تراکم CNG برای سوختگیری سریع به هنگام تقاضا، ارزانتر و انعطاف‌پذیرتر می‌باشد و به نصب و عملکرد کمپرسورهای بزرگ و سیستمهای تانک دافع فشار نیاز ندارد. LNG به عنوان سوخت وسایل نقلیه عمومی و حتی شخصی نیز مطرح می‌باشد. نیروگاههای بخش خصوصی نیز می‌توانند از دستگاههای LNG مقیاس‌کوچک به عنوان ابزاری برای تامین نیاز سوخت خود در مقابل رشد ناگهانی قیمت گازطبیعی استفاده کنند یا بجای استفاده از سوختهای جایگزین به هنگام افت فشار گاز در شبکه، گازطبیعی را در روزهای کم‌مصرف سال به صورت مایع شده ذخیره کنند و در مواقع لزوم از آن استفاده کنند.

گاز طبیعی مایع علاوه بر چگالی انرژی بالا، به خاطر آلودگی کم آن با محیط نیز سازگار است و به همین دلیل به عنوان سوخت سبز در نیروگاه‌ها و اتومبیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید گاز طبیعی

مایع بسیار هزینه بر می‌باشد. با یک تخمین ساده و ابتدایی می‌توان گفت برای تولید یک تن گاز LNG حدود ۸۵۰ کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی نیاز است. LNG در دمای ۱۱۰ درجه کلوین و فشار نرمال ذخیره می‌شود و علاوه بر انرژی شیمیایی، به خاطر کار و انرژی که هنگام مایع سازی صرف می‌شود، دارای اگزرژی فیزیکی زیادی نیز می‌باشد. هنگام مصرف که مایع LNG به گاز تبدیل می‌شود، با بازیاب انرژی سرد می‌توان به ازای هر تن LNG حدود ۲۴۰ کیلووات‌ساعت کار تولید کرد و این اهمییت موضوع بازیاب انرژی سرد را می‌رساند.

این موارد از جمله دلایلی می‌باشد که مجریان را بر آن داشت تا به انجام این پروژه همت گمارند. در این پژوهش، آنالیز اگزرژی سیکل بازیاب انرژی سرد LNG مورد توجه قرار گرفته است. گزارش در چهار فصل به صورت زیر تدوین شده است: در فصل اول این گزارش، اطلاعات عمومی در رابطه با LNG شامل تاریخچه LNG، روشهای مایع‌سازی و انتقال LNG، روشهای ذخیره‌سازی و گازسازی مجدد، هزینه‌های صنعت LNG و مقدمه‌ای بر دستگاههای پیک‌سایی و بارمبنای LNG آورده شده است. فصل دوم به بررسی چگونگی پاک‌سازی و آماده‌سازی گازطبیعی برای ورود به بخش مایع‌سازی دستگاههای پیک‌سایی و بارمبنای LNG می‌پردازد و روشهای معمول برای حذف آب، دی‌اکسیدکربن، ترکیبات سولفوری، جیوه و ... از گاز طبیعی را بیان می‌کند. در فصل سوم ابتدا روابط کلی آنالیز اگزرژی بیان می‌گردد و سپس سیکلی که LNG مایع را تبدیل به گاز می‌کند و آن را برای مصرف خانگی یا صنعتی آماده می‌کند تشریح می‌گردد. در ادامه سیکل ترکیبی که از این سرما استفاده کرده و کار تولید می‌کند، معرفی می‌گردد. در فصل چهارم که فصل آخر این گزارش مباشد، سیکل معرفی شده در فصل سوم در نرم‌افزار HYSYS مدل شده و نتایج این مدل سازی آورده شده است. آنالیز اگزرژی سیکل و برخی پارامترهای تاثیر گذار روی سیکل نیز در همین فصل بررسی شده است.

