

به نام خالق زیبایی‌ها

تهیه و تنظیم:

دکتر علیرضا بزرگیان

صفحه	فهرست مطالب	عنوان
------	-------------	-------

۱	پرسش‌ها	
۸	فصل اول - ترمودینامیک	
۲۴	فصل دوم - انتقال جرم و عملیات واحد	
۳۷	فصل سوم - مکانیک سیالات و سیالات دوفازی	
۶۰	فصل چهارم - انتقال حرارت و مبدل‌های حرارتی	
۷۲	فصل پنجم - راکتورهای شیمیایی	
۸۳	فصل ششم - کنترل فرایندها	
۹۲	فصل هفتم - مسایل مختلف عملیاتی	
۱۲۵	پیوست	
۱۲۶	مراجع	

ترمودینامیک

- ۱- قوانین ترمودینامیک (صفرم، اول، دوم و سوم)
- ۲- مایع و بخار اشباع، مایع کمپرس و بخار سوپرهیت
- ۳- کیفیت، دما و فشار بحرانی و تبخیر ناگهانی
- ۴- نمودارهای فاز برای یک ماده خالص مانند آب و یک مخلوط مانند نفت خام و پدیده retrograde
- ۵- گاز ایده‌آل و چگونگی نزدیک شدن شرایط یک گاز حقیقی به یک گاز ایده‌آل
- ۶- تفاوت بخار و گاز
- ۷- پدیده ژول-تامسون و کاربرد آن
- ۸- نقطه حباب و شبنم
- ۹- نقطه همجوش در سیستمهای دوفازی و راه حل برای جداسازی دو جزء
- ۱۰- معادلات حالت و ضریب فعالیت
- ۱۱- فوگاسیته و ضریب فوگاسیته
- ۱۲- انواع چرخه‌ها برای سیستمهای توانی و تبرید

انتقال جرم و عملیات واحد

- ۱- تعاریف موارد زیر:
Osmosis & Reverse , leaching , Liquid Extraction , desorption و adsorption , Gas Absorption و Stripping
drying و humidification , osmosis
- ۲- اثر فشار و دما در جذب و دفع گاز در حلال مایع
- ۳- قوانین نفوذ Fick
- ۴- انواع دستگاههای انتقال جرم و انواع برجها
- ۵- انواع سینی‌ها در برجهای سینی‌دار و بازده سینی‌ها
- ۶- مشکلات برجهای سینی‌دار
- ۷- مقایسه بین برجهای سینی‌دار و پر شده
- ۸- پدیده مجراسازی در برجهای پر شده
- ۹- انواع کندانسورها و ریبولرها در برجهای تقطیر
- ۱۰- رطوبت مطلق، اشباع و نسبی، دمای حباب مرطوب و خشک
- ۱۱- مکانیسم کولر آبی و برج خنک کننده

۱۲- نسبت تعادل و ضریب فراریت نسبی

مکانیک سیالات و سیالات دوفازی

- ۱- سیال نیوتنی، لزجت مطلق یا دینامیکی و لزجت سینماتیکی، فشار مطلق و فشار gauge
- ۲- معادلات اولر و برنولی
- ۳- انواع جریانها در سیالات تک فازیه، عدد رینولدز، انواع افتها در لوله‌ها و دیاگرام مودی
- ۴- مفاهیم لغزش، مایع تجمع یافته و سرعت ظاهری گاز و مایع و انواع رژیم‌های جریانی در جریانهای دوفازی
- ۵- مشکلات عملیاتی خطوط لوله انتقال جریانهای دوفازی
- ۶- پمپ، انواع آن و علت بستن موازی و سری پمپهای دینامیکی
- ۷- نمودارهای عملکرد پمپ و سیستم (برای پمپهای دینامیکی)
- ۸- NPSH در پمپهای دینامیکی
- ۹- پدیده کاویتاسیون
- ۱۰- پدیده ضربه قوچ
- ۱۱- کمپرسور و انواع آن
- ۱۲- پدیده surge ، stall و Stonewall در کمپرسورهای دینامیکی
- ۱۳- توربین و انواع آن
- ۱۴- وسایل اندازه‌گیری دبی و سرعت جریان

انتقال حرارت و مبدل‌های حرارتی

- ۱- انواع انتقال حرارت
- ۲- شعاع بحرانی در عایق بندی و علت استفاده از پره‌ها در سطوح
- ۳- نفوذ حرارتی
- ۴- مقایسه بین ضرایب هدایت و جابجایی مواد مختلف
- ۵- انواع مبدل‌های حرارتی، مزایا و معایب آنها و علت استفاده از بافل‌ها در مبدل‌های پوسته-لوله
- ۶- نحوه توزیع سیالات در سمت پوسته و لوله در مبدل‌های پوسته-لوله
- ۷- Temperature Cross در مبدل‌های پوسته-لوله
- ۸- دیگ بخار و انواع آن

راکتورهای شیمیایی

- ۱- راکتورهای شیمیایی و انواع آن

۲- پارامترهای موثر در عملکرد راکتورها

کنترل فرایند

۱- فلسفه علم کنترل فرایند و چگونگی کنترل فرایندهای شیمیایی

۲- تعاریف موارد زیر:

OP(OutPut), PV (Process Value), SP (Set Point), Process Gain, اغتشاش، خطا، افت کنترل، overshoot، زمان

مرده (DeadTime)، تاخیر زمانی (Lag Time)

۳- اثر افزودن کنترل انتگرالی و مشتقی به کنترل تناسبی در کنترل کننده‌های PID و انواع روشهای تنظیم

پارامترهای کنترلی در این نوع کنترل کننده

۴- تفاوت کنترل پسخور و پیشخور و تعریف کنترل نمودن مستقیم و معکوس در کنترل پسخور

۵- کنترل آبشاری

۶- کنترل‌های Ratio و Split-Range

۷- کنترل MPC

مسایل مختلف عملیاتی

۱- نفت خام، درجه API و دسته بندی نفت‌های خام

۲- تفاوت بین CNG، LNG، LPG، NGL

۳- تفکیک گرها، ظروف قطره گیر، ظروف لخته گیر، Gas Scrubber ها و انواع برجها در صنعت از لحاظ عملکرد

۴- مشعل گازی

۵- شیرین سازی گاز طبیعی

۶- مرکاپتان زدایی از نفت خام و گاز طبیعی

۷- پدیده هیدرات گازی در خطوط لوله انتقال نفت و گاز

۸- توپکرانی در خطوط لوله انتقال نفت و گاز

۹- اندازه لوله‌های مورد استفاده در صنعت نفت و گاز و schedule آنها

۱۰- انواع شیرهای صنعتی و کاربرد آنها

۱۱- انواع فلنج‌ها در صنعت نفت و گاز و کلاس فشاری آنها

۱۲- انواع یاتاقان‌ها از لحاظ عملکرد و ساختمان

۱۳- حفاظت کاتدی

۱۴- ادوات سرچاهی

۱۵- بخشهای مختلف تاسیسات فراورش نفت و گاز، پالایشگاههای نفت و گاز و مجتمع‌های پتروشیمی

این کتاب با هدف آمادگی بیشتر دانش آموختگان رشته‌های مهندسی شیمی و نفت جهت مصاحبه‌های علمی استخدامی صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و نیروگاه‌ها و نیز برای علاقمندان و دست اندرکاران محترم صنایع بالادستی و پایین دستی نفت و گاز کشور عزیزمان، ایران و به کمک تجارب چندین ساله اینجانب در شرکت نفت در دریا و خشکی و نیز مصاحبه‌های علمی، تهیه گردیده است. اینجانب پس از فارغ التحصیلی از دانشکده فنی دانشگاه تهران در مقطع کارشناسی ارشد و فعالیت در حوزه شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرایندی، در سال ۱۳۸۵ وارد شرکت نفت فلات قاره ایران شده و فعالیت شغلی خود را در دریا و خشکی آغاز نمودم. سکوه‌های نفتی و گازی بستری مناسب برای علاقمندان به فرایند و عملیات بهره‌برداری محسوب گردیده و به منزله یک دانشگاه در حوزه علم و عمل می‌باشند. در همین راستا، مجتمع نفتی و گازی ابودر و سپس تاسیسات فراورش نفت هنگام، تاسیسات فراورش گاز هنگام، تاسیسات نم‌زدایی گاز گورزین و تاسیسات آب‌شیرین‌کن در منطقه عملیاتی قشم، تجربه و فرصت بسیار خوبی برای اینجانب فراهم آورد.

پس از کسب تجارب صنعتی و با توجه به اشتیاق اینجانب برای یادگیری بیشتر و گردآوری مطالب مفهومی و کاربردی و نیز باتوجه به دغدغه‌های دانشجویان و مهندسانی که در گروه‌های مجازی مختلف فرایندی و فنی با آنها برخورد کرده‌بودم و یا سوالات مطرح شده بی‌شمار حضوری و غیر حضوری، بر آن شدم که این کتاب راهنما را برای کمک به این عزیزان جهت ورود به صنعت و نیز برای مشتاقان دانش و صنعت که به دنبال فراگیری بیشتر و مرور مسایل دانشگاهی هستند، پدید آورم تا خدمتی هرچند کوچک به جامعه مهندسين و صنعت‌گران عزیز کشورمان کرده باشم.

در دوره‌های فرایندی و سمینارهای برگزار شده توسط اینجانب مانند کارگاه شیر کنترلی و یا سمینار فرصت‌های شغلی در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی با توجه به ارتباطی که با دانشجویان عزیز و فارغ التحصیلان محترم داشته‌ام، سردرگمی و سوالات زیادی که این عزیزان با آنها درگیر هستند، نشان می‌دهد که یک خلا در سیستم آموزشی دانشگاهی کشور و حتی در آموزش‌های بدو استخدام در صنعت وجود دارد که می‌بایست تغییرات زیادی جهت بهبود حوزه‌های دانشگاهی و صنعتی و نیز ایجاد بستری مناسب برای جوانان دانش‌آموخته، ایجاد نمود.

قطعاً این مجموعه کوچک شامل سوالها و جوابها، خالی از اشکال و کاستی نمی‌باشد. به همین علت از تمامی مهندسان عزیز، اساتید محترم دانشگاهها و همکاران گرامی تقاضا نمودم اینجانب را در برطرف نمودن این اشکالات یاری رسانده و نظرات و پیشنهادات ارزشمند و سازنده خود را جهت بهبود کیفیت مطالب این کتاب در چاپ‌های بعدی، عنوان نمایند.

در این مجموعه سعی شده است تا مسایل کاربردی صنعت نفت، گاز و پتروشیمی و نیروگاه‌ها در حیطه علوم پدیده‌های انتقال (مکانیک سیالات، انتقال جرم و انتقال حرارت)، ترمودینامیک، راکتورهای شیمیایی، کنترل فرآیند و نیز عملیات بهره‌برداری، بصورت خلاصه و جامع مطرح گردد بطوریکه، مهندسی که قصد ورود به صنعت و فعالیت در این حوزه را دارد، با مطالعه این کتاب، بتواند سطح آگاهی و دانش خود را ارتقاء دهد. همچنین در بعضی از قسمتهای مجموعه، بر تئوری مسایل، مانند فرمولهای کاربردی و یا مسایل عملیاتی به لحاظ اهمیت موضوع، تاکید بعمل آمده و در بخش دروس پدیده‌های انتقال و جهت یادآوری بیشتر، اعداد بدون بعد ذکر گردیده‌اند. این کتاب نه تنها برای عزیزان داوطلب شرکت در مصاحبه علمی که پس از قبولی در آزمون کتبی، برگزار می‌گردد بسیار مفید خواهد بود، بلکه برای کسانی که می‌خواهند مطالب مرتبط با مهندسی شیمی و فرایند را در یک مجموعه منسجم در اختیار داشته و مروری بر آنها نمایند، بسیار موثر می‌باشد. به امید روزی که پیوند دانشگاه‌ها و مراکز علمی با صنعت بخصوص صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، با هدف سازندگی و پیشرفت میهن عزیزمان، هرچه بیشتر و بهتر انجام پذیرد.

مطالعه فصول مختلف این کتاب ترتیب خاصی نخواهد داشت و خواننده عزیز باتوجه به نیاز و علاقه‌اش می‌تواند هر فصلی را انتخاب و مورد مطالعه قرار دهد اما توصیه می‌شود که تمامی مطالب فصلها خوانده شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد ابتدا مطالب فصلهای یک تا شش که بصورت تیوری می‌باشند مطالعه و سپس با پیش‌زمینه‌ای بهتر، فصل آخر خوانده شود. خواننده پس از مطالعه کامل هر فصل، علاوه بر مروری بر مسایل مفهومی دانشگاهی همان درس (بغیر از فصل آخر که مربوط به مبانی عملیات بهره‌برداری می‌باشد)، قادر خواهد بود به سؤالاتی که موضوع آنها سرفصلهای همان فصل می‌باشند، پاسخ داده و نیز آمادگی لازم جهت پاسخگویی به سؤالات مرتبط با مصاحبه‌های علمی استاندارد را پیدا نماید. توصیه می‌گردد بخش واژه نامه انگلیسی کتاب جهت اطلاعات بیشتر، حتماً مطالعه گردد.

در فصل اول به علم ترمودینامیک پرداخته می‌شود؛ ترمودینامیک علم انرژی و آنتروپی است. این دانش، هیچ اطلاعاتی در مورد مقدار کل انرژی به ما نمی‌دهد، بلکه تغییرات انرژی که برای ما مهم می‌باشد را در اختیارمان قرار می‌دهد. از دیدگاه تاریخی، ترمودینامیک با آرزوی افزایش بازده موتورهای بخار گسترش یافت. به ویژه به سبب تلاش‌های فیزیکدان فرانسوی، "نیکولا لئونارد سعدی کارنو" که اعتقاد داشت افزایش بازده موتورهای بخار می‌تواند رمز پیروزی فرانسه در نبردهای ناپلئون باشد.

در فصل دوم به فرایند انتقال جرم و عملیات واحد پرداخته می‌شود؛ در بسیاری از فرایندهای صنعتی مهندسی شیمی، تغییر غلظت ماده‌های درگیر در یک واکنش و ساخت فراورده‌ای دیگر مورد نیاز می‌باشد. در بسیاری از این جداسازی‌ها، تغییر شیمیایی وجود نداشته و مواد دست‌نخورده باقی می‌مانند، دگرگونی تنها فیزیکی بوده و به عبارت دیگر جداسازی انجام می‌دهیم. برای این جداسازی روش‌های گوناگونی وجود دارد. برای نمونه، برای محلول‌ها گاهی از روش تقطیر بهره می‌گیریم. بخش عمده‌ای از درس عملیات انتقال جرم، عملیات جداسازی یک محلول بدون واکنش شیمیایی می‌باشد که این عملیات جایگاه ویژه‌ای نسبت به بقیه عملیات دارد. از جمله این عملیات می‌توان تقطیر، جذب، متبلور سازی و... را نام برد.

در فصل سوم به دانش مکانیک سیالات پرداخته می‌شود؛ در دانش مکانیک سیالات قوانین فیزیک و مکانیک در حوزه سیالات مورد بررسی قرار می‌گیرند. مسایلی نظیر حرکت یا سکون سیال، نیرو یا فشار وارد بر آن، قوانین حاکم بر لوله‌ها، لایه مرزی و سایر مسایل مرتبط با سیالات در علم مکانیک سیالات بررسی می‌گردند. تفاوت اصلی بین جامد و سیال در نحوه واکنش این دو در مقابل تنش برشی است. جسم جامد می‌تواند در مقابل یک تنش برشی یا یک تغییر شکل معین و ثابت، مقاومت کند درحالی‌که اگر تنش برشی (هر قدر هم کوچک) به سیالی وارد گردد، تا هنگامیکه این تنش اعمال می‌شود، سیال پیوسته در حال تغییر شکل و حرکت خواهد بود.

در فصل چهارم به مقوله انتقال حرارت و نیز مبدل‌های حرارتی پرداخته می‌شود؛ طبق آنچه که گفته شد، علم ترمودینامیک، با حالت‌های تعادل ماده سروکار دارد و در حالت تعادل، گرادیان دمایی وجود ندارد. اما دانش انتقال حرارت، به دنبال انجام کاری است که ترمودینامیک ذاتاً از انجام آن ناتوان است. انتقال حرارت به تحلیل آهنگ انتقال گرما در سیستم می‌پردازد. انتقال گرما، جریان انرژی ناشی از اختلاف دماست. انتقال انرژی از طریق شارش گرما را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد ولی این انتقال چون به یک کمیت قابل اندازه‌گیری به نام دما ارتباط دارد، دارای مفهوم فیزیکی است. دما کمیتی است که بیانگر مقدار گرمای یک جسم بوده و معیاری است برای تعیین میزان گرمی یا سردی یک ماده.

در فصل پنجم به راکتورهای شیمیایی پرداخته می‌شود؛ درواقع، سینتیک شیمیایی شاخه‌ای از علم است که به مطالعه سرعت فرایندهای شیمیایی و عوامل مؤثر بر آنها می‌پردازد، چراکه شرایط مختلف آزمایشگاهی از جمله دما، فشار و ... می‌تواند بر مکانیزم واکنش و حالت گذار آن تاثیر بگذارد. معادله سرعت، تعادلی بودن یا نبودن، فاز مواد درگیر در واکنش (جامد، مایع و گاز)، گرماگیر یا گرماده بودن و همچنین اثر کاتالیست بر واکنش، از جمله مهمترین نکاتی است که در طراحی راکتورهای شیمیایی حایز اهمیت می‌باشد.

در فصل ششم به علم کنترل فرایندها پرداخته می‌شود؛ عمل اتوماسیون کنترل فرایند به وسیله یک تیم کوچک از پرسنل عامل انجام می‌گیرد که از این طریق، می‌توان یک فرایند پیچیده را از یک اتاق کنترل مرکزی، تحت نظر داشت. همواره در صنایع تولیدی، بویژه صنایع مرتبط با مواد شیمیایی، کنترل بهینه سیستمها جهت کسب محصول مطلوب و بهینه در چهارچوب قیود ایمنی و محیط زیستی، از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. مجبور نمودن سیستم در باقی‌ماندن در مقادیر مقرر، تضمین پایداری سیستم، جلوگیری از توقف فرایند و بهینه نمودن عملکرد فرایند با اعمال سیاستهای کنترلی، از اهداف سیستم کنترل فرایند می‌باشد.

فصل آخر نیز اختصاص به عملیات بهره‌برداری یافته‌است؛ فرایندهای شیمیایی و عملیات بهره‌برداری، طیف گسترده‌ای از عملیات را در برمی‌گیرند، فرایندهای بالا و پایین‌دستی شامل عملیات اکتشاف و حفاری چاه‌های نفت و گاز، تاسیسات پالایشگاهی نفت و گاز، مجتمع‌های پتروشیمی، تاسیسات آب‌شیرین‌کن، خطوط لوله انتقال و عملیات مربوط به آنها، توزیع محصولات نفتی، گاز و پتروشیمی و.. همگی مواردی هستند که مهندس فرایند و بهره‌بردار درگیر انجام، پایش، کنترل و بهینه‌سازی آنها می‌باشد.

در مصاحبه‌های علمی جهت استخدام، علاوه بر پرداختن به مسایل علمی و فنی، دو مقوله تسلط به زبان انگلیسی و نرم‌افزارهای عمومی و تخصصی در درجه بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. لذا به داوطلبین عزیز

توصیه می‌گردد حتماً به زبان انگلیسی در حد متوسط تسلط داشته، بطوریکه بتوانند در زمان مصاحبه، ضمن معرفی خود، برخی توانمندی‌ها، علاقمندی‌ها و سوابق علمی و تحصیلی خود را نیز به آن زبان بیان نموده و نیز متون تخصصی خواسته شده را خوانده و بصورت شفاهی ترجمه نمایند. همچنین به نرم‌افزارهای عمومی، بخصوص نرم‌افزارهای (Microsoft Office (Word & Excel و نرم‌افزارهای تخصصی رشته مهندسی شیمی و نفت (Aspen HYSYS یا Aspen Plus و PIPESIM) آشنایی داشته باشند.

علیرضا بزرگیان

فصل اول / ترمودینامیک

ترمودینامیک از دو کلمه یونانی thermo به معنای حرارت و dynamics به معنای نیروی محرکه گرفته شده است. این دانش، شاخه‌ای از علم فیزیک است که به بحث راجع به گرما و دما و نسبت آن با انرژی و کار می‌پردازد و پدیده‌های ماکروسکوپیک که از تغییر دما، فشار و حجم در یک سیستم فیزیکی اتفاق می‌افتد را بررسی می‌نماید. متغیرهای ماکروسکوپیک (مانند دما و فشار) برای توصیف حالت مواد در ترمودینامیک تعریف و چگونگی ارتباط آنها و قوانین حاکم بر آنها بیان می‌گردد. همچنین ترمودینامیک، رفتار میانگینی از تعداد زیادی از ذرات میکروسکوپیک را بیان می‌کند. این علم فقط حالت‌های تعادل و نهایی فرآیندها را بررسی می‌کند ولی سرعت انتقال حرارت و سرعت انتقال اجزاء مختلف بین فازها را بیان نمی‌نماید. فیزیکدان اسکاتلندی "لرد کلوین"، نخستین کسی بود که در سال ۱۸۵۴ تعریفی کوتاه برای ترمودینامیک ارائه داد:

ترمودینامیک مبحثی است که ارتباط حرارت با نیروهای بین قطعات به هم پیوسته‌ای که پیکر سیستم‌ها را تشکیل می‌دهند و همچنین رابطه میان حرارت با عامل الکتریسیته را بیان می‌نماید.

