

جایگزین مناسب برای شیرهای فشار شکن در چرخه‌های برودتی برای بازیابی انرژی حاصل از انبساط جریان

محمد عابدی، سید رسول حسینی حسن آبادی، احسان اعتضادی
سازمان پژوهشهای علمی صنعتی ایران، پژوهشکده اصفهان

خلاصه

بخش عمده‌ای از انرژی مورد استفاده در بسیاری از صنایع از قبیل صنایع غذایی، نوشیدنی و شیمیایی و سهم عمده‌ای از هزینه‌های کلی مصرف انرژی این صنایع مربوط به بخش برودتی است. چرخه‌های سرمایش در بسیاری از زمینه‌ها مقادیر زیادی از انرژی را به دلیل به روز نبودن طراحی سیستم و شکل سنتی موجود در واحد هدر می‌دهند.

در صنایع برودتی که یکی از بزرگترین مصرف کننده‌های انرژی در دنیا هستند، صرفنظر از کلیه جزئیات فرآیند، غالباً اساس کار روی جذب گرما از منبع سرد و دفع آن به منبع گرم است که این اساس کار یخچال‌ها و سیستم‌های سرمایشی موجود است. برای این کار سیال خاص در یک جهت با افزایش فشار مواجه خواهد شد که این کار را با یک کمپرسور انجام می‌دهند و در جهت مقابل نیاز است تا فشار این سیال در سیستم خاصی شکسته شود.

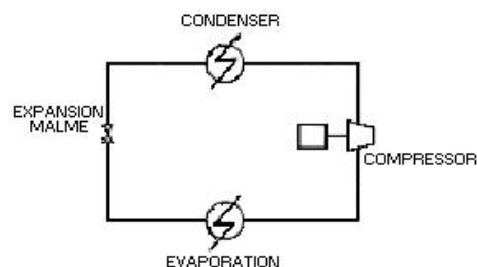
سیستمی که برای این منظور پیشنهاد شده است شیر فشار شکن است که به صورت مانعی بر سر راه جریان فشار بالا قرار می‌گیرد و فشار آن را می‌کاهد. در خلال این کاهش فشار، مقادیری انرژی به صورت گرما هدر خواهد رفت، که با بازیافت آن می‌توان نیاز قسمت‌هایی از سیستم را به انرژی تأمین نمود و هزینه‌ها را کاهش داد. از جمله واحدها و فرآیندهای شاخص می‌توان به واحدهای تولید اکسیژن، میعان گاز، سرمایش پروپان، سرمایش مخلوط هیدروکربن، فرآیند تولید گاز مایع، تولید پروپیلن واتیلن، واحد آمونیاک، فرآیندهای تصفیه و پالایش گاز، واحد مایع سازی و تراکم گاز طبیعی، تولید پروپیلن با دانسیته بالا و در نهایت واحد تولید اوره و... اشاره کرد. در این مقاله روی ترمودینامیک فرآیند انبساط و همچنین معرفی سیستم‌های مختلف و مناسب جایگزین به جای شیرهای فشار شکن و بازده آنها بحث خواهد شد^۱.

واژه‌های کلیدی: شیر انبساط، فرآیند ژول تامسون، سیستم‌های سرمایشی، توربو توربین انبساطی، توربین دو فازی، بازیابی انرژی

۱- پمپ سانتریفیوژی با جریان معکوس، توربین انبساطی و توربین‌های دو فازی

مقدمه

مطابق شکل شماره (۱) ماده سردساز به صورت بخار فوق داغ، به آرامی و با فشار پایین وارد کمپرسور می‌شود. سپس با حالت بخار و فشار افزایش یافته از درون کمپرسور خارج شده و وارد چگالنده می‌شود، که در آنجا ماده سردکننده به خاطر انتقال گرما به منبع سرد چگالیده می‌شود. سپس ماده سرد کننده به صورت مایع پر فشار، چگالنده را ترک می‌کند. فشار مایع به دلیل جریان یافتن از درون شیر انبساط کاهش یافته و مقداری از مایع به سرعت به بخار تبدیل می‌شود. مایع به جا مانده در تبخیرکننده که دارای فشار پایین است، به دلیل انتقال گرما از منبع سرد، تبخیر می‌شود و بعد وارد کمپرسور می‌شود و بدین ترتیب یک چرخه سرمایشی ادامه می‌یابد [۱۰].



