

عملکرد چرخه‌های سردسازی خارجی در فرآیند مایع‌سازی هیدروژن

علی صابری مقدم^{۱*}، سجاد آزادگان جهرمی^۲، محمدمهدی بحری رشت‌آبادی^۳

۱. دانشیار، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳. دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

دریافت: ۹۳/۶/۱۱ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱

چکیده

هیدروژن سوختی پاک و تجدیدپذیر است که قابلیت جایگزین شدن با سوخت‌های رایج فسیلی را داراست؛ اما به دلیل چگالی بسیار پایین، استفاده از آن به عنوان سوخت، مشکلاتی را در زمینه‌ی حمل و نقل و نگه‌داری ایجاد می‌کند. مایع‌سازی هیدروژن بهترین روش در چگال‌تر ساختن این سوخت و کاهش مشکلات ناشی از چگالی پایین آن است. استفاده از سیکل‌های سردساز هلیومی روشی مناسب و جدید برای مایع‌سازی هیدروژن محسوب می‌شود که امکان ارتقاء ظرفیت تولید و کاهش مصرف انرژی را نسبت به واحدهای فعلی مایع‌سازی هیدروژن ایجاد می‌کند. در این تحقیق، ابتدا توضیح مختصری پیرامون فرآیند مایع‌سازی هیدروژن ارائه می‌شود و در ادامه سیکل‌های مایع‌سازی هیدروژن بر پایه چرخه‌ی سردساز هلیومی مرور می‌گردد و مزایا و معایب آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: مایع‌سازی هیدروژن، سردساز هلیومی، کرایوژنیک، هیدروژن

مقدمه

استفاده روز افزون از سوخت‌های فسیلی به منظور تامین انرژی، دنیا را با خطر آلودگی محیط زیست و هم‌چنین اتمام سوخت‌های فسیلی روبرو کرده است. این تهدیدات دنیا را به سمتی کشانده است که در پی استفاده از سوخت‌های پاک و تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی و تجدیدناپذیر باشند. در پی تلاش‌های بشر به منظور یافتن منابع انرژی با ویژگی‌های مذکور، هیدروژن جایگاه خود را در میان منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر به خوبی پیدا کرده است، چرا که هیدروژن فراوان‌ترین عنصر در جهان بوده و محصولات ناشی از احتراق آن تنها بخار آب و مقدار قابل توجهی انرژی است که هر دو می‌تواند گواهی بر

*ali_sabermoghaddam@yahoo.com

تجدیدپذیر و پاک بودن سوخت هیدروژنی باشد، اما سبک بودن هیدروژن مشکلاتی را در زمینه‌ی حمل و نقل و نگهداری ایجاد می‌کند که بهترین روش برای حل این مشکلات، چگال ساختن این سوخت به کمک مایع‌سازی آن است. از این رو ارتقاء صنعت مایع‌سازی هیدروژن، امکان استفاده از انرژی هیدروژنی را بیش‌تر و میزان مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد و می‌تواند تا حد قابل توجهی مشکلات بشری را در زمینه تامین انرژی مرتفع سازد.

از سوی دیگر، در بسیاری از واحدهای مرتبط با صنایع نفت، واحدهای تولید هیدروژن با روش ریفرمینگ گاز طبیعی احداث می‌گردد. این واحدها با استفاده از واکنش بین بخار آب و هیدروکربن‌های موجود در گاز طبیعی مثل متان و پروپان به تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ می‌پردازند. هیدروژن تولیدی از این واحدها برای بخش‌های مختلف این صنایع مثل واحدهای بهبود هیدروتريتینگ نفت^۱ و هیدروکراکر^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. هزینه‌ی احداث واحدهای تولید هیدروژن بسیار بالاست و گاهی ساخت آن‌ها در محل مورد نیاز امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل، انتقال هیدروژن از محلی دیگر (واحد تولید هیدروژن) به واحدهای نیازمند به هیدروژن توجیه‌پذیر می‌شود. در این تحقیق مروری بر فرآیندهای مایع‌سازی هیدروژن بر اساس چرخه‌ی سردساز هلیومی انجام گرفته است؛ چرا که استفاده از این روش، ظرفیت تولید هیدروژن مایع را به صورت چشم‌گیری بهبود و میزان مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. از این رو با کاهش قیمت تمام شده برای تولید این سوخت، قابلیت رقابت با سایر سوخت‌های مشابه ایجاد می‌گردد و حضور سوخت هیدروژنی را در بین سایر سوخت‌ها، پررنگ‌تر خواهد کرد.

نگاهی کلی بر فرآیند مایع‌سازی هیدروژن

هدف از احداث واحد مایع‌ساز هیدروژن، تولید هیدروژن مایع در فشار اتمسفریک است، چرا که امکان عرضه‌ی هیدروژن مایع به بازار، در فشار محیط امکان‌پذیر می‌باشد [۱]. از این رو می‌بایست هیدروژن از دمای محیط تا نقطه‌ی جوش نرمال (۲۰/۲۳ کلوین) کاهش دما یابد و از حالت گازی به حالت مایع تغییر فاز دهد. فرآیند مایع‌سازی هیدروژن در نگاهی کلی به چهار بخش تقسیم می‌شود [۲] که عبارت است از: فشرده-سازی، پیش‌سرمايش، سردسازی کرایونیک و مایع‌سازی. در ادامه شرح مختصری از هر یک از آن بخش‌ها ارائه می‌گردد.