ترمودینامیک

۱- قوانین ترمودینامیک (صفرم، اول، دوم و سوم):

قانون صفرم: وقتی دو جسم با جسم سومی دارای تساوی درجه حرارت باشند، آن دو جسم نیز با هم تساوی درجه حرارت دارند.

قانون اول (قانون بقای کار و انرژی): وقتی در یک جرم کنترل تغییر حالت روی می دهد، انرژی می تواند به صورت حرارت یا کار از مرز سیستم عبور کند که ممکن است هریک از آنها مثبت یا منفی باشند. $Q-W=\Delta E$

توجه: علایم گرما و کار در این رابطه براساس بیان کلازیوس^۱ (Rudolf Julius Emanuel Clausius) بوده و به این صورت می باشند که معمولاً چون گرما به سیستم اضافه شده و کار توسط سیستم و بر روی محیط انجام می گیرد، علامت Q مثبت و علامت W منفی خواهد بود، در غیراینصورت باید علایم تصحیح گردند. رابطه کلی بصورت $Q+W=\Delta E$ می باشد که کار و گرما باتوجه به علایمشان می بایست جمع جبری گردند.

تغییرات انرژی پتانسیل + تغییرات انرژی جنبشی + تغییرات انرژی داخلی = (تغییرات انرژی کل) ΔE

بسط قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترلی که جرم به داخل یا خارج آن جریان دارد، باتوجه به کار جریان (ورود جریان به حجم کنترل به منزله انجام کار توسط محیط و خروج جریان از حجم کنترل به منزله انجام کار توسط سیستم) و تعریف خاصیت آنتالپی بعنوان انرژی جریان $(H=U+PV)$ بصورت زیر می باشد:

$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = Q_{c.v.} - W_{c.v.} + \left(H_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gZ_i \right) - \left(H_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right)$$

قانون دوم:

بیان کلازیوس: غیر ممکن است وسیله ای بسازیم که در یک چرخه عمل نماید و تنها اثر آن انتقال حرارت از جسم سردتر به جسم گرمتر باشد (نمی توان یخچالی ساخت که بدون کار ورودی، عمل نماید).

بیان کلین-پلانک^۲ (Lord Kelvin & Max Karl Ernst Ludwig Planck): غیر ممکن است وسیله ای بسازیم که در یک چرخه عمل نماید و در عین حال که فقط با یک مخزن تبادل حرارت دارد، اثری بجز صعود وزنه داشته باشد، یعنی غیر ممکن است یک موتور حرارتی بدون از دست دادن گرما در Q_c به کار خود ادامه دهد (امکان ندار موتور حرارتی بسازیم که کارایی حرارتی آن صد درصد باشد).

برای فرایند بازگشت پذیر $\delta Q = Tds$

¹ Clausius Statement

² Kelvin–Planck Statement

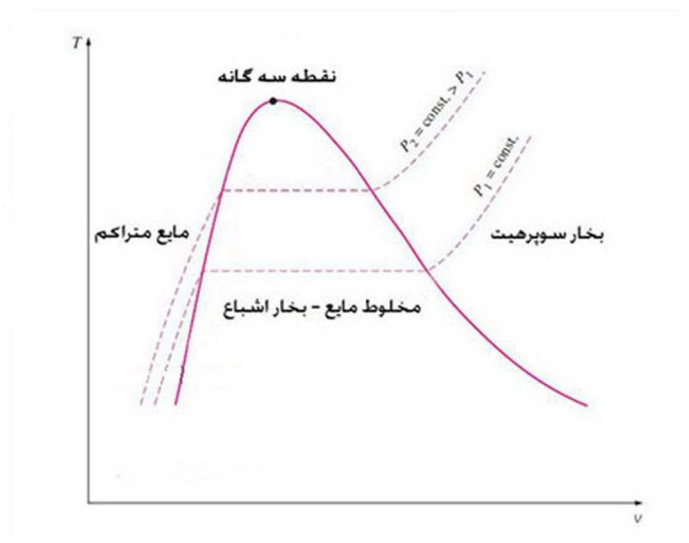
قانون سوم (آنتروپی مواد در درجه حرارت صفر مطلق): در صفر مطلق، انرژی حرارتی در حداقل مقدار خود می‌باشد. درواقع هنگامیکه انرژی یک سیستم به حداقل مقدار خود میل می‌کند، آنتروپی سیستم قابل چشم‌پوشی می‌باشد. از دیدگاه آماری، ساختمان کریستالی بدانگونه است که دارای حداکثر درجه نظم می‌باشد.

۲- مایع و بخار اشباع، مایع کمپرس و بخار سوپرهیت

مایع یا بخار در درجه حرارت و فشار اشباع را مایع یا بخار اشباع گویند. به این ترتیب که اگر اندکی حرارت به مایع داده شود و یا از بخار گرفته شود، بلافاصله تغییر فاز صورت می‌گیرد. مایع اشباع با جذب اندکی حرارت بلافاصله تبدیل به بخار شده و بخار اشباع با از دست دادن اندکی حرارت بلافاصله تبدیل به مایع اشباع می‌شود.

دمای اشباع: دمایی که در آن، تبخیر مایع تحت فشار معینی صورت می‌گیرد که این فشار، فشار اشباع می‌باشد. مایع متراکم یا مادون سرد (Compressed or Subcooled Liquid): اگر دمای مایع در یک فشار معین، از دمای اشباع کمتر باشد و یا فشار آن در یک دمای معین، از فشار اشباع بیشتر باشد. این مایع با جذب حرارت تنها افزایش دما داده و به بخار تبدیل نمی‌گردد.

بخار سوپرهیت یا مافوق گرم (Superheated Vapour): وقتی دمای بخار در یک فشار معین، از دمای اشباع بیشتر باشد و یا فشار آن در یک دمای معین، از فشار اشباع کمتر باشد. به زبان ساده تر این بخار، بخاریست که انرژی حرارتی بیشتر از انرژی اشباع در خود جای داده است. پس این بخار با از دست دادن انرژی بلافاصله به مایع تبدیل نمی‌گردد.



نمودار ۱-۱ - دما-حجم مخصوص برای آب

۳- کیفیت، دما و فشار بحرانی و تبخیر ناگهانی^۳

تعریف کیفیت یا کیفیت بخار برای یک مخلوط اشباع:

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{vapor}} + m_{\text{liquid}}} = \frac{\text{جرم بخار}}{\text{جرم مایع} + \text{جرم بخار}} \quad (\text{در حالت اشباع})$$

³ Flash Distillation

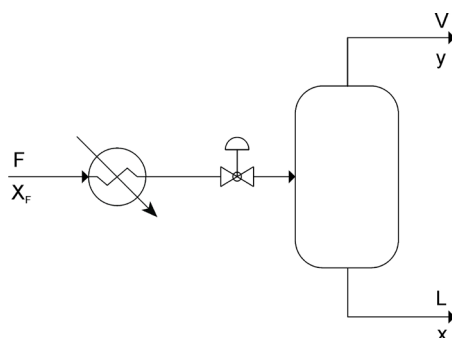
توجه به این نکته جالب می‌باشد که این تعریف در نرم افزار Aspen HYSYS برحسب مبناء مولی می‌باشد. برای مایع اشباع $x=0$ و برای بخار اشباع $x=1$ است.

دمای بحرانی: بالاترین دمایی که در آن، گاز و مایع می‌توانند با یکدیگر در تعادل باشند.

فشار بحرانی: فشاری که برای مایع کردن گاز در دمای بحرانی مورد نیاز است.

در دما یا فشار بالاتر از دما یا فشار بحرانی، مایع و بخار یک ماده خالص که در تعادل باشند، وجود ندارد. دما و فشار بحرانی، حالت حدی دما و فشار است که مایع به حالت مه مانند تبدیل می‌گردد و تمایز بین مایع و بخار غیر ممکن است و با افزودن اندکی حرارت، این حالت مه مانند تبدیل به بخار می‌گردد. در نقطه بحرانی، دانسیته فازهای بخار و مایع باهم برابر می‌گردند و در بالای آن، ماده به هیچ وجه نمی‌تواند به مایع تبدیل گردد (زیرا ذرات گاز انرژی جنبشی بسیار بالایی دارند که به هیچ عنوان نمی‌توانند به مایع تبدیل گردند).

تبخیر ناگهانی: یک تکنیک جداسازی تک مرحله‌ای است که مساله تعادل مایع-بخار در آن مطرح می‌باشد. خوراک مایع چند جزیی در ابتدا در یک گرمکن، گرم شده و سپس در اثر افت فشار ناگهانی، مانند گذشتن از یک شیر فشار شکن بصورت آدیاباتیک، تبخیر می‌گردد که در اینحالت، بخار و مایع با یکدیگر در تعادل ترمودینامیکی می‌باشند و مخلوط نهایتاً وارد یک مخزن جداکننده موسوم به Flash Drum شده و دو فاز مایع و بخار، بخاطر اختلاف دانسیته، از یکدیگر جدا می‌گردند.



شکل ۱-۱ - تبخیر ناگهانی

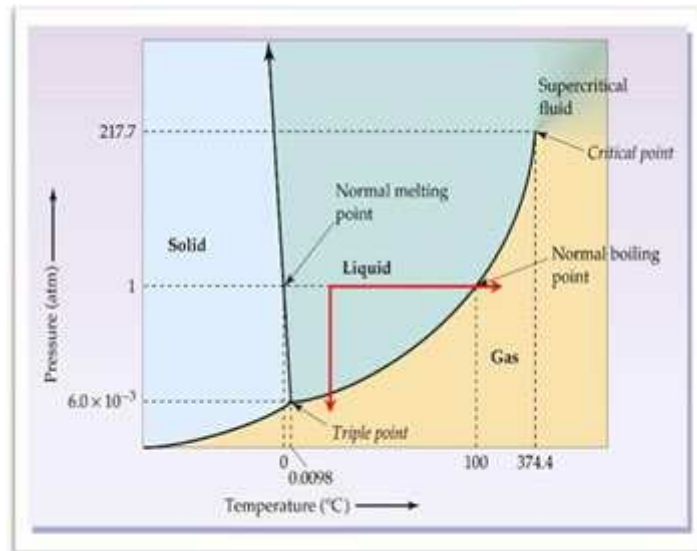
۴- نمودارهای فاز^۴ برای یک ماده خالص مانند آب و یک مخلوط مانند نفت خام و پدیده retrograde

برای یک سیستم تک جزیی، نقطه بحرانی، بالاترین دما و فشاری است که دو فاز می‌توانند وجود داشته باشند و درواقع، نقطه‌ای که فازهای بخار و مایع، قابل تشخیص از یکدیگر نیستند.

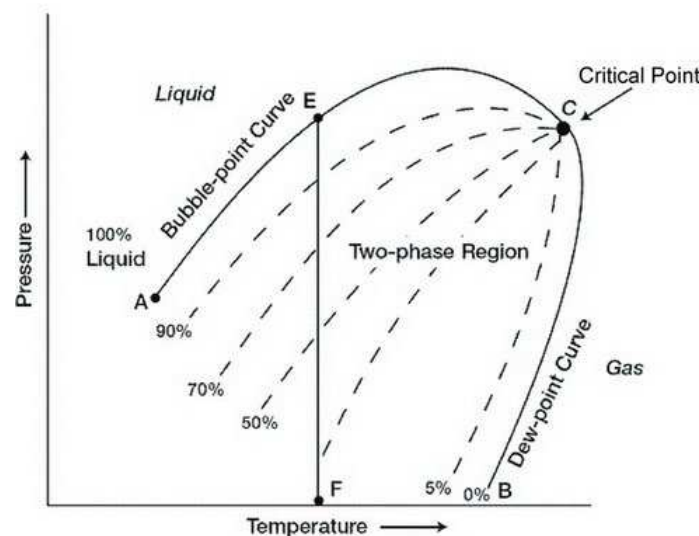
برای سیستمهای چند جزیی، نقطه مشترک منحنی‌های نقطه شبنم و حباب می‌باشد (نقطه‌ای که فازهای مایع و بخار قابل تشخیص از یکدیگر نمی‌باشند). بطور کلی، این نقطه نشان‌دهنده نه بیشترین فشار و نه بیشترین دما برای همزیستی مایع-بخار است. منحنی نقطه حباب، نشان‌دهنده خط مایع اشباع می‌باشد (۱۰۰ درصد مایع به همراه مقدار بی‌نهایت کوچک از بخار) و منحنی نقطه شبنم، نشان‌دهنده بخار اشباع (۱۰۰ درصد بخار به همراه مقدار بی‌نهایت کوچک از مایع). این شرایط در شکل دوم نمایش داده شده است.

⁴ Phase Envelope

فرایندهای فشرده‌سازی همدمای T_1 و T_2 را اگر در شکل سوم در نظر بگیریم بطوریکه دمای T_1 از دمای بحرانی کمتر و دمای T_2 از دمای بحرانی بیشتر و کمتر از دمای T_{cc} (بیشترین دما بر روی منحنی) می‌باشد. بر اساس دانش معمول، فشرده‌سازی همدم (افزایش فشار در حالیکه، دما ثابت نگه داشته می‌شود)، باعث چگالش یک بخار می‌گردد. آن یک رفتار قابل انتظار یا



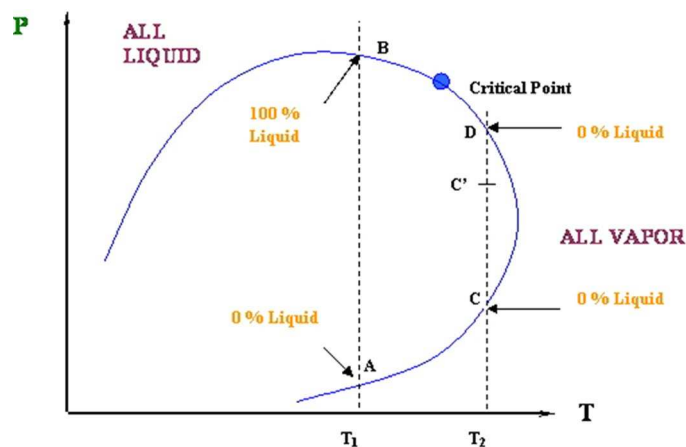
نمودار ۱-۲ - نمودار فازی برای آب خالص



نمودار ۱-۳ - نمودار فازی برای یک سیستم چند جزئی

معمول یک بخار تحت تراکم می‌باشد که تراکم بیشتر باعث تشکیل مایع بیشتر از آن، بعد از اینکه شرایط اشباع ایجاد گردد، خواهد شد. این، همیشه برای یک سیستم با جزء خالص مانند آب، صحیح می‌باشد. این دقیقاً اتفاقی هست که در مورد حالت اول یعنی تراکم همدم در دمای T_1 می‌افتد. در نقطه A، ما در حالت تمام بخار (مایع صفر درصد) بوده و در حال تقاطع با

ناحیه دوفازی هستیم. هنگامیکه از نقطه A تا B فشرده‌سازی را انجام می‌دهیم، مایع بیشتری تشکیل شده تا اینکه کل سیستم در نقطه B چگالیده گردد. در این مسیر، همانطور که انتظار داشتیم، با متراکم نمودن بخار، از صفر درصد مایع به



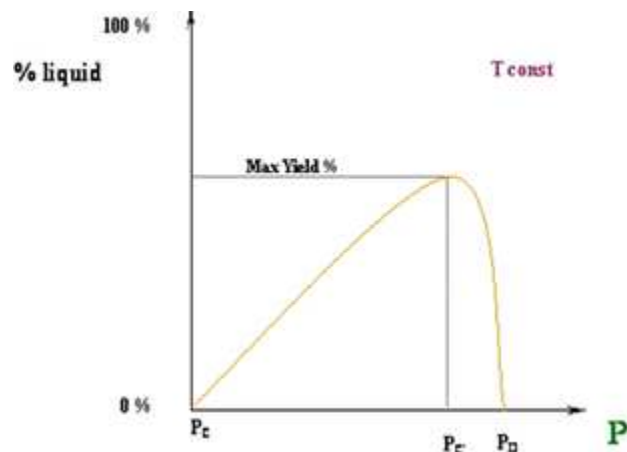
نمودار ۴-۱ - نمودار فازی برای یک سیستم چند جزئی شامل پدیده retrograde

۱۰۰ درصد مایع حرکت کرده‌ایم. در حالت دوم، یعنی دمایی بیشتر از دمای بحرانی و کمتر از دمای T_{cc} (بیشترین دما بر روی منحنی)، رفتاری متفاوت داریم. در نقطه C در شکل سوم، از یک شرایط تمام بخار (مایع صفر درصد)، با افزایش فشار، شروع کرده و سیستم را وادار به ورود به ناحیه دوفازی می‌نماییم. بنابراین، مقداری مایع بایستی تشکیل گردد. ما انتظار داریم وقتی که افزایش فشار ادامه پیدا کند، مایع بیشتری تولید نماییم. این، تا حدودی درست است اما، در نقطه پایانی یعنی نقطه D، با وجودیکه در حال تولید مایع می‌باشیم، شرایط نهایی مان (نقطه شبنم)، نشان‌دهنده این است که مجدداً مایع صفر درصد در سیستم داشته باشیم.

چه اتفاقی افتاده است؟؟؟ این به ما می‌گوید که، هنگامیکه وارد ناحیه دوفازی می‌شویم، تولید مقداری مایع را آغاز می‌نماییم، اما یک نقطه وجود خواهد داشت که (نقطه ماکزیمم تولید مایع) مایع شروع به تبخیر می‌نماید (نقطه C'). به عبارتی دیگر، اگرچه ما در حال متراکم‌سازی سیستم هستیم، مایع تبخیر خواهد شد و چگالیده نمی‌گردد که این خلاف انتظارات می‌باشد و به همین علت است که یک رفتار برگشتی^۵ نامیده می‌شود.

شکل زیر، منحنی نمونه برای تغییر درصد حجم مایع با فشار را نشان می‌دهد.

⁵ Retrograde Behavior

نمودار ۵-۱ - تولید مایع برای فشرده‌سازی همدمای در دمای T_2

افزایش جزء مایع بواسطه کاهش فشار بین نقاط C و D در شکل سوم، دقیقاً برخلاف روند طبیعی است. این رفتار، با این وجود، حکایت از سیستم‌های میعان‌ات گازی دارد. در چاه‌های تولیدی گازی عمیق، علاوه بر مخزن هیدروکربنی، با شرایط retrograde ممکن است برخورد گردد.

برای عملیات تولید، معمولاً هدف، حفظ فشار برای دست یافتن به تشکیل بیشینه مایع می‌باشد. شرایط اولیه PVT چاه ممکن است متناظر با نقطه‌ای بالای نقطه D باشد. اگر شرایط در سرچاه سپس، در نزدیکی نقطه C' نگهداشته شود، بازیافت مایع در سطح، بیشینه می‌گردد. با این حال، بالاترین مقدار تشکیل مایع همیشه مدنظر نمی‌باشد. در شرایط مخزنی، حضور مایع در یک مخزن گازی، مطلوب نمی‌باشد، زیرا مایعات قابلیت حرکت ناچیز (در اشباع‌های کم) داشته و بنابراین، هیدروکربن برای مقاصد عملی، برای همیشه از دست می‌رود. مایع، همچنین، جابجایی گاز را ضعیف می‌نماید. بنابراین، از تولید مایع در شرایط مخزنی، در تمام مواقع در یک مخزن گازی، بایستی پرهیز گردد. این اغلب توسط دوباره متراکم‌سازی یا تزریق گاز رقیق، بدست می‌آید.

همچنین این مهم است که بدانیم یک رفتار مشابه، برای ناحیه فشار بین فشار بحرانی و فشار P_{cc} (بیشترین فشار بر روی منحنی)، قابل انتظار می‌باشد. در این حالت، تبخیر برگشتی خواهیم داشت، زیرا از یک شرایط مایع ۱۰۰ درصد به شرایط مایع ۱۰۰ درصد دیگر (هر دو بر روی منحنی نقطه حباب)، بر روی یک گرم‌شدن همفشار، حرکت می‌نماییم.

۵- گاز ایده‌آل و چگونگی نزدیک شدن شرایط یک گاز حقیقی به یک گاز ایده‌آل

در گاز ایده‌آل نیروی بین مولکولی وجود نداشته و حجم مولکولها نسبت به حجم کل گاز، ناچیز است. در فشارهای خیلی پایین و دماهای خیلی بالا، گاز حقیقی رفتاری دقیقاً مشابه گاز ایده‌آل از خود نشان می‌دهد. (فشارهای خیلی پایین و در دمای در حدود $T=2.5T_c$ که به دمای بویل^۶، Robert Boyle، معروف می‌باشد). در دماهای پایین، مولکولها بهم نزدیکتر شده و نیروی جاذبه بین مولکولی وجود خواهد داشت (حجم اشغال شده توسط گاز واقعی کمتر از گاز ایده‌آل می‌باشد) و در فشارهای بالا، مولکولها بسیار بهم نزدیک شده و نیروی دافعه بین مولکولی وجود خواهد داشت (حجم اشغال شده توسط گاز واقعی بیشتر از گاز ایده‌آل می‌باشد).