شکل ۱- نمای کلی چرخه برودتی صنعتی

در کل در یک سیستم سرمایشی مقداری کار به سیستم داده می‌شود و با توجه به قانون دوم ترمودینامیک هیچ‌گاه نمی‌توان کل کار صرف شده را بازیابی نمود، ولی می‌توان با روش‌هایی بازده چرخه را افزایش داد. در بسیاری از فرآیندهای شیمیایی، نیاز است تا فشار بعضی از جریان‌ها را کاهش دهند، از این جمله می‌توان به نیاز به کاهش فشار برای تفکیک و یا تبخیر ناگهانی جریان^۲ اشاره کرد.

برای انبساط جریان پر فشار در یک چرخه سرمایشی معمولاً بر سر راه جریان مانعی قرار می‌دهند که این مانع عمدتاً شیر انبساط (شیر فشار شکن) است. فرآیند انبساط در این سیستم‌ها براساس فرآیند موسوم به ژول تامسون انجام می‌گیرد. در حالت پایا، جریان با عبور از یک روزنه به صورت شدید با افت فشار رو به رو خواهد شد. نمونه‌های این فرآیند را می‌توان در شیرهای نیمه باز و یا موانع موجود در لوله‌ها یافت. این فرآیند اغلب در فضای کوچکی انجام می‌شود که زمان و سطح کافی برای انتقال حرارت باقی نمی‌گذارد، بنابراین دانشمندان ترمودینامیک این فرآیند را بی‌دررو فرض می‌کنند [۱۰].

با توجه به مطالب ارائه شده در بالا و شکل شماره (۱) که نمای کلی یک چرخه ایجاد سرما و یا چرخه برودتی را نشان می‌دهد، اگر به جریان‌ات ورودی و خروجی شیر فشار شکن توجه شود، می‌توان از لحاظ ترمودینامیکی انتظار داشت که انتالپی جریان در دو طرف شیر یکسان باشد ولی در عمل به دلیل اصطکاک و افت فشار ناشی از آن مقداری از انرژی هدر می‌رود که از یک طرف مقداری از انرژی موجود در جریان فشار بالا را افت می‌دهد و از طرف دیگر این انرژی اتلافی که به صورت گرما هدر می‌رود، بازده تولید مایع را در سیستم کاهش می‌دهد و موضوع اخیر در بعضی فرآیندها که هدف اصلی میعان جریان گازی در خلال

2- Flash

چنین سیستمی است، مثل میعان هوا، تولید گاز مایع و... در کل، بازده فرآیند را کاهش و هزینه‌ها را افزایش می‌دهد.

سیستم مناسب را باید جایگزین شیر فشارشکن کرد تا انرژی هدر رفته ناشی از افت فشار را به انرژی مکانیکی تبدیل کند. انرژی حاصل از افت فشار، علاوه بر اثرات کاهش دمایی می‌تواند باعث تغییرات فاز جریان‌ها هم بشود که البته در فرآیند سرمایشی و بسیاری از فرآیندهایی که نیاز به کاهش دما داریم بسیار مطلوب و دلخواه است.

انبساط از فشار بالا به فشار پایین در عبور از شیر فشار شکن در بالا نشان داده شده است. همانطور که گفته شد فرآیند ایزنتروپیک است و انتالپی ورودی و خروجی برابر است. حال اگر این جریان از یک سیستم بازیابی انرژی جایگزین این شیر عبور داده شود، بطوری که سیستم ذکر شده با بازده معلوم ولی مشابه سیستم فوق ایزنتروپیک عمل کند می‌توان گفت که انرژی اتلافی بدون تغییر در روند جریان قابل بازیافت است. این قدرت بازیافت شده جزئی از انرژی است که قبلاً در شیرهای فشار شکن معمولی در اثر افت فشار هدر می‌رفت.

شرح انواع سیستم‌های بازیابی انرژی

سیستمی که در واحد نصب خواهد شد از هر نظر باید فرایندی مشابه شیر فشار شکن داشته باشد تا بتواند بدون برهم زدن فرآیند در سیستم جایگزین شود. از طرفی باید از لحاظ اقتصادی نتایج مطلوبی داشته باشد تا بتواند زمان بازپرداخت کم و قابل قبولی را ارائه دهد. از جمله این موارد می‌توان به مرجع شماره یک اشاره کرد که در مورد ارائه یک سیستم مناسب برای سیستم‌های تولید گاز مایع برای جایگزینی به جای ولوهای ژول - تامسون می‌باشد [۱].