۱.مقدمه‌ای بر LNG

۱-۱- خواص LNG [C.M.Sliepcevich,۱۹٦٥]

گازطبیعی استخراج شده، محتوی متان، اتان، پروپان و هیدروکربن‌های سنگین به علاوه مقادیر کوچکی از نیتروژن، هلیم، دی‌اکسیدکربن، ترکیبات سولفور و آب است. LNG گازطبیعی مایع شده است. فرآیند مایع‌سازی ابتدا به پیش‌عمل‌آوری جریان گازطبیعی نیاز دارد تا ناپاکی‌هایی نظیر آب، نیتروژن، دی‌اکسیدکربن، سولفید هیدروژن و دیگر ترکیبات سولفوری از آن حذف شوند. با حذف کردن این ناپاکی‌ها، به هنگام سردکردن گازطبیعی، جامدی شکل نمی‌گیرد. همچنین محصول، مشخصات کیفی LNG مصرف کننده‌های نهایی را برآورده می‌کند. گازطبیعی پیش‌عمل‌آورده شده در دمای تقریباً $^{\circ}C$ ۱۶۰- مایع می‌شود و برای ذخیره‌سازی و حمل با کشتی آماده می‌گردد. حجم LNG، ۱/۶۰۰ حجم گازطبیعی در دمای اتاق و فشار اتمسفر می‌باشد. چون LNG مایعی بی‌نهایت سرد است که بواسطه سردسازی شکل داده می‌شود، تحت فشار ذخیره نمی‌شود. عقیده نادرستی که در مورد LNG به عنوان یک ماده تحت فشار وجود دارد، به فهم غلط از خطراتش منجر شده است.

LNG مایعی زلال، غیر خورنده، غیرسمی، کرایجنیک در فشار اتمسفر است. LNG بی‌بو است. بنابراین قبل از آنکه بوسیله سرویس گاز محلی به مصرف‌کننده‌های نهایی برسد، مواد معطری به آن می‌افزایند تا مصرف کننده قادر به تشخیص نشت گازطبیعی از وسایل گازسوز باشد. چگالی LNG حدود kg/m^3 ۴۶۷

است در حالیکه چگالی آب حدود kg/m^3 ۹۹۵ است. بنابرین اگر LNG بر روی آب ریخته شود، در بالا شناور می‌ماند و به سرعت بخار می‌شود زیرا سبک تر از آب است.

بخارهای آزاد شده از LNG در مدتی که به فاز گازی برمی‌گردد، اگر به طور صحیح و ایمن اداره نشوند، اشتعال‌پذیر هستند اما تنها تحت شرایط ویژه‌ای قابل انفجار خواهند بود. با این حال اقدامات ایمنی که در طراحی و در مدت عملکرد دستگاه‌های LNG انجام می‌گیرند، خطرات بالقوه را به مقدار زیادی کاهش می‌دهند.

گستره اشتعال‌پذیری، گستره بین غلظت‌های کمینه و بیشینه بخار LNG می‌باشد که در آن، هوا و بخارهای LNG مخلوطی قابل اشتعال شکل می‌دهند که می‌تواند مشتعل شود و بسوزد.

حد اشتعال‌پذیری پایینی و حد اشتعال‌پذیری بالایی متان، جزء غالب بخار LNG، به ترتیب ۵ درصد حجمی و ۱۵ درصد حجمی هستند. وقتی غلظت بخار LNG از حد اشتعال‌پذیری بالایی‌اش فراتر رود، نمی‌تواند بسوزد زیرا اکسیژن کافی وجود ندارد. این وضعیت برای مثال در یک مخزن ذخیره‌سازی بسته و محکم که غلظت بخار متان تقریباً ۱۰۰ درصد است، دیده می‌شود. وقتی که غلظت بخار LNG، زیر حد اشتعال‌پذیری پایینی است، نمی‌تواند بسوزد زیرا بخار LNG کافی وجود ندارد. این وضعیت برای مثال هنگامی که نشت مقادیر کوچکی از LNG به هوا وجود دارد، دیده می‌شود.