⁶ Boyle Temperature

۶- تفاوت بخار و گاز

بطور کلی تمام بخارات گاز هستند، ولی تمام گازها بخار نیستند. بخار ماده‌ای می‌باشد که از یک ماده جامد یا مایع، در اثر گرما یا افت فشار، در اثر فرایند تبخیر یا تصعید برخیزد. بخار حالت گازی ماده‌ای می‌باشد که در دما و فشار اتاق بصورت مایع یا جامد است. گاز پراکنده‌ترین حالت ماده می‌باشد که در آن مولکولها از هم فاصله بسیاری دارند و دارای حرکت تقریباً نامحدود و کاتوره‌ای هستند. از لحاظ علمی، حالت گازی بالاتر از دمای بحرانی ماده می‌باشد. ماده گازی در دما و فشار اتاق، پایدارترین حالت خود را دارد اما بخار در این شرایط، پایدارترین حالت ماده نمی‌باشد.

۷- پدیده ژول-تامسون و کاربرد آن

این پدیده تغییر دمای یک گاز یا مایع را هنگامیکه آن سیال از میان یک شیر یا یک plug متخلخل عبور می‌کند، درحالیکه کاملاً ایزوله شده باشد و بنابراین هیچ تبادل گرمایی با محیط نداشته باشد را تفسیر می‌نماید. این روند، فرایند اختناق^۷ یا اثر ژول-تامسون^۸ نامیده می‌شود (James Prescott Joule & William Thomson). در دمای اتاق (دمای معمولی)، تمامی گازها به غیر از هیدروژن، هلیوم و نئون در اثر انبساط به واسطه فرایند ژول-تامسون، سرد می‌شوند. در این پدیده گاز با حجم V_1 در ناحیه با فشار P_1 (ناحیه ۱) قرار دارد و هنگامیکه به ناحیه ۲ می‌رود حجم و فشار آن به ترتیب V_2 و P_2 می‌گردد. طبق بسط قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترلی که جرم به داخل یا خارج آن جریان دارد، باتوجه به کار جریان، داریم:

$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = Q_{c.v.} - W_{c.v.} + \left(U_1 + \frac{1}{2}V_1^2 + gZ_1 + P_1\vartheta_1 \right) - \left(U_2 + \frac{1}{2}V_2^2 + gZ_2 + P_2\vartheta_2 \right)$$

حال در فرایند ژول-تامسون هیچ کار خارجی انجام نمی‌گیرد ($W_{c.v.}=0$) و این فرایند، یک فرایند آدیاباتیک درنظر گرفته می‌شود ($Q_{c.v.}=0$)، زیرا انبساط در یک زمان بسیار کوتاه در ناحیه‌ای بسیار کوچک واقع می‌گردد. همچنین بعلت اینکه در این فرایند، فقط اندکی افزایش سرعت سیال وجود دارد و اینکه در ارتفاع سیال تغییری بوجود نمی‌آید، پس از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل نیز می‌توان صرفنظر نمود. درضمن این فرایند، بصورت حالت پایدار- جریان پایدار می‌باشد. بنابراین داریم:

$$(U_1 + P_1\vartheta_1) - (U_2 + P_2\vartheta_2) = 0$$

با توجه به تعریف خاصیت آنتالپی بعنوان انرژی جریان ($H=U+PV$)، داریم:

$$H_1 - H_2 = 0 \Rightarrow H_1 = H_2$$

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \text{ ضریب ژول-تامسون:}$$

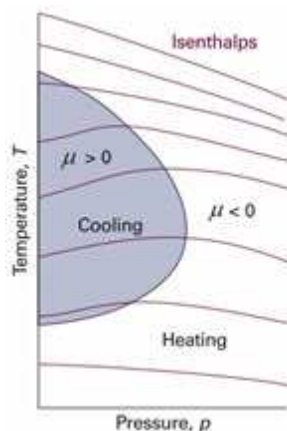
در دمای اتاق (دمای معمولی)، این ضریب برای تمامی گازها به غیر از هیدروژن، هلیوم و نئون مثبت بوده و چون در این فرایند $\Delta P < 0$ نتیجتاً $\Delta T < 0$ خواهد بود. دماهای وارونگی^۹ گازهای مذکور در فشار ۱ اتمسفر، بسیار پایین می‌باشد، یعنی بطور معمول این گازها در دمای اتاق، همیشه بالای دماهای وارونگی بالایی خود قرار دارند. به یاد داشته باشیم که تمامی

⁷ throttling

⁸ Joule-Thomson Effect

⁹ Inversion Temperature

گازها طبق نمودار ۱-۶ دو دمای وارونگی، بالایی و پایینی، دارند (در مورد دمای وارونگی، در قسمت واژه نامه انگلیسی توضیح داده شده است).



نمودار ۱-۶ - دماهای وارونگی برای خطوط آنتالپی ثابت برای یک گاز

مکانیسم سرد و یا گرم شدن سیالات به این صورت می‌باشد که در دماهای پایین‌تر از دمای وارونگی بالایی تا دمای وارونگی پایینی، نیرویی که بین مولکولها غالب می‌باشد، نیروهای جاذبه بین مولکولی است. در این حالت وقتی گاز منبسط شود، فاصله بین مولکولها افزایش پیدا کرده، اما چون مولکولها تمایل به جذب هم را دارند، این جذب انرژی مصرف می‌نماید و از آنجا که فرآیند آدیاباتیک هست، تنها منبع انرژی که وجود دارد انرژی داخلی خود سیال هست، پس مولکولها برای جذب یکدیگر، انرژی داخلی رو مصرف کرده و با کاهش انرژی داخلی، دمای سیال، کاهش پیدا خواهد کرد.

از سوی دیگر، در دماهای بالاتر از دمای وارونگی بالایی، مولکولهای سیال سریعتر حرکت می‌نمایند و نیروهای دافعه بین مولکولی، غالب هستند. در این حالت مولکولها تمایل به جدا شدن از یکدیگر دارند و زمانی که فرصت انبساط به آنها داده می‌شود، در واقع دور شدنشان از یکدیگر، باعث بالا رفتن انرژی درونی گاز و در نتیجه افزایش دما می‌گردد. این مکانیسم‌ها را نیز می‌توان از دیدگاه انرژی پتانسیل و جنبشی مولکولهای سیال نیز (دید مولکولی)، بررسی و به نتیجه‌ای مشابه رسید.

کاربرد: برای گازهایی که ضریب ژول-تامسون آنها مثبت باشد، می‌توان از اثر سردسازی برای مایع نمودن آنها و نیز در بسیاری از کاربردهای بروودی (برای مثال جهت تولید اکسیژن، نیتروژن و آرگون مایع)، استفاده نمود.

۸- نقطه حباب و شبیم

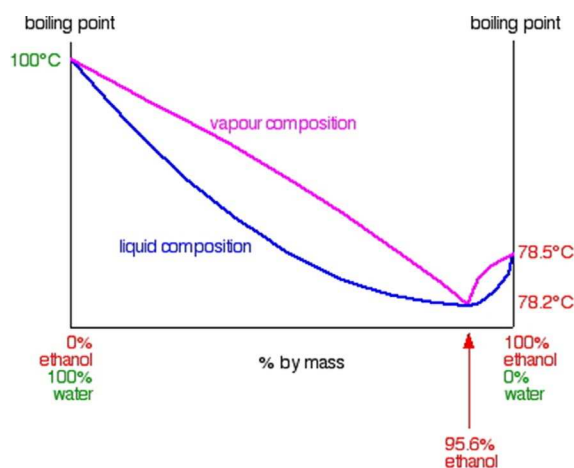
نقطه حباب^{۱۰}: اگر در اثر کاهش فشار بر روی مایع یا افزایش دمای آن، اولین حباب بخار ایجاد شود، آن دما و فشار، مربوط به نقطه حباب آن ماده یا مخلوط می‌باشد. اگر در اثر افزایش فشار یک بخار یا کاهش دمای آن، مایع تشکیل گردد، آخرین ذره حباب که باقی می‌ماند نیز، نقطه حباب آن ماده یا مخلوط می‌باشد.

¹⁰ Bubble Point

نقطه شبنم^{۱۱}: اگر در اثر افزایش فشار یک بخار یا کاهش دمای آن، اولین قطره مایع تشکیل شود، آن دما و فشار، مربوط به نقطه شبنم آن ماده یا مخلوط می‌باشد. اگر در اثر کاهش فشار بر روی یک مایع یا افزایش دمای آن، بخار تشکیل گردد، آخرین ذره مایع که باقی می‌ماند نیز نقطه شبنم آن ماده یا مخلوط می‌باشد.

۹- نقطه هم‌جوش^{۱۲} در سیستمهای دوفازی و راه حل برای جداسازی دو جزء

آزئوتروپ‌ها تنها زمانی تشکیل می‌شوند که مخلوط از قانون راولت^{۱۳} (Francois-Marie Raoult) منحرف می‌شود. در منحنی P_{xy} در یک فشار معین و در منحنی T_{xy} در یک دمای معین، جزء مولی مایع و بخار در حال تعادل با هم برابر می‌شوند، در نتیجه مایع در حال تبخیر، هیچ تغییری در اجزای سازنده‌اش رخ نخواهد داد. هیچ‌گونه عمل جداسازی برای چنین محلولی با نقطه جوش ثابت، توسط عمل تقطیر معمولی، میسر نمی‌باشد. راه حل شکستن نقطه آزئوتروپ استفاده از روش تقطیر آزئوتروپی (استفاده از جزء سوم بنام شکننده آزئوتروپ^{۱۴})، تقطیر استخراجی (استفاده از جزء سوم بنام حلال)، تقطیر با استفاده از یک نمک محلول، Pressure Swing Distillation، تراوش تبخیری^{۱۵} و روشهای دیگر غشایی می‌باشد.



نمودار ۱-۷ - نقطه آزئوتروپ برای مخلوط اتانول-آب

۱۰- معادلات حالت و ضریب فعالیت

معادله حالت برای یک ماده خالص عبارت است از رابطه بین فشار، حجم و دمای آن ماده. بر حسب فاز ماده و گستره شرایطی که ماده تحت اثر آن است، یکی از چند معادله حالت قابل استفاده می‌باشد. از طرف دیگر این معادله‌ها برای مایعات و جامدات چنان پیچیده هستند و گستره و کاربرد آنها به قدری محدود است که عموماً استفاده از جداول خواص ترمودینامیکی، آسانتر می‌باشد.

معادلات حالت مانند: PR^{16} (Peng-Robinson)، SRK^{17} (Soave-Redlich-Kwong)، وندروالس^{۱۸} (Van der Waals) و ویرال (Virial)

¹¹ Dew Point

¹² Azeotrope Point

¹³ Raoult's Law

¹⁴ entrainer

¹⁵ pervaporation

¹⁶ Ding-Yu Peng & Don B. Robinson

معادله ضریب فعالیت^{۱۹} برای یک ماده: ضریب فعالیت فاکتوری برای توجیه انحرافات از رفتار ایده‌آل در یک محلول شیمیایی مواد می‌باشد. در یک محلول ایده‌آل، برهم‌کنشهای میکروسکوپی بین هر جفت از گونه‌های شیمیایی مشابه می‌باشند (یا معادل آن از دید ماکروسکوپی، تغییر آنتالپی محلول و نوسان حجمی در آن صفر می‌باشد) و در نتیجه، خواص محلول‌ها را می‌توان مستقیماً برحسب غلظتها یا فشارهای جزئی قابل فهم مواد حاضر، برای مثال قانون راولت، بیان نمود. انحرافات از حالت ایده‌آل با اصلاح نمودن غلظت توسط یک ضریب فعالیت همراه می‌باشد. بطور مشابه، عبارات شامل گازها را می‌توان با مقیاس نمودن فشارهای جزئی توسط یک ضریب فوگاسیته برای غیر ایده‌آل بودن، تعدیل نمود.

معادلات ضریب فعالیت مانند: Margules، NRTL، UNIQUAC و Van Laar

۱۱- فوگاسیته و ضریب فوگاسیته

بر اساس تعاریف و معادلات ترمودینامیکی، انرژی آزاد گیبس یک گاز ایده‌آل در دمای ثابت، تابعی از فشار آن می‌باشد، حال برای یک گاز واقعی در دمای ثابت، انرژی گاز تابعی از فشار تصحیح شده می‌باشد که به آن فوگاسیته^{۲۰} گفته می‌شود. در یک گاز ایده‌آل، فوگاسیته مساوی فشار گاز می‌باشد. برای مقایسه این که رفتار یک گاز چقدر به گاز ایده‌آل نزدیک می‌باشد، از تعریف ضریب فوگاسیته که نسبت فوگاسیته به فشار است، استفاده می‌شود. هرچه این ضریب به یک نزدیکتر باشد، رفتار گاز بیشتر به حالت ایده‌آل نزدیک می‌باشد. ضریب فوگاسیته یک گاز خالص کمیتی است که مستقیماً وابسته به انرژی آزاد گیبس^{۲۱} (Josiah Willard Gibbs) می‌باشد و تابعی از فشار و دمای گاز است.

مفهوم فوگاسیته، اولین بار توسط Gilbert Newton Lewis در سالهای ۱۹۰۰ و ۱۹۰۱ به همراه مفهوم فعالیت در ترمودینامیک برای بحث تعادلات فازی معرفی و مطرح گردید.

۱۲- انواع چرخه‌ها برای سیستمهای توانی و تبرید

❖ چرخه‌های توانی بخار:

۱- 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.

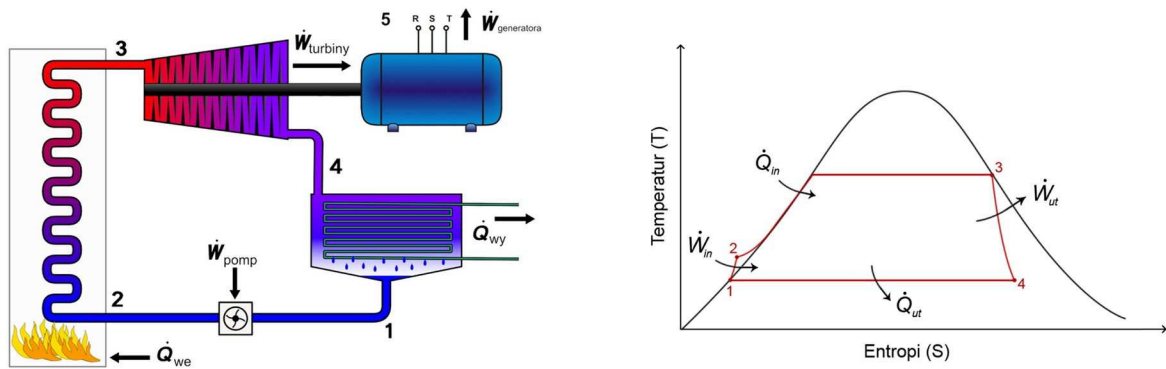
¹⁷ G. Soave & Otto Redlich & Joseph Neng Shun Kwong

¹⁸ Johannes Diderik van der Waals

¹⁹ Activity Coefficient

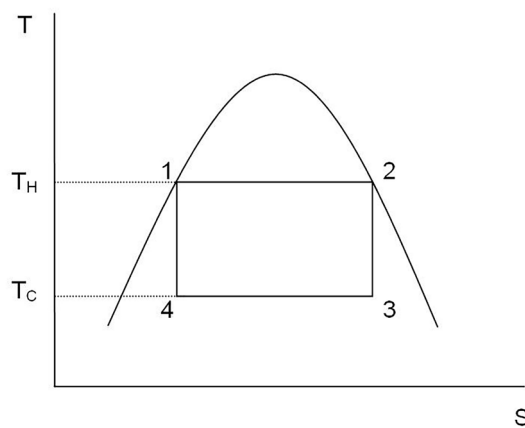
²⁰ fugacity

²¹ Gibbs Free Energy



شکل ۱-۲ - چرخه رانکین

چرخه کارنو، چرخه ترمودینامیکی بازگشت‌پذیری است که توسط Nicolas Léonard Sadi Carnot معرفی گردید و چرخه‌ای می‌باشد که بیشترین کارایی را دارد، به این معنی که توسط این چرخه، بیشترین مقدار کار مکانیکی را می‌توان از انرژی گرمایی چشمه گرم، دریافت نمود. چرخه کارنو، شامل دو فرایند دما ثابت و دو فرایند آدیاباتیک می‌باشد. سیال عامل این چرخه، گاز ایده‌آل می‌باشد. بیان کارنو به این صورت می‌باشد: بازده تمام ماشینهای بازگشت‌پذیری که بین دماهای یکسانی کار می‌کنند با هم برابر است و بازده هیچ ماشین بازگشت‌ناپذیری که بین همان دو دما کار می‌کند، نمی‌تواند بیشتر از این باشد.



نمودار ۱-۸ - چرخه کارنو

۲- چرخه گرمایش مجدد (Reheat Rankine Cycle)

برای افزایش بازده چرخه رانکین با بالا بردن فشار، به طوریکه رطوبت اضافی در مراحل فشار پایین توربین نداشته باشیم، از چرخه گرمایش مجدد استفاده می‌شود. در این چرخه، بخار تا فشار متوسطی در توربین منبسط شده و سپس به درون بویلر برگشت داده می‌شود و پس از گرمایش مجدد، دوباره به توربین وارد شده و تا فشار نهایی خود، منبسط می‌گردد.

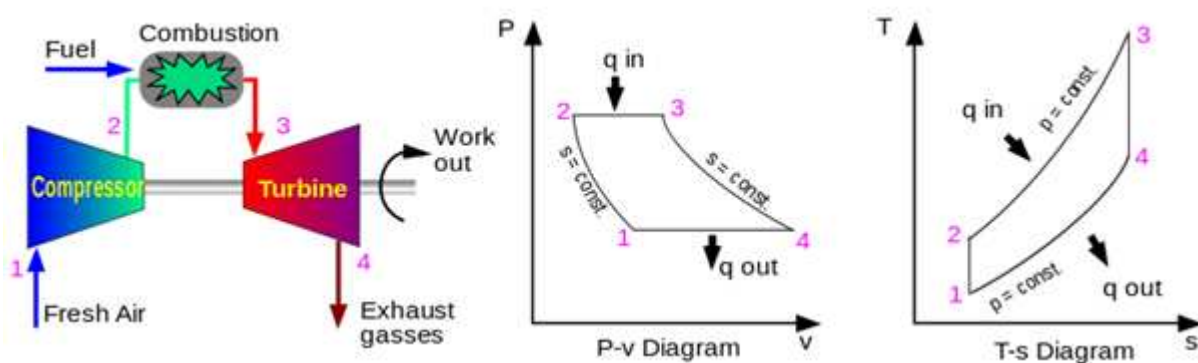
۳- چرخه بازیابی (Regenerative Rankine Cycle)

یکی دیگر از انواع مهم چرخه‌های رانکین، چرخه بازیابی می‌باشد که در آن از گرمکن‌های آب تغذیه استفاده می‌گردد. مشخصه اصلی این چرخه، اینست که فاقد فوق گرمایش است. مشخصه اصلی این چرخه در مقایسه با چرخه رانکین، اینست که مایع پس از خروج از پمپ، در محفظه توربین و در جهت مخالف با جریان بخار در توربین، گردش می‌نماید.

❖ چرخه‌های توانی هوایی:

۱- چرخه برایتون (Brayton Cycle)

این چرخه، چرخه ایده‌آلی برای توربینهای گازی و موتورهای جت است و به افتخار مهندس آمریکایی، George Brayton، نامگذاری شده است که شامل دو فرایند فشار ثابت و دو فرایند آنتروپی ثابت (آدیاباتیک برگشت‌پذیر) می‌باشد. این چرخه اگر همراه با سیال عامل گازی تک فاز بکار رود، چرخه برایتون بوده و اگر همراه با سیال عاملی که چگالیده می‌شود، چرخه رانکین خواهد بود. هر چه فشار ورودی به توربین بالاتر باشد، راندمان کلی چرخه بالاتر خواهد بود. بدلیل اینکه گازهای حاصل از احتراق اگر بخواهند با دمای بالا وارد بخش توربین شوند، باعث آسیب زدن به بخشهای مختلف توربین می‌شوند، دمای گازهای حاصل از احتراق، باید با تزریق هوای اضافی پایین آورده شود.

