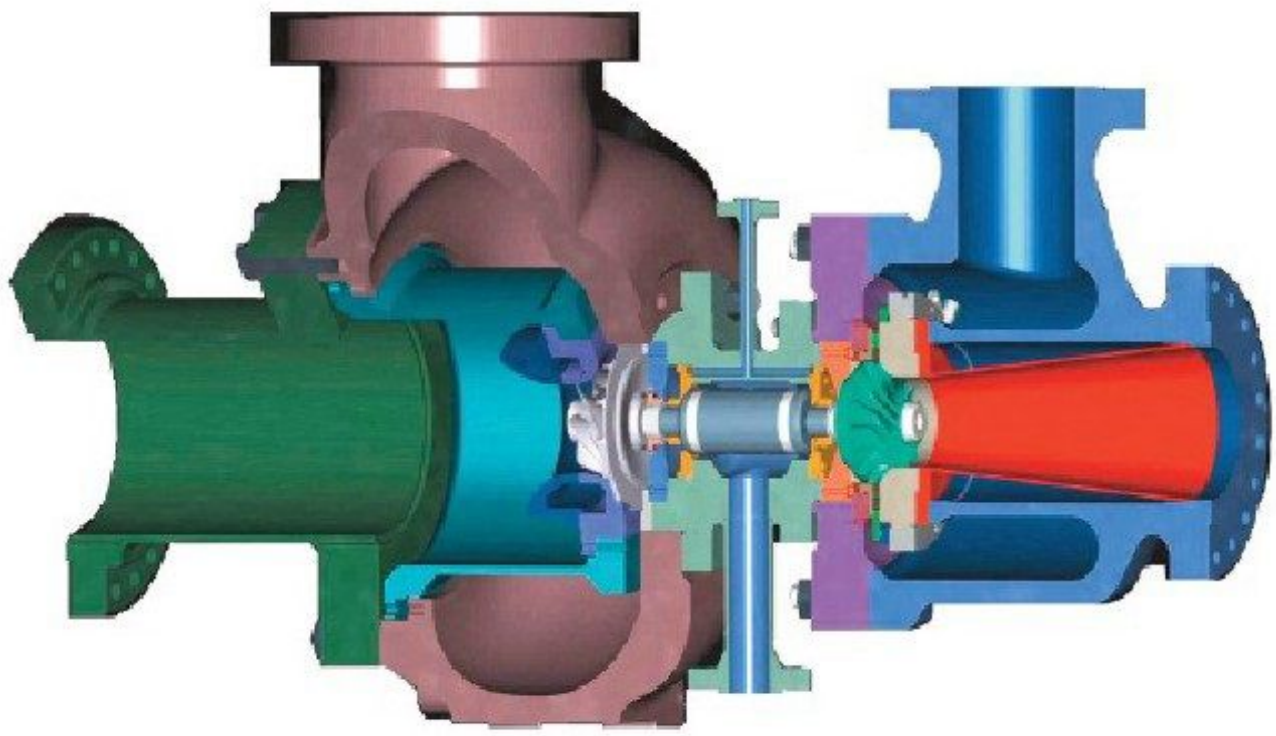
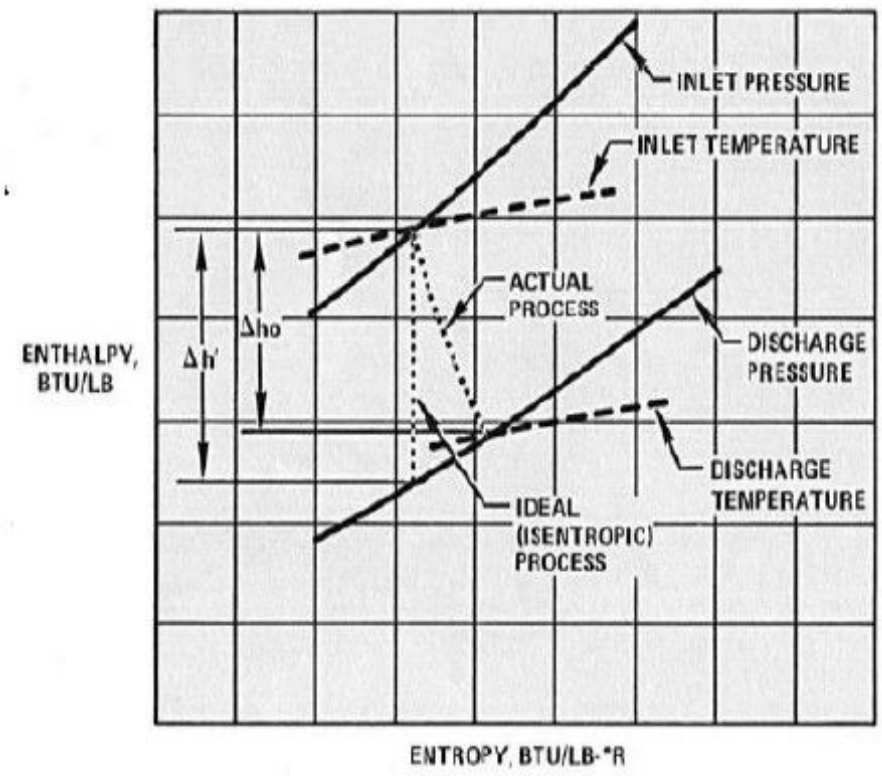


۷ Turbo Expander چیست ؟

Turbo Expander که به یک توربین انبساطی نیز منتسب می‌باشد، یک توربین با جریان گریز از مرکز یا محوری است که از طریق آن گازی با فشار بالا برای تولید کار، انبساط می‌یابد که اغلب از آن برای به حرکت در آوردن یک کمپرسور استفاده می‌گردد (محور چرخان روی یک میله بهم متصل بوده و توربین انبساطی، واحد تولید نیرو و کمپرسور، واحد چرخنده می‌باشد). به عبارت دیگر، از این عملیات، برای کاهش فشار یک جریان گاز ورودی پر فشار برای تولید یک جریان خروجی با فشار پایین و سرعت بالا، استفاده می‌گردد. یک فرایند انبساط شامل تبدیل انرژی داخلی گاز به انرژی جنبشی و نهایتا به کار محوری می‌باشد. درواقع گاز بصورت محوری یا شعاعی به داخل جریان یافته و ازمیان پره‌های ورودی سرعت گرفته و می‌چرخند. گاز چرخان و با سرعت بالا وارد پره‌های انبساط دهنده با برخورد نسبتاً کم شده زیرا سرعت نوک تیغه در قطر خروجی پروانه تقریباً با سرعت گاز یکسان می‌باشد.

انبساط با یک فرایند آنتروپی ثابت، تقریب زده می‌شود (آدیاباتیک و برگشت‌پذیر زیرا تبادل حرارت بخاطر انبساط سریع گاز، ناچیز فرض می‌گردد) و گاز کم فشار خارج شده از توربین، در یک دمای بسیار کم، بسته به

فشار عملیاتی و خواص گاز، 150 - درجه سلسیوس یا کمتر می باشد. میعان جزئی گاز منبسط شده، غیر معمول نیست.



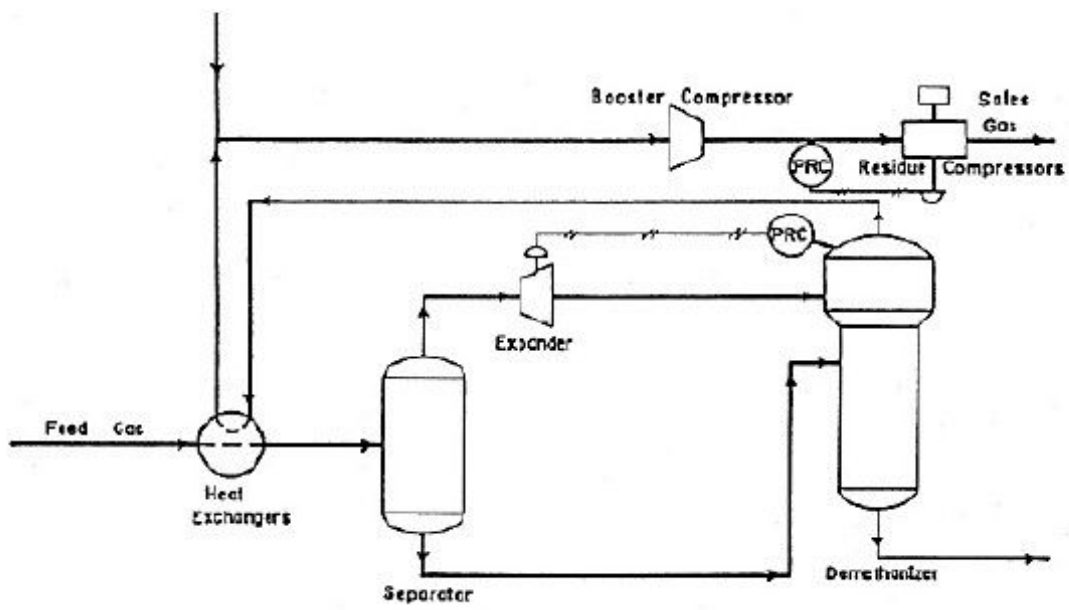
شکل 1 . فرایند انبساط

در فرایندهای گازی، هدف از کاربرد این توربین انبساطی انجام موثر دو عملکرد کاملاً مختلف در یک ماشین واحد. عملکرد اصلی، ایجاد سردسازی در جریان گاز فرایندی بطور موثر که اینکار توسط توربین انبساطی و استخراج گرمای پتاسیل از جریان گازی که نتیجتاً باعث سرد سازی آن بطور چشمگیر می‌گردد، انجام می‌شود. انرژی بیرون کشیده شده به انرژی مکانیکی برای چرخاندن محور کمپرسور بوستر توربین انبساطی تبدیل می‌گردد.

از توربینهای انبساطی بطور بسیار گسترده‌ای به عنوان منابع سرد کننده در فرایندهای صنعتی مانند استخراج اتان و مایعات گاز طبیعی (NGL) از گاز طبیعی، واحدهای تولید اتیلن، مایع سازی گازها (گازهایی مانند اکسیژن، نیتروژن، هلیوم، آرگون و کریپتون)، پالایشگاهها تجهیزات جداسازی هوا و در دیگر فرآیندهای با دمای پایین، استفاده می‌شوند. بطوریکه این تجهیز، سردترین سطح برای سیستم تبرید موجود در تاسیسات را تامین کرده درحالیکه در این شرایط مقادیر قابل توجهی میعانات نیز در خلال فراید انبساط ایجاد می‌گردد. چون فقط سردسازی گاز منظور نبوده بلکه مقداری از اجزای سنگین‌تر گازی نیز مایع می‌گردند که این میعانات حاوی محصولات ارزشمندی می‌باشند که استفاده از توربین انبساطی در چنین تاسیساتی را ارزشمندتر و موثرتر می‌نماید.