فشرده‌سازی

اساس سردسازی در فرآیند مایع‌سازی هیدروژن انبساط گازهای پرفشار است و برای تحقق این هدف، فشرده‌سازی گاز یکی از الزامات غیرقابل اجتناب در فرآیندهای مایع‌سازی هیدروژن به حساب می‌آید، تا امکان انبساط و رسیدن به دماهای پائین را در سایر بخش‌های فرآیند اعم از مایع‌سازی و سردسازی ایجاد نماید [۳،۴].

^۱NaphtaHydrotreator Unit

^۲Hydrocracker Unit

پیش‌سرمایش

ضریب ژول - تامسون هیدروژن برخلاف اکثر گازها در دمای محیط منفی است، به این مفهوم که با کاهش فشار (انبساط)، دمای هیدروژن افزایش خواهد یافت. از این‌رو می‌بایست قبل از انجام فرآیندهای انبساطی، ضریب ژول - تامسون هیدروژن مثبت گردد. برای این منظور لازم است که دمای گاز هیدروژن در زیر نقطه-ی وارونگی آن (۲۰۲ کلوین) قرار گیرد. این امر در اکثر موارد در مجاورت مبرد ثانویه، مانند نیتروژن مایع در بخش پیش‌سرمایش صورت می‌پذیرد [۲،۵].

سردسازی کرایونیک

کاهش دمای هیدروژن از دمای پیش‌سرمایش تا دمای نزدیک به نقطه جوش در بخش سردسازی کرایونیک صورت می‌پذیرد. اساس این سردسازی بر دو روش پایه‌گذاری می‌شود؛ اگر سردسازی بر اساس انبساط هم‌انتالی در شیر ژول- تامسون باشد، مایع‌سازی هیدروژن با روش لیند - هامپسون^۱ صورت پذیرفته است و اگر سردسازی بر اساس انبساط هم‌آنتروپی در اکسپندر^۲ باشد، مایع‌سازی هیدروژن با روش کلاود^۳ انجام گرفته است [۳،۴]. در هر دو حالت، بخشی از هیدروژن، در اثر انبساط کاهش دما یافته و به عنوان مبرد به سردسازی هیدروژن پرفشار می‌پردازد. تفاوت در روش‌های مایع‌سازی هیدروژن بر اساس مرحله سردسازی کرایونیک می‌باشد، از این‌رو می‌توان این بخش را مهم‌ترین بخش در فرآیند مایع‌سازی هیدروژن دانست.

مایع‌سازی

فشار بالا و دمای نزدیک به نقطه جوش نرمال، شرایطی است که هیدروژن با عبور از سایر بخش‌ها به آن رسیده است. شرایط کنونی گاز به همراه انبساط نهایی، مایع‌سازی هیدروژن را به دنبال خواهد داشت که این انبساط می‌تواند به صورت هم‌انتالی در شیر ژول- تامسون و یا هم‌آنتروپی در اکسپندره‌های مرطوب صورت پذیرد [۲،۷].

در فرآیند مایع‌سازی هیدروژن، وظیفه‌ی کاهش دما بر عهده‌ی دو بخش پیش‌سرمایش و سردسازی کرایونیک است و از آن جهت که در بخش پیش‌سرمایش کاهش دما عمدتاً توسط نیتروژن مایع انجام می‌شود و این مبرد در سیکلی مجزا تهیه شده است، لذا قسمتی از سردسازی که مستقیماً مربوط به فرآیند مایع‌سازی هیدروژن است در بخش سردسازی کرایونیک انجام می‌پذیرد. بنابراین، ارتقاء و پیشرفت فرآیندهای مایع‌سازی هیدروژن به صورت قابل ملاحظه‌ای مرتبط با بهبود بخش سردسازی کرایونیک است. به دلیل این اهمیت، پژوهشگران در سالیان اخیر به ارتقاء بخش سردسازی کرایونیک پرداخته‌اند.

¹LindeHampson

²Expander

³Claude

علت انتخاب چرخه‌ی سردسازی هلیومی

سردسازی هیدروژن تا دماهای نزدیک به نقطه‌ی جوش آن، توسط مبردهایی صورت می‌پذیرد که قابلیت کاهش دما، تا دمای مذکور را بدون تغییر فاز داشته باشند [۳،۴]. هیدروژن مبرد اصلی در اکثر فرآیندهای سنتی مایع‌سازی است و استفاده از آن مشکلاتی را در پی دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از [۷،۸]:

- عدم قابلیت کاهش دما به دماهای پایین‌تر از نقطه جوش هیدروژن
- مصرف بالای انرژی در کمپرسور به دلیل جرم مولکولی پائین
- نفوذپذیری بالا در ساختار تجهیزات به دلیل جرم مولکولی پائین
- راندمان پائین واحد