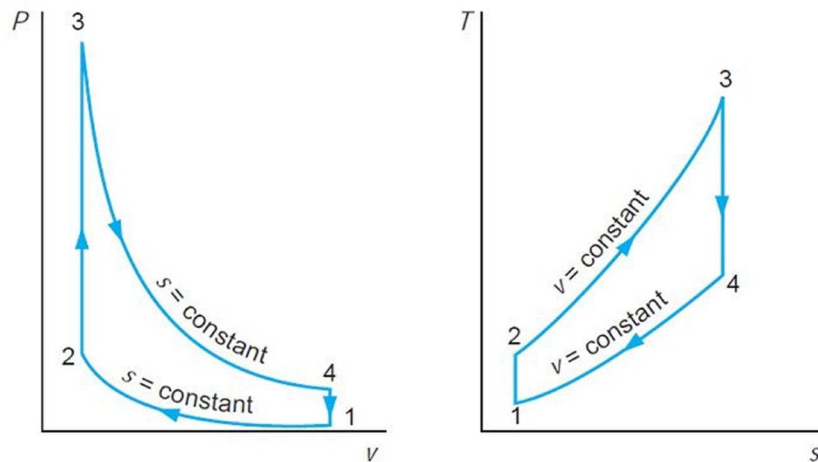


شکل ۳-۱ - چرخه برایتون ایده‌آل

۲- چرخه اتو (Otto Cycle)

چرخه اتو، چرخه ایده‌آلی برای موتورهای احتراق داخلی جرقه‌ای است که شامل دو فرایند حجم ثابت و دو فرایند آنتروپی ثابت می‌باشد. این چرخه به افتخار مهندس آلمانی، Nikolaus August Otto، نامگذاری شده است. این چرخه ترمودینامیکی است که عموماً در موتورهای اتوموبیل یافت می‌گردد.

اتو برای مطابقت کار ماشینهای درونسوز و برونسوز، فرض کرد که در مرحله ی احتراق جسم در بالاترین دما و فشار خود قرار می‌گیرد و نمی‌سوزد، بلکه به بالاترین نقطه انبساطی می‌رسد و در مرحله تخلیه نیز بسیار سرد می‌شود، به طوریکه به ماده اولیه داخل سیلندر تبدیل می‌گردد و ماده سوختنی خارج نمی‌شود و در چرخه بعدی شرکت می‌نماید.



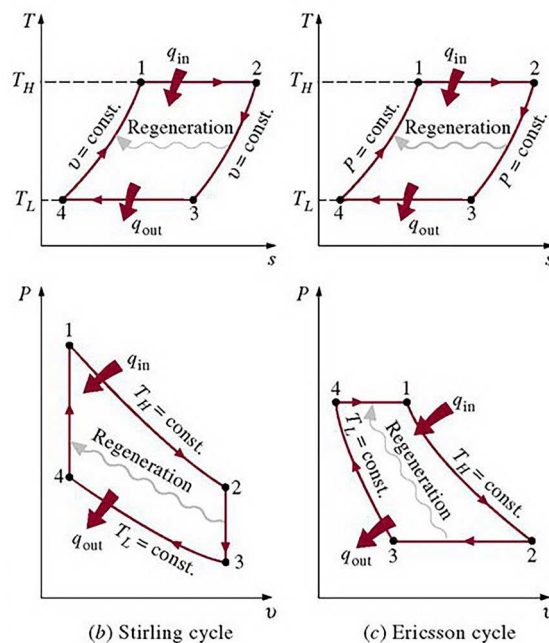
نمودار ۹-۱ - چرخه اتو

۳- چرخه استرلینگ (Stirling Cycle)

این چرخه شامل دو فرایند حجم ثابت و دو فرایند دما ثابت می‌باشد و مانند چرخه اتو است، با این تفاوت که فرایندهای آدیاباتیک آن، با فرایندهای همدمای تعویض شده‌اند. این چرخه به افتخار کشیش اسکاتلندی، دکتر Robert Stirling، نامگذاری شده است. در چرخه ایده‌آل استرلینگ، چون کل گرما به صورت همدمای تامین شده و دفع می‌گردد، بازده آن برابر بازده چرخه کارنویی است که بین همان دماها عمل می‌کند.

۴- چرخه اریکسون (Ericsson Cycle)

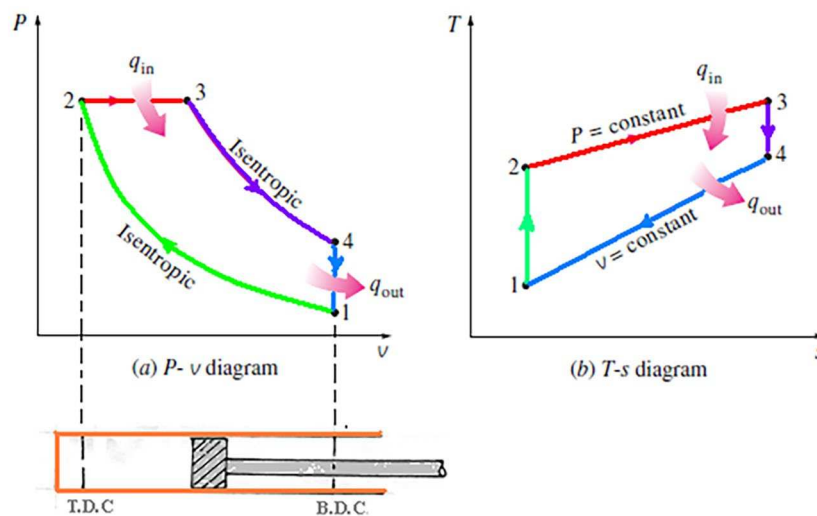
عمدتاً چرخه‌های استرلینگ و اریکسون، افزایش بازده به واسطه وجود بازیاب را نشان می‌دهند. چرخه اریکسون مشابه چرخه استرلینگ می‌باشد، با این تفاوت که فرایندهای حجم ثابت در چرخه استرلینگ، با فرایندهای فشار ثابت تعویض شده‌اند. این چرخه به افتخار مهندس سوئدی-آمریکایی، John Ericsson، نامگذاری شده است.



نمودار ۱۰-۱ - چرخه‌های استرلینگ و اریکسون

۵- چرخه دیزل (Diesel Cycle)

چرخه دیزل، چرخه ایده‌آلی برای موتورهای احتراق داخلی اشتعال تراکمی است که شامل یک فرایند فشار ثابت، یک فرایند حجم ثابت و دو فرایند آنتروپی ثابت می‌باشد. گرما در این چرخه در فشار ثابت، به سیال عامل انتقال می‌یابد. این فرایند متناظر با اشتعال و سوختن سوخت، در موتور واقعی است. این چرخه به افتخار مهندس آلمانی، Rudolf Christian Karl Diesel نامگذاری شده است. موتورهای دیزلی، در هواپیماها، اتومبیلها، تولید برق، لوکوموتیوهای دیزلی-الکتریکی و در کشتی‌ها و زیردریایی‌ها بکار می‌رود. تفاوت‌های زیادی بین چرخه‌های اتو و دیزل وجود دارد. مثلاً در نسبت تراکم یکسان، بازده چرخه اتو بیشتر از بازده چرخه دیزل است. در موتورهای دیزل، انفجار خودبخودی، به اندازه موتورهای بنزینی (چرخه اتو)، مساله ساز نبوده و بهمین دلیل در موتورهای دیزل، می‌توان از نسبت تراکم بالاتری نسبت به چرخه اتو استفاده نمود.

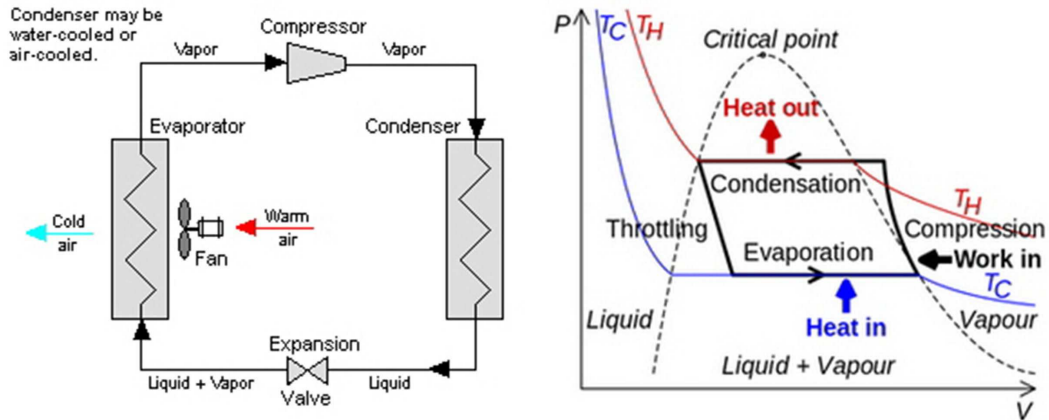


نمودار ۱-۱۱ - چرخه دیزل ایده‌آل

❖ چرخه‌های تبرید:

۱- چرخه تبرید تراکم بخار (Vapor-Compression Refrigeration Cycle)

چرخه تبرید ایده‌آل برای سیال عاملی که طی چرخه، تغییر فاز می‌دهد می‌باشد. تعداد سیالات عامل بکار رفته در سیستمهای تبرید تراکم بخار، از تعداد سیالات عامل در چرخه‌های قدرت بخار بیشتر است. در ابتدا، در چرخه‌های تبرید تراکم بخار، آمونیاک و دی‌اکسید کربن بکار می‌رفت که هر دو بسیار سمی و خطرناک می‌باشند. اخیراً سیالهای عامل عمده مورد استفاده عبارتند از: هیدروکربنهای هالوژنه که در بازار با نام تجاری فرئون و ژناترون معروف هستند مثل فلورئورو کربن‌ها یا CFCS که از لحاظ شیمیایی در دمای محیط بسیار پایدار می‌باشند، مخصوصاً آنهایی که فاقد اتم هیدروژن هستند که اگر گاز از دستگاهی به بیرون نشت نماید، آثار ویران کننده‌ای دارد.



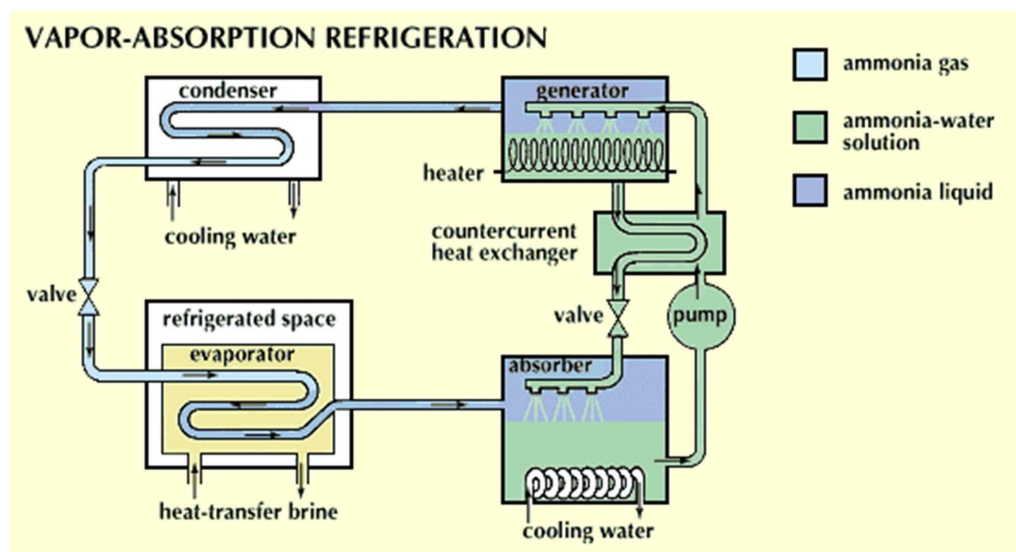
شکل ۱-۴ - چرخه تبرید تراکم بخار ساده

مطلوب ترین سیال عامل به HFCS معروف می‌باشد و اتم کلر ندارد. دو نکته مهم در انتخاب سیال عامل عبارتند از:

- دمایی که مقرر است سرد شود
- دستگاههای مورد نیاز

۲- چرخه تبرید جذبی آمونیاک

در چرخه جذبی آمونیاک، تعداد دستگاههای بکار رفته در مقایسه با چرخه تبرید تراکم بخار بیشتر می‌باشد. تفاوت این دو چرخه، در نحوه تراکم سیال است. در چرخه تبرید جذبی آمونیاک، از پمپ برای تراکم استفاده می‌گردد، درحالیکه در چرخه تراکم بخار، از کمپرسور استفاده می‌شود. مشخصه اصلی چرخه تبرید جذبی آمونیاک در برابر چرخه تبرید تراکم بخار، اینست که به کار ورودی بسیار کمتری (فقط برای پمپاژ مایع)، نیاز است.



شکل ۱-۵ - چرخه تبرید جذبی آمونیاک

فصل دوم / انتقال جرم و عملیات واحد

انتقال جرم یکی از شاخه‌های پدیده‌های انتقال است که به بررسی انتقال ماده در اثر اختلاف پتانسیل شیمیایی می‌پردازد. عملیات انتقال جرم به وسیله انتقال یک ماده به داخل ماده دیگر در مقیاس مولکولی مشخص می‌شود. فرآیندهای انتقال جرم، فرآیندهایی است که توسط آنها، نیروی محرکه انتقال جرم، در یک محلول یا مخلوط ایجاد می‌شود. در عملیات انتقال جرم هیچیک از دو فاز در حال تعادل، حاوی تنها یک جزء نخواهد بود (البته یک مورد استثنا برای عملیات مرطوب‌سازی وجود خواهد داشت). همچنین وقتی دو فاز با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند، بلافاصله به تعادل نمی‌رسند و این فرایند تابعی از زمان می‌باشد. سیستم به مرور زمان در اثر نفوذ آهسته اجزاء از یک فاز به فاز دیگر، به تعادل نزدیک می‌گردد.

انتقال جرم و عملیات واحد

۱- تعاریف

(گاز-مایع) **stripping** : هنگامیکه جزء یا سازنده از فاز مایع به فاز گاز نفوذ نماید که همان عمل دفع می‌باشد، مانند دفع سولفید هیدروژن^{۲۲} از نفت خام

(گاز-مایع) **Gas Absorption** : هنگامیکه جزء یا سازنده از فاز گاز به فاز مایع نفوذ نماید که همان عمل جذب می‌باشد (عکس stripping)، مانند جذب سولفید هیدروژن بر روی محلول آمین (تفاوت بین دو عمل جذب و دفع، تنها مربوط به جهت نفوذ کننده می‌باشد)

(گاز-جامد و مایع-جامد) **adsorption** : هنگامیکه جزء یا سازنده از فاز گاز به سطح فاز جامد یا از فاز مایع به سطح فاز جامد نفوذ نماید که همان عمل جذب سطحی می‌باشد مانند جذب رطوبت هوا بر روی سیلیکاژل جهت ایجاد هوای ابزار دقیق مورد نیاز شیرهای کنترلی و اضطراری تاسیسات نفت، گاز و پتروشیمی

(گاز-مایع، گاز-جامد و مایع-جامد) **desorption** : عکس عمل Gas Absorption و adsorption می‌باشد، مانند خشک کردن و احیای سیلیکاژل در Air Dryer ها.

تفاوت drying با desorption : در خشک کردن علاوه بر انتقال جزء سازنده از سطح فاز جامد به فاز گاز، انتقال از درون ماده جامد به سطح آن نیز، صورت می‌گیرد.

(مایع-مایع) **Liquid- Liquid Extraction** : عملیات جداسازی که در آنها دو فاز نامحلول با یکدیگر تماس داده می‌شوند که همان استخراج از مایعات می‌باشد مانند استخراج استن از آب توسط تتراکلریدکربن

(مایع-جامد) **leaching** : عملیات جداسازی انتخابی یک سازنده از یک مخلوط جامد توسط یک حلال مایع که همان استخراج از جامدات می‌باشد مانند جداسازی روغن از پنبه‌دانه توسط هگزان، در واقع انتقال جزء سازنده از فاز جامد به فاز مایع می‌باشد.

(مایع-مایع) **osmosis** : حلال را از محلولی که در آن است با استفاده از غشایی که فقط بتواند حلال را از خود عبور دهد، جدا می‌کنند. عبور مواد از غشای نیمه تراوی سلول زنده، کار کلیه‌ها و بالا رفتن شیره گیاهی در درختان، مهمترین نمونه‌های اسمز می‌باشند. همچنین می‌توان به تهیه میوه خشک که نمونه‌ای از کاربرد صنعتی این فرایند در صنایع غذایی است، اشاره نمود.

(مایع-مایع) **Reverse Osmosis** : غلیظ شدن محلول با استفاده از فشار مخالف و غالب بر فشار اسمزی مانند شیرین کردن آب شور دریا. در این فرایند، با استفاده از فشاری مخالف و غالب بر فشار اسمزی، می‌توان سوی حرکت جریان حلال را معکوس نموده و حلال و حل شونده را به این ترتیب از یکدیگر جدا نمود.

(گاز-مایع) **humidification** : هنگامیکه جزء از فاز مایع خالص به فاز گاز که از چند جزء تشکیل یافته است، انتقال یابد که همان رطوبت دهی می‌باشد مانند تماس هوای خشک با آب که بخشی از آب به درون هوا تبخیر می‌گردد (مکانیسم کولر آبی)

(گاز-جامد) **drying** : هنگامیکه جزء یا سازنده از درون ماده جامد به سطح آن و سپس از سطح، به فاز گاز انتقال یابد که همان خشک کردن می‌باشد، این فرایند در صنایع مختلف از جمله کشاورزی، سرامیک، شیمیایی، غذائی، داروئی، کاغذ، چوب، معدن، پلیمر و نساجی کاربرد دارد.

²² H₂S

۲- اثر فشار و دما در جذب و دفع گاز در حلال مایع

در دمای ثابت، حلالیت گاز در مایع با ازدیاد فشار و در فشار ثابت، حلالیت گاز در مایع با کاهش دما، افزایش می‌یابد. بعنوان مثال فرایند جذب سولفید هیدروژن یا دی اکسیدکربن بر روی محلولهای آمین جهت جداسازی آنها از گاز در برج جذب^{۲۳} در دمای پایین و فشار بالا انجام می‌گیرد و جداسازی سولفید هیدروژن از نفت خام در برج عریان‌ساز^{۲۴} (فرایند دفع)، در دمای بالاتر و فشار پایین‌تر بهتر انجام می‌گیرد. این مشاهدات با قوانین راتولت اصلاح شده و هنری^{۲۵} (William Henry) قابل توضیح می‌باشند.

۳- قوانین نفوذ Fick

فیک (Adolf Eugen Fick) قانون اول^{۲۶} تجربی خود را باتوجه به تشابه نفوذ مولکولی با انتقال حرارت هدایتی، از کار فوریه (قانون هدایت فوریه) که در فصل چهارم یعنی مبحث انتقال حرارت و مبدل‌های حرارتی توضیح داده می‌شود، الهام گرفت و پیشنهاد داد که انتقال جرم تک بعدی ناشی از نفوذ مولکولی متناسب با گرادیان غلظت آن ماده در آن جهت می‌باشد. اما درواقع، نیروی محرک انتقال جرم، گرادیان یا اختلاف پتانسیل شیمیایی است و بنابراین شار انتقال جرم ناشی از نفوذ مولکولی را بایستی بر اساس "گرادیان یا اختلاف پتانسیل شیمیایی" آن جزء بیان نمود. در این حالت، بر اساس دو فرض زیر، می‌توان به رابطه اولیه پیشنهاد شده فیک، بر اساس گرادیان غلظتی رسید:

- برای یک محلول، اگر بتوان آن را ایده‌آل فرض نمود (رقت بی‌نهایت جزء مورد نظر) آنگاه ضریب فعالیت آن جزء، برابر با یک خواهد بود. برای یک مخلوط گازی، اگر بتوان مخلوط گازها را ایده‌آل فرض نمود (نیروهای بین مولکولی مشابه و درواقع، برابری نسبت مولی با نسبت حجمی اجزاء) آنگاه ضریب فوگاسیته آن جزء برابر با یک خواهد شد.
- غلظت کل ثابت باشد.

ضریب D در رابطه پیشنهادی فیک یا همان ضریب نفوذ جزء در یک مخلوط، پارامتر ثابتی است که بستگی به طبیعت اجزای سیستم و محیط اطراف اجزا (دما، فشار، غلظت و جنس اجزا) دارد.

قانون دوم فیک، از نوشتن موازنه ماده و رابطه کلی بقای جرم (معادله پیوستگی) برای هریک از سازنده‌های سیال و با درنظر گرفتن ساکن بودن سیال و عدم وجود واکنش شیمیایی بدست می‌آید که در مورد جامدات و سیالات ساکن بکار می‌رود. این قانون درواقع، نفوذ مولکولی را در حالت ناپایا توصیف می‌نماید.

۴- انواع دستگاههای انتقال جرم و انواع برجها

الف: دستگاههایی که در آنها فاز گاز پراکنده می‌شود (فاز گاز بصورت حباب یا کف در فاز مایع پراکنده می‌شود، فاز مایع، فاز پیوسته و فاز گاز، فاز پراکنده می‌باشد):

- مخازن مولد حباب: در این مخازن جریان گاز بصورت حبابهای ریزی درون مایع پراکنده می‌شود.
- مخازن مجهز به همزن: همزن‌ها می‌توانند تلاطمی با شدت زیاد تولید نمایند که علاوه بر حصول ضرایب انتقال جرم بالا، باعث پراکنده شدن موثر مایعات در گازها می‌شوند.