در مواردی که یک جریان دو فازی از یک شیر ژول - تامسون عبور می‌کند و یا زمانی که برای بازیابی مقداری از انرژی وافت فشار به صورت معکوس وارد یک پمپ می‌شود، می‌توان سیستم جایگزین را برای سیستم افت دهنده فشار ارائه داد [۲].

اساساً، یک شیر فشارشکن یا یک پمپ معکوس توانایی خیلی کمی را برای جداسازی فازها دارد، ولی توانایی افت فشار آنها بسیار قابل توجه است. شاید زمانی که از یک پمپ معکوس استفاده شود، این امکان وجود داشته باشد که از انرژی مکانیکی تولیدی برای چرخاندن یک سیستم استفاده کرد، ولی باید به این نکته اشاره کرد که بازده سیستم اشاره شده حتی در آن حد هم نیست که انگیزه‌ای برای بررسی و توجیه اقتصادی موجود باشد. ولی اساس کار سیستم‌های مطرح در دنیا تفاوت چندانی با سیستم پمپ معکوس ندارد، بطوری که در مرجع شماره دو ثبت شده است از یک سیستم هیدرولیک توربین انبساطی سخن به میان آمده است که برای بازیابی انرژی حاصل از افت فشار در یک سیستم یوتیلیتی مورد استفاده قرار گرفته است. در این سیستم به جای پمپ معکوس یا شیر فشارشکن از این سیستم توربین انبساطی استفاده شده که می‌توان خروجی این سیستم را با یک کمپرسور و یا با یک ژنراتور و حتی با یک پمپ، کوپل نمود [۲].

این روش روی یک سیستم مشغول کار اعمال شده است و به همین دلیل بدون اینکه آرایش اصلی سیستم از بین برود، یک جریان به صورت کنار گذر از توربین انبساطی عبور داده شده است، در ابتدای کار و انتهای کار که سیستم پایا نشده است و یا در زمان‌هایی که توربین انبساطی از سیستم خارج است، روش سنتی، شیرهای انبساط در فرآیند قرار می‌گیرد و بعد از پایا شدن فرآیند، توربین انبساطی وارد فرآیند می‌شود.

آنچه که گفته شد شاید توجیه کاملی برای بکار بردن یک توربین انبساطی در این سیستم‌ها نباشد، ولی آنچه که تکنولوژی قرن تازه در تمامی زمینه‌ها پیشنهاد می‌کند چند منظوره بودن است. سیستم توربین دو فازی^۳ به عنوان یکی از این سیستم‌های چند منظوره مطرح می‌باشد.

این سیستم این توانایی را دارد که در خروجی، دو فاز مجزا را تحویل دهد و باز این امکان وجود دارد که فشار مایع خروجی را طوری تنظیم کرد که این جریان بتواند باقیمانده فرایند را بدون نیاز به پمپ طی کند. از لحاظ جداسازی، این سیستم دارای بازده بالاتری نسبت به سیستم‌های قبلی است و این به دلیل جداسازی با استفاده از یک نیروی سانتریفیوژی بالا است. این سیستم بسیار ارزان‌تر تمام خواهد شد زیرا در کلیه سیستم‌های قبلی نیاز به یک فرآیند فلاش فشار پایین است ولی در این سیستم این مرحله حذف شده است. همچنین در کلیه سیستم‌های قبلی نیاز به یک پمپ برای انتقال مایعات بعد از مرحله جداسازی می‌باشد که در اینجا این مرحله حذف شده است [۳].