بصورت یک طرح کلی می‌توان گفت که گاز پرفشار و نسبتاً خنک وارد قسمت انبساط دهنده توربین انبساط دهنده می‌شود و به میان پره‌های متغیر ورودی (Variable Guide Vane) و سپس به میان چرخ توربین، جریان یافته و با فشار کمتر و دمای پایین‌تر خارج می‌گردد. گاز سپس از این توربین انبساطی به واحد متان‌زدایی رفته و

میعانات گازی آن جدا می‌گردد. نازل‌های انبساط دهنده جهت کنترل دبی جریان گاز بمنظور ثابت نگه داشتن فشار در متان‌زدا استفاده می‌گردد. گاز باقی‌مانده از برج متان‌زدا به میان مبدل حرارتی گاز و سپس به کمپرسور بوستر اکسپندر جهت فشار افزایی جریان می‌یابد. بازده این کمپرسور بسیار مهم می‌باشد بطوریکه می‌توان فرایند سرسازی را برای سرمایش بیشتر بهمراه استفاده از تولید توان بیشتر توسط توربین انبساطی ارتقا داد. همانطور که گفته شد توان تولید شده توسط انبساط دهنده می‌تواند برای چرخاندن یک کمپرسور جریان شعاعی استفاده گردد که راندمان آن بسیار مهم می‌باشد،



شکل 2 . شمای کلی فرایند یک توربین انبساطی

افت فشار در GV I ها همان پره‌های راهنمای ورودی باعث شتاب دادن به گاز وقتی که در یک جهت جانبی می‌چرخد، می‌شود. درواقع هدف، انجام این کار با کمترین افت در فشار کلی بهمراه سرعت و زاویه جریانی یکنواخت در خروجی این پره‌ها و نیز جهت کمینه نمودن ناحیه با جریانهای حلقوی در پایین‌دست می‌باشد. سرعت و جهت خروجی گاز از این GV I تقریباً یکنواخت می‌باشد. در واقع با استفاده از این پره‌ها، گاز مستقیماً و با زاویه مناسب به داخل توربین انبساطی هدایت شده و علاوه براین کنترل جریان ورودی حاصل می‌گردد.

معمولا توربین های انبساطی، در محدوده عملیاتی حدود 0 5 7 وات تا تقریبا 5, 7 مگاوات (1 اسب بخار تا تقریبا 10000 اسب بخار)، می‌باشند. همچنین سرعت چرخش محور این توربینهای انبساطی در سرویسهای هیدروکربنی، معمولاً بین 000 5 تا 1000 دور در دقیقه برای ماشینهای بزرگ و 0000 5 تا 100000 دور در دقیقه برای ماشینهای کوچک می‌باشد.

توربینهای انبساطی در 20 سال اخیر بسیار موثر و پرکاربرد گردیده‌اند، بطوریکه بازدهی و قابلیت اطمینان بالای آنها باعث استفاده بسیار گسترده اشان در سرتاسر جهان شده است. استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی در بسیاری از کاربردهای حساس این توربینهای انبساطی مانند تاسیسات تولید اتیلن معمول شده است و حتی در فرایندهای گاز طبیعی نیز وارد شده‌اند.

۷ یاتاقانهای مغناطیسی

استفاده از یاتاقان مغناطیسی فعال محاسن غیر قابل چشم پوشی دارد که در مقایسه با یاتاقانهای متعارف نصب شده روی تجهیزات دوار مزایای زیادی را برای این تجهیزات به ارمغان می آورد که شامل موارد ذیل می شوند:

- حذف سیستم روغن کاری
- حذف کامل اصطکاک به دلیل چرخش شفت بدون تماس با بدنه
- کاهش قابل ملاحظه نیاز به تعمیرات دوره‌ای
- قابلیت تغییر مؤلفه‌های ذاتی یاتاقان یعنی Stiffness و Damping به صورت آنلاین بر اساس نیاز فرایند.(این مؤلفه ها در یاتاقانهای متعارف غیر قابل تغییر هستند)
- کاهش Noise
- کاهش مصرف انرژی به دلیل حذف اصطکاک
- قابلیت استفاده در محیط های تمیز به دلیل حذف روغن
- قابلیت نصب روی محورهایی به وزن تا 50 تن
- قابلیت کنترل ارتعاش
- قابلیت کارکرد در سرعتهای بسیار بالا

واضح است در صورت استفاده از این تکنولوژی در تجهیزات دوار، با توجه به مزایای ذکر شده، صنایع بهره برداری مشکلات کمتری در زمینه تعمیر ونگهداری خواهند داشت و از انعطاف پذیری بیشتری در زمینه کنترل تجهیزات دوار برخوردار خواهند بود.

تکنولوژی، طراحی و بکارگیری یاتاقان مغناطیسی فعال بمنظور رفع ضعفها در یاتاقانهای متعارف می باشد. ویژگی بزرگ این یاتاقانها کار در سرعتهای بسیار بالا بدون استفاده از سیستم روغن کاری است.

یاتاقانهای مغناطیسی با بهره‌گیری از یک کنترلر جریان الکتریکی، معلق شدن شفت موتورها، کمپرسورها و یا پمپها را در مرکز فضای چرخش امکانپذیر می‌سازند. عدم وجود تماس مکانیکی بین سطح دوار و سطح ثابت بدنه، امکان دستیابی به سرعتهای بسیار بالا و کاهش شدید تعمیرات دوره‌ای به دلیل نبود اصطکاک را فراهم می‌آورد. با حذف تلفات اصطکاک، سر و صدا و لرزش، مصرف انرژی نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. قابلیت ویژه یاتاقانهای مغناطیسی نسبت به یاتاقانهای متعارف، تغییر پارامترهای معادل فنریت (Stiffness) و میرایی (Damping) است، که با کنترل‌کننده پیش‌خور تنظیم می‌شوند. این کنترل‌کننده از الگوریتم PID برای تنظیم جریان در الکترومگنتها استفاده می‌نماید و به وسیله همین جریان است که نیروی مغناطیسی ایجاد می‌شود.

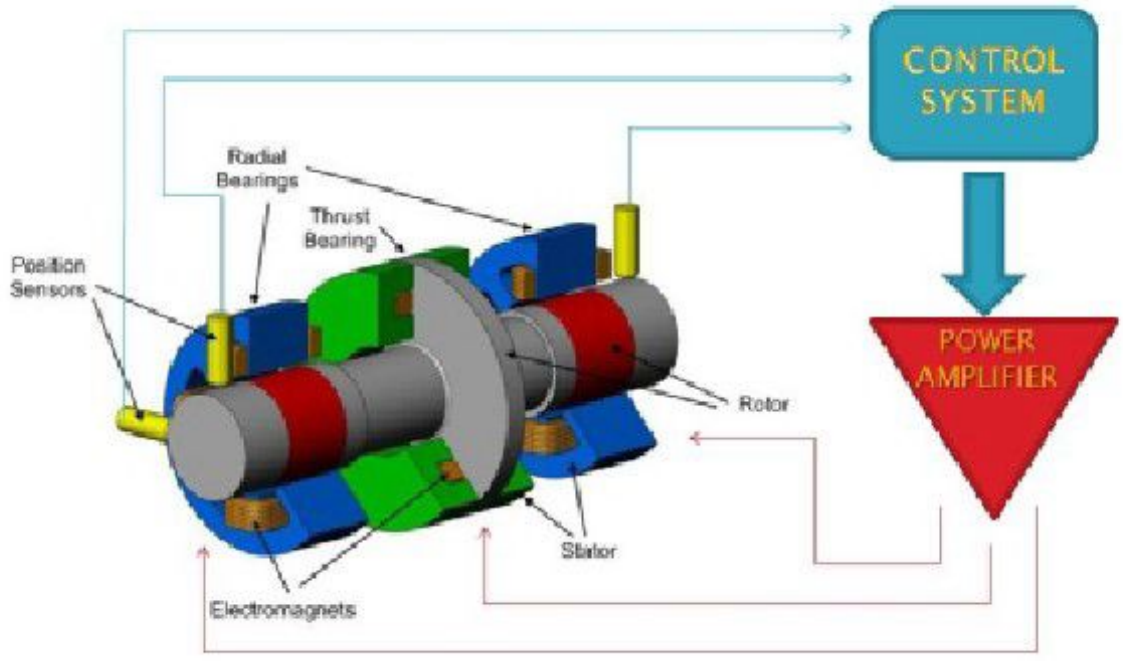
استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی درواقع بصورت یاتاقانهای مغناطیسی فعال بوده که منظور همان نگه‌داشتن محور در موقعیت خاص با استفاده از آهن‌رباهای الکتریکی که در مجاورت محور قرار گرفته‌اند. جریانی که به این آهن‌رباهای الکتریکی تغذیه می‌گردد توسط یک سیستم کنترلی تنظیم می‌گردد. هنگامیکه محور از موقعیت مطلوب دور شود (معمولاً از مرکز یاتاقانها)، سنسورهای موقعیت این تغییر را شناسایی کرده و سیگنال خطا ایجاد شده و به کنترل کننده PID فرستاده می‌شود. قابل توجه است که اولاً، نرخ زمانی دریافت سیگنال خطا، پردازش آن و عکس‌العمل خروجی که به یاتاقان‌ها ارسال می‌گردد، بسیار سریعتر از کنترل فرایندی استاندارد می‌باشد. دوماً، یک کنترل کننده PID معمولاً نیاز به استفاده از باند مشتقی برای کنترل ندارد. اما در سیستم کنترلی یاتاقان مغناطیسی، عکس العمل مشتقی مطلقاً مورد نیاز بوده و حیاتی است. درحالیکه بیشترین استعمال

کنترل فرایندی صنعتی، بصورت حلقه باز پایدارند که دلالت دارد بر اینکه آنها می‌توانند در حالت دستی قرار گیرند و حلقه بصورت نامحدود تغییر نخواهد کرد، یاتاقانهای مغناطیسی بصورت مدار باز ناپایدار خواهند بود و نمی‌توانند بصورت مد دستی قرار گیرند.

در ارتباط با کنترل‌کننده‌های PI D باید گفت که در عمل تناسبی، رابطه‌ای خطی بین ورودی یا خطا و خروجی کنترل‌کننده وجود دارد، در عمل مشتقی، خروجی کنترل‌کننده متناسب با نرخ تغییرات ورودی یا خطا (مشتق خطا نسبت به زمان) نسبت به زمان می‌باشد و در عمل انتگرالی، خروجی کنترل‌کننده متناسب با انتگرال ورودی یا خطا می‌باشد.

سیستم کنترلی خود می‌تواند بصورت آنالوگ یا دیجیتال باشد. در یک سیستم آنالوگ، عناصر حلقه PI D از اجزای سخت‌افزار الکتریکی واقعی (مقاومت‌های الکتریکی، خازنها، القا کننده‌ها و ..)پیکربندی می‌گردند. این، مزیت استفاده از اجزای نسبتاً در دسترس که عکس العمل سریع با کمترین تاخیر زمانی را دارد را بهمراه دارد. کنترل دیجیتالی تغییر در پارامترهای مدار تنظیم را بسیار آسانتر می‌نماید. اما نکته منفی این است که یک تاخیر زمانی بصورت ذاتی در چنین سیستمهایی وجود دارد که به تاخیر فازی نامطلوب کمک نموده که در فرکانسهای بالاتر، وضعیت بدتر میگردد. در بحث یاتاقانهای مغناطیسی، بایستی توجه شود که آلارم لرزش و سطوح trip کمی در مقایسه با یاتاقانهایی که با روغن خنک‌کاری می‌گردند، متفاوت می‌باشد.