²³ Absorber Column

²⁴ Stripper Column

²⁵ Henry's Law

²⁶ Fick's First Law of Diffusion

- برجهای سینی‌دار

ب: دستگاههایی که در آنها فاز مایع پراکنده می‌شود (فاز مایع بصورت یک فیلم نازک و یا بصورت قطره درآمده و در فاز گاز پراکنده می‌شود)

- شستشو دهنده‌های ونتوری: مشابه اژکتورها^{۲۷} عمل می‌نمایند و تماس بین فاز گاز و مایع در اثر مکشی که بخاطر عبور مایع جاذب از گلوگاه ونتوری حاصل می‌شود، ایجاد می‌گردد. خصوصاً زمانی که مایع حاوی ذرات معلق باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- برجهای دیواره مرطوب^{۲۸}: در صنعت از آن برای جذب اسید کلریدریک در آب که توام با ایجاد گرمای زیادی می‌باشد، استفاده می‌شود و آب سرد برای خنک کردن در اطراف برج جریان دارد.
- پاشنده‌ها یا برجهای پاششی: مایع توسط یک نازل یا شیپوره به قطرات ریز تبدیل شده و در جریان گاز پراکنده می‌گردد. تماس دو فاز می‌تواند همسو یا ناهمسو باشد. از مزایای آن، کم بودن افت فشار در گاز و ایجاد اختلاط نسبتاً کامل می‌باشد.
- ستونهای پرشده: برای ایجاد سطح تماس زیاد بین دو فاز گاز و مایع، از پرکنها استفاده می‌شود. مایع و گاز می‌توانند بصورت متقابل و یا همسو در تماس با یکدیگر قرار گیرند.

۵- انواع سینی‌ها در برجهای سینی‌دار و بازده سینی‌ها

سینی کلاهکی (Bubble Cap Tray): در این نوع سینی بخار از مجرای دودکش ماندنی وارد کلاهک بالای مجرا گردیده و از طریق شکافهایی که در اطراف کلاهک موجود است، وارد فاز مایع می‌گردد. بازده این سینی‌ها بالا می‌باشد. افت فشار در سینی‌های کلاهکی بیشتر از سینی‌های دریچه‌ای و افت فشار در سینی‌های دریچه‌ای، بیشتر از سینی‌های مشبک می‌باشد. هزینه ساخت سینی‌های کلاهکی تقریباً دو برابر سینی‌های مشبک و دریچه‌ای می‌باشد. (ترتیب هزینه‌ها نیز مانند ترتیب افت فشار می‌باشد)

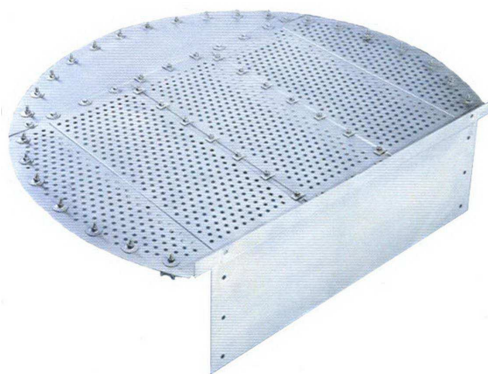


شکل ۲-۱ - سینی کلاهکی

²⁷ ejector

²⁸ Falling-film Tower/Column

سینی غربالی یا مشبک (Sieve Tray or Perforated): مانند یک غربال یا آبکش می‌باشد که از صفحات فلزی با سوراخهای کوچک گرد تشکیل شده‌است. حرکت سریع بخار از روزنه‌های موجود، باعث عدم ریزش مایع به سینی پایینی می‌گردد. این عبور از درون مایع، باعث حبابی شدن مایع و ایجاد لایه متلاطم در روی مایع سینی گردیده و ضمن تشکیل کف، انتقال جرم بین دو فاز را افزایش می‌دهد. این سینی، مزیت کارایی بالا و هزینه نصب و نگهداری پایین را دارا بوده و به طور گسترده‌ای در صنایع بکار می‌رود البته افزایش ارتفاع مایع در مجرای ریزش مایع و ماندگی زیاد آن در فاز گاز، ممکن است منجر به ایجاد پدیده طغیان در این نوع سینی گردد.



شکل ۲-۲ - سینی مشبک

سینی دریچه‌ای (Valve Tray): این سینی نوع تکامل یافته سینی غربالی می‌باشد به طوریکه اندازه سوراخها بزرگتر (35-40 mm) بوده و روی سوراخ درپوشی قرار گرفته است که با تغییر سرعت بخار بالا و پایین می‌رود (نوع Floating Valve Tray). در نوع Fixed Valve Tray این درپوش ثابت می‌باشد. در سرعت‌های پایین گاز، امکان ریزش مایع در سینی‌های دریچه‌ای کمتر است. این سینی‌ها تقریباً به علت بازده بالا و درصد جداسازی زیاد در طول فرآیند، متداولترین نوع سینی در صنایع شیمیایی می‌باشند.



شکل ۲-۳ - سینی دریچه‌ای

سینی لینده (Linde Tray): در این نوع سینی یک نوع صفحه سوراخ دار، با تغییراتی در نوع شبکه‌ها به منظور ایجاد اثراتی در جریان مایع ایجاد گردیده است، بطوریکه در سینی‌های بزرگ حتی با قطر بیش از ۱۰ متر، کاهش گرادیان مایع را باعث می‌گردد و با تغییر جهت جریان، سطوح غیرفعال را از بین برده و در سرتاسر سینی جریان قالبی مناسبی را ایجاد می‌کند.

سینی دودکشی (Chimney Tray): این سینی، در مواقعی استفاده می‌شود که بخواهیم از برج، جریان جانبی خارج کنیم و طراحی آن به عنوان یک دستگاه جمع‌آوری کننده یا به منظور تغذیه یک توزیع کننده مایع می‌باشد. این سینی برخلاف سینی‌های دیگر، از تماس فازهای مایع و بخار جلوگیری می‌نماید و به بخار اجازه می‌دهد بدون تماس با مایع بر روی سینی، به سوی بالا حرکت نماید.



شکل ۲-۴ - سینی دودکشی

بازده سینی: بصورت زیر تعریف می‌گردد (میزان نسبی نزدیکی رفتار یک سینی واقعی به یک سینی تعادلی):

$$\text{بازده} = \frac{\text{تغییرات غلظت واقعی}}{\text{تغییرات غلظت تعادلی}}$$

که بصورت نسبت تعداد سینی‌های ایده‌آل (تیوری یا تعادلی) مورد نیاز به تعداد سینی‌های واقعی مورد نیاز نیز می‌توان بیان نمود. یکی از شاخص‌ترین بازده‌ها، بازده‌ای موسوم به Murphree (Eger Vaughan Murphree) می‌باشد که معمولاً بر اساس فاز بخار تعریف می‌گردد.

۶- مشکلات برج‌های سینی‌دار

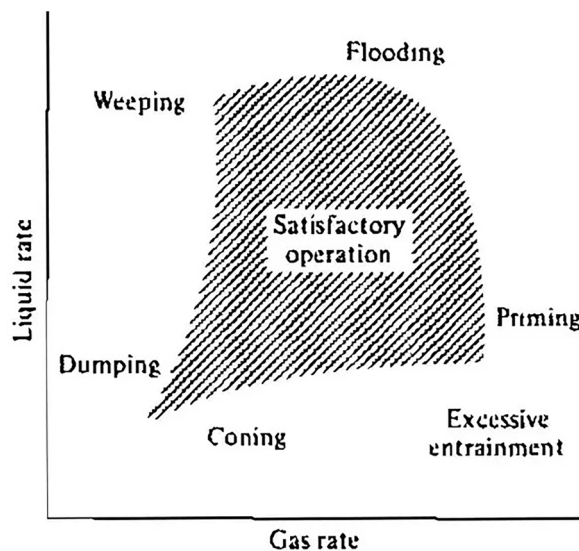
ماندگی (entrainment): برای افزایش بازده سینی‌ها می‌توان عمق مایع را روی سینی‌ها زیاد نمود و سرعت گاز جهت تشکیل حبابهای ریزتر را افزایش داد که در اثر این دو عمل، ماندگی قطرات مایع در جریان گاز وجود خواهد داشت.

طغیان (flooding): طغیان بعلت افت فشار زیاد در برج می‌باشد. وقتی اختلاف فشار بین دو سینی زیاد باشد، سطح مایعی که یک سینی با فشار کمتر را طی کرده و وارد سینی دیگری با فشار بالاتر می‌گردد، در محل ریزش صفحه بالایی، بیش از صفحه پایینی خواهد بود. اگر در اثر افزایش شدت گاز یا مایع، اختلاف فشار افزایش یابد، سطح ریزش مایع در محل ریزش بازهم بالاتر خواهد رفت تا همسطح با مایع موجود در سینی بالایی گردد.

وضعیت انسداد (**priming**): در مواردی که اختلاط گاز و مایع، کف فراوان تولید نماید، سرعت زیاد گاز ممکن است وضعیت انسداد را ایجاد نماید. کف فراوان ایجاد می‌شود و مقدار زیادی از مایع توسط گاز، از یک سینی به سینی دیگر حمل می‌گردد. اینحالت یک نمونه بسیار حاد از پدیده ماندگی می‌باشد و سبب افزایش شدت جریان مایع بین سینی‌ها و افزایش افت فشار فاز گاز شده که منجر به وضعیت طغیان خواهد گردید.

مخروطی شدن (**coning**): اگر شدت مایع کم باشد یا سطح مایع بر روی سینی کم باشد، گازی که از درون منافذ صفحه به بالا می‌رود، مایع را با خود به سمت بالا خواهد کشید.

چکه کردن (**weeping**): اگر شدت گاز خیلی کم باشد، قسمت اعظم مایع ممکن است از منافذ صفحه به پایین چکه کند. شرشر کردن (**dumping**): اگر شدت گاز فوق العاده کم باشد، تمام مایع از منافذ صفحه‌ها به پایین ریخته و اصولاً به محل ریزش مایع، نخواهد رسید.



نمودار ۱-۲ - نحوه عملکرد سینی غربالی

یک نمونه نمودار عملکرد سینی غربالی، از کتاب انتقال جرم (Treybal (Robert E. Treybal در بالا آورده شده است که طبق این شکل، مادامیکه سرعت‌های ظاهری گاز و مایع در محدوده عملیاتی قابل قبول^{۲۹} باشند، پدیده‌های نامطلوب توضیح داده شده بالا، رخ نخواهند داد. این نوع نمودار برای طراحی برجهای سینی‌دار بسیار مفید بوده و می‌بایست همراه مدارک دیگر، توسط سازنده ارایه گردد. فاکتورهای مهم در طراحی برجهای سینی‌دار، قطر برج، فاصله سینی‌ها و جزییات سینی می‌باشند.

۷- مقایسه بین برجهای سینی‌دار و پرشده

- افت فشار گاز: افت فشار گاز در ستونهای پرشده معمولاً کمتر از برج سینی‌دار می‌باشد که این امر در تقطیر تحت خلا بسیار مهم می‌باشد (در برجهای پرشده منظم، افت فشار از همه حالتها کمتر می‌باشد).

²⁹ Region of Satisfactory Operation

- ماندگاری مایع: در برجهای پر شده، ماندگاری مایع بمراتب کمتر از برجهای سینی‌دار می‌باشد (این امر در مواردی که مایع ممکن است در دماهای بالا تخریب گردد و نیاز است که زمان اقامت در برج حتماً کوتاه باشد، بسیار اهمیت دارد).
- نسبت مایع به گاز: اگر نسبت مایع به گاز کم باشد، برجهای سینی دار مناسب‌تر می‌باشند و اگر زیاد باشد، ستونهای پر شده مناسب‌ترند.
- سرد کردن مایع: ماریچهای سردکننده را به آسانی می‌توان در برجهای سینی‌دار نصب نمود و مایع را جهت تبرید از سینی‌ها خارج نمود (برای واکنشهای گرما زا مثلاً جذب گاز، برج سینی‌دار مناسب می‌باشد).
- جریانهای جانبی: جریانهای جانبی بیشتر در برجهای سینی‌دار استفاده می‌گردند.
- سیستمهای کف کننده: در مورد سیستمهای کف‌کننده در صورت استفاده از ستونهای پر شده، حبابهای کمتری از گاز وارد مایع می‌شود و نتیجتاً ستونهای پر شده برای این سیستمها مناسب‌تر می‌باشند.
- خوردگی: در شرایط خوردگی، هزینه‌های برجهای پر شده کمتر از برجهای سینی‌دار خواهد بود. پس برجهای پر شده، مناسب‌تر می‌باشند.
- کارهای تعمیراتی: تعمیرات درون برجهای سینی‌دار آسانتر انجام می‌گیرد. تمیز کردن برجهای پر شده، از آنجا که می‌بایست بیش از هر چیز، آنها را خالی کرده و سپس آنها را تمیز نمود، بسیار پرهزینه خواهد بود.
- وجود ذرات جامد: در صورت وجود ذرات جامد، هیچکدام از انواع برجه‌ها مناسب نمی‌باشند و مخازن دارای همزن و یا تصفیه کننده‌های ونتوری، بهترین انتخاب می‌باشند که این دو دستگاه فقط معادل یک مرحله محسوب می‌گردند.
- تمیز کردن: تمیز کردن برجهای سینی دار آسانتر می‌باشد.
- نوسانات زیاد حرارتی: در صورت وجود نوسانات زیاد حرارتی، پرکن‌های شکننده که تمایل به خرد شدن دارند مانند سرامیک و گرانیت، مناسب نبوده و برجهای سینی‌دار و یا برجهای پر شده از پرکن‌های فلزی مناسب‌تر می‌باشند.
- انباشتگی برج: وزن برجهای پر شده از پرکن‌های پلاستیکی، کمتر از برجهای سینی‌دار و وزن برجهای سینی‌دار کمتر از برجهای پر شده از پرکن‌های فلزی یا سرامیکی می‌باشند.

۸- پدیده مجراسازی^{۳۰} در برج‌های پر شده

در پر کردن نامنظم برج‌های پر شده، جرم حجمی پرکنها و یا تعداد پرکنها در واحد حجم، عموماً در اطراف دیواره‌های برج، کمتر می‌باشد که این مساله منجر به کشیده شدن مایع بسمت دیواره‌ها شده و در نتیجه گاز از نواحی مرکزی ستون، عبور می‌نماید که موجب توزیع نامناسب مایع در برج می‌شود. این مساله وقتی قطر پرکنها کمتر از $1/8$ قطر برج باشد، کمتر دیده می‌شود.

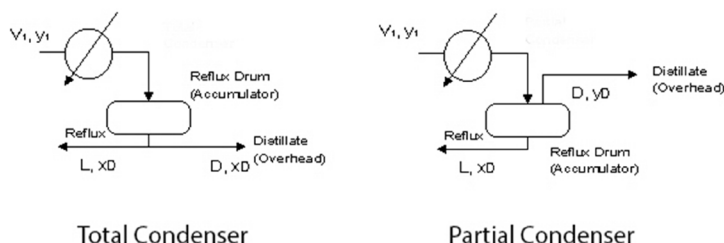
۹- انواع کندانسورها و ریبویلرها در برجهای تقطیر

کندانسورهایی که در برجهای تقطیر استفاده می‌شود، درواقع نوعی مبدل حرارتی می‌باشند که داخل لوله‌های آنها، یک مایع سرد جریان دارد.

کندانسور کامل (Total Condenser): در صورتی که تمام بخار بالای برج تقطیر به مایع تبدیل شود و بخشی از آن وارد برج شده و بخشی دیگر آن وارد مخزن جمع آوری محصول می‌گردد، کندانسور کامل می‌باشد.

³⁰ Flow Channeling

کندانسور جزیی (Partial Condenser): اگر بخشی از بخارهای حاصل مایع شده (مایع برگشتی) و بخشی دیگر بصورت بخار از چگالنده خارج شود، کندانسور جزیی خواهد بود. در مواقعی که نقطه جوش مایع فرار خیلی پایین باشد و نیز زمانیکه محصول بالای برج بصورت بخار مورد نیاز باشد، از این نوع کندانسور استفاده می‌گردد. کندانسور جزیی بعنوان یک مرحله تعادلی عمل می‌نماید. بار حرارتی این کندانسورها از حالت کامل، کمتر می‌باشد.



شکل ۲-۵ - انواع کندانسور در برجها

در نرم افزار Aspen HYSYS، کندانسور جزیی (سمت راست در شکل بالا) که تمامی مایع کندانس شده به برج تقطیر وارد می‌گردد، بنام Full Reflux و کندانسور جزیی که بخشی از مایع وارد برج و بخشی دیگر وارد مخزن جمع‌آوری محصول می‌گردد، بنام Partial تعریف می‌شود.

ریبویلرها یا جوش‌آورها همان مبدل‌های حرارتی هستند که معمولاً برای فراهم نمودن حرارت برای پایین برجهای تقطیر بکار می‌روند. حرارتی که بوسیله ریبویلر در پایین برج تامین می‌شود، در بالای برج توسط کندانسور خارج می‌گردد.

Kettle Reboiler: این نوع ریبویلر بسیار ساده و قابل اعتماد است. ممکن است نیاز به پمپاژ مایع کف ستون تقطیر به این نوع ریبویلر باشد. بخار از داخل تیوبها^{۳۱} جریان یافته و بصورت کندانس خارج می‌شود. مایع ته برج یا همان محصول پایین از سمت پوسته جریان می‌یابد. یک دیوار حایل مجموعه تیوبها^{۳۲} را از قسمت ریبویلر جدا می‌نماید.

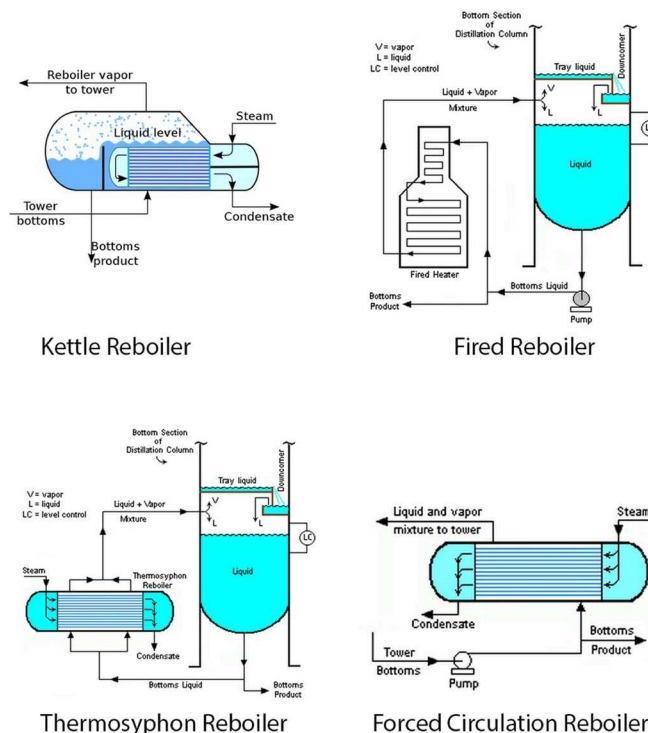
Thermosyphon Reboiler: در این نوع ریبویلر از اختلاف دانسیته بین ورودی مایعات پایینی برج به ریبویلر و خروجی مخلوط مایع و بخار برای ایجاد حرکت در مایع و رساندن آن از پایین برج به ریبویلر استفاده می‌شود.

Fired Reboiler: بصورت یک کوره بوده و یک پمپ برای گردش مایع پایین برج به درون لوله‌های انتقال حرارت بخشهای همرفت و تشعشع کوره مورد نیاز می‌باشد و منبع حرارتی نیز سوخت گاز یا مایع است.

Forced Circulation Reboiler: بصورت ریبویلر نوع دوم بوده اما از یک پمپ برای گردش مایع پایین برج استفاده می‌شود. این نوع، برای حالتی که ریبویلر از برج دور بوده و یا محصول پایین برج بسیار ویسکوز باشد، مفید است.

³¹ tube

³² Tube Bundle



شکل ۲-۶ - انواع ریبویلر

۱۰- رطوبت مطلق، اشباع و نسبی، دمای حباب مرطوب و خشک

رطوبت مطلق یا Absolute Humidity: جرم بخاری است که توسط واحد حجم گاز بدون بخار، حمل می‌گردد. رطوبتی که به این صورت تعریف می‌گردد، فقط به فشار جزئی بخار مخلوط، بستگی دارد.

رطوبت اشباع: اگر مقدار حداکثر بخار آب در دمای ثابتی وارد هوا گردد، این دما را دمای اشباع هوا گویند که هوا دارای رطوبت اشباع می‌باشد. فشار بخار آب را در اینجالت، فشار بخار اشباع شده در درجه حرارت مذکور می‌نامند.

رطوبت نسبی یا Relative Humidity: نسبت رطوبت مطلق در دمای معین، به رطوبت اشباع در همان دما می‌باشد. درواقع به صورت نسبت فشار جزئی بخار در مخلوط به فشار بخار اشباع آب، دردمای معین تعریف می‌گردد که معمولاً آن را بصورت درصد بیان می‌نمایند. لذا رطوبت نسبی ۱۰۰٪، یعنی گاز اشباع و رطوبت نسبی ۰٪، یعنی گاز بدون بخار.