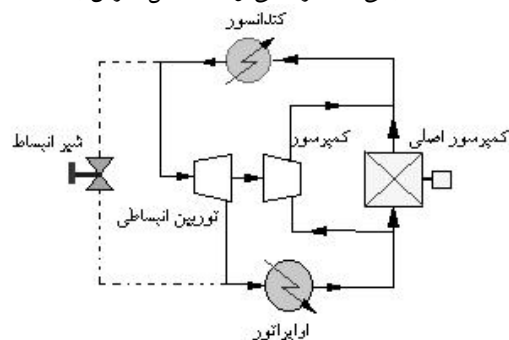
هدف اصلی از نصب شیر فشار شکن انبساط جریان پر فشار در یک فرآیند ایزنتروپیک است، اولین پیشنهاد برای استفاده به جای شیر فشار شکن می‌تواند یک پمپ سانتریفیوژی با جریان معکوس باشد. در این سیستم جریانات فشار بالا از نازل خروجی پمپ وارد و بر روی روتور اثر می‌کند و بعد از اثر روی روتور از درون روزنه‌های روی شفت خارج می‌شود. تعداد مراحل مورد نیاز تابع فشار ورودی پمپ است. این سیستم اگر چه از لحاظ افت فشار بسیار مناسب عمل می‌کند ولی اثرات تغییر فازی جریانات در اثر کاهش فشار درون آن می‌تواند مشکلاتی از قبیل کاویتاسیون و مشکلات عملیاتی مختلفی درون آن ایجاد کند و همچنین بازده پایین آن برای بازیابی انرژی حاصل از افت فشار دلیلی برای ارجحیت آن برای نصب به جای شیرهای فشار شکن سنتی ایجاد نمی‌کند. البته استفاده از این سیستم در چرخه‌های برودتی به دلیل چند فازی شدن جریان سیال کاری زیاد مطلوب نیست، ولی به عنوان یک پیشنهاد مطرح می‌باشد.

پیشنهاد بعدی، توربین‌های انبساطی و یا توربو اکسپندرها هستند که امروزه در صنایع مختلف خصوصاً در چرخه‌های سرمایشی کاربرد فراوان دارند. آنچه که از بررسی منابع و مآخذ معتبر علمی حاصل شده است، نشان می‌دهد که بازیابی انرژی از یک جریان چند فازی موضوع چندان جدیدی نیست. بطوری که اولین پیشنهاد در این زمینه را RUTH ارائه داد که بعداً در سال ۱۹۲۰ به صورت پتنتی برای صرفه‌جویی انرژی در مورد جمع‌کننده‌های بخار بویلرها ثبت شد [۴].

ولی بحث جدی در مورد این سیستم‌ها در اوایل دهه ۱۹۷۰ به منظور بازیابی انرژی از جریانات چند فازی حاصل از چشمه‌های زیرزمینی مطرح شد. این روند آنقدر سرعت گرفت که در سال ۱۹۷۳ اولین نمونه از این سیستم‌ها در کالیفرنیا نصب شد. این سیستم را SPRANKLE ارایه و طراحی کرده بود که مجهز به دو چرخ‌دنده برای انبساط بخار/مایع پر فشار حاصل از چشمه‌های آب‌گرم زیرزمینی کالیفرنیا بود [۴]. که اساس کار این سیستم همان چرخه ترمودینامیکی در فرآیند RUTH بود.

طراحی کلی سیستم به صورت یک توربین ضربه‌ای معمولی است. فشار جریانات پر فشار در عبور از نازل‌ها منجر به افزایش سرعت شده که این جریان پرسرعت تولیدی، در اثر برخورد با پره‌های U شکل روتور باعث ایجاد حرکت گردشی روتور می‌شود و پره‌های روتور را با سرعتی نصف سرعت جریان به حرکت در می‌آورد. در این طراحی حدود ۸٪ از انرژی درون پره‌های روتور هدر می‌رود. طراحی بعدی طراحی براساس توربین عکس‌العملی است که بازده بالاتری دارد، در این طراحی نیمی از انرژی فشاری

جریان را در نازل‌های ثابت به سرعت تبدیل می‌کنند و روتور و پره‌هایش هم کل انرژی سرعتی جت و نیمه باقیمانده انرژی فشاری در روتور عکس‌العملی بازیابی می‌شود. افت فشار بیشتر در خلال روتور و تجهیزات آب‌بندی اطراف آن رخ می‌دهد. از مشکلات این سیستم می‌توان به تشدید روتور در اثر لرزش‌های ناشی از گردش در فرکانس بالای چند هزار دور بر دقیقه که حتی ممکن است باعث شکست سیستم شود، اشاره کرد. از دیگر مشکلات موجود می‌توان به مشکلات ناپایداری و نوسانات موجود در سیستم اشاره کرد که از لحاظ عملیاتی و کنترل می‌تواند مشکل‌آفرین باشد.