از این‌رو محققان در سالیان اخیر، استفاده از مبرد هلیومی در بخش سردسازی کرایوژنیک را مورد توجه قرار داده‌اند که تاثیر بسزایی در حل مشکلات مذکور دارد. جرم مولکولی بالاتر هلیوم مشکلات مربوط به فشرده‌سازی و انبساط مبردهای هیدروژنی را حل کرده و توان مصرفی را به صورت چشمگیری کاهش می‌دهد [۹،۱۰]؛ هم‌چنین مولکول‌های بزرگ‌تر، امکان نفوذ به ساختار تجهیزات را از هلیوم گرفته است و نیاز به تجهیزات خاص و مقاوم در برابر خوردگی را کاهش می‌دهد [۸] که این امر تاثیر بسزایی بر کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری دارد. در برخی موارد گاز نئون به مبرد هلیومی اضافه می‌گردد تا با افزایش جرم مولکولی متوسط گاز، روند بهبود خواص مبرد ادامه یابد، اما به منظور جلوگیری از تضعیف خواص حرارتی، بیش‌ترین مقدار نئون قابل استفاده ۳۰٪ خواهد بود [۱۱،۱۲].

با گذشت بیش از یک قرن از پیدایش هیدروژن مایع، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در زمینه‌ی تولید صنعتی این محصول ایجاد شده است، به گونه‌ای که امکان تولید بیش از ۳۵۰ تن هیدروژن مایع در روز در سطح دنیا وجود دارد [۱۳]، اما همان‌گونه که بیان شد به دلیل مصرف بالای انرژی در واحدهای تولیدی، هیدروژن مایع قابلیت رقابت با سایر منابع انرژی را ندارد، در پی حل این مشکل، محققان فراوانی با تکیه بر چرخه‌ی سردسازی هلیومی، فرآیندهایی را پیشنهاد داده‌اند که ظرفیت تولید را چندین برابر ظرفیت فعلی کرده و هم‌چنین میزان مصرف انرژی را به صورت چشم‌گیری کاهش داده است.

فرآیندهای پیشنهادی مایع‌سازی هیدروژن بر اساس چرخه‌ی سردسازی هلیومی

پس از مشاهده‌ی تاثیرات مطلوب استفاده از چرخه‌ی سردسازی هلیومی در فرآیندهای مایع‌سازی هیدروژن، این روش بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفت و سبب شد پیشنهادهای در قالب استفاده از این چرخه سردسازی در مایع‌سازهای هیدروژنی ارائه شود. در این قسمت، بخشی از مهم‌ترین پیشنهادهای ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفته و معایب و مزایای آن‌ها نیز ذکر خواهد شد.

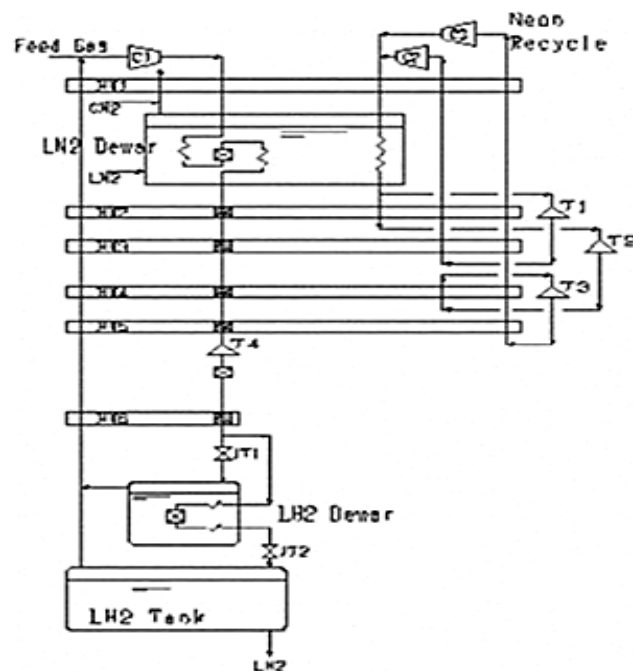
فرآیند پیشنهادی ماتسولا^۱ و ناگامی^۲

ماتسولا و ناگامی در سال ۱۹۹۷ میلادی در شبکه جهانی انرژی (معمولاً با نام WE-NET خوانده می‌شود)، فرآیند مایع‌سازی هیدروژن، با امکان تولید ۳۰۰ تن در روز را پیشنهاد کردند. راندمان چرخه‌ی سردسازی

^۱Matsuda

^۲Nagami

در این فرآیند ۱/۴۷٪ نسبت به چرخه‌ی ایده‌آل کارنو پیش‌بینی شده است که به صورت تقریبی بیش از دو برابر راندمان‌های سیکل‌های مرسوم در مایع‌سازی هیدروژن است. ابتدا مبرد مورد استفاده در چرخه‌ی سردساز این فرآیند، گاز نئون معرفی شد، اما به دلیل خواص انتقال حرارت ضعیف، طراحان این فرآیند، تصمیم به افزودن هلیوم و به کارگیری مخلوط هلیوم - نئون به عنوان مبرد گرفتند که این تصمیم آغاز استفاده از هلیوم، به عنوان بخشی از مبردهای سردسازی در فرآیندهای مایع‌سازی هیدروژن به حساب می‌آید. در این فرآیند، مبرد موجود در سیکل سردساز، طی چند مرحله انبساط هم‌آنتروپی، به دمایی کم‌تر از دمای اشباع هیدروژن می‌رسد و امکان کاهش دمای هیدروژن به دماهای بسیار نزدیک به نقطه جوش را ایجاد می‌کند و در پایان بخش قابل توجهی از هیدروژن با عبور از شیر ژول-تامسون به مایع تبدیل می‌گردد. لازم به ذکر است که قابلیت کاهش دمای هیدروژن به دماهای پایین‌تر از مقادیر معمول، سبب بهبود و افزایش بازده این سیکل شده است. شکل ۱ این فرآیند پیشنهادی را نمایش می‌دهد [۱۵].