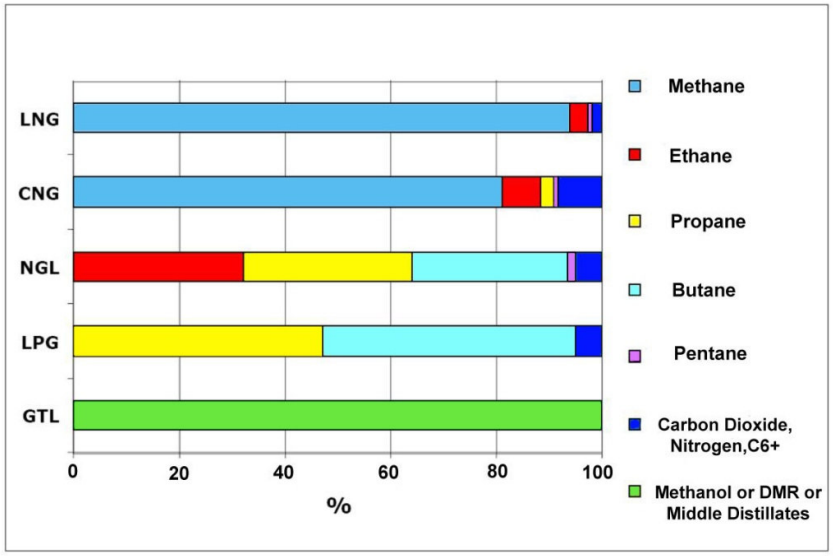
مقایسه خواص LNG با خواص سوختهای مایع دیگر نشان می‌دهد که حد اشتعال‌پذیری پایینی LNG معمولاً بالاتر از سوخت‌های دیگر است. یعنی، برای اشتعال در یک ناحیه معین، به غلظت‌های بزرگتری از بخار LNG در مقایسه با LPG یا بنزین نیاز است.

دمای خود اشتعالی، پایین‌ترین دمایی است که در آن، بخار گاز قابل اشتعال بدون منبع اشتعال و بعد از چندین دقیقه پرتودهی به منابع حرارتی، به طور خود به خود مشتعل خواهد شد. دماهای بالاتر از دمای خود اشتعالی، موجب اشتعال بعد از یک زمان پرتودهی کوتاه‌تر خواهد شد. با یک مخلوط بخار LNG - هوای

حدود ۱۰ درصد (میانه حد اشتعال‌پذیری ۱۵-۵ درصد) و در فشار اتمسفری، دمای خود اشتعالی بالای ۵۴۰ °C می‌باشد. این دمای خیلی بالا به منبعی نیرومند از تشعشع حرارتی و سطح داغ نیاز دارد. اگر LNG روی زمین یا روی آب ریخته شود و بخار گاز قابل اشتعال شکل دهد اما با یک منبع اشتعال (یک شعله، جرقه یا یک منبع حرارتی با دمای ۵۴۰ °C یا بزرگتر) مواجه نشود، بخار در اتمسفر پراکنده خواهد شد و هیچ آتشی رخ نخواهد داد.

مقایسه بخار LNG با سوخت‌های مایع دیگر نشان می‌دهد که دمای خوداشتعالی بخار LNG بالاتر از سوخت‌های دیگر است.