درجه حرارت حباب مرطوب یا Wet-Bulb Temperature: همان دمایی است که مقداری از هوا اگر به حالت اشباع (رطوبت نسبی صد در صد) بواسطه تبخیر آب در آن با تامین گرمای نهان تبخیر توسط آن مقدار هوا سرد شده بود، می‌داشت. این دما، کمترین دمایی است که می‌توان تحت شرایط فعلی محیطی بوسیله فقط تبخیر آب، دست یافت.

درواقع دمای غیر تعادلی و در حالت پایایی است که وقتی مقداری مایع در شرایط آدیاباتیک، در جریان پیوسته‌ای از گاز فرو برده می‌شود، ایجاد می‌گردد. این مقدار مایع در مقایسه با فاز گاز آن قدر کم می‌باشد که فقط تغییر ناچیزی در خواص گاز بوجود می‌آید و اثر این فرایند، محدود به مایع است. روش اندازه‌گیری این دما به این صورت است که دماسنج با فتیله اشباع از مایع خالص پوشانده شده و درون جریان گازی با دما و رطوبت معینی فرو برده می‌شود. در ابتدا دمای مایع و گاز تقریباً مساوی می‌باشند. چون گاز اشباع شده نیست، مایع تبخیر می‌گردد و چون این فرایند آدیاباتیک است، گرمای نهان تبخیر ابتدا با سرد شدن مایع، تامین می‌گردد. با کاهش دمای مایع به کمتر از دمای گاز، گرمای محسوس از گاز به مایع بواسطه

هدایت انتقال می‌یابد. بالاخره حالت پایایی حاصل می‌گردد که در آن، دمای مایع طوری است که گرمای لازم برای تبخیر مایع و رساندن دمای آن به دمای گاز، تقریباً توسط گرمایی که از گاز به مایع منتقل می‌شود، موازنه می‌گردد. این دما همان دمای حباب مرطوب است.

این درجه حرارت از لحاظ ظاهری به دمای اشباع آدیاباتیک یا همان دمای حباب تر ترمودینامیکی شباهت دارد. درواقع در مخلوطهای هوا-آب در دما و فشار اتمسفریک، این دو دما تقریباً با یکدیگر مساوی است که البته این امر تصادفی بوده و این تساوی در مورد مخلوطهای هوا و آب در غیر از شرایط اتمسفریک معمولی و یا برای مخلوطهای غیر از هوا و آب، صدق نمی‌کند. درجه حرارت حباب تر، تفاوت‌های زیادی با دمای اشباع آدیاباتیک دارد. در ضمن در فرایند اشباع آدیاباتیک، دما و رطوبت گاز تغییر می‌نمایند و نقطه انتهایی، یک تعادل واقعی است نه یک حالت پایایی پویا. دمای حباب تر، به دمای حباب خشک و مقدار رطوبت هوا بستگی دارد.

درجه حرارت حباب خشک یا Dry-Bulb Temperature: گاهی اوقات از دماسنجی بدون پوشش در برابر هوا اما محافظت شده در برابر رطوبت و تشعشع، برای اندازه‌گیری درجه حرارت هوا، استفاده می‌شود که این دمای هوا، یعنی دمای ترمودینامیکی واقعی هوا، همان درجه حرارت خشک می‌باشد که نشان‌دهنده مقدار حرارت در هوا و مستقیماً متناسب با انرژی جنبشی میانگین مولکولهای هوا می‌باشد.

۱۱- مکانیسم کولر آبی و برج خنک کننده

کولر آبی: درواقع مکانیسم کار این کولرها، فرایند سرمایش تبخیری می‌باشد. هوای داغ و ترجیحاً خشک در تماس با آب سرد (آب شیر) که بر روی پوشال‌ها ریخته شده، قرار گرفته و آب در اثر فرایند تبخیر، گرمای نهان لازم برای تبخیر را از محیط اطراف خود شامل آب و هوا گرفته (طبیعتاً عمده گرمای گرفته شده از هوای داغ می‌باشد) و به این ترتیب مقداری از آب به صورت آدیاباتیک وارد هوا می‌شود و دمای هوا بر روی منحنی اشباع آدیاباتیک، کاهش یافته و خنک می‌گردد. دمای هوا را حداکثر می‌توان تا دمای اشباع آدیاباتیک پایین آورد. بالا بودن نرخ تبخیر، رطوبت نسبی را افزایش داده و ممکن است موجب عدم آسایش محیط شود. بطور کلی، روش سرمایش تبخیری مستقیم، باید در مناطقی انجام شود که رطوبت نسبی در آنجا کم باشد، در غیر اینصورت، میزان خنک شدن هوا ناچیز خواهد بود.

برج خنک‌کننده^{۳۳}: دستگاهی است که برای خنک‌سازی آبی که در فرایندهای خنک‌سازی سیستمهای تهویه مطبوع، نیروگاههای حرارتی، پالایشگاهها، پتروشیمی و دیگر واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بکار می‌رود. اساس کار تمام برجهای خنک‌کن بر مبنای ایجاد سطح تماس بیشتر بین جریان آب گرم و هوای خنک خشک و گاهاً انتقال جرم بین دو فاز مایع و گاز و در نتیجه، تبادل حرارتی بین این دو می‌باشد، درواقع این برجها از تبخیر آب برای خارج نمودن گرمای فرایندی و خنک نمودن سیال عامل نزدیک به دمای حباب مرطوب هوا یا در حالت برجهای خنک‌کن خشک مدار بسته، که منحصرأ بر اساس هوا بوده، جهت خنک نمودن سیال کاری به نزدیک دمای حباب خشک هوا، استفاده می‌نمایند (توضیح اینکه دمای حباب خشک هوای ورودی در ابتدا کمی کاهش و سپس افزایش می‌یابد). عموماً در برجهای خنک‌کن، آب گرم توسط لوله‌هایی به بالای برج منتقل شده و در آنجا یا بصورت طبیعی و یا با آبفشانهایی به سمت پایین برج به جریان می‌افتد که در طول این مسیر با توجه به نوع برج، به شیوه‌های مختلف با جریان هوای سرد خشک که از محیط بیرون وارد برج می‌گردد، برخورد می‌کند.

³³ Cooling Tower

براساس مکانسیم انتقال حرارت، برجهای خنک‌کن به سه دسته تقسیم می‌گردند:

- برجهای خنک‌کن مرطوب

- برجهای خنک‌کن خشک

- کولرهای سیالی یا برجهای خنک‌کن هایبریدی (خشک-مرطوب)

در برجهای خنک‌کن مرطوب (برجهای مدار باز)، آب گرم از بالای برج با عبور از packing ها (جهت افزایش سطح تماس جریان آب با هوا و نیز کاهش سرعت جریان آب که به دو صورت Film Packing و Splash Packing مورد استفاده قرار می‌گیرند) و برخورد با جریان هوای خنک، مقداری از آب تبخیر شده و عمده گرمای نهان تبخیر از آب گرفته شده و در عمل، آب تا دمایی در حدود 2.5°C تا 5°C بیشتر از دمای حباب مرطوب هوای ورودی، خنک می‌گردد که کمتر از دمای حباب خشک محیط می‌باشد. پارامتر محدود کننده انتقال حرارت، رطوبت نسبی هوای ورودی می‌باشد. مهمترین عیب این برجها، تبخیر بیش از حد آب و پاشیده شدن ذرات آب به اطراف می‌باشد.

در برجهای خنک‌کن با تماس غیرمستقیم که به برجهای خنک‌کن خشک مشهور هستند، کاهش دمای آب صرفاً تا دمایی نزدیک به دمای حباب خشک هوا امکان‌پذیر است. در این نوع برجها، آب گرم بجای عبور از packing ها، از لوله‌های پرده‌دار که با هوای خنک در تماس می‌باشند، عبور کرده و خنک می‌گردد. در مناطقی که به علت عدم وجود آب کافی باید از اتلاف آب و تبخیر بیشتر جلوگیری نمود، از این نوع برج استفاده می‌گردد. از معایب این نوع برجها، کاهش راندمان با افزایش دمای محیط اطراف می‌باشد.

کولرهای سیالی یا برجهای خنک‌کن هایبریدی (برجهای مدار بسته)، ترکیبی از برجهای خنک‌کن خشک و مرطوب می‌باشند و برای کاهش معایب و عوارض دو نوع برج قبلی بکار برده می‌شوند. راندمان انتقال حرارت بسیار به راندمان برجهای خنک‌کن مرطوب نزدیک است.

روشهای جریان یافتن هوای خنک، به صورت گردش طبیعی^{۳۴} با استفاده از نیروی شناوری یا بصورت گردش مکانیکی (گردش القایی^{۳۵} یا گردش اجباری^{۳۶}) با استفاده از فن‌های موتوری برقی انجام می‌گیرد، که در نوع گردش طبیعی، هزینه بهره‌برداری فقط شامل هزینه اولیه ساخت دودکش هذلولی شکل بلند برج می‌باشد. در نوع گردش مکانیکی که از فن‌های برقی استفاده می‌گردد، هرچند طول برج کوتاه‌تر و هزینه ساخت آن کمتر است اما انرژی الکتریکی زیادی صرف فن‌ها می‌شود. در نوع گردش القایی، از فن‌هایی در خروجی یا همان بالای برج جهت کشیدن هوا و در نوع گردش اجباری، از فن‌هایی در ورودی برج بصورت دمنده جهت فرستادن هوا به داخل برج استفاده می‌گردد.

۱۲- نسبت تعادل^{۳۷} و ضریب فرار^{۳۸}یت نسبی

نسبت تعادل: نسبت تعادل یک جزء معین بصورت کسر مولی آن جزء در فاز گازی به کسر مولی همان جزء در فاز مایع تعریف می‌گردد (دو فاز در حال تعادل) که در زیر فشارهای 100 Psia برای محلولهای ایده‌آل، (با توجه قوانین راولت و

³⁴ Natural Draft

³⁵ Induced Draft

³⁶ Forced Draft

³⁷ K value or Vapor-Liquid Distribution Ratio

³⁸ Relative Volatility

دالتون^{۳۹} برای محلولها و مخلوطهای ایده‌آل این مقدار تابعی از دما و فشار سیستم یا مخلوط می‌باشد. هرچه نسبت تعادل یک جزء بیشتر باشد، به این معنی است که آن جزء در مخلوط فرارتر است یا به عبارت دیگر این جزء بیشتر در فاز بخار

$$K_A = \frac{y_A}{x_A} = \frac{\phi_A^L}{\phi_A^V}$$
 حضور دارد تا در فاز مایع

ضریب فراریت نسبی: کمیتی می‌باشد که برای سنجش میزان تمایل دو ماده در یک مخلوط به تبخیر و تبدیل شدن به فاز بخار بکار می‌رود و درواقع معیار کمی اختلاف بین غلظت‌های فاز مایع و بخار برای جداسازی اجزاء در فرایند تقطیر می‌باشد.

این کمیت در طراحی سیستم‌های صنعتی تقطیر بسیار کاربرد دارد و برابر است با $\alpha_{AB} = \frac{\frac{y_A}{x_A}}{\frac{y_B}{x_B}} = \frac{K_A}{K_B}$ که سرعت عمل تقطیر و امکان‌پذیری آن به بزرگی این کمیت بستگی دارد.

اعداد بدون بعد:

$$Sc = \frac{\text{نفوذ مومنتم}}{\text{نفوذ جرمی}} = \frac{\mu}{\rho D} \quad \text{عدد اشمیت - تشابه بین انتقال مومنتم و انتقال جرم (نفوذ جرمی)}$$

که متناظر با عدد پرانتل، $Pr = \frac{\mu C_p}{K}$ در انتقال حرارت می‌باشد.

$$Le = \frac{\text{نفوذ حرارتی}}{\text{نفوذ جرمی}} = \frac{K}{\rho C_p D} = \frac{Sc}{Pr} \quad \text{عدد لوئیس - تشابه بین انتقال حرارت (نفوذ حرارتی) و انتقال جرم (نفوذ جرمی)}$$

$$Sh = \frac{\text{انتقال جرم جابجایی}}{\text{انتقال جرم نفوذی}} = \frac{F}{\frac{CD_{AB}}{L}} = \frac{FL}{CD_{AB}} \quad \text{عدد شروود}$$

که متناظر با عدد ناسلت، $Nu = \frac{hL}{K}$ در انتقال حرارت می‌باشد.

$$Pe = \frac{\text{انتقال جرم بواسطه جریان سیال}}{\text{انتقال جرم نفوذی}} = Re.Sc = \frac{Lu}{D_{AB}} \quad \text{عدد پکلت}$$

$$St = \frac{\text{انتقال جرم جابجایی}}{\text{انتقال جرم بواسطه جریان سیال}} = \frac{Sh}{Re.Sc} = \frac{Sh}{Pe} = \frac{F}{Cu} \quad \text{عدد استانتون}$$

$$Gr = \frac{\text{نیروی شناوری}}{\text{نیروی لزجی}} = \frac{gL^3 \Delta \rho}{\rho \mu^2} \quad \text{عدد گرافش}$$

³⁹ Dalton's Law (John Dalton)

فصل سوم / مکانیک

سیالات و سیالات دوفازی

مکانیک شاره‌ها یا مکانیک سیالات علم بررسی رفتار سیالات در حالت سکون و یا حرکت است که به مقوله برهمکنش میان آنها و اجسام ساکن یا متحرک واقع در داخل یا پیرامون آنها می‌پردازد و یکی از شاخه‌های وسیع در مکانیک محیط‌های پیوسته را تشکیل می‌دهد. مکانیک سیالات هم با همان اصول مربوط به مکانیک جامدات آغاز می‌شود ولی آن‌چه که سرانجام آن دو را از یکدیگر متمایز می‌نماید، این است که سیالات بر خلاف جامدات قادر به تحمل تنش برشی نیستند. با دانستن این مساله، معادله‌هایی برای تحلیل حرکت سیالات طرح‌ریزی شده است. این معادلات به احترام "ناویر و استوکس" دو ریاضی‌دان فرانسوی و ایرلندی به نام معادلات ناویر-استوکس معروف هستند. نیروی برشی همان مولفه مماسی نیرو بر سطح مورد نظر می‌باشد. حال اگر این سطح آنقدر کوچک شود که به یک نقطه تبدیل گردد، آنگاه حد نیروی برشی بر این سطح نقطه‌ای را تنش برشی در آن نقطه می‌نامند. در مکانیک سیالات، مباحث استاتیک و دینامیک مایعات و گازها نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

مکانیک سیالات و سیالات دوفازی

۱- سیال نیوتنی، لزجت مطلق یا دینامیکی و لزجت سینماتیکی، فشار مطلق^{۴۰} و فشار gauge

برای سیال نیوتنی رابطه بین du/dy و τ در معادله $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ بصورت خطی گذرنده از مبدا می‌باشد (μ با شیب ثابت از مبدا می‌گذرد). گرانروی یک سیال نیوتنی^{۴۱} مستقل از نیروی وارده بر آن است، اگر چه می‌تواند تابعی از دما، فشار و ترکیب شیمیایی (برای موادی که خالص نیستند) باشد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{لزجت مطلق یا دینامیکی } (\mu = \text{poise}) \\ \text{لزجت سینماتیکی } (\nu = \text{stock}) \end{array} \right. \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

✓ فشار gauge: فشار یک سیستم بسته را فشار gauge گویند، مانند فشار داخل لوله.

✓ فشار مطلق: مجموع فشار اتمسفر و gauge را گویند.

✓ فشار اتمسفر محلی و استاندارد به ترتیب فشار جو در هر نقطه که بستگی به دو عامل ارتفاع و شرایط آب و هوایی دارد و فشار جو در سطح آبهای آزاد که همواره مقداری ثابت است.

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Kpa} = 1.01325 \text{ bar} = 14.695 \text{ Psi} = 760 \text{ mmHg} = 10332.27 \text{ mmH}_2\text{O}$$

✓ فشار نسبی^{۴۲}: تفاضل فشارهای gauge و اتمسفر را گویند.

۲- معادلات اولر (Leonhard Euler) و برنولی (Daniel Bernoulli)

با نوشتن موازنه نیرو-اندازه حرکت (معادله بقای اندازه حرکت) در سه جهت مختصات که بر قانون دوم نیوتن برای حرکت سیالات استوار می‌باشد، به معادلات دیفرانسیل جزئی پیچیده‌ای با تعداد مجهول زیاد خواهیم رسید که با اعمال رابطه‌ای که ناویر^{۴۳} (۱۷۸۵-۱۸۳۶) و استوکس^{۴۴} (۱۸۱۹-۱۹۰۳) بین میدان تنش و تغییر شکل میدان، در اثر تغییر مکانی و زمانی میدان سرعت بدست آوردند، معادلات ناویر-استوکس حاصل می‌شوند که یکی از روشهای حل این معادلات عبارتست از ساده سازی آنها با فرضیات زیر که نهایتاً به معادله اولر خواهیم رسید:

- فرضیات معادله اولر:
 - جریان در امتداد یک خط جریان باشد
 - جریان بدون اصطکاک باشد یا $\mu = 0$ (تنش برشی صفر باشد)
 - جریان پایدار باشد (در هیچ نقطه‌ای از سیال، تغییری نسبت به زمان رخ ندهد)

معادله اولر از نوشتن قانون اول ترمودینامیک با فرضهای زیر نیز بدست می‌آید:

⁴⁰ Absolute Pressure

⁴¹ Isaac Newton

⁴² relative

⁴³ Claude-Louis Navier

⁴⁴ George Gabriel Stokes

- فرایند آدیاباتیک ($Q=0$)
- فرایند بدون انجام کار (نظیر عبور جریان از درون یک شیپوره)
- فرایند حالت پایدار- جریان پایدار
- فرایند برگشت پذیر

➤ فرض معادله برنولی: علاوه بر فرضیات معادله اولر، سیال تراکم ناپذیر باشد یا $\rho = cte$

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gZ = cte$$

مجموع انرژی فشاری ($P/\rho g$) هد فشاری می‌باشد، انرژی جنبشی ($V^2/2g$) هد سرعتی می‌باشد و انرژی پتانسیل (Z) هد ارتفاعی می‌باشد در هرجا، مقداری ثابت می‌باشد. معادله برنولی را می‌توان بصورت زیر بازنویسی نمود:

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gZ = cte$$

در این حالت، به جمله اول یا P ، فشار استاتیکی و به جمله دوم یا $\frac{1}{2}\rho V^2$ فشار دینامیکی اطلاق می‌گردد.

۳- انواع جریانها در سیالات تک فازیه، عدد رینولدز، انواع افت‌ها در لوله‌ها و دیاگرام مودی

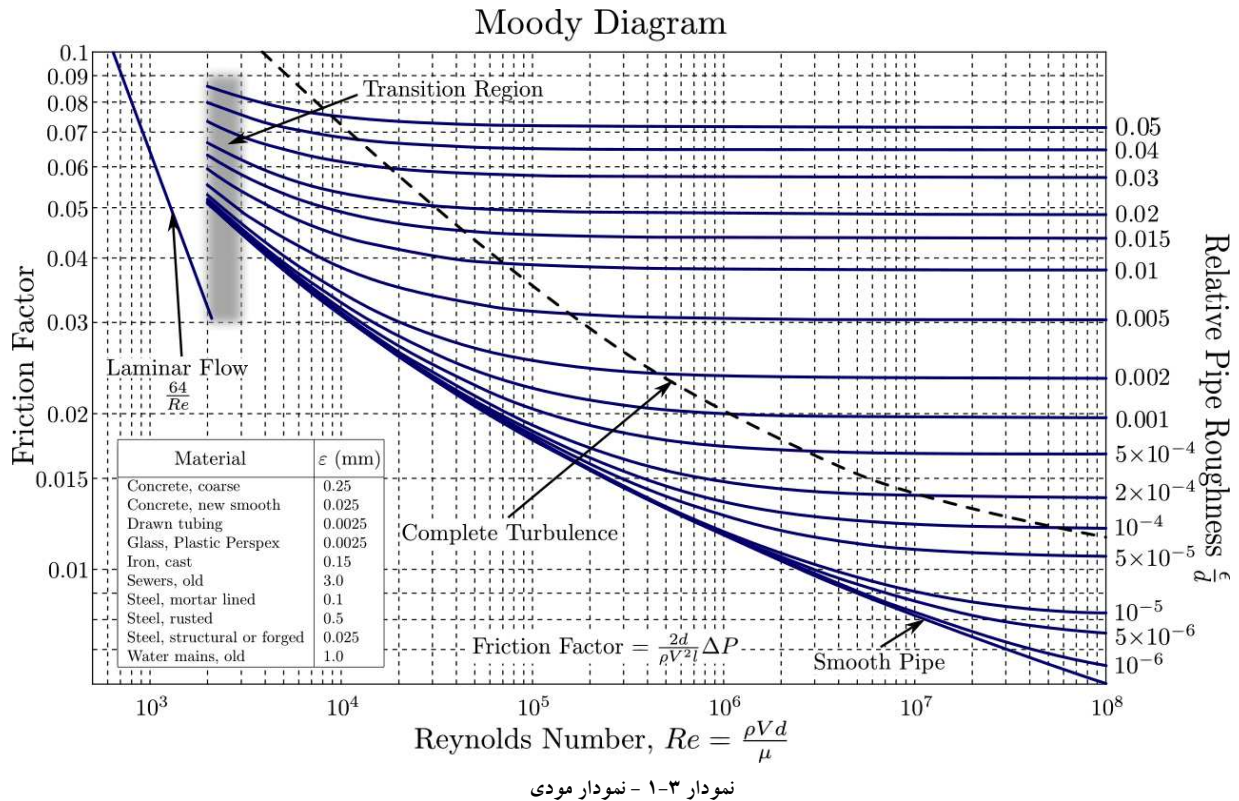
$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad \left\{ \begin{array}{l} Re \leq 2000 \text{ (جریان آرام)} \\ Re \geq 4000 \text{ (جریان آشسته)} \\ 2000 \leq Re \leq 4000 \text{ (جریان انتقالی)} \end{array} \right.$$

انواع افت‌ها: افت اصطکاکی و افت‌های فرعی: شامل افت در اثر اتصالات و انبساط و انقباض ناگهانی و تدریجی

دیاگرام مودی^{۴۵} (Lewis Ferry Moody): در این نمودار ضریب اصطکاک یعنی f ، برحسب عدد رینولدز برای زبری‌های نسبی یا $\frac{\epsilon}{D}$ های مختلف لوله‌ها رسم شده است که البته در ناحیه آرام، رابطه بین f و عدد رینولدز بصورت $f = \frac{64}{Re}$ می‌باشد. با استفاده از معادله دارسی-ویسباخ^{۴۶}، می‌توان افت هد ناشی از اصطکاک را برای سیالات تراکم ناپذیر داخل لوله، در جریانهای آرام و آشسته بدست آورد (Henry Philibert Gaspard Darcy & Julius Ludwig Weisbach). f همان ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ یا مودی می‌باشد.