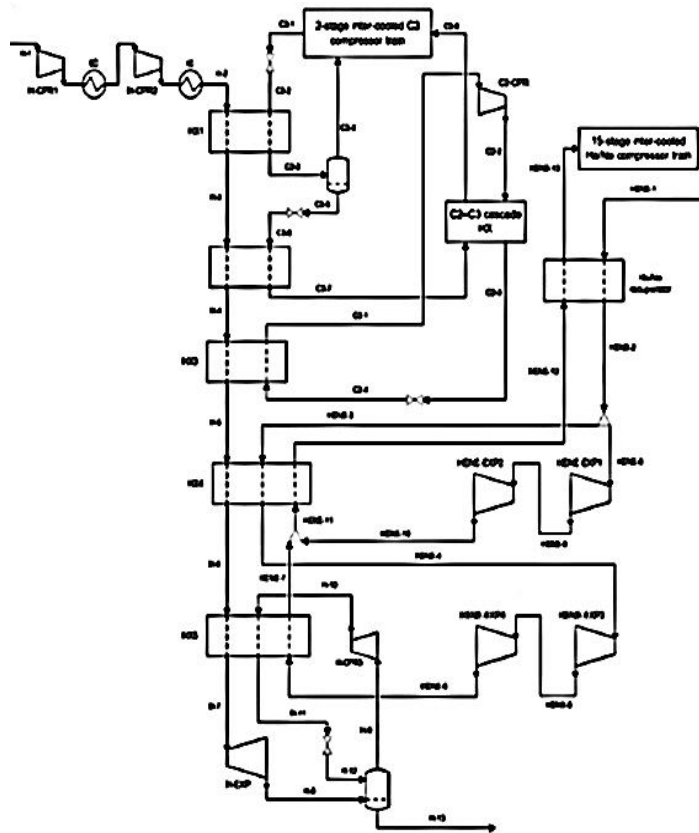
شکل ۱. فرآیند پیشنهادی ماتسولا و ناگامی [۱۵]

فرآیند پیشنهادی کوآک^۱

کوآک در سال ۲۰۰۲ میلادی، فرآیندی را پیشنهاد داد که در آن مایع‌ساز هیدروژن با ظرفیت و راندمان بالا شبیه‌سازی شده بود. این فرآیند در بخش سردسازی کرایونیک از مبرد هلیوم - نئون (۸۰٪ هلیوم - ۲۰٪ نئون) و در بخش پیش‌سرمایش از مبرد چند جزئی (اتان - پروپان) بهره گرفته است که استفاده از مبردهای چند جزئی سبب بهبود عملیات انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی و کاهش توان موردنیاز در فشرده‌سازی

^۱Quack

می‌شود و از این رو بهبود راندمان فرآیند را به دنبال خواهد داشت. کوآک برای فرآیند پیشنهادی خود راندمان ۵۰٪ را پیش‌بینی کرده است و علت این افزایش راندمان را در بهره‌گیری از میردهای نوین در بخش‌های پیش‌سرمایش و سردسازی کرایوژنیک می‌داند. نمایی از این فرآیند پیشنهادی در شکل ۲ قابل مشاهده است [۷،۱۵،۱۶].



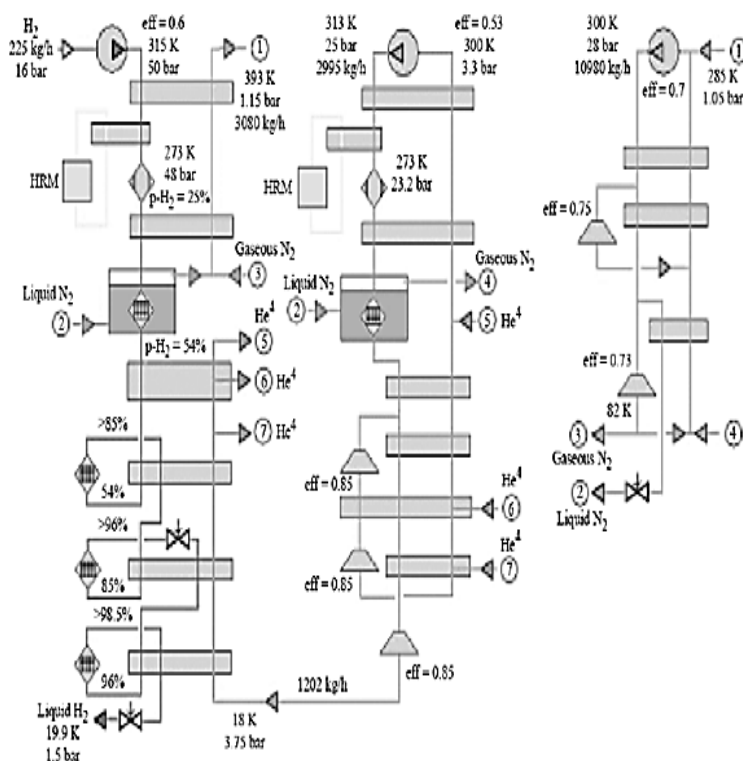
شکل ۲. فرآیند پیشنهادی کوآک [۱۶]