اولین نکته‌ای که می‌بایست فهمید اینست که محور بصورت معمول بایستی در مرکز یاتاقانهای کمکی، برای اینکه بیشترین حرکت بدون تماس محور با یاتاقانهای کمکی اتفاق بیافتد، بچرخد. بنابراین حرکت پایا و ارتعاشی و یا ترکیبی این دو باعث یک Trip می‌گردد. همچنین بایستی توجه شود که حرکت قابل قبول کلی برای محور نسبت به قسمت ثابت برای یک سیستم یاتاقان مغناطیسی، بیشتر است بخاطر دو علت قابل پذیرش: اول، هیچ بابیتی (Babbitt یا همان فلز یاتاقان) برای خستگی وجود نداشته، بنابراین مقدار بیشتری حرکت ارتعاشی باعث خرابی یاتاقانها بصورتی که در سیستم روغن کاری آنها اتفاق می‌افتد نمی‌گردد. دوم، یاتاقان مغناطیسی مجهز شده است به حذف کامل نیاز تقویت‌کننده‌ها به عکس‌العمل به لرزشهای همزمان. بنابراین نیروهای انتقال داده شده بخاطر لرزشهای بزرگ محور تمایل به مقدار کمتری برای سیستم یاتاقان مغناطیسی نسبت به سیستم یاتاقانهای روغنی دارند.



شکل 3 . سیستم یک یاتاقان مغناطیسی

یکی از دلایل فنی استفاده از توربین انبساطی با یاتاقان مغناطیسی بجای روغن برای روانکاری و خنک‌کاری یاتاقانها، همان حذف احتمال آغشته شدن Cold Box یا همان مبدل حرارتی ویژه، به روغن در مواقع خطای اپراتوری یا اشکال در تجهیز است. این روغن اگر از این مبدل حرارتی خارج نگردد، باعث دردسری جدی می‌شود. حتی سیستم یاتاقان مغناطیسی و سیستم کنترلی آن، اغلب ارزانتر می‌باشد.

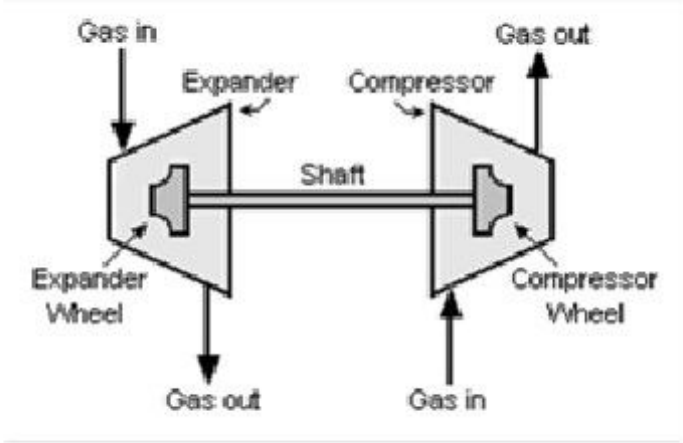
برنامه‌های CFD یا همان دینامیک سیالات محاسباتی، دریچه‌هایی را برای پیشرفت در زمینه آیرودینامیک و نیز کاربردهایی که در گذشته بی‌سابقه بوده است را گشوده‌اند.

استاندارد API 617 ، اشاره به توربینهای انبساطی cryogenic دارد (بخش 4 از ویرایش 2014).

پارامترهایی که برای Size نمودن توربین انبساطی مورد نیاز می‌باشد عبارتند از:

- ترکیب درصد گاز
- دبی جریان
- فشار جریان ورودی
- دمای جریان ورودی

که معمولاً فشار خروجی از توربین انبساطی توسط عملکرد بازده کمپرسور افزاینده و از طریق یک آنالیز پیچیده تکرار شونده تعیین می‌گردد.



شکل 4 . طرح شماتیک یک توربین انبساطی که یک کمپرسور را می چرخاند

۷ تاریخچه

امکان استفاده از یک ماشین انبساطی برای ایجاد دماهای پایین بصورت فرایند آنتروپی ثابت، توسط Carl Wilhelm Siemens (چرخه زیمنس)، مهندسی آلمانی در سال 1857، پیشنهاد گردید. در حدود سه دهه بعد، در سال 1885، Ernest Solvay بلژیکی اقدام به استفاده از یک ماشین انبساطی رفت و برگشتی کرد، اما نتوانست به دماهای کمتر از 98 - درجه سانتیگراد، به دلیل مشکلات روانکاری ماشین در چنین دماهایی، دست پیدا نماید.

در سال 1902، Georges Claude ، مهندسی فرانسوی، از یک ماشین انبساطی رفت و برگشتی برای مایع نمودن هوا، با موفقیت استفاده نمود. او از یک پوشش (packing) چرمی سوخته و روغن زدایی شده به عنوان یک آب‌بند پیستونی، بدون هیچ گونه روانکاری استفاده نمود. با فشار هوایی برابر با فقط 40 bar ، (4 مگا پاسکال)، او تقریباً به یک انبساط آنتروپی ثابت دست پیدا کرد که منجر به دمایی پایین تر از آنچه که قبلا امکان پذیر بوده گردید.

به نظر می‌رسد اولین توربینهای انبساطی در حدود سالهای 1934 یا سال 1935 توسط Guido Zerkowitz ، مهندسی ایتالیایی که برای شرکت آلمانی Linde AG کار می‌کرد، طراحی شده باشد.

در سال 1939، Pyotr Kapitsa فیزیکدان روسی، طراحی توربینهای انبساطی گریز از مرکز را تکمیل نمود. اولین نمونه آزمایشی عملی او از فلز Monel ساخته شد که دارای قطر خارجی فقط 8 سانتی متر (1, 3 اینچ) بود و با 40000 دور در دقیقه، کار می کرد و 1000 متر مکعب هوا را در یک ساعت، منبسط می‌نمود. آن نمونه، از یک پمپ آب بعنوان یک ترمز استفاده می‌کرد و دارای بازده ای بین 79 درصد تا 83 درصد بود. از آن پس، اکثر توربینهای انبساطی که در صنعت استفاده می‌شود، براساس طراحی Kapista بوده اند و توربینهای انبساطی گریز از مرکز نزدیک به 100 درصد از نیازمندیهای فرایندی تبدیل صنعتی گاز به مایع و فرایندهای دمای پایین را برعهده گرفته‌اند. در دسترس بودن اکسیژن مایع، انقلابی را در تولید فولاد با استفاده از فرایند فولادسازی اکسیژنی بنیادی، بوجود آورد.

در سال 1978، جایزه نوبل فیزیک، به Pyotr Kapitsa ، بخاطر قسمت اصلی کارش در زمینه فیزیک دما پایین، اهدا شد.

در سال 1983، گاز و برق San Diego از نخستین شرکتهایی برای نصب یک توربین انبساطی در یک ایستگاه کاهش فشار و دمای (Letdown Station) گاز طبیعی برای بازیابی انرژی، بود.

۷انواع توربین انبساطی

توربینهای انبساطی می‌توانند بر اساس دستگاه بارگذاری شده یا یاتاقانها، طبقه‌بندی گردند. سه دستگاه بارگذاری شده اصلی مورد استفاده در توربینهای انبساطی، کمپرسورهای گریز از مرکز، ژنراتورهای برق یا ترمزهای هیدرولیکی می‌باشند. توسط کمپرسورهای گریز از مرکز و ژنراتورهای الکتریکی، نیروی محور از توربین انبساطی یا برای دوباره متراکم کردن گاز فرایندی و یا برای تولید انرژی الکتریکی در کاهش هزینه‌های آب و برق و هوا، مجددا بازیابی می‌گردد.
از ترمزهای هیدرولیکی، زمانی استفاده می گردد که توربین انبساطی بسیار کوچک بوده و استفاده از نیروی محور، از لحاظ اقتصادی قابل توجیه نباشد. یاتاقانهای استفاده شده، یاتاقانهای روغنی و یا یاتاقانهای مغناطیسی می‌باشند.

۷بازده و فرمولهای مرتبط

برای یک انبساط دهنده، بازده بصورت خارج قسمت کار واقعی تولید شده در فرایند انبساط، به کار تولید شده برای یک انبساط آنتروپی ثابت، تعریف می گردد:

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{Fluid\ Power\ Produced_{actual}}{Fluid\ Power\ Produced_{ideal\ or\ isentropic}} \times 100$$

بازده آنتروپی ثابت متضمن مقایسه‌ای بین عملکرد واقعی یک دستگاه و عملکردی که تحت شرایط محیطی ایده‌آل برای همان حالت ورودی و همان فشار خروجی بدست می‌آمد، می‌باشد. برای یک انبساط آنتروپی ثابت (بازده 100%)، همیشه دمای خروجی گاز، از دمای خروجی برای یک انبساط واقعی، کمتر می‌باشد.
برای یک انبساط دهنده بدون انتقال حرارت و با صرفنظر نمودن از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل، برای مقدار کار واقعی، می توان یک عبارت بصورت زیر نوشت :

$$\text{Power Produced}_{actual} = \text{Heat Flow}_{inlet}\ \text{(Inlet Enthalpy)} - \text{Heat Flow}_{outlet}\ \text{(Outlet Enthalpy)}$$

بیشترین مقدار برای نرخ کار، برای کمترین مقدار مجاز آنتالپی خروجی برای فشار خروجی معین، بدست می‌آید. پس، بازده بصورت زیر خواهد بود :

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{Inlet\ Enthalpy_{actual} - Outlet\ Enthalpy_{actual}}{Inlet\ Enthalpy_{actual} - Outlet\ Enthalpy_{ideal\ or\ isentropic}} \times 100$$

مقدار بازده عادی، بین 0,7 تا 0,9 می باشد.

کار پلی تروپیک (ایده آل) برای کمپرسور را می‌توان از عبارت زیر محاسبه نمود:

$$\text{work} = F_1\,(MW)\left(\frac{n}{n-1}\right)CF\left(\frac{P_1}{\rho_1}\right)\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\left(\frac{n-1}{n}\right)} - 1\right]$$

که :

n= توان حجم

CF= ضریب تصحیح

P_1= فشار جریان ورودی

P_2= فشار جریان خروجی

ρ_1= دانسیته جریان ورودی

F_1= دبی مولی جریان ورودی

MW = جرم مولکولی گاز

فرایند پلی‌تروپیک یعنی اینکه فرایند به تعداد نامحدود تغییر آنتروپی ثابت کوچک شکسته شود.
در یک کمپرسور گریز از مرکز سعی می‌گردد تا حرارت بوجود آمده از طریق بدنه گرفته شود با این وجود عملا دمای گاز خروجی بیشتر از ورودی بوده می‌باشد، به عبارت دیگر هم درجه حرارت سیال بدلیل تراکم بالا رفته (ایزوترمال یا هم دما نبوده) و هم تبادل حرارت بین گاز و بدنه کمپرسور انجام گرفته است (آدیاباتیک نمی‌باشد). بنابراین می‌توان تراکم در کمپرسورها را در عمل، تحولی بین دو حالت فوق (ایزوترمال – آدیاباتیک) دانست که آن را تحول پلی‌تروپیک می‌نامند.

۷ سیستم روغن کاری

فشار روغن روانسازی تامین شده برای یاتاقانها در فشاری بالاتر از مخزن کنترل می‌گردد و توسط یک شیر تنظیم کننده فشار اختلافی که روغن اضافی را به مخزن آن برمی‌گرداند، کنترل می‌شود. معمولاً دو پمپ الکتریکی برای روغن روانساز (یکی اصلی و دیگری آماده بکار) روغن را از مخزن از میان خنک کننده یا از مسیر کنارگذر آن توسط یک شیر کنترلی که جهت نگهداشت دمای روغن برای یاتاقانها، مکش می‌نمایند. سپس روغن از میان فیلتر عبور می‌نماید و نیز فشارش بطور مناسبی تنظیم می‌گردد. یک انباره جهت ذخیره روغن در زمان قطع برق و خاموش شدن پمپ های الکتریکی درنظر گرفته می‌شود. در بعضی از سیستمها، دستگاه اندازه‌گیری دبی روغن وجود دارد.