دانستن تفاوت بین گازطبیعی مایع شده (LNG)، گاز طبیعی فشرده شده (CNG)، مایعات گازطبیعی (NGL)، گاز نفت مایع شده (LPG) و گاز به مایع (GTL) بااهمیت می‌باشد. LNG بیشتر از متان ساخته شده است. فرآیند مایع‌سازی به حذف ترکیباتی غیر از متان نظیر دی‌اکسیدکربن، آب، بوتان، پنتان و ترکیبات سنگین‌تر در گازطبیعی نیاز دارد. CNG، گازطبیعی است که تحت فشار قرار گرفته و در فشار بالای ۲۴.۹ MPa در مخازن بطری مانند جوش داده شده، ذخیره می‌شود. CNG ترکیبی مشابه با گازطبیعی خط لوله دارد. NGL، از مولکولهای سنگین‌تر از متان نظیر اتان، پروپان و بوتان ساخته می‌شود. LPG مخلوطی از پروپان و بوتان در حالت مایع و در دمای اتاق می‌باشد. GTL، تبدیل گازطبیعی به محصولاتی نظیر متانول، دی اتیل اتر (DME)، فرآورده چگالش میانی (دیزل و سوخت جت)، مواد شیمیایی تخصصی و موم ها می‌باشد.



شکل ۱-۱- مقایسه ترکیب LNG، NGLs، CNG، GTL، LPG

۱-۲- انواع مخاطرات LNG [Michot and Delano,۲۰۰۳]

انفجار، ابرهای بخار، انجمادمایع، غلطیدن به روی هم و تبدیل فاز سریع از انواع مخاطرات LNG می‌باشد که در این بخش به آنها پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱- انفجار

انفجار هنگامی اتفاق می‌افتد که یک ماده به سرعت حالت شیمیایی‌اش را تغییر دهد یا به طور غیرقابل کنترل از حالت تحت فشار آزاد شود. برای آنکه یک ماده به طور غیر قابل کنترل از حالت تحت فشار آزاد شود، باید یک عیب ساختاری وجود داشته باشد، یعنی چیزی مخزن را سوراخ کند یا مخزن از قسمت داخلی بشکند. مخازن LNG، مایع را در دمای بی‌نهایت پایین، حدود $^{\circ}C$ ۱۶۰- ذخیره می‌کنند، بنابراین هیچ فشاری برای نگه داشتن LNG به حالت مایع نیاز نمی‌باشد. سیستم‌های محدود کننده خبره، منابع اشتعال را از تماس با مایع باز می‌دارند. از آنجا که LNG در فشار اتمسفر ذخیره می‌شود - یعنی تحت فشار قرار نمی‌گیرد - یک شکاف یا سوراخ در مخزن، منجر به یک انفجار فوری نخواهد شد.

۱-۲-۲- ابرهای بخار

هنگامی که LNG محفظه کنترل شده دمایی را ترک می‌کند، به تدریج گرم شده و از مایع به گاز تبدیل می‌شود. در ابتدا، گاز سردتر و سنگین‌تر از هوای محیط است. بنابراین یک مه - ابربخار - در بالای مایع آزاد شده ایجاد می‌شود. همچنانکه گاز گرم می‌شود، با هوای محیط مخلوط شده و در محیط پراکنده می‌گردد. ابر بخار تنها زمانی مشتعل می‌شود که با یک منبع اشتعال در تماس بوده و در گستره اشتعال‌پذیری‌اش واقع شود. وسایل ایمنی و رویه‌های موثر به کار گرفته می‌شوند تا احتمال آزادسازی مایع و تشکیل ابر بخار در خارج از مرز دستگاه را کمینه کنند.

۱-۲-۳- انجماد مایع

اگر LNG رها شود، تماس مستقیم انسان با این مایع کرایجنیک، موجب انجماد نقطه تماس خواهد شد. بنابراین سیستم‌های بازدارنده‌ای طراحی می‌شوند که تا ۱۱۰ درصد گنجایش مخزن ذخیره‌سازی LNG را تحت احاطه خود دارند. همچنین سیستم‌های بازدارنده، مخزن را از تجهیزات دیگر جدا می‌کند. علاوه بر این پرسنل دستگاه هنگامی که به نواحی مخاطره آمیز وارد می‌شوند باید خود را با دستکش، ماسک‌های صورت و دیگر روپوش‌های محافظ بپوشانند.