فرآیند پیشنهادی کازمنکو^۱

کازمنکو در سال ۲۰۰۴ میلادی، فرآیند مایع‌سازی هیدروژن را با ظرفیت متوسط و راندمان بالا ارائه نمود. این فرآیند تکامل یافته طرح پیشنهادی بلجاکو و همکارانش در سال ۲۰۰۲ میلادی به حساب می‌آید [۱۷]، با این تفاوت که ظرفیت واحد ارتقاء یافته بود. در این طرح، چرخه‌ی مایع‌ساز نیتروژن وظیفه‌ی پیش-سرمایش هیدروژن را بر عهده دارد و چرخه‌ی سردساز هلیومی در بخش سردسازی کرایوژنیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از نیتروژن گازی دما پائین در کنار نیتروژن مایع سبب کاهش هدررفت انرژی شده و

^۱Kuzmenko

به دنبال آن سردسازی هلیومی در چند مقطع دمایی تاثیر نهایی را بر ارتقاء راندمان فرآیند داشته است. نمایی از فرآیند پیشنهادی در شکل ۳ قابل مشاهده است [۱۸].

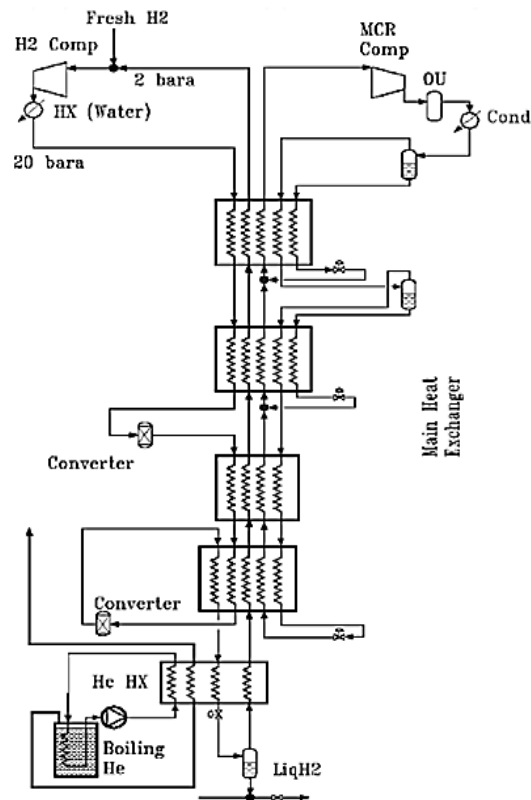


شکل ۳. فرآیند پیشنهادی کازمنکو [۱۸]

فرآیند پیشنهادی استنگ^۱ و همکاران

استنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ میلادی، فرآیند مایع سازی هیدروژن با راندمانی بالاتر از ۴۰٪ ارائه دادند که این فرآیند در شکل ۴ قابل مشاهده است. نکته‌ی قابل توجه در این فرآیند استفاده از مبردهای چند جزئی در بخش پیش‌سرمایش به عنوان جایگزین نیتروژن مایع بود. این نوع مبرد اختلاف دمایی جریان‌های سرد و گرم را در یک حد بهینه نگه می‌دارد و سبب کاهش اتلاف انرژی در بخش پیش‌سرمایش می‌شود. این نوع مبردها توانایی کاهش دمای هیدروژن پرفشار به دمای پیش‌سرمایش مرسوم (۸۰ کلوین) را ندارند، لذا استفاده از سردساز هلیومی در بخش سردسازی کرایوژنیک ناتوانی مذکور را در بخش پیش‌سرمایش جبران می‌کند. به بیان دیگر این طرح، آغاز همراهی اجتناب‌ناپذیر چرخه‌ی سردساز هلیومی با مبردهای چندجزئی مورد استفاده در بخش پیش‌سرمایش به حساب می‌آید [۱۹].

^۱Stang

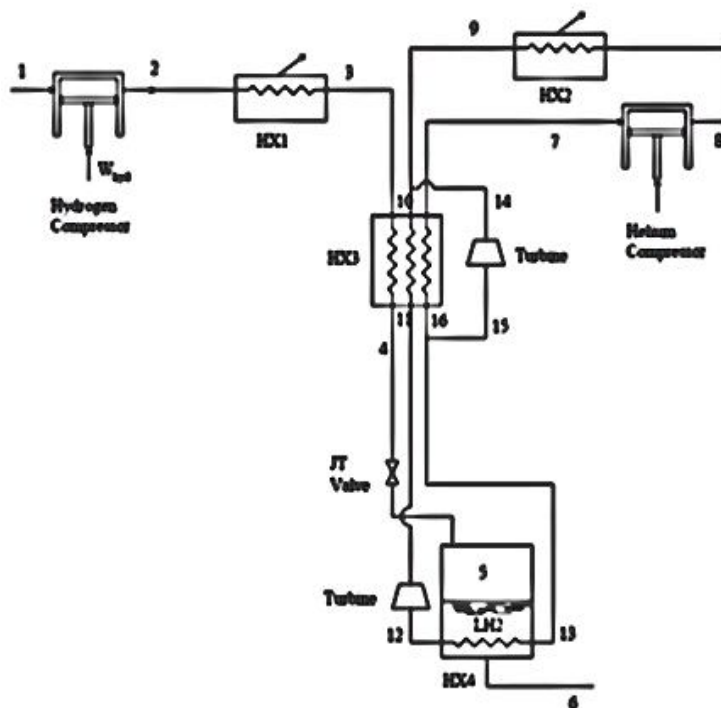


شکل ۴. فرآیند پیشنهادی استنگ و همکاران [۱۹]