۷ آب‌بندی محور

آب‌بندی محور می‌تواند از نوع Labyrinth باشد که از گاز آب‌بند یا همان Gas Seal جهت جلوگیری از نشتی گاز فرایندی به اتمسفر و نیز جلوگیری از مهاجرت این گاز سرد به محفظه یاتاقانها و نیز جلوگیری از نشتی روغن به جریان فرایندی استفاده گردد. اگر گاز سرد که فیلتر هم نشده برای ذرات کوچک از توربین انبساطی به محفظه یاتاقانها وارد شود، روغن روانکاری کثیف شده و حتی سرد شده و به حالت منجمد درمی‌آید. به همین ترتیب، نشتی روغن به گاز فرایندی داخل توربین انبساطی نامطلوب بوده زیرا تمایل به یخ زدن در داخل تجهیز داشته و در پایین دست یعنی مبدلهای حرارتی دچار مشکل خواهیم شد. همانطور که گفته شد و قابل توجه می‌باشد، در صورت نشت روغن به Cold Box ، بیرون آوردن و جمع‌اوری آن بسیار دشوار می‌باشد.

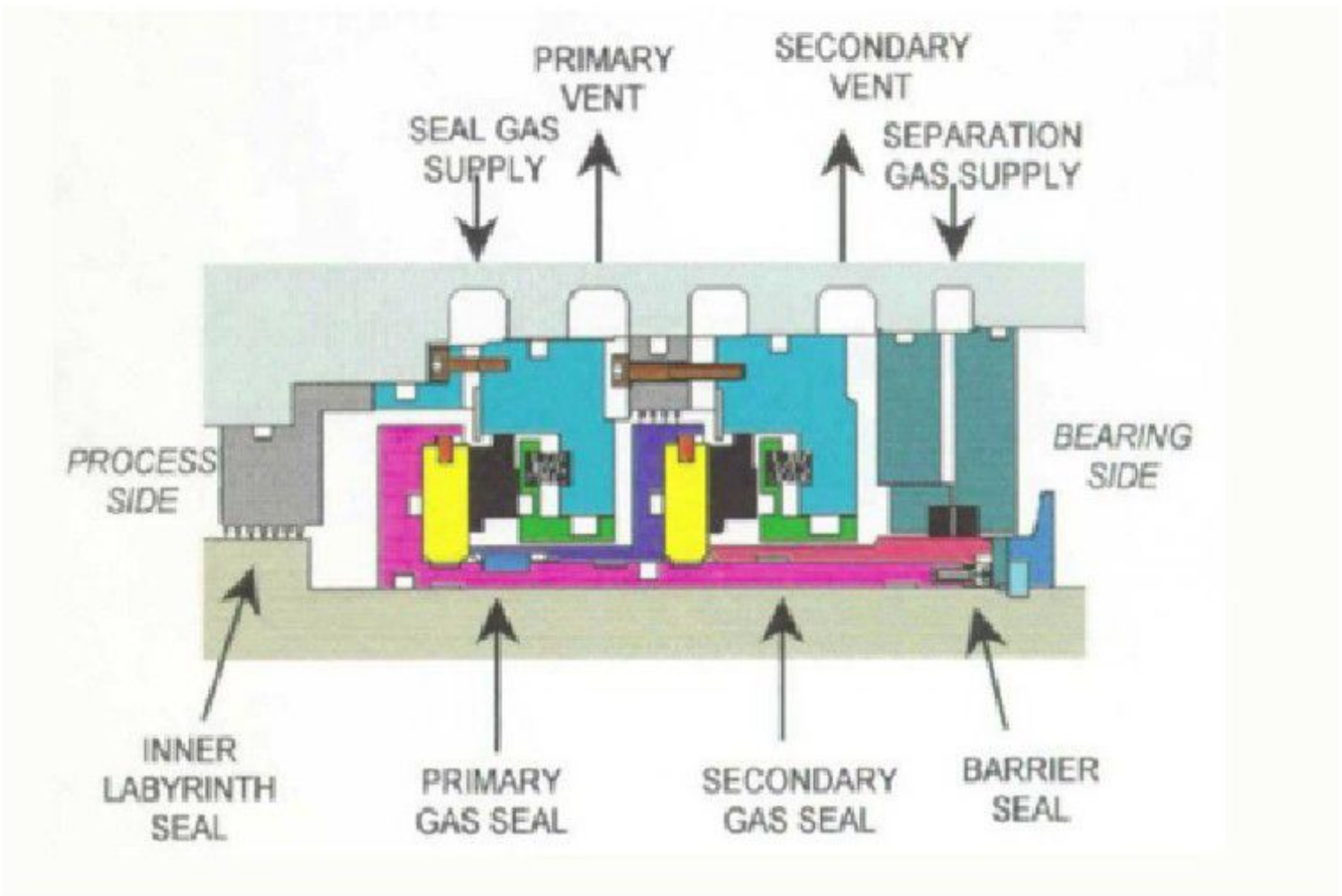
تقریباً تمامی آب‌بندهای توربین‌های انبساطی یا از نوع آب‌بند Closefitting Labyrinth یا از نوع غیر تماسی با گاز خشک می‌باشد. سرعت بالای این ماشینهای دوار باعث می‌شود که آب‌بندهای مکانیکی متعارف بخاطر تماسی بودن این آب‌بندها، مورد استفاده قرار نگیرند.

سیستم گاز آب‌بندی از گاز فرایندی گرم که فیلتر شده است یا گاز خنثی فیلتر شده، استفاده می‌نماید. گاز آب‌بندی در نزدیکی میانه آب‌بند تزریق شده و باعث می‌شود که آب‌بند به سمت جلو و محفظه یاتاقانها و محفظه انبساط دهنده (انتهای انبساط دهنده) رانده شده و از اختلاط سیال بین محفظه‌ها جلوگیری بعمل آورد.

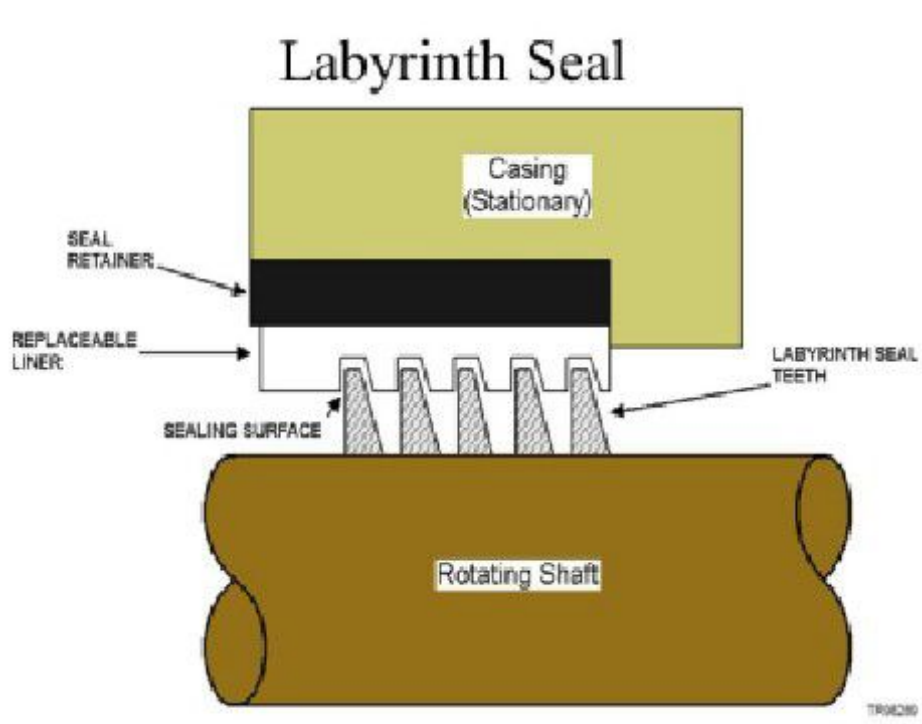
مقدار کمی از گاز آب‌بند که به سوی محفظه یاتاقانها می‌رود با روغن مخلوط می‌گردد که به مخزن روغن، تخلیه شده و در مخزن، گاز از روغن جدا شده و سپس از میان یک معبر جداکننده قطرات مایع (Demister Pad) عبور کرده و به ورودی کمپرسور هدایت می‌گردد. تجهیزات ابزار دقیق ایمنی اصلی شامل ردیاب سرعت و لرزش، RTD های دمای یاتاقان، Thrust Oil و سوییچهای اختلاف فشار گاز آب‌بند می‌باشد. در سیستم آب‌بندی معمولی(Single Seal)، از یک Gas Seal برای جلوگیری از حرکت گاز فرایندی به اتمسفر به همراه یک Barrier Seal که معمولاً نیتروژن می‌باشد برای جلوگیری از نشت روغن محفظه یاتاقانها به Gas Seal استفاده می‌گردد. نشتی این دو گاز مطابق با شکل شماره 5، از طریق vent به بیرون و درصورت لزوم به مشعل گازی منتقل می گردد.

در استفاده از تکنولوژی یاتاقان مغناطیسی، باز هم جهت جلوگیری از نشت گاز فرایندی و اینکه بسیاری از قطعات هستند که می‌بایست از گاز سرد داخل توربین انبساطی محافظت گردند، بنابراین آب‌بندها در کاربردهای یاتاقان مغناطیسی نیز بکار می‌روند.

برای هر دو سیستم یاتاقنهای روغنی و مغناطیسی، جهت جداسازی گاز فرایندی و محفظه یاتاقانها از آب‌بند Labyrinth میانگیردار استفاده می‌گردد.



شکل 5 . آب‌بند شانه‌ای



شکل 6 . آب‌بند شانه‌ای

Adjustable seals employ a tapered shaft-conical labyrinth seal design. Seal clearance can be maintained by adjusting the axial position of the seal, a procedure not possible with other types of seals.

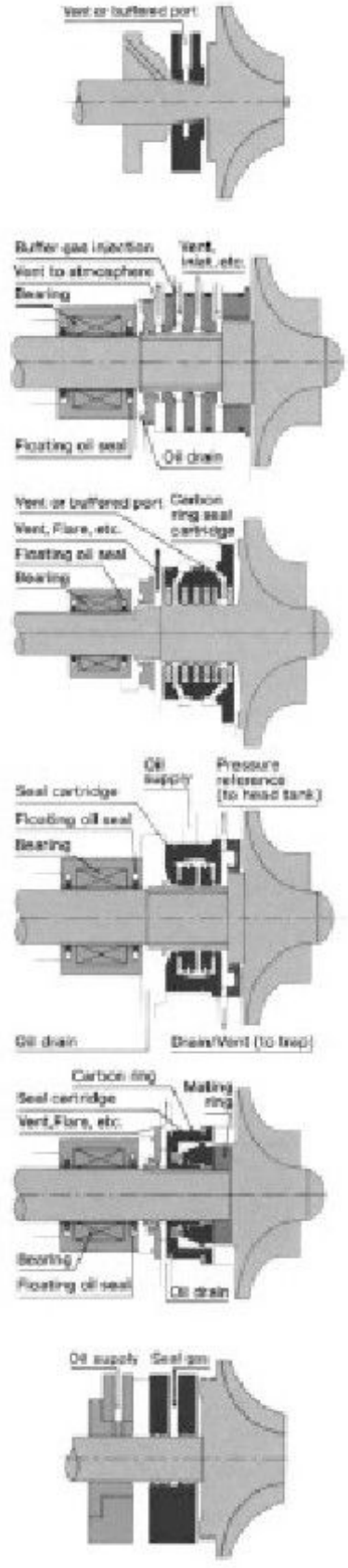
Buffered labyrinth seals permit injection of buffer gas between the labyrinths for maximum process gas containment without oil contamination.