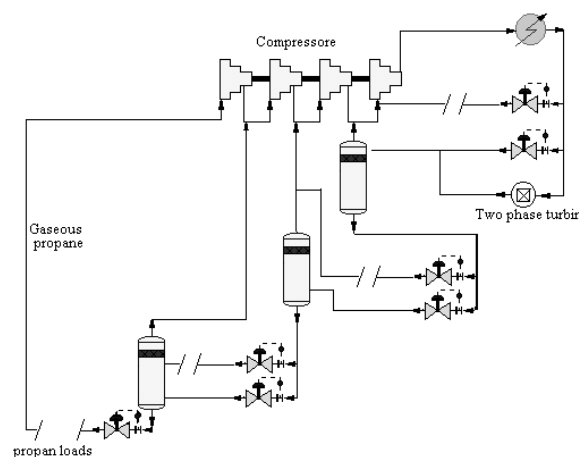
شکل ۲- نمای یک چرخه اصلاح شده برودتی

سیستم بعدی مورد بحث سیستم جدید توربین دو فازی است. بطور کلی یک توربین دو فازی می‌تواند با بازدهی در حدود ۵۰٪ تا ۶۰٪ کار کند که این بازده وابسته به خواص سیال و پتانسیل تولید قدرت توربین می‌باشد. البته بطور خاص برای سیستم‌های سرمایشی، سیستم‌های مناسب‌تری ارائه شده‌اند، از جمله استفاده از یک توربین انبساطی برای انبساط جریان و کوپل کردن آن با کمپرسور واحد است که با این عمل مقداری از انرژی و نیروی مورد نیاز کمپرسور تأمین می‌شود [۹-۵].

با مطالعه و شبیه‌سازی روی فرآیند چند شرکت سرمایشی، نتایج مناسبی بدست می‌آید. بطوری که در یک واحد تولید اتیلن علاوه بر تولید ۵۸۰ کیلو وات انرژی الکتریکی در حدود ۵/۹٪ افزایش تولید میعانات پیش‌بینی شده است. اطلاعات مشابهی در مورد صنایع میعان هوا حاصل شده است که در این مورد هم تولید ۱۵۵ مگاوات انرژی الکتریکی پیش‌بینی شده است.

توربین دو فازی با بازده بالا و اندازه کوچکتر، نسبت به توربو توربین‌های انبساطی هزینه‌های نصب و عملیاتی پایین‌تری دارد. در این سیستم هم مشابه توربین‌های ضربه‌ای، جریان فشار بالا به سرعت بالا تبدیل می‌شود و باعث حرکت روتور می‌شود. البته شکل پره‌ها و انحنای آن طوری طراحی می‌شود که حداکثر بازده و مومنتم و حداقل افت اصطکاکی ایجاد شود.

در سیکل سرمایشی پروپان، جریان با دبی ۲۳۵۰۰۰ کیلو گرم بر ساعت و فشار بالای حدود ۱۶۰۰ کیلو پاسکال وارد شیر فشار شکن می‌شود و در اثر افت فشار با فشار ۶۶۵ کیلو پاسکال خارج می‌شود. در حدود ۳۰۰۰ کیلو وات انرژی قابل بازیافت در خلال این عمل در یک شیر فشار شکن هدر می‌رود که می‌توان با نصب سیستم از آن استفاده کرد. بطور تقریبی در مقابل انرژی مصرف شده در کمپرسور سیستم می‌توان گفت که در حدود ۱۰٪ از انرژی مصرفی در کمپرسور واحد (مصرف کننده اصلی) قابل بازیابی است که البته چنین محاسباتی را برای موارد بسیاری می‌توان انجام داد و اهمیت اقتصادی موضوع را گوشزد نمود.