⁴⁵ Moody Diagram

⁴⁶ Darcy-Weisbach Equation



۴- مفاهیم لغزش، مایع تجمع یافته و سرعت ظاهری گاز و مایع و انواع رژیم‌های جریان در جریانهای دوفازی

لغزش: معمولاً هنگامیکه مخلوط نفت و گاز درون یک خط لوله جریان می‌یابند، فاز گاز به علت دانسیته و گرانشی پایین‌تر نسبت به فاز مایع، با سرعت بیشتری حرکت خواهد نمود. لغزش در اصطلاح جریان دوفازی، به عقب ماندگی و یا کندی سرعت حرکت فاز مایع نسبت به فاز گاز اطلاق می‌گردد.

مایع تجمع یافته^{۴۷}: نسبت حجم قسمتی از لوله که توسط مایع اشغال شده است به حجم همان قسمت از لوله (شامل حجم مایع و گاز) می‌باشد.

سرعت ظاهری^{۴۸}: نسبت میزان جریان حجمی هر فاز، هنگامیکه بطور مستقل تمام فضای لوله را اشغال کرده باشد، به سطح مقطع کل همان لوله

Beggs-Brill (H. Dale Beggs & James P. Brill) در سال ۱۹۷۳ سه نوع الکوی اصلی جریان را برای جریانهای افقی پیشنهاد دادند:

- جریان جداشده (Segregated Flow): هنگامیکه دو فاز گاز و مایع در امتداد محور جریان، پیوسته باشند که شامل الگوهای جریانی زیر می‌باشد:

- جریان لایه‌ای (Stratified Flow)

- جریان موجی (Wavy Flow)

- جریان حلقوی (Annular Flow)

⁴⁷ Liquid Holdup

⁴⁸ Superficial Velocity

- جریان متناوب (Intermittent Flow): هنگامیکه دو فاز گاز و مایع بصورت بسته‌های متناوب جاری گردند که شامل الگوهای جریانی زیر می‌باشد:
 - جریان قالبی (Plug Flow)
 - جریان لخته‌ای (Slug Flow)
- جریان توزیع‌شده (Distributed Flow): هنگامیکه یکی از فازهای گاز یا مایع بطور پیوسته و نسبی در دو امتداد موازی و عمود بر محور لوله، جریان یابد که شامل الگوهای جریانی زیر می‌باشد:
 - جریان حبابی (Bubble Flow)
 - جریان قطره‌ای (Mist Flow)

جریان لایه‌ای (Stratified Flow): در این نوع الگوی توزیع، گاز و مایع کاملاً از یکدیگر جدا بوده و فاز گاز که عموماً دارای سرعت بیشتری نسبت به فاز مایع می‌باشد، در قسمت فوقانی و فاز مایع در ناحیه پایین درون خط لوله، حرکت می‌کند. فصل مشترک بین دوفاز نسبتاً منظم و صاف می‌باشد.

جریان موجی (Wavy Flow): در جریان لایه‌ای، اگر سرعت فاز گاز مجدداً افزایش یابد، بین دو فاز گاز و مایع، تنش ایجاد خواهد شد که خود باعث پیدایش امواج در فصل مشترک دو فاز می‌گردد که این امواج در امتداد جریان، حرکت می‌کنند. جریان حلقوی (Annular Flow): در این نوع جریان، دو فاز گاز و مایع بصورت دو استوانه متداخل (مایع بر روی جداره داخلی لوله و گاز در مرکز لوله قرار دارد) درون لوله، خواهند بود. اینحالت هنگامی شکل خواهد گرفت که سرعت ظاهری گاز بیشتر از ۲۰ فوت بر ثانیه باشد.

جریان قالبی (Plug Flow): با افزایش سرعت فاز گاز در جریان حبابی، تعداد حبابهای فاز گاز افزایش می‌یابد، بطوریکه از برخورد و بهم پیوستن آنها، حبابهای بزرگ توبی شکل، نزدیک به جداره بالایی لوله، تشکیل خواهد شدند. جریان لخته‌ای (Slug Flow): در مواردی که نرخ جریان مایع زیاد باشد، افزایش سرعت گاز منجر به افزایش دامنه موجهای سطحی مایع در فصل مشترک دو فاز می‌گردد که ضمن آن، موجها به جداره فوقانی لوله برخورد نموده و لخته‌های مایع^{۴۹} تشکیل می‌شود. از ویژگی‌های این نوع رژیم جریانی، می‌توان از نوسانات منظم در تغییرات فشار و مقدار مایع تجمع یافته نام برد که معیار مناسبی برای تشخیص این نوع رژیم جریانی می‌باشد.

جریان حبابی (Bubble Flow): هنگامیکه نرخ حجمی گاز نسبتاً کم و نرخ حجمی مایع نسبتاً زیاد باشد، جریان حبابی بصورت حبابهای کوچک گاز تحت تاثیر اختلاف دانسیته در قسمت فوقانی لوله ظاهر می‌گردد.

جریان قطره‌ای (Mist Flow): با افزایش نرخ جریان فاز گاز در جریان حلقوی، فاز گاز، فاز مایع را بصورت قطرات ریزی انتقال خواهد داد. در مواردی که نرخ جریان گاز، نسبتاً زیاد و نرخ جریان مایع نسبتاً کم باشد، فاز مایع در داخل فاز گاز بصورت ذرات بسیار ریز و پراکنده تبدیل شده و اصطلاحاً فضایی شبیه به مه بوجود می‌آید که در این نوع حالت، رژیم جریانی را مه‌آلود^{۵۰} می‌نامند. بعضی از خطوط لوله انتقال سیستمهای گاز میعانی، در این نوع الگوی جریانی قرار دارند.

(Aziz-Govier (K. Aziz & G.W. Govier در سال ۱۹۷۲ چهار الگوی جریانی را برای جریانهای عمودی پیشنهاد دادند:

جریان حبابی (Bubble Flow): در این نوع رژیم جریان، فاز مایع بصورت پیوسته و فاز گاز بصورت پراکنده (حبابهای ریز) درون مایع، بطرف بالا حرکت می‌کند. سرعت فازها در این نوع جریان، بدلیل اختلاف جرم ویژه فازها، متفاوت می‌باشد.

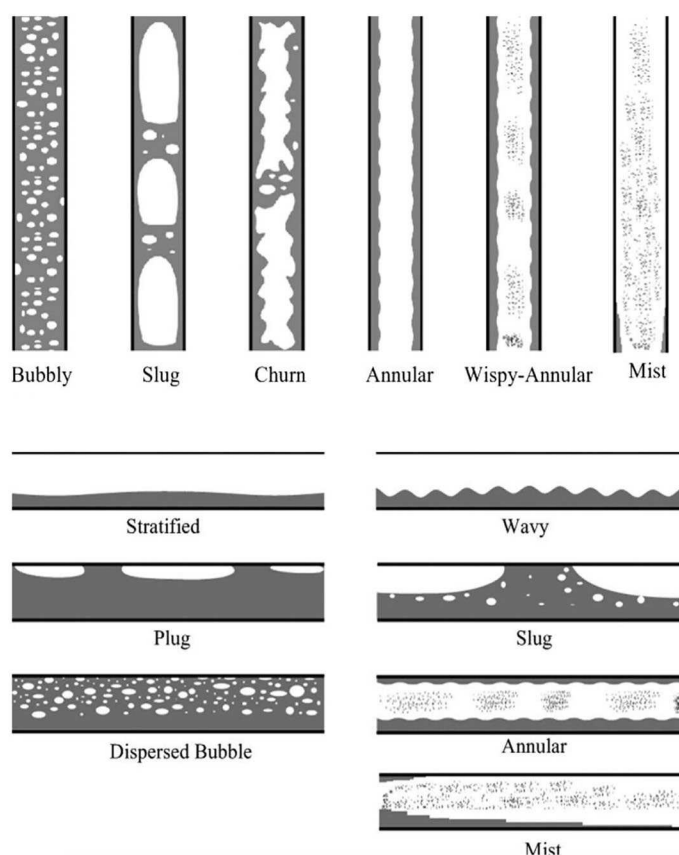
⁴⁹ Slug

⁵⁰ Froth Flow

جریان لخته‌ای (Slug Flow): در جریان حبابی با افزایش سرعت فاز گاز، تعداد حبابها افزایش یافته و از برخورد و بهم پیوستن آنها با یکدیگر، چند گنبد چتری شکل گازی بوجود می‌آید که در قسمتهایی از لوله، تمام سطح مقطع لوله را اشغال می‌کنند. در عمل، این نوع جریان بصورت منقطع از فازهای مایع و گاز، دارای افت فشار زیاد و نیز از نظر فرایندی با ایجاد سر و صداهای ناهنجار و آسیب دیدگی تجهیزات همراه می‌باشد.

جریان کف آلود یا انتقالی (Churn or Transition Flow): در جریان لخته‌ای با افزایش سرعت جریان، توده‌های گاز شکسته شده و جریان ناپایدار و انتقالی بین دو جریان لخته‌ای و حلقوی، شکل خواهد گرفت. در خطوط لوله جریان با قطر زیاد، حرکت نوسانی مایع به سمت بالا و پایین رخ خواهد داد، درحالیکه در لوله‌های باریک، این حرکت نوسانی بوقوع نخواهد پیوست و حرکت انتقالی بین دو نوع جریان لخته‌ای و حلقوی، بسیار گذرا خواهد بود.

جریان حلقوی-قطره‌ای (Annular-Mist Flow): در این نوع الگوی جریان، فاز گاز بصورت پیوسته و فاز مایع بصورت ذرات ریز به‌همراه آن در حرکت می‌باشد، بطوریکه فاز گاز، فاز مایع را بصورت قطرات ریز انتقال می‌دهد. در اینحالت، تغییرات فشار سیال توسط فاز گاز کنترل می‌گردد. در سرعت ظاهری فاز گاز بیش از 30 ft/sec و سرعت ظاهری فاز مایع کمتر از 2 ft/sec این نوع جریان به جریان حلقوی تبدیل خواهد شد.



شکل ۳-۱ - الگوهای جریان دوفازی در خطوط لوله افقی و قائم

در طراحی خطوط لوله جریان دوفازی، سعی می‌گردد حتی الامکان از ایجاد چنین رژیم‌های جریانی، اجتناب گردد. در مورد جریانهایی عمودی رو به پایین، انواع الگوهای جریانی نظیر موارد فوق (البته بغیر از الگوی جریان انتقالی) وجود خواهند داشت. در این نوع جریانه‌ها، اکثراً رژیم جریان حلقوی مشاهده خواهد شد.

الگوهای جریان دوفازی گاز-مایع در خطوط لوله شبیدار، تابع شیب خط لوله می‌باشند. بطوریکه برای هر شیب معین، الگوی جریانی مشخصی می‌تواند وجود داشته باشد.

۵- مشکلات عملیاتی خطوط لوله انتقال جریانهای دوفازی

وجود آب و مایعات گازی در خطوط لوله جمع‌آوری و انتقال گاز طبیعی و نیز گاز همراه و محلول در خطوط لوله انتقال نفت خام، موجب پیدایش مشکلات زیر در حین عملیات انتقال و تولید می‌شوند:

❖ تجمع مایعات در خط لوله انتقال گاز

این مساله بخصوص در نواحی کم ارتفاع‌تر بوجود می‌آید و نهایتاً باعث کاهش سطح مقطع لازم برای عبور فاز گاز و در نتیجه افزایش افت فشار در خط لوله و کاهش راندمان خطوط لوله انتقال جریان می‌گردد. این مشکل در مورد انتقال سیال چند فازی مثل نفت خام با تجمع آب در نواحی ذکر شده نیز وجود دارد. برای حل مشکلات فوق، از توپک جهت تمیز نمودن خط لوله استفاده می‌گردد.

❖ پدیده خوردگی و ساییدگی جدار داخلی خط لوله

پدیده ساییدگی:

در خطوط لوله انتقال گاز، بعلا افزایش سرعت ظاهری فاز گاز و حرکت سریع لخته‌های مایع تجمع یافته، تنش‌های مکانیکی بر دیواره خط لوله ایجاد می‌گردد، همچنین در شرایطی که سرعت حرکت جریان سیال زیاد باشد، بعلا وجود ذرات جامد یا حبابهای گاز معلق در محیط، بدنه فلز خط لوله دچار ساییدگی می‌گردد که باعث بروز مشکلات نشستی در خط لوله انتقال جریان خواهد بود.

پدیده خوردگی:

خوردگی در خطوط لوله انتقال جریان، پدیده‌ای پیچیده و یک فرایند الکتروشیمیایی بوده و علل مختلفی می‌تواند داشته باشد که بخاطر رسوب و تجمع مواد ناشی از خوردگی بدنه لوله، منجر به کاهش راندمان خط لوله و نیز بروز نشستی خواهد شد. خوردگی بواسطه لخته‌های مایع تجمع یافته و نیز آب در کف لوله انتقال بوجود می‌آید. روش‌های جلوگیری از خوردگی جدار داخلی خطوط لوله عبارتند از: تزریق مداوم مواد شیمیایی ضد خوردگی و یا کندکننده خوردگی (عموماً ترکیبی از محلول‌های آلی آمینی) و استفاده از پوششهای داخلی خط لوله نظیر پلی اورتان و اپوکسی فنولیک

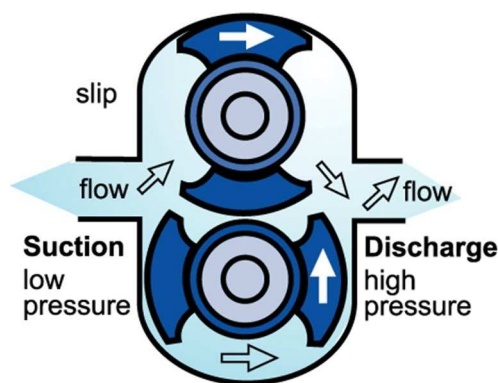
❖ تشکیل هیدرات گاز طبیعی (در خطوط لوله انتقال گاز و نیز سیال هیدروکربنی)

تشکیل هیدرات گازی در خطوط لوله انتقال سیال باعث افزایش افت فشار، انسداد مسیر و کاهش ایمنی خط لوله و گاه انفجار خط لوله انتقال جریان می‌گردد. در مورد این پدیده و یکی از روشهای جلوگیری از آن در فصل هفتم بیشتر بحث می‌شود. بطور کلی روشهای جلوگیری از تشکیل هیدرات گازی شامل: نگهداری فشار جریان در پایین فشار تشکیل هیدرات در یک دمای معین (که کاربردی آنچنانی ندارد)، نگهداری دمای جریان در بالای دمای تشکیل هیدرات در یک فشار معین، جلوگیری از ایجاد فاز مایع آب و یا حل شده در فاز مایع هیدروکربنی و یا بصورت بخار در خطوط لوله و تزریق مواد شیمیایی ممانعت کننده تشکیل هیدرات گازی می‌باشد.

۶- پمپ، انواع آن و علت بستن موازی و سری پمپهای دینامیکی

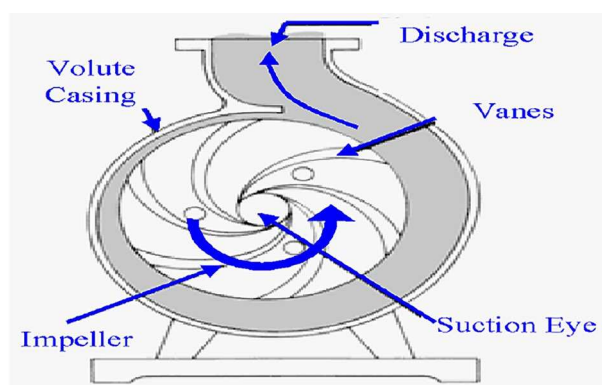
تعریف: به طور کلی پمپ وسیله‌ای می‌باشد که سیال مایع را از نقطه‌ای به نقطه دیگر جابجا می‌نماید و درواقع برای این جابجایی، انرژی مکانیکی را از یک منبع خارجی گرفته و به سیال انتقال می‌دهد. پمپها نقشی معادل قلب یک انسان را در یک مجتمع صنعتی ایفا می‌نمایند.

پمپهای جابجایی مثبت (Positive Displacement Pumps): در این پمپها انتقال انرژی به سیال به صورت متناوب یا پریودیک صورت می‌پذیرد. این انرژی با استفاده از اعمال نیرو به یک یا چند مرز متحرک که دارای حجمی از سیال می‌باشد، به سیال وارد شده و موجب افزایش فشار آن می‌شود. در این پمپها برخلاف پمپهای گریز از مرکز که سیال تحت اثر نیروی گریز از مرکز در آن پرتاب می‌گردد، سیال را به دام انداخته و تحت فشار در داخل یک محفظه بسته می‌گذارد.



شکل ۳-۲ - پمپ جابجایی مثبت

پمپهای دینامیکی (Dynamic or Velocity Pumps): در این پمپها انتقال انرژی به سیال به طور دایمی بوده و طرز کار این نوع پمپها بر اساس افزودن انرژی جنبشی به مایعات می‌باشد. این انرژی غالباً بصورت سرعت دادن و حرکت دادن به مایع از طریق پروانه‌ها می‌باشد.