Carbon ring seals can be used in moderate pressure applications. They permit less leakage than a labyrinth seal design and they can be operated dry, buffered with gas, or buffered with liquid.

Oil bushing seals are used to seal in hazardous and/or toxic gases when a buffer-gas source is not available. Oil is injected into the seal to isolate process gas from the lubrication system and atmosphere. Excess oil-gas mixture drains into a trap which returns the gases to the process gas stream and the oil to an atmospheric reservoir.

Dynamic dry gas seals minimize leakage. They eliminate the need for an oil-film seal and expensive seal support systems. The dry gas seal can be applied in single, double or triple configurations. It is recommended when leakage can be hazardous and/or costly.

Drainer seals mix seal gas and a small amount of bearing oil in a cavity behind the labyrinth seals. The oil/gas mixture is separated in a drainer to minimize dilution and eliminate the need for external oil degassing tanks. Seal gas is vented from the top of the drainer and can be recovered in a recovery system. Oil is returned to the lubrication system.



شکل 7 . پیکربندی آب‌بندها در توربین‌های انبساطی مدرن

برای برقرار نمودن یک مانع موثر ولو با وجود ساییدگی آب‌بند، گاز آب‌بند بایستی تحت کنترل اختلاف فشاری باشد، نه کنترل جریان. اگر این گاز تحت کنترل جریانی باشد و آب‌بند ساییده شود، قابلیت آب‌بند برای فراهم آوردن یک مانع موثربه خطر می‌افتد. با کنترل‌کننده اختلاف فشاری، آب‌بند ساییده شده می‌تواند بازهم یک مانع موثر باشد زیرا جریان اضافی هنگامیکه نیاز باشد که اختاف فشار نگه داشته شود، فراهم خواهد آمد. منبع گاز آب‌بند بسیار مهم می‌باشد. این گاز می‌بایست گرم، تمیز و خشک باشد.

خاصیت آب‌بندی سیستم روغن روانسازی به این معنی است که ویسکوزیته روغن بخاطر حضور گاز تغییر خواهد کرد. این بدان معنی است که ویسکوزیته روغن واقعی درون سیستم، کمتر از ویسکوزیته روغن خالص در فشار و دمای یکسان خواهد بود. این اشاره به رقیق شدن دارد بخاطر اینکه گاز آب‌بندی در روغن روانسازی حل می‌گردد. برای برخورد موثر با این مساله اغلب نیاز است که ویسکوزیته روغن افزیش پیدا کند، بنابراین مخلوط حاصل رقیق شده به قدر کافی لزج خواهد بود برای تامین سفتی مورد نیاز جهت نیاز یاتاقانها برای کنترل حرکت محور.

بدیهیست که با استفاده از یاتاقانهای مغناطیسی، رقیق شدن روغن اهمیت نخواهد داشت. با اینحال در بعضی از کاربردها، گاز خنک‌سازی اضافی می‌بایست داخل محفظه یاتاقان مغناطیسی جهت خارج نمودن حرارت ناشی از مقاومت هوا در برابر چرخش محور، مقاومت و افت حلقه‌های جریان القا شده در یاتاقانهای مغناطیسی بخاطر تغییر در میدان مغناطیسی، وارد گردد. هنگامیکه مورد نیاز باشد، گاز سرد کننده معمولاً از همان منبع گاز آب‌بندی تامین می‌گردد.

۷ پدیده Surge

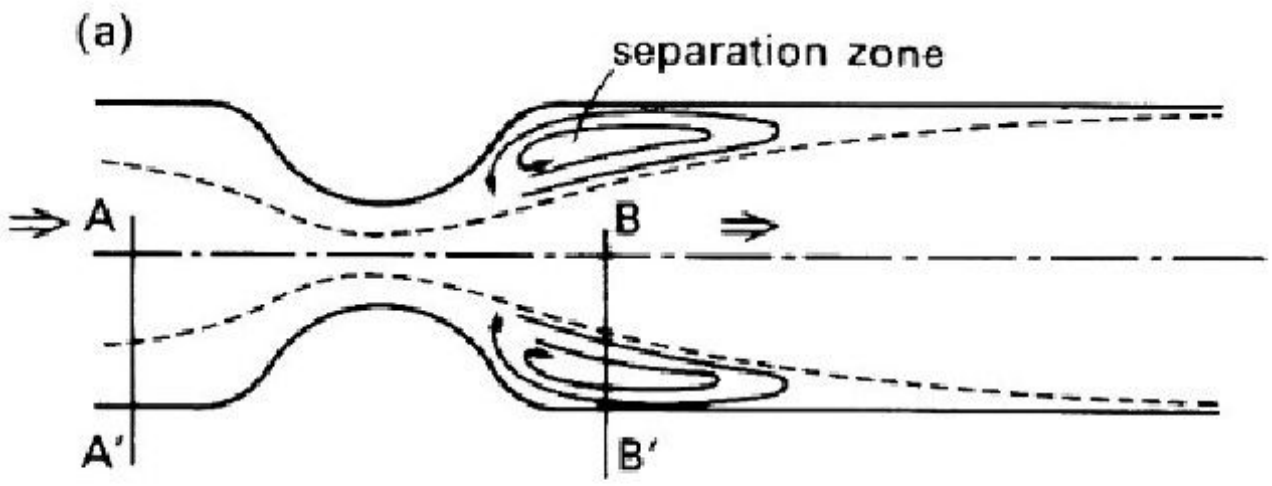
پدیده Surge در کمپرسورهای گریز از مرکز یا جریان محوری هنگامی رخ می‌دهد که دبی جریان به اندازه کافی کاهش پیدا کند که باعث یک جریان معکوس آنی گردد. این جریان برگشتی تمایل به کاستن فشار در لوله خروجی دارد. فشرده سازی معمول، از سر گرفته شده و این چرخه تکرار می‌شود. این چرخه می‌تواند از شدت صدای تق‌تق قابل شنیدن تا یک شوک سخت تغییر نماید. Surge های شدید قادرند که باعث تخریب اجزای کمپرسور مانند تیغه‌ها، یاتاقان‌ها و آب‌بندها شوند. بنابراین یک سیستم کنترلی ضد Surge برای محافظت در برابر Surge یا این چرخه توصیه می‌گردد.

surge : پدیده‌ای مربوط به سیستم فرآیندی است که نتیجه تفکیک و بازگشت کامل جریان سیال به علت دبی پایین گاز است. این پدیده ذاتاً همان پدیده stall می‌باشد که به کل کمپرسور اعمال می‌گردد. باید دانست که پدیده surge نتیجه عدم توانایی پروانه کمپرسور، در تولید انرژی مورد نیاز سیستم است. در اثر سرعت پایین جریان در پره یا گذرگاه پروانه، پدیده surge بوجود می‌آید. انرژی بوسیله حرکت پره و جریان سیال بین پره‌ها، تولید می‌گردد. چنانچه مقدار جریان بین پره‌ها کم شود، به همان اندازه سرعت بین پره‌ها یا گذرگاه سیال در پروانه کم می‌شود. درنتیجه جریان از حالت خطی به حالت اغتشاشی در می‌آید. در آستانه surge ، کمپرسور نمی‌تواند جریان کافی به داخل لوله خروجی تامین نماید، در نتیجه انرژی ذخیره شده در تجهیز در اثر معکوس شدن جریان به سمت ورودی، روی پره‌های کمپرسور کار می‌کند.

این پدیده نه تنها به کمپرسور بلکه به نوع طراحی لوله‌کشی نیز بستگی دارد. درواقع در کمپرسور، دو جریان بازگشتی که یکی ناشی از تفکیک جریان (stall) و دیگری ناشی از جریان بازگشتی از شیر اطمینان در اثر کاهش فشار است، چرخه‌ای را بوجود می‌آورند که به چرخه surge موسوم است. این پدیده باعث کاهش هد تولیدی کمپرسور می‌گردد.

در این پدیده :

- به سرعت اتفاق می‌افتد. به طوریکه جریان بازگشتی گاز در بازه زمانی کمتر از 150 میلی ثانیه، روی می‌دهد.
- سرعت جریان بازگشتی بین 30 cycle/ sec تا 120 cycle/ sec می‌باشد.
- فشار به سرعت نوسان می‌کند
- دما ممکن است با سرعت بالایی افزایش یابد
- توام با سر و صدای بسیار زیادی می‌باشد
- ممکن است خسارات مکانیکی جدی به کمپرسور وارد گردد (در فشارهای بالاتر و جرم مولکولی بیشتر گاز، این خسارات بیشتر می‌باشد)



شکل 8 . پدیده جدایش و بازگشت جریان

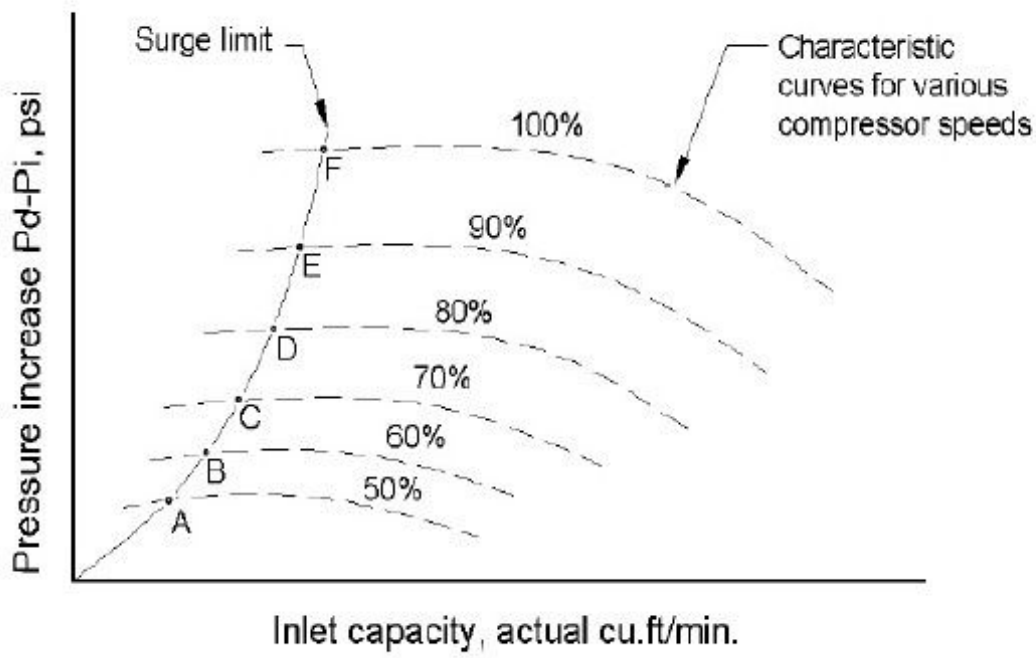
عوامل زیر، نقطه کارکرد کمپرسور دینامیکی را به خط surge نزدیکتر می‌نماید:

- کاهش دبی کمپرسور به هر علت (کاهش مصرف در پایین‌دست یا بسته شدن شیرهای بین راهی خطوط انتقال)
- کاهش فشار گاز ورودی به کمپرسور به هر علت
- کاهش سریع دور به هر علت (مانند زمان توف اضطراری)
- تغییرات در جرم مولکولی سیال به علت تغییر در ترکیب درصد گاز
- افزایش فشار در header خروجی کمپرسور به علت بسته شدن مسیر در پایین دست
- بالا بودن فشار در header خروجی کمپرسور در زمان در سرویس آمدن کمپرسور و اتصال آن به خط

با دقت در عوامل فوق، می‌توان نتیجه گرفت که کمپرسور دینامیکی در هریک از سه حالت کاری خود یعنی روشن شدن، شرایط عادی بهره‌برداری و زمان توقف اضطراری، با خطر surge مواجه می‌باشد، لذا سیستم کنترل باید برای جلوگیری از رخ دادن این پدیده در هریک از شرایط ذکر شده، بتواند عمل نماید.