فرآیند پیشنهادی نوتاردوناتو^۱

نوتاردو ناتو در سال ۲۰۰۶ میلادی فرآیندی مبتنی بر سردسازی، مایع‌سازی و فوق سردکردن هیدروژن با استفاده از چرخه سردساز هلیومی ارائه داد. لازم به ذکر است که استفاده از هیدروژن مایع فوق سرد، جایگاه قابل توجهی در مصارف هوافضا دارد، چرا که در صورت نشت حرارت به مخازن حاوی هیدروژن مایع فوق-سرد، حرارت انتقال یافته ابتدا سبب افزایش دمای هیدروژن مایع به دمای اشباع و سپس تبخیر آن شود و این امر سبب می‌گردد که هیدروژن مایع مدت زمان بیش‌تری در درون مخزن باقی بماند. در فرآیند پیشنهادی نوتاردوناتو، مبدل حرارتی در مخزن نگهداری هیدروژن مایع قرار می‌گیرد و توسط مبرد هلیومی، هیدروژن مایع را به زیر دمای اشباعش می‌رساند. لازم به ذکر است که به دلیل نقطه‌ی جوش پائین‌تر هلیوم از هیدروژن، امکان فوق سردکردن هیدروژن مایع ایجاد می‌گردد. از این‌رو با ارائه‌ی طرح مذکور، اهمیت چرخه‌ی سردساز هلیومی در تهیه هیدروژن مایع فوق سرد نشان داده می‌شود. نمایی از فرآیند مذکور در شکل ۵ قابل مشاهده است [۲۰].

^۱Notardonato



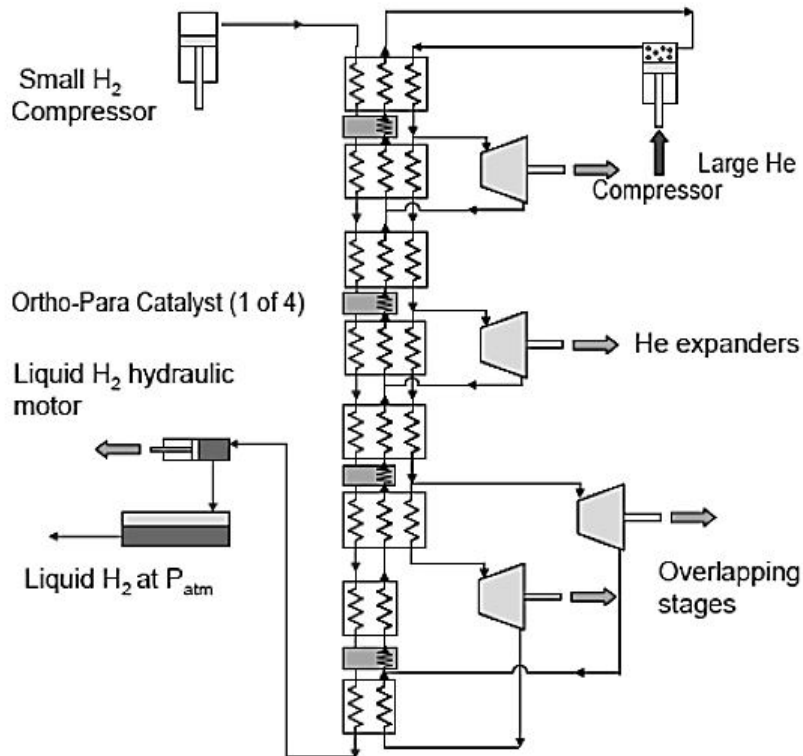
شکل ۵. فرآیند پیشنهادی نوتاردوناتو [۲۰]

فرآیند پیشنهادی شیمکو^۱ و گاردینر^۲

شیمکو و گاردینر در سال ۲۰۰۷ میلادی، فرآیند دیگری مبتنی بر استفاده از چرخه‌ی سردساز هلیومی برای مایع‌سازی هیدروژن ارائه نمودند که راندمانی فراتر از ۳۰٪ برای آن پیش‌بینی شده بود. نکته‌ی حائز اهمیت در این طرح، حذف بار فشرده‌سازی از کمپرسورهای هیدروژنی و انتقال به کمپرسورهای هلیومی است که تاثیر بسزایی بر میزان مصرف انرژی دارد. همچنین در این طرح، مایع‌سازی هیدروژن، به جای دستگاه‌های انبساطی در مبدل حرارتی انجام می‌شود و تنها در پایان به منظور کاهش فشار هیدروژن به فشار مدنظر از یک موتور انبساطی استفاده می‌شود که این امر با توجه به توان سردسازی بالا در چرخه‌ی سردساز هلیومی قابل توجیه است. از این رو طرح مذکور قابلیت دیگری از چرخه‌ی سردساز هلیومی را نشان می‌دهد که امکان حذف دستگاه‌های انبساطی در بخش مایع‌ساز و به دنبال آن نیاز اندک به فشرده‌سازی هیدروژن را نوید می‌دهد. این قابلیت میزان مصرف انرژی را در حد قابل توجهی کاهش می‌دهد. نمایی از فرآیند پیشنهادی در شکل ۶ قابل مشاهده است [۲۱].