۱-۲-۴- غلطیدن به روی هم

هنگامی که LNG از منابع مختلف با چگالی‌های متفاوت در یک زمان در مخزن ذخیره‌سازی بارگیری شود، این مایعات در ابتدا با هم مخلوط نمی‌شوند، بلکه به صورت لایه‌های ناپایدار در داخل مخزن طبقه‌بندی می‌شوند. با گذشت زمان این لایه‌ها به طور خودبه‌خود به روی هم می‌غلطند تا مایع داخل مخزن را به حالت موازنه درآورند. همچنانکه لایه LNG پایین‌تر بواسطه نشت حرارت گرم می‌شود، چگالی‌اش تغییر می‌کند تا اینکه سرانجام سبک‌تر از لایه بالایی می‌شود. در این هنگام، لایه بالایی و پایینی به روی هم می‌غلطند و یک بخارسازی ناگهانی LNG رخ می‌دهد که ممکن است آنقدر بزرگ باشد که شیرهای آزادسازی فشار مخزن قادر به آزاد کردن آن نباشند. در بعضی مواقع، فشار اضافی می‌تواند منجر به ایجاد شکاف یا دیگر عیب‌های ساختاری در مخزن شود. برای جلوگیری کردن از لایه‌بندی، اوپراتورها هنگام باربرداری از یک کشتی LNG، چگالی محموله را اندازه‌گیری می‌کنند و اگر لازم باشد روش باربرداری را بر طبق آن تنظیم می‌کنند. مخازن LNG، سیستم‌های حفاظت از بر روی هم غلطیدن دارند که شامل سنسورهای دمایی و سیستم‌های آمیختگی هستند.

۱-۲-۵- تبدیل فاز سریع

هنگامی که LNG بر روی آب ریخته می‌شود، بر روی آن شناور شده و بخار می‌شود. اگر حجم‌های بزرگی از LNG بر روی آب رها شود، ممکن است خیلی سریع بخار شده و موجب تبدیل فاز سریع (RPT) شود. دمای آب و وجود موادی علاوه بر متان در LNG نیز بر احتمال وقوع RPT موثر است. RPT تنها زمانی رخ می‌دهد که بین LNG و آب، آمیختگی بوجود آید. گستره اثر RPT، از صدای انفجاری کوچک تا انفجارهای بزرگ که به ساختارهای سبک وزن آسیب می‌زند، می‌باشد.

۱-۳- استخراج و تولید

ذخایر مشخص شده گازطبیعی جهان، ۱۵۵ تریلیون مترمکعب تخمین زده می‌شود. روسیه، ایران و قطر مجموعا بیش از ۵۰ درصد منابع گازطبیعی جهان را در اختیار دارند. ۱۲ کشوری که صادرکننده عمده LNG می‌باشند، ۲۸ درصد منابع گازطبیعی جهان را در اختیار دارند[Griffin and others,۲۰۰۳].

جدول ۱-۱- منابع گازطبیعی جهان[Griffin and others,۲۰۰۳]

کشور	ذخایر(تریلیون متر مکعب)	درصد ذخایر
روسیه	۴۷.۵۷	۳۰.۵٪
ایران	۲۳	۱۴.۸٪
قطر	۱۴.۴	۹.۲٪
عربستان سعودی	۶.۳۶۳	۴.۱٪
امارات متحده عربی	۶	۳.۹٪
ایالات متحده	۵.۱۹۶	۳.۳٪
الجزایر	۴.۵۲۲	۲.۹٪
ونزوئلا	۴.۱۹۱	۲.۷٪
نیجریه	۳.۵۱۱	۲.۳٪
عراق	۳.۱۱	۲.۰٪
اندونزی	۲.۶۲	۱.۷٪
استرالیا	۲.۵۵	۱.۶٪
نروژ	۲.۱۹	۱.۴٪
مالزی	۲.۱۲۴	۱.۴٪
ترکمنستان	۲.۰۱	۱.۳٪
ازبکستان	۱.۸۷۵	۱.۲٪