کنترل Surge :

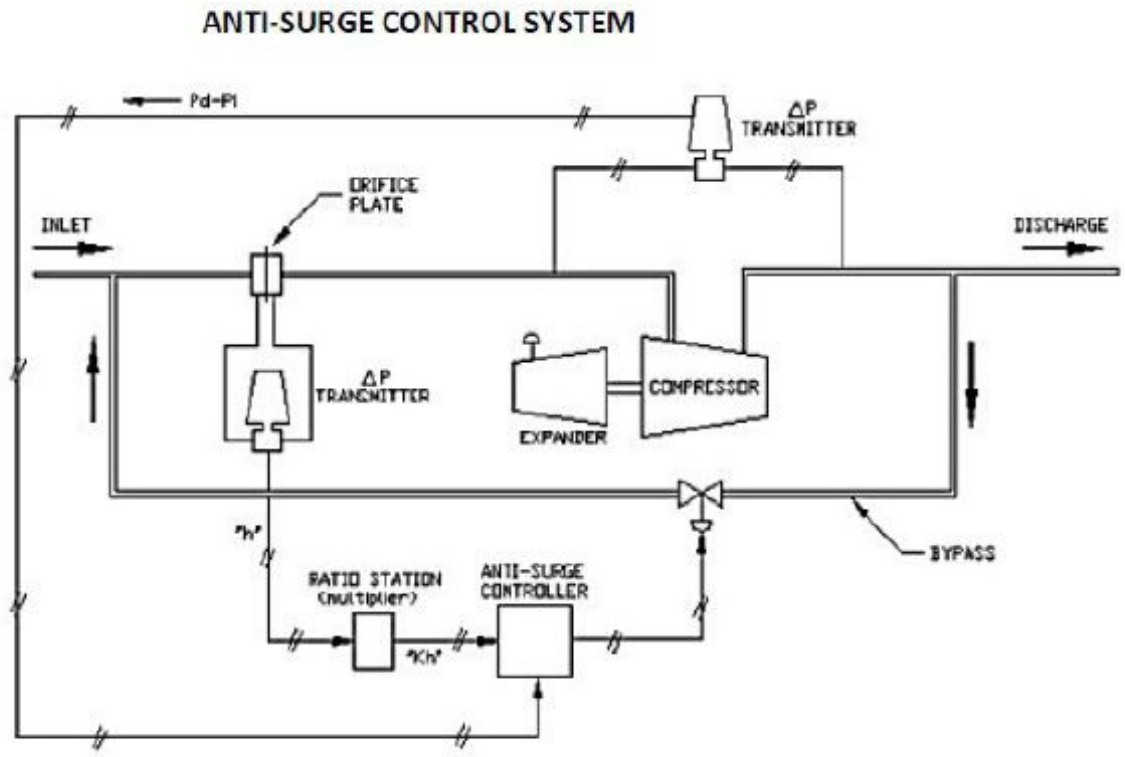
معمول‌ترین روش (استفاده از شیر Anti-surge) برای کنترل این پدیده، از اختلاف فشار دو سر کمپرسور برای نشان‌دادن هد و اختلاف فشار دو سر اریفیس ورودی برای نشان‌دادن دبی استفاده می‌نماید. کارکرد سیستم کنترلی Surge عبارتست از اینکه نسبت DP/h از شیب خط Surge تجاوز ننماید. برای ارضای فاکتورهای ایمنی، نقطه تنظیم برای کنترل Surge می‌بایست سمت راست خط Surge طبق شکل 9 باشد.



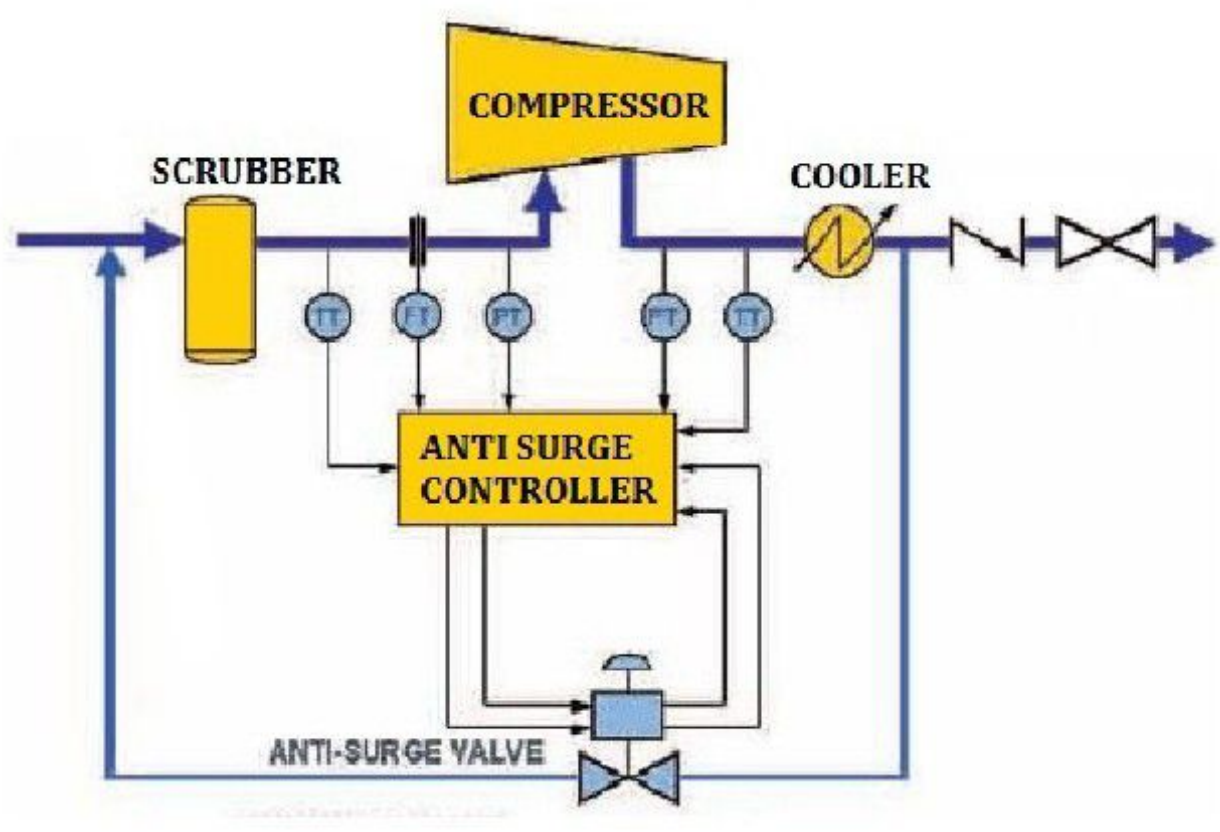
شکل 9 . پدیده سرج

نمودارهای شماتیک بلوکی سیستم کنترل ضد Surge در شکل 10 و 11 نشان داده شده است. در عمل، دبی ورودی توسط صفحه اریفیس توسط یک ترانسمیتر اختلاف فشار اندازه‌گیری شده و بعنوان یک نقطه تنظیمی،

به کنترل‌کننده PI D ارسال می‌گردد. اختلاف فشارهای خروجی و ورودی کمپرسور نیز توسط یک ترانسمیتر DP اندازه‌گیری شده و بعوان متغیر فرایندی به کنترل‌کننده فرستاده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده یک شیر کنارگذر را کنترل می‌نماید که گاز را به ورودی کمپرسور باز می‌گرداند. هنگامیکه دبی ورودی کم شود (نزدیک نقطه surge) آنگاه شیر کنارگذر بایستی باز گردد تا اجازه برگشت جریان بیشتر به ورودی کمپرسور را بدهد. در حالت عملیات معمول، شیر کنارگذر بسته می‌باشد تا از هدر رفت فشار جلوگیری بعمل آورد.



شکل 10 . سیستم کنترل ضد سرج



شکل 11 . سیستم کنترل ضد سرج

همانطور که گفته شد در زمان کار عادی کمپرسور، با کاهش دبی و نزدیک شدت نقطه کارکرد به خط surge، سیگنالی از کنترل‌کننده به شیر Anti-surge ارسال شده و سبب می‌گردد که شیر به آهستگی باز شده و مقداری به دبی افزوده گردد. عیب این کار اینست که باز شدن این شیر در زمان کار عادی، سبب اتلاف انرژی می‌گردد. بنابراین بایستی سعی گردد تا آنجا که امکان دارد در عین حال که از رفتن به سمت رخ دادن این پدیده، جلوگیری می‌شود، از باز نمودن شیر جریان برگشتی نیز، جلوگیری بعمل آید.

این شیر بایستی علاوه بر زمان کار عادی کمپرسور، در زمانهای راه‌اندازی و توقف اضطراری نیز، از رخ دادن این پدیده جلوگیری نماید.

در زمان راه‌اندازی، این شیر بمانند یک شیر کنارگذر، جریان گاز خروجی کمپرسور را به ورودی آن باز می‌گرداند. چرا که در شروع راه‌اندازی، خروجی کمپرسور از پایین دست خود ایزوله بوده و قبل از اینکه گاز فشرده شده بتواند به سمت پایین دست برود، بایستی کمپرسور به یک فشار معینی برسد. وقتی که فشار خروجی به حد کافی رسید، ارتباط کمپرسور با پایین دست خود برقرار شده و گاز جریان می‌یابد و شیر Anti-surge بسته می‌شود و سیستم بطور عادی کار خواهد نمود.

در حالت توقف عادی، همزمان با کاهش تدریجی دور کمپرسور، دبی نیز کاهش می‌یابد. اما در حالت توقف اضطراری، یکباره سیستم کنترلی ضد surge می‌بایست هد کمپرسور را کاهش دهد. طراحان کمپرسور دینامیکی، مسیر شیر Anti-surge را طوری طراحی می‌نمایند که خروجی کمپرسور به هدر ورودی قبل از scrubber متصل می نماید.

مطابق با شکل 11 ، بطور کلی کنترل‌کننده Anti-surge سیگنالی از ترانسمیتر دبی و نیز ترانسمیترهای دما و فشار بالا و پایین‌دست کمپرسور دریافت می‌نماید. سپس این کنترل‌کننده، تمامی سیگنالهای دریافتی را آنالیز می‌کند. دمای گاز فرایندی برگشتی به ورودی مهم می‌باشد و درصورت گرم بودن بیش از حد، مشکلاتی را به همراه دارد. درضمن دما و فشار ورودی و خروجی گاز در بازده پلی‌تروپیک کمپرسور موثر می‌باشد.