¹Shimko

²Gardiner



شکل ۶. فرآیند پیشنهادی شیمکو و گاردینو [۲۱]

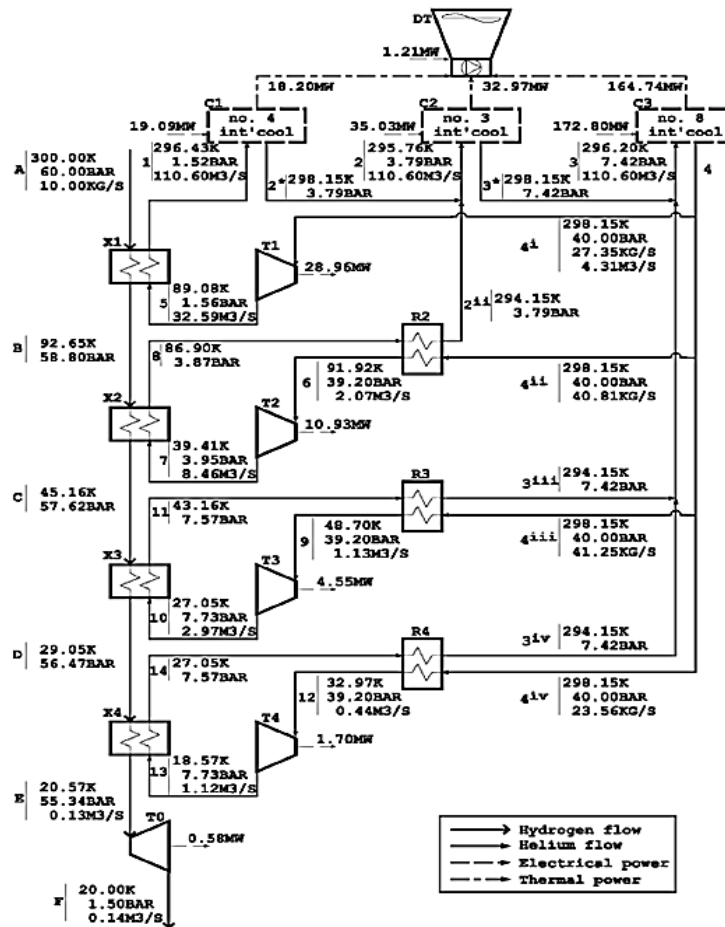
فرآیند پیشنهادی ولنتی^۱

ولنتیدر سال ۲۰۰۸ میلادی، فرآیند مایع‌سازی هیدروژن با راندمان ۴۸٪ نسبت به چرخه‌ی کارنو ارائه داد. اساس سردسازی در این فرآیند استفاده از چرخه‌ی سردساز هلیومی است. گاز پرفشار هلیوم به صورت موازی در مراحل مختلف، منبسط شده و دمای مورد نیاز برای هر مرحله از سردسازی را فراهم می‌کند، در این فرآیند، پیش‌سرمایش هیدروژن و سردسازی کرایوژنیک توسط چرخه‌ی سردساز یکپارچه هلیومی صورت می‌پذیرد. این امر بیان‌گر قابلیت استفاده از سردساز هلیومی در دمای بالا می‌باشد و هم‌چنین استفاده از هلیوم در دماهای متفاوت سبب تطابق دمایی بهتر در بین سیالات سرد و گرم شده و هدررفت انرژی را به حداقل می‌رساند. از این‌رو فرآیند مذکور با تکیه بر سردساز هلیومی قابلیت تبدیل کامل هیدروژن گازی به هیدروژن مایع را داراست. شکل ۷ نمایی از فرآیند را نمایش می‌دهد [۱۵، ۱۹، ۲۲].

بحث و نتیجه‌گیری

تا به امروز اکثر واحدهای صنعتی تولید هیدروژن مایع در جهان بر اساس فرآیندهای کلاود و لیند هامپسون به فعالیت پرداخته‌اند که با توجه به گزارشات منتشر شده، فرآیند کلاود بیش‌ترین استفاده را در واحدهای

^۱Valenty



شکل ۷. فرآیند پیشنهادی ولنتی [۲۲]

صنعتی داشته است [۱۳]. فرآیندهای مذکور بر اساس چرخه‌های سردسازی هیدروژنی عمل کرده و از این رو مشکلاتی از قبیل راندمان پائین، مصرف انرژی بالا و هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری بالا را به همراه دارد. مطالعات پژوهشگران در دو دهه‌ی اخیر نشان می‌دهد که در صورت جایگزینی چرخه‌ی سردسازی هلیومی به جای چرخه‌ی سردسازی هیدروژنی توسعه قابل توجهی در زمینه‌ی تولید هیدروژن مایع ایجاد می‌گردد که مقایسه‌ی موجود در جدول ۱ گواهی بر این ادعاست. هم‌چنین استفاده از چرخه‌ی سردسازی هلیومی قابلیت‌هایی در زمینه‌ی توسعه فنی فرآیند ایجاد می‌کند که عبارتند از:

- الف- امکان استفاده از مبرد چندجزئی
- ب- انتقال بار فشرده‌سازی از کمپرسور هیدروژنی به کمپرسور هلیومی
- ج- امکان تولید هیدروژن مایع فوق سرد
- د- امکان استفاده از چرخه سردسازی یکپارچه در بخش‌های مختلف مایع‌سازی

جدول ۱. مقایسه‌ی فرآیندهای مایع‌سازی هیدروژن

نوع فرآیند	نوع سردساز	میزان مصرف انرژی $\frac{kW h}{kg LH2}$	بازده انرژی
لیندهامپسون	هیدروژنی	۶۰ - ۷۰	۳ - ۵
کلاود	هیدروژنی	۱۲ - ۱۵	۱۹ - ۲۴
مایع‌سازی با سردساز خارجی	هلیومی	۵ - ۶	۳۳ - ۵۵

از این‌رو، در صورت استفاده از چرخه‌ی سردساز هلیومی در فرآیندهای مایع‌سازی هیدروژن، میزان تولید به صورت قابل توجهی افزایش و میزان مصرف انرژی کاهش خواهد یافت. این امر سبب می‌شود که هیدروژن مایع به عنوان یک سوخت، قابلیت رقابت با سایر منابع انرژی را پیدا کند.

منابع

1. Verfondern .K. "Safety Considerations on Liquid Hydrogen"; Julich; 2008.
2. Walnum.H. T; Berstad. D." Principles for the liquefaction of hydrogen with emphasis on precooling processes", 12th Cryogenics Conference in Dresden; September 2012.
3. Mukhopadhyay,M. "Fundamentals of Cryogenic Engineering"; Chemical Engineering Department Indian Institute of Technology Bombay; PHI Private Limited; 2010.
4. Radall,B."Cryogenic Systems"; Department of Mechanical Engineering Louisiana Polytechnic Institute ; 1966.
5. R. D. McCarty .R .D ; Hord .J ; Roder. H. M." Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data)"; Center for Chemical Engineering, National Engineering Laboratory , National Bureau of Standards, Boulder. 1981.
6. Nandi.T. K.; Sarangi.S. "Performance and Optimization of Hydrogen Liquefaction Cycles"; International Journal of Hydrogen Energy; vol 18; 1993; 131-139.
7. Quack.H. "Conceptual design of a high efficiency large capacity hydrogen liquefier"; AIP Conf Proc; 2002.
8. Notardonato.W.U. "Analysis and testing of an integrated refrigeration and storage system for liquid hydrogen zero boil off, liquefaction and densification"; University of Florida; 2006. 1960.
9. Belyakov.V.V; Krakovskii.B.D ."Low-capacity hydrogen liquefier with a helium cycle"; Chemical and Petroleum Engineering; vol 38; 3-4, 2002.
10. Kuzmenko.I.F ; Morkovkin.I.M; Gurov.E.I , " Concept of Building medium-Capacity Hydrogen Liquefiers with helium Refrigeration"; Chemical and Petroleum Engineering; Vol. 40; 2004; 1-2.
11. Takashi.F. "Efficiency of Hydrogen Liquefaction Plants"; Linde Kryotechnik Ag; Switzerland; 2001.
12. Quack H; "Search for the Best Processes to Liquefy Hydrogen in Very Large Plants", 12th Cryogenics IIR Conference in Dresden ; 2012.
13. Songwut K.I.; Jacob .H; Stang, P.N." Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009"; international journal of hydrogen energy 35 ; 2010; 4524-4533.
14. Matsuda.H; Nagami.N "Study of large hydrogen liquefaction Process"; Nippon Sanso Corp; 1997.

15. Kuendiga.A. "Large scale hydrogen liquefaction in combination with LNG re-gasification"; LindeKryotechnik AG; 2000.
16. Berstad.D.O; Stang.J.H; Neksa.P." Large-scale hydrogen liquefier utilising mixed-refrigerant pre-cooling"; International Journal of Hydrogen Energy; 2010;4512-4523.
17. Belyakov.V.V; Krakovskii.B.D ."Low-capacity hydrogen liquefier with a helium cycle, Chemical and Petroleum Engineering"; Chemical and Petroleum Engineeringol:vol 38;3-4,2002.
18. Kuzmenko.I.F ;Morkovkin.I.M; Gurov.E.I ," Concept of Building medium-Capacity Hydrogen Liquefiers with helium Refrige-gration";Chemical and Petroleum Engineering; Vol. 40; 2004; 1-2.
19. Stang.J; Neksa.P; Brendeng.E. "On the design of an efficient hydrogen liquefaction process"; WHEC 16; Lyon France 2006.
20. Notardonato.W.U. "Analysis and testing of an integrated refrigeration and storage system for liquid hydrogen zero boil off,liquefaction and densification";University of Florida;2006.1960.
21. Shimko.M.A."Innovative Hydrogen Liquefaction Cycle;Gas Equipment Engineering Corp; 2011.
22. Valenti.G." Proposal of an innovative, high-efficiency, large-scale hydrogen liquefier"; International Journal of Hydrogen Energy33; 2008;3116-3123.