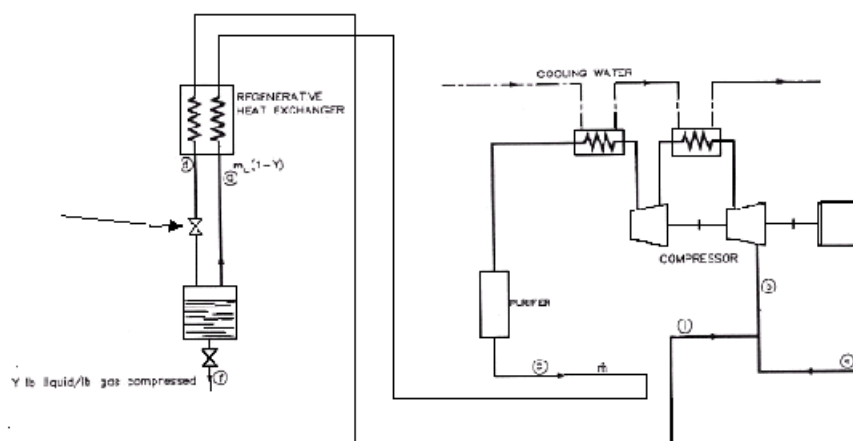


شکل ۳- چرخه برودتی پروپان

زمینه‌های کاربردی سیستم

فرآیند میعان هوا

یکی از فرآیندهای بزرگ و برجسته صنعتی، میعان هوا است که در آن هوا به اجزاء تشکیل‌دهنده تفکیک می‌شود. روش‌های مختلفی برای تفکیک اجزاء هوا پیشنهاد و بکار گرفته می‌شوند که در همه آنها نیاز به دماهای پایین است. در فرآیند میعان هوا در موارد مختلف نیاز به انبساط جریان‌ات فشار بالا است، که عمدتاً این کار را بطور مرسوم در شیرهای فشارشکن (شیر انبساط) عملی می‌کنند و از این لحاظ این صنعت دارای پتانسیل بازیابی انرژی فراوانی می‌باشد.



شکل ۴- فرآیند میعان هوا و شیر انبساطی

خوراک در نقطه **b** وارد کمپرسور می‌شود. هوای فشرده شده از کمپرسور با عبور از تمیز کننده^۴ به صورت هوای تمیز وارد مبدل حرارتی می‌شود و بعد از کاهش دما به صورت جریان **d** در می‌آید. این جریان فشار بالا باید کاهش یابد و به صورت جریان نقطه **e** درآید و بعد از تفکیک شدن میعانات این جریان گازی دوباره چرخه را طی خواهد نمود. جریان فشار بالای **d** باید فشار خود را از دست بدهد، این کار بطور سستی در شیر انبساطی انجام می‌شود ولی جزء مایعات آن در حدود ۲۰٪ تا ۲۵٪ است و میزان مصرف انرژی در حدود ۱۵-۲۰ کیلووات به ازای ۱۰۰۰ فوت مکعب گاز ورودی است. البته موارد مشابه بسیاری را می‌توان نام برد و بهره حاصل از اجرای این فن‌آوری را در آنها ملاحظه نمود، از جمله آن می‌توان به واحدهای تولید اکسیژن، تولید گاز مایع، انجماد پروپان، تولید اتیلن و پروپیلن، اوره، آمونیاک و.... اشاره کرد [۵ و ۸].

۱- پمپ سانتریفیوژی با جریان معکوس، توربین انبساطی و توربین‌های دو فازی

2- Flash

3- Biphase rotary separator turbine

4- Purifier

مراجع

- 1- Brundige, Jr., "Method and apparatus for the production for liquid gas products", United States Patent, 4,563,201, January 7, 1986.
- 2- Shnell., "System for geothermal production of electricity", United States Patent, 5,911,684, June 15, 1999.
- 3- Helgeson, N., Generation of Useful Energy from Process Fluids Using the Biphase Turbine, Final Report contract DE-AC07-76ET15350/A009, Biphase Energy Systems, Santa Monica, Calif., August 1980.
- 4- Hayes, L., History and Overview of Two-Phase Turbines. International conference on Compressores and Their Systems, Institution of Mechanical, Engineeres, London, September, 1995.
- 5- Carrier Corporation, 19XT Hermatic Centrifugal Liquid Chiller, Product Data From 19XT-1PD, Syracuse, 1995.
- 6- Wulf, J., Praxair, Personal Communication, March 1999.
- 7- Hays, L., "The Biphase Rotary Separator Turbine", Presented at the Conference on Developments in Production Separation Systems, June 1995, London, UK.
- 8- Elliott, Hays, Weinberg, "Acceleration of liquid in Two-Phase Nozzles", Report no. 32-987, National Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA, 1968.
- 9- Vislie, Davies, Hays, "Futher Developments of the Biphase Rotary Separatore Turbine", Paper presented at IBC Separation Systems Conference, May 1997, Oslo, Norway.
- 10- D.H. Mackenzie. Propak systems Ltd., "Mixed refrigerants proven efficient in natural – gas-liquid recovery process ., Oil&Gas Journal, March 4, 1985, pp-116-120.

4- Purifier