خط کنترلی ضد surge معمولاً از 10 درصد حاشیه خط surge معلوم کمپرسور تعیین می‌گردد. خط surge را می‌توان از آزمایش واقعی یا داده‌های تجربی کمپرسور بدست آورد. بطور معمول، الگوریتم کنترلی تناسبی - انتگرالی فعال خواهد شد و شروع به تنظیم شیر Anti-surge می‌نماید اگر کمپرسور بین خط کنترلی ضد surge و خط surge کار نماید. نقطه تنظیمی برای کنترل‌کننده PI جریانی بر روی خط کنترلی می‌باشد. معمولاً، یک رابطه ریاضی چند جمله‌ای برای نزدیک شدن به خط کنترلی و تعیین نقطه تنظیمی کنترل‌کننده PI با استفاده از فشار ورودی و خروجی کمپرسور بعنوان متغیر استفاده می‌گردد. سپس، کنترل‌کننده surge در صورت نیاز، با استفاده از الگوریتم کنترل PI ، شیر کنترلی Anti-surge را برای رساندن وضعیت عملیاتی کمپرسور بر روی خط کنترلی، باز و بسته خواهد نمود.

۷کاربردهای توربین انبساطی

باوجودیکه توربینهای انبساطی در فرایندهای دما پایین، بسیار مرسوم هستند، اما برای بسیاری از کاربردهای دیگر نیز، مورد استفاده قرار می گیرند. در این بخش، یکی از فرایندهای دمای پایین و همچنین برخی دیگر از کاربردهای توربینهای انبساطی، مورد بحث قرار می گیرد.

1 -استخراج مایعات هیدروکربنی از گاز طبیعی

2 - تولید برق

3 - سیستم سرد سازی

4 - بازیابی توان در شکست دهنده کاتالیستی سیال (شکستن هیدروکربونهای سنگین و با نقطه جوش بالای نفت خام و تبدیل آنها به هیدروکربونهای سبکتر)

۷استخراج مایعات هیدروکربنی از گاز طبیعی

گاز طبیعی خام عمدتا شامل متان، همچنین مقادیر مختلف گازهای هیدروکربنی سنگین تر مانند اتان، پروپان، بوتان نرمال، ایزو بوتان، پنتان‌ها و حتی هیدروکربنهای با جرم مولکولی بالاتر می‌باشد. گاز طبیعی خام همچنین حاوی مقادیر مختلفی از گازهای اسیدی مانند دی‌اکسیدکربن، سولفیدهیدروژن و مرکاپتان‌هایی مانند متانتیول و اتانتیول می‌باشد.

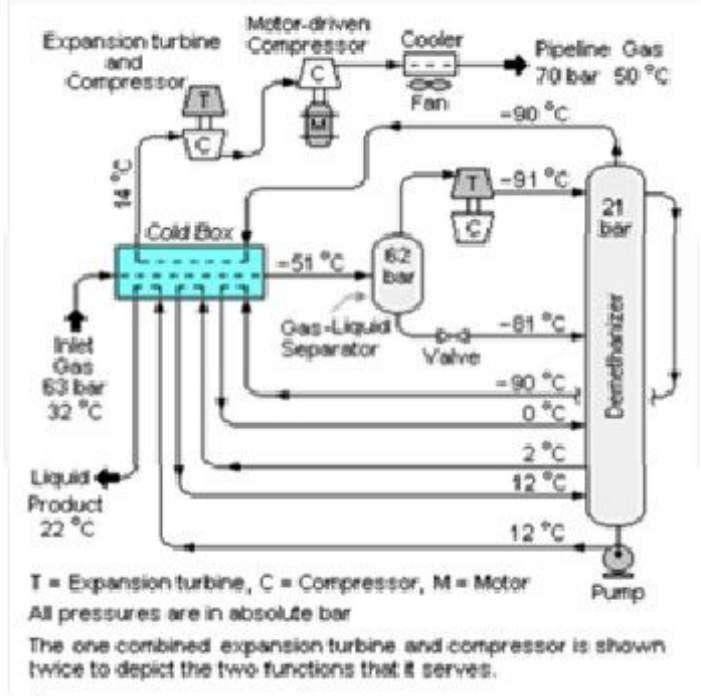
گاز طبیعی هنگامیکه به محصولات جانبی نهایی، فراوری می‌شود، این هیدروکربنهای سنگینتر در مجموع بعنوان NGL منتسب می گردند (مایعات گاز طبیعی).

استخراج NGL اغلب نیازمند یک توربین انبساطی و یک ستون تقطیر در دمای پایین (جداکننده متان نامیده می شود)، همانطور که در شکل 12 نشان داده شده است، می باشد.

ابتدا گاز ورودی به جداکننده متان در یک مبدل حرارتی (منسوب به Cold Box یا همان جعبه سرد)، به حدود 51 - درجه سانتیگراد سرد می‌شود، که بخشی از این گاز را مایع می‌نماید. سپس مخلوط گاز و مایع حاصله، به یک جریان گاز و یک جریان مایع، تفکیک می‌گردد.

جریان مایع از تفکیک گر گاز-مایع، از درون یک شیر عبور کرده و دستخوش یک انبساط اختناقی از فشار مطلق 62 bar به 21 bar می گردد که یک فرایند آنتالپی ثابت می باشد که باعث کاهش دمای جریان از حدود 51 - درجه سلسیوس تا حدود 81 - درجه سلسیوس، هنگامیکه جریان وارد جداکننده متان می شود، می گردد.

جریان گاز از تفکیک گر گاز-مایع وارد توربین انبساطی شده که گاز دستخوش یک انبساط آنتروپی ثابت از فشار مطلق 62 bar به 21 bar می‌گردد که باعث کاهش دمای جریان گاز از حدود 51 - درجه سانتیگراد تا حدود 91 - درجه سانتیگراد، هنگامیکه جریان وارد جداکننده متان بعنوان رفلاکس تقطیرمی شود، می‌گردد.



شکل 12 . طرح شماتیک یک جداکننده متان که مایع های هیدروکربنی را از گاز طبیعی،

استخراج می کند

مایع از سینی بالایی برج جداساز متان (در دمای حدود 90 - درجه سانتیگراد) از میان جعبه سرد عبور داده می شود بطوریکه به سبب خنک کردن گاز ورودی، تا دمای صفر درجه سانتیگراد گرم می‌شود و سپس به بخش پایینتر برج جداساز متان، برگردانده می‌شود. جریان مایع دیگر از بخش پایین تر برج جداساز متان (در دمای حدود 2 درجه سلسیوس)، از میان جعبه سرد عبور داده می شود و با دمایی در حدود 12 درجه سانتیگراد به برج جداساز متان، بازگردانده می‌شود. عملا، گاز ورودی گرمای مورد نیاز برای جوشاندن پایین برج جداساز متان را مهیا کرده و توربین انبساطی حرارت مورد نیاز برای ایجاد ریفلاکس در بالای برج جداساز متان را می‌گیرد.

محصول گازی بالایی از برج جداساز متان در دمایی در حدود 90 - درجه سانتیگراد، گاز طبیعی فراورش شده‌ای است که ازکیفیت مناسب برای توزیع جهت مصرف کنندگان نهایی از طریق خط لوله، برخوردار می‌باشد. این گاز از میان جعبه سرد عبور داده شده بطوریکه سبب خنک کردن گاز ورودی گرم می‌شود. سپس این گاز در کمپرسور گازی که توسط توربین انبساطی چرخانده می‌شود، فشرده شده و در یک کمپرسور گازی مرحله بعدی که توسط یک موتور الکتریکی چرخانده می‌شود، قبل از ورود به خط لوله توزیع، بیشتر فشرده می‌گردد.

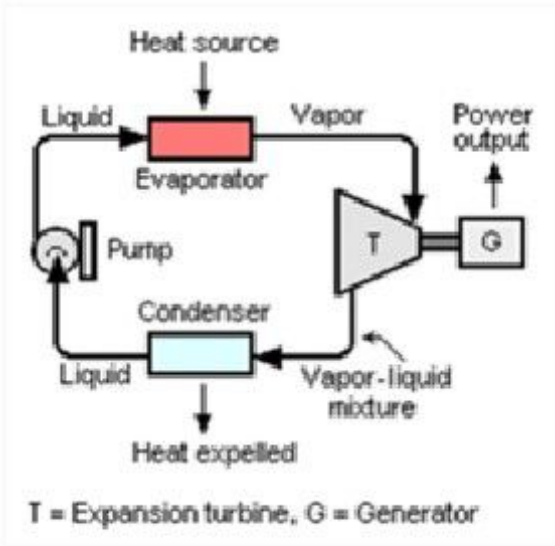
محصول پایین برج جداساز متان نیز در جعبه سرد به سبب خنک کردن گاز ورودی، پیش از آنکه سیستم را به عنوان NGL ترک کند، گرم می‌شود.

۷ تولید برق

شکل 13 یک سیستم تولید نیروی برق را نشان می‌دهد که از یک منبع حرارتی، یک واسط سرد کننده (هوا، آب و یا موارد دیگر)، یک سیال عامل درگردش و یک توربین انبساطی استفاده می‌نماید. سیستم می‌تواند طیف گسترده‌ای از منابع حرارتی مانند موارد ذکر شده در زیر را، در خود داشته باشد:

- **آب داغ ژئوترمال**

- گاز خروجی از موتورهای احتراق داخلی که انواع سوخت (گاز طبیعی، گاز حاصل از دفن زباله، گازوییل یا نفت کوره) را می‌سوزانند
- انواع منابع حرارتی حاصل از ضایعات (در هر دو حالت گاز یا مایع)



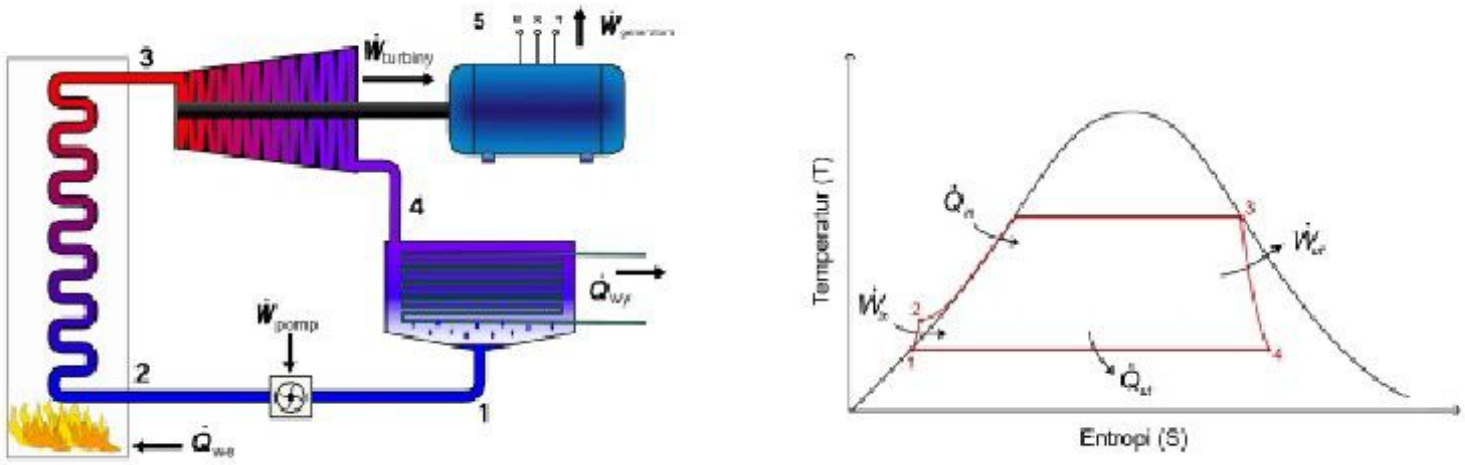
شکل 13 . طرح شماتیک سیستم تولید برق با استفاده از یک توربین انبساطی

با توجه به شکل 13 ، سیال عامل درگردش (معمولا یک ترکیب آلی مانند R-134a) به یک فشار بالا پمپ شده و پس از آن در تبخیر کننده، بواسطه تبادل حرارت با منبع حرارت موجود، بخار می‌شود. بخار حاصله با فشار بالا، به یک توربین انبساطی جریان می‌یابد، بطوریکه دستخوش یک انبساط آنتروپی ثابت گردیده و بصورت مخلوط بخار - مایع خارج می‌شود که پس از آن، بواسطه تبادل حرارت به واسطه خنک کننده موجود، تبدیل به مایع می‌شود. مایع چگالیده شده برای تکمیل چرخه، مجددا به تبخیر کننده، پمپاژ می‌شود.

سیستم موجود در شکل 13 ، یک سیکل رانکین می‌باشد، همانطور که در نیروگاههای سوخت فسیلی استفاده می‌گردد که آب، سیال عامل بوده و منبع حرارت از احتراق گاز طبیعی، نفت کوره یا زغال سنگ بدست می‌آید که برای تولید بخار با فشار بالا، از آنها استفاده می‌شود. سپس بخار با فشار بالا، در یک توربین بخار معمولی دستخوش یک انبساط آنتروپی ثابت می‌گردد. بخار خروجی از توربین بخار به آب مایع چگالیده شده که پس از آن برای تکمیل چرخه، مجددا به مولد بخار پمپاژ می شود.

چرخه رانکین (Rankine Cycle)، چرخه ترمودینامیکی می‌باشد که گرما را به کار تبدیل می‌نماید که مدلی برای نیروگاه بخار ساده می‌باشد. این چرخه به افتخار دانشمند اسکاتلندی، William John Macquorn Rankine ، نامگذاری شده است. در چرخه ایده‌آل رانکین، پمپ و توربین آنتروپی ثابت خواهند بود و بنابراین کار خالص خروجی را ماکزیمم خواهند نمود.

هنگامیکه یک سیال عامل آلی مانند R-134a ، در سیکل رانکین مورد استفاده قرار می‌گیرد، چرخه، گاهی بعنوان یک سیکل رانکین آلی، منتسب می گردد (ORC).



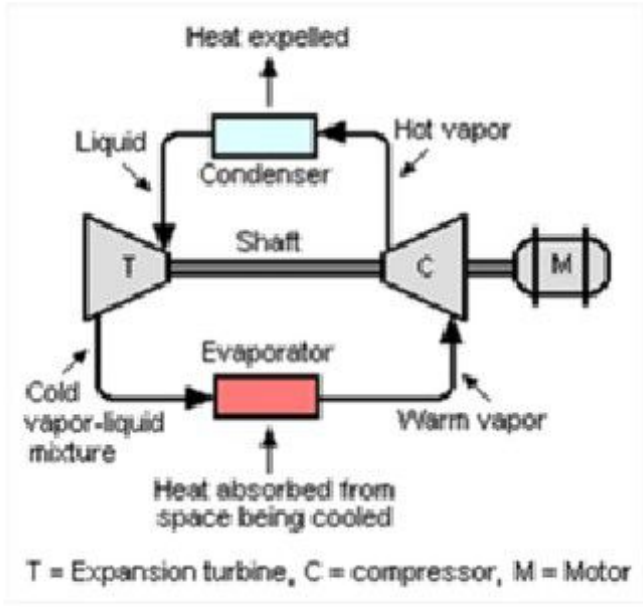
شکل 14 . سیکل رانکین

۷سیستم سرد سازی

شکل 15 یک سیستم سردسازی با ظرفیت حدود 100 تا 1000 تن را نشان می‌دهد (معادل 350 تا 3500 کیلووات). سیستم از یک کمپرسور، یک توربین انبساطی و یک موتور الکتریکی بهره می‌گیرد.
بسته به شرایط عملیاتی، توربین انبساطی تقریبا 6 % تا 15 % از بار موتور الکتریکی را در مقایسه با یک سیستم سر سازی تراکمی بخار معمولی که در آن از یک شیر انبساط اختناقی بجای یک توربین انبساطی استفاده می شود، کاهش می‌دهد.
این سیستم، یک ماده سردکننده فشار بالا را بکار می‌گیرد (یک مبرد با نقطه جوش نرمال پایین) مانند :

- کلرو دی فلوئورو متان ($CHCLF_2$) معروف به R-22 با نقطه جوش نرمال 47 - درجه سانتیگراد
- 1و1و1و 2 تترا فلوئورو اتان ($C_2H_2F_4$) معروف به R-134a با نقطه جوش نرمال 26 - درجه سانتیگراد

همانطور که در شکل 15 نشان داده شده است، بخار خنک‌کننده به یک فشار بالاتر که باعث یک دمای بالاتر نیز می‌گردد، فشرده می‌شود. سپس، بخار فشرده‌شده و گرم به مایع چگالش می‌گردد. کندانسور جایی است که در آن، حرارت از ماده سردکننده در گردش، خارج شده و توسط هر آنچه بعنوان خنک ساز واسطه در کندانسور استفاده می شود (هوا، آب و غیره) به خارج برده می‌شود.
مایع سردکننده از میان توربین انبساطی جریان می‌یابد بطوریکه آن تبخیر شده و بخار دستخوش یک انبساط آنتروپی ثابت، می‌گردد که باعث بوجود آمدن یک مخلوط بخار و مایع با دمای پایین می‌شود. سپس، مخلوط بخار - مایع از میان تبخیر کننده به حرکت در آمده بطوریکه بواسطه حرارت جذب شده از فضایی که در حال سرد شدن است، تبخیر می‌گردد. ماده سرد ساز تبخیر شده، برای تکمیل چرخه، به ورودی کمپرسور، جریان می‌یابد.



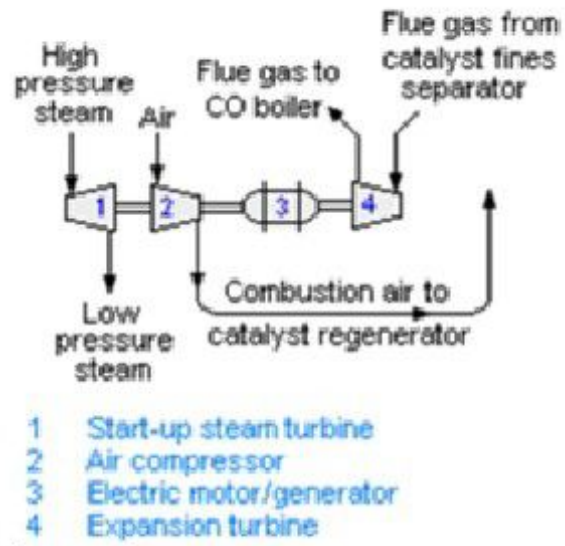
شکل 15 . طرح شماتیک یک سیستم سرد سازی با استفاده از یک توربین انبساطی، کمپرسور و یک موتور

۷بازیابی توان در شکست‌دهنده کاتالیستی سیال (شکستن هیدروکربونهای سنگین و با نقطه جوش بالای نفت خام و تبدیل آنها به هیدروکربونهای سبکتر)

گاز حاصل از احتراق احیا کننده کاتالیستی یک شکست دهنده کاتالیستی سیال (Fluid Catalytic Cracker or FCC)، در دمایی در حدود 715 درجه سانتیگراد و در فشار نسبی در حدود 2.4 bar می‌باشد. ترکیبات گازی آن بیشتر مونوکسیدکربن، دی اکسیدکربن و نیتروژن است. اگر چه گاز حاصل از احتراق برای جدا کردن ذرات کاتالیست حمل شده، در میان دو مرحله از سیکلونها (داخل احیا کننده قرار گرفته‌اند) بوده است، اما هنوز حاوی مقداری ذرات ریز کاتالیست باقی مانده می باشد.

شکل 16 نشان می‌دهد که چگونه توان، بازیابی شده و با حرکت دادن گاز دودکش از میان یک توربین انبساطی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از اینکه گاز دودکش از احیا کننده خارج می‌شود، از میان یک تفکیک‌گر کاتالیستی ثانویه که شامل لوله های چرخشی بوده که برای حذف 70 تا 90 درصد از ذرات کاتالیست باقی‌مانده طراحی شده‌است، عبور داده می‌شود. این کار برای جلوگیری از آسیب به توربین انبساطی در اثر سایش، ضروری می‌باشد.

همانطور که در شکل 16 نشان داده شده است، انبساط گاز دودکش از طریق یک توربین انبساطی، قدرت کافی برای چرخاندن کمپرسور هوای احتراق مربوط به احیا کننده را فراهم می‌آورد. موتور - مولد الکتریکی در سیستم بازیابی توان، می‌تواند توان الکتریکی را مصرف یا تولید نماید. اگر انبساط گاز دودکش، نیروی کافی برای چرخاندن کمپرسور هوا را فراهم نکند، موتور - مولد الکتریکی نیروی اضافی مورد نیاز را فراهم می‌نماید. اگر انبساط گاز دودکش، قدرت بیشتر نسبت به آنچه برای چرخاندن کمپرسور هوا نیاز است را فراهم نماید، آنگاه موتور - مولد الکتریکی، توان اضافی را به توان الکتریکی تبدیل کرده و به سیستم الکتریکی پالایشگاه، ارسال می‌نماید.



شکل 16 . طرح شماتیک سیستم بازیابی توان در یک واحد شکست دهنده کاتالیستی سیال

توربین بخار برای چرخاندن کمپرسور هوای احتراق احیاکننده، در خلال راه اندازیهای شکست‌دهنده کاتالیستی سیال تا زمانیکه به اندازه کافی گاز احتراق برای انجام آن کار وجود داشته باشد، استفاده می‌شود. سپس گاز دودکش انبساط یافته، به میان یک دیگ تولید بخار (موسوم به CO-boiler) که در آن مونو اکسیدکربن موجود در گاز دودکش بعنوان سوخت جهت تامین بخار برای استفاده در پالایشگاه، سوزانده می‌شود، جریان داده می‌شود. گاز دودکش حاصل از دیگ بخار مذکور، توسط یک ته‌نشین‌کننده الکترواستاتیکی (ESP) ، جهت حذف ذرات خاکستر باقی مانده، فراورش می‌گردد. ESP ذرات در محدوده اندازه 2 تا 20 میکرومتر از گاز دودکش را حذف می‌نماید.

منابع

1- Turboexpander, Wikipedia, The free encyclopedia, 2018.

2- Tutorial on cryogenic Turboexpanders, J. Jumonville, Senior consulting Engineer (Atlas Copco Mafi-Trench Company LLC)

3- Fundamentals of TurboExpanders "Basic Theory and Design", Presented by Mr. J. Simms, 2009

4- Centrifugal Compressor or Expander, Rotating Equipment, Aspen Hysys 3.1 Manual, 2002.

5- Isentropic Efficiencies of Turbines, Compressors and Nozzles, Lecture, 2008.

6- Turboexpanders and Process Applications, H. P. Bloch C. Soares, Gulf Professional Publishing, 2001.

7 - سیستمهای کنترل سرج (به همراه بررسی کامل شیرهای آنتی سرج)، علیرضا داوری‌نیا