شکل ۳-۳ - پمپ گریز از مرکز

✓ ویژگی کلی پمپهای جابجایی مثبت (Positive Displacement Pumps):

- دبی آنها نمی‌تواند زیاد باشد ولی این پمپها هد (فشار) بالایی دارند

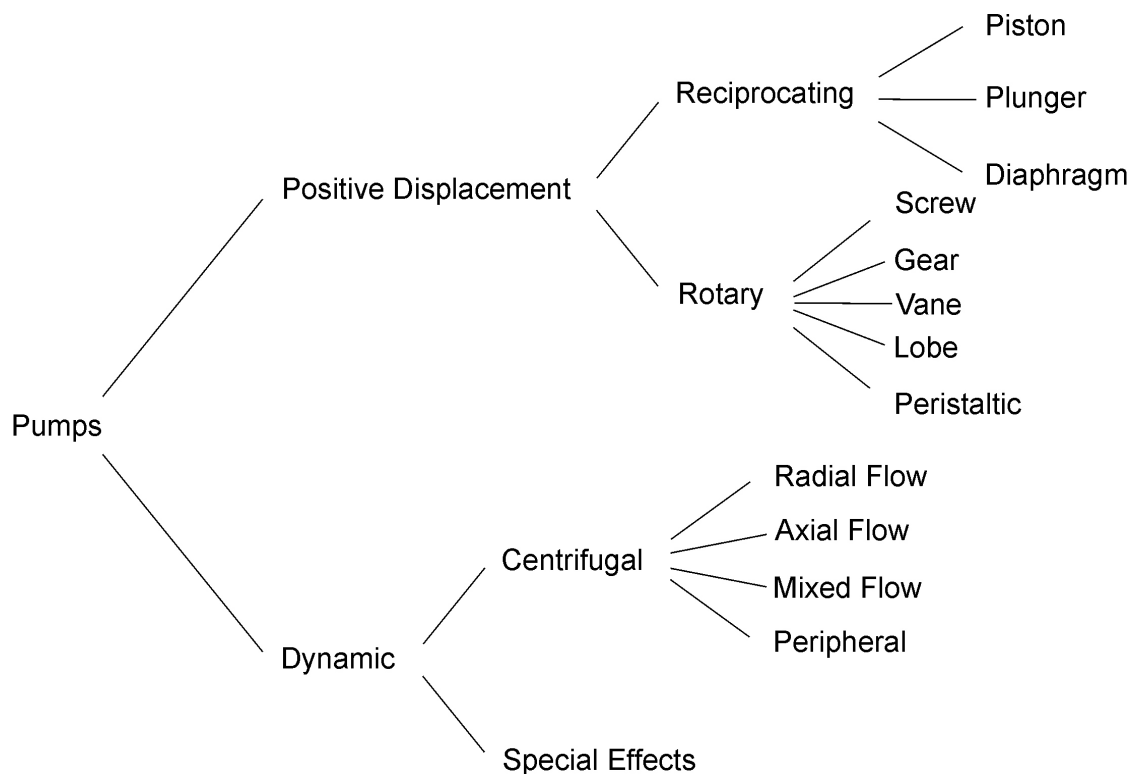
- Self-Priming می‌باشند
- انتقال انرژی به سیال متناوب می‌باشد
- برای مایعات با ویسکوزیته بالا قابل استفاده می‌باشند
- اگر خط خروجی^{۵۱} بسته شود، پمپ صدمه می‌بیند

❖ ویژگی پمپهای رفت و برگشتی (Reciprocating Pumps):

- دبی پایین و هد (فشار) بالایی دارند
- جریان مایع غیریکنواخت می‌باشد
- مزیت عمده آنها، امکان پمپاژ مایعات با ویسکوزیته بسیار بالا می‌باشد
- در صورت سرویس منظم، راندمان بالایی دارند

❖ ویژگی پمپهای دورانی (Rotary Pumps):

- دبی پایین و هد (فشار) متوسطی دارند
- جریان مایع یکنواخت می‌باشد
- برای مایعات با ویسکوزیته بالا قابل استفاده می‌باشند



نمودار ۳-۲ - دسته‌بندی پمپها^{۵۲}

^{۵۱} discharge

^{۵۲} این دسته‌بندی در بعضی از مراجع آمده است اما عملاً پمپ‌های گریز از مرکز، پمپ‌های دینامیکی جریان شعاعی بوده و زیر مجموعه پمپ‌های روتودینامیکی می‌باشند و پمپ‌های محیطی و جریان محوری نیز زیر مجموعه پمپ‌های گریز از مرکز نمی‌باشند.

✓ ویژگی کلی پمپهای جریان شعاعی (Centrifugal Pumps):

- فشارهای پایین (به نسبت دبی) و دبی‌های بالایی می‌توانند داشته باشند
- انتقال انرژی به مایع به طور دایمی می‌باشد و جریان یکنواخت است
- Self-Prime نمی‌باشند و لوله مکش و ورودی پروانه می‌بایست قبل از راه‌اندازی، از مایع پرگردد
- قابلیت کار در دورهای (RPM) بالا
- برای مایعاتی که دارای ذرات معلق هستند، قابل استفاده می‌باشند
- برای مایعات با ویسکوزیته بالا، قابل استفاده نمی‌باشند
- اگر خط خروجی بسته شود و پمپ برای زمان زیادی کار نکرده باشد، صدمه نمی‌بیند
- دبی و فشار به یکدیگر وابسته می‌باشند
- معمولاً کوچک هستند و فضای کمی را اشغال می‌کنند

❖ علت بستن سری و موازی پمپهای دینامیکی:

یک باور مصطلح اشتباه به صورت زیر می‌باشد:

بستن موازی پمپها: برای هد (فشار) مشخص و دبی بیشتر که نحوه عملکرد این پمپها شبیه مدارهای الکتریکی در حالت موازی می‌باشد.

بستن سری پمپها: برای دبی مشخص و هد (فشار) بیشتر که در هر مرحله فشار تا حدی بالا می‌رود.

اما اولاً هدف اصلی استفاده از پمپ دینامیکی در سیستم‌های انتقال سیالات تراکم‌ناپذیر، رسیدن به دبی بیشتر است و نه فشار استاتیکی بیشتر و فشار استاتیکی، ابزار دستیابی به دبی می‌باشد. دوماً هدف از سری و موازی بستن پمپ‌های دینامیکی، صرفاً افزایش دبی است (افزایش دبی باعث افزایش ارتفاع مورد نیاز در سیستم می‌شود).

در واقع می‌توان گفت که سیستم و یا مداری وجود ندارد که افزایش دبی، بدون افزایش انرژی مورد نیاز برای انتقال مایعات (افزایش ارتفاع مورد نیاز)، امکانپذیر باشد. اما حالا سوالی که مطرح می‌شود این است که پس چه زمانی ما باید پمپ‌های دینامیکی را موازی ببندیم و چه موقع سری؟ پاسخ به این سوال بر می‌گردد به سه پارامتر مهم تاثیرگذار برای اینکه ببینیم چقدر افزایش دبی و هد مطلوب ما می‌باشد. یعنی:

- ۱- ارتفاع استاتیکی مورد نیاز در سیستم انتقال مایع توسط پمپ، که به اختلاف فشار استاتیکی و اختلاف ارتفاع (هد ارتفاعی) بین مبدا و مقصد بستگی دارد و مستقل از دبی جریان می‌باشد.
- ۲- نوع منحنی سیستم که شیب آن تند باشد و یا کند
- ۳- نوع منحنی مشخصه پمپ که شیب آن تند باشد و یا کند

۷- نمودارهای عملکرد پمپ و سیستم (برای پمپهای دینامیکی)

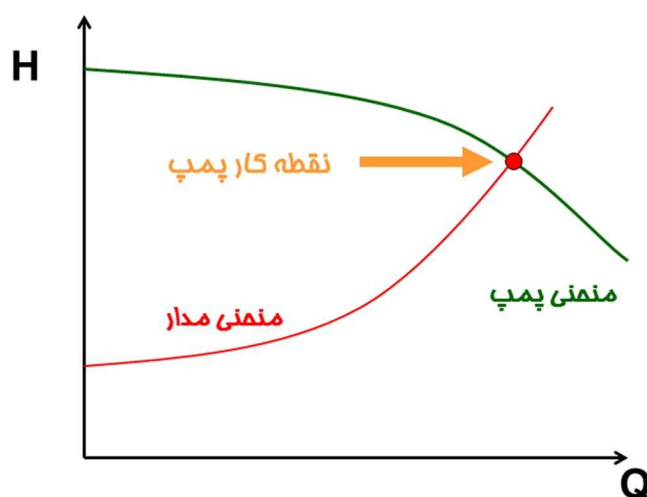
از نوشتن معادله برنولی برای دو نقطه ابتدایی و انتهایی (مبدأ و مقصد) مسیر پمپاژ شامل پمپ با احتساب انرژی پمپ و نیز اتلاف انرژی برای یک سیستم لوله‌کشی و حل آن معادله و بدست آوردن عبارتی برای H (هد) پمپ، برحسب Q^2 (توان دوم دبی)، معادله‌ای بدست می‌آید که دارای ضریبی برای Q^2 و نیز عرض از مبدأ $(\frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z)$ می‌باشد، با رسم این سهمی در ربع اول محورهای مختصات با دهانه بطرف بالا، در واقع منحنی سیستم یا مدار^{۵۳} بدست می‌آید:

$$H_p = \left(\frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z\right) + aQ^2$$

کارخانه سازنده پمپ نیز نموداری مرسوم به منحنی پمپ^{۵۴} که مختص همان پمپ بوده و نشاندهنده رابطه بین هد بر حسب دبی آن پمپ است را (سیالی که با آن نمودار مذکور را بدست می‌آورند، سیالی با دانسیته مشخص می‌باشد که عموماً آب در دمای محیط است) ارائه می‌دهد که سهمی با دهانه رو به پایین در ربع اول محورهای مختصات می‌باشد. با رسم این دو نمودار در یک محور مختصات برای سیستم لوله‌کشی، نقطه برخوردی بدست می‌آید که همان نقطه کاری پمپ^{۵۵} می‌باشد که پمپ در صورت نصب در آن سیستم لوله‌کشی، با آن فشار و دبی کار خواهد نمود. لازم به ذکر می‌باشد که طبق استاندارد API 610 می‌بایست، پمپ بگونه‌ای انتخاب گردد که با دبی زیر کار کند:

$$0.7 Q_{BEP} < Q_{pump} < 1.2 Q_{BEP}$$

که BEP همان نقطه با بهترین بازده^{۵۶} پمپ می‌باشد که در واقع نقطه بیشینه در نمودار بازده بر حسب دبی پمپ است. این ناحیه به Preferred Operating Region موسوم می‌باشد. عملکرد پمپ در این ناحیه باعث کاهش هزینه‌های مصرف انرژی و تعمیرات و کاهش خطرات در اثر مشکلات سیستم ناشی از نیروهای هیدرولیکی می‌گردد. کارخانه سازنده پمپ، نمودار دیگری که شامل $NPSH_r$ بر حسب دبی پمپ است را نیز به همراه دیگر نمودارها ارائه می‌دهد.



نمودار ۳-۳ - منحنی عملکرد پمپ دینامیکی و سیستم

⁵³ System Curve

⁵⁴ Pump Performance Curve

⁵⁵ Operating Point

⁵⁶ Best Efficiency Point

۸- NPSH در پمپ‌های دینامیکی (استفاده شده برای پمپ‌های گریز از مرکز بر طبق استاندارد API 610، ویرایش یازدهم)

$$NPSH = \text{Net Positive Suction Head} = NPSH_a (\text{Available NPSH}) - NPSH_r (\text{Required NPSH})$$

$NPSH_a$: هد ورودی مثبت خالص در دسترس که عبارتست از اختلاف هد مطلق ورودی پمپ و هد فشار بخار مایع در آن دما و درواقع فاصله موجود بین فشار ورودی تا فشار بخار سیال در پروانه پمپ می‌باشد.

$NPSH_r$: هد ورودی مثبت خالص مورد نیاز که عبارتست از کمترین هدی که مورد نیاز است تا بر افت‌های داخلی پمپ غلبه گردد تا پمپ دچار کاویتاسیون^{۵۷} نشود (میزان هدی که در اثر افت‌های هیدرولیکی و اصطکاکی در دهانه پمپ مصرف می‌شود که نمودار آن نسبت به دبی ورودی به پمپ، توسط سازنده پمپ داده می‌شود)

$$\begin{cases} NPSH_a = H_{suction} - \frac{P_g}{\rho g} \\ H_{suction} = H_A + H_Z + H_V - H_F \end{cases}$$

$\frac{P_g}{\rho g}$: هد فشار بخار سیال پمپ شده، که P_v فشار بخار مطلق سیال (بصورت True Vapour Pressure) در دمایی که سیال پمپ می‌گردد، می‌باشد.

H_A : هد فشار مطلق بر روی سطح مایع تانک منبع

H_Z : فاصله عمودی بین سطح مایع تانک منبع و خط مرکزی پمپ (اگر پمپ بالاتر از تانک باشد، این مقدار منفی خواهد بود)

H_V : هد سرعتی در ورودی پمپ که معمولاً چون مقدارش نسبت به ترم‌های دیگر کوچک است، می‌توان از آن صرف‌نظر نمود.

H_F : هد تلف شده در اثر اصطکاک و افت‌های فرعی در سیستم لوله کشی ورودی پمپ

برای پمپ‌های جابجایی مثبت رفت و برگشتی که احتمال پدیده کاویتاسیون برای آنها نیز وجود دارد، یک جمله شامل هد شتابی^{۵۸} که توضیح افت هد ناشی از ضربان در جریان در ورودی پمپ است، می‌بایست از عبارت بالا کم شود. در این نوع پمپ‌ها، درواقع پارامتری بنام فشار ورودی مثبت خالص تعریف می‌گردد.

همیشه نه تنها بایستی $NPSH_a > NPSH_r$ ، بلکه درحالت استاندارد، نسبت این دو (NPSH Margin)، که نشان‌دهنده فاصله $NPSH_a$ از $NPSH_r$ است، می‌بایست مقدار مشخصی باشد تا پمپ دچار پدیده کاویتاسیون نگردد. جدول زیر توسط انجمن علمی هیدرولیک^{۵۹} برای این margin توصیه شده است.

جدول ۳-۱ راهنمای NPSH Margin

Suction Energy Level	NPSH Margin Ratio
Low	1.1 to 1.3
High	1.3 to 2.0
Very High	2.0 to 2.5

انرژی ورودی، تابعی است از مومنتوم سیالی که به چشمی پروانه^{۶۰} نزدیک می‌شود که آن نیز تابع قطر پروانه، مقدار دور یا چرخش پمپ در دقیقه، سرعت مخصوص ورودی و جرم مخصوص سیال پمپ شده می‌باشد.

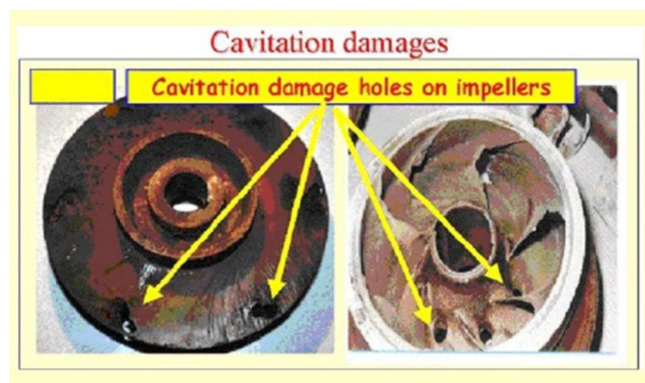
⁵⁷ cavitation

⁵⁸ Acceleration Head

⁵⁹ Hydraulic Institute

۹- پدیده کاویتاسیون

وقتی فشار استاتیک مایع در ورودی پمپ دینامیکی کاهش یافته و برابر با فشار بخار خود در آن دما گردد، مایع بجوش می‌آید و حبابهایی از گاز در آن، ایجاد می‌گردد. حبابهای بخار همراه سیال حرکت کرده تا به ناحیه‌ای که فشارش زیادتر است، برسند (در اثر چرخش پروانه) و در این ناحیه، حبابها که تعدادشان بسیار زیاد می‌باشد به طور ناگهانی می‌ترکند که این فرایند ایجاد موج‌شو^{۶۱} (موج ضربه‌ای) می‌نماید، همچنین ذرات کناری مایع، جای خالی حبابها را پر می‌کنند و سبب افزایش موضعی شدید سرعت قطرات مایع (چند ده متر بر ثانیه) و برخورد آن با سطح پره با مومنتوم بسیار بالا می‌گردد که این نیروهای وارده به تیغه پمپ، باعث ایجاد حفره و خوردگی و صدمه جدی به آن می‌شود و معمولاً کمتر فلزی در برابر این نیرو مقاومت می‌کند. این پدیده علاوه بر این، راندمان پمپ را بعثت داخل نشدن مایع به اندازه کافی به طور قابل ملاحظه‌ای پایین می‌آورد و باعث ایجاد سر و صدا و ارتعاشات در پمپ می‌گردد. صدای کاویتاسیون مخصوص و مشخص بوده و شبیه برخورد گلوله‌هایی به یک سطح فلزی است. همزمان با تولید این صدا پمپ نیز به ارتعاش درمی‌آید. در انتها این صداهای منقطع به صداهایی شدید و دائم تبدیل می‌گردد. کاهش فشار در اطراف پروانه می‌تواند بواسطه شتاب سیال و یا کاهش فشار ورودی اتفاق بیافتد.



شکل ۳-۴ - پروانه صدمه دیده پمپ در اثر پدیده کاویتاسیون

کاویتاسیون کلاسیک به دو صورت ایستایی^{۶۲} و غیرایستایی وجود دارد که در نوع ایستایی با ترکیدن حبابها، همانگونه که توضیح داده شد، موج شوک بوجود می‌آید و این حالت در پمپهای دینامیکی دیده می‌شود و در نوع غیر ایستایی، نوسانات در اندازه و یا شکل حبابها بخاطر بازیافت فشار در پایین دست و وجود نیروهای غیرمتقارن در اطراف حباب، باعث بوجود آمدن میکروجت‌ها^{۶۳} شده و مانند یک میدان صوتی عمل می‌نماید. بنابراین ترکیب دو عامل موج‌شو^{۶۱}ها و میکروجت‌ها سیال، باعث تخریب و صدمات جدی می‌گردند. پدیده کاویتاسیون مختص پمپهای دینامیکی نبوده و در شیرهای کنترلی، کاهنده‌های جریان^{۶۴} در چاههای نفت و یا پروانه mixer ها نیز دیده می‌شود.

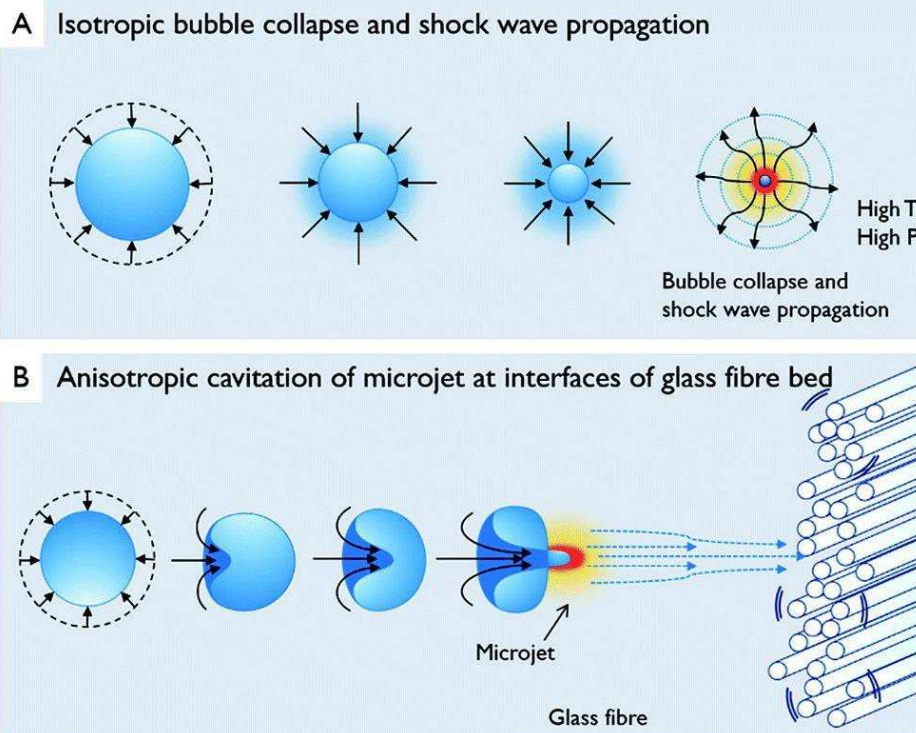
⁶⁰ impeller

⁶¹ Shock Wave

⁶² Inertial Cavitation

⁶³ microjets

⁶⁴ Choke Valve



شکل ۳-۵ - انواع پدیده کاویتاسیون

۱۰- پدیده ضربه قوچ^{۶۵}

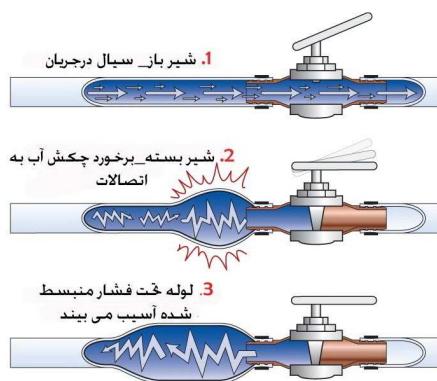
پدیده ضربه قوچ یا چکش آبی، همان موج فشاری می‌باشد که در شاره‌های در حال حرکت اعم از مایع یا گاز، پس از توقف یا تغییر مسیر ناگهانی (تغییر در مومنتوم)، پیش می‌آید. که این موجها می‌توانند فشار زیادی تولید نموده و موجب بوجود آمدن تنشهای بسیار زیادی در اجزاء شبکه و صدمات فراوان به شبکه خط لوله گردند. این افزایش فشار معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که شیر در مسیر حرکت شاره ناگهان بسته می‌شود. در اینحالت چون تا قبل از قطع جریان، سیال در حال حرکت بوده، در اثر بسته شدن ناگهانی شیر در خط لوله، افزایش فشار در سمت ورودی شیر و در اثر آن یک موج شوک بوجود می‌آید که ضربه‌ای ناشی از فشار زیاد را ایجاد کرده و در بالادست جریان، با سرعت موج صوتی تقویت می‌گردد. از طرفی سیال پایین دست شیر، چون سعی می‌کند به حرکت خود ادامه دهد، باعث بوجود آمدن خلاء می‌گردد که ممکن است باعث فرو ریختن^{۶۶} لوله شود که حالت حاد این مورد وقتی است که خط لوله در یک شیب سرازیر قرار گرفته باشد.

توضیح موردی عملی:

بعد از خاموش کردن ناگهانی یک پمپ دینامیکی، نیروی محرکه دوران‌دهنده پروانه پمپ سریع قطع می‌گردد، به همین دلیل سرعت جریان سیال بطور ناگهانی تغییر می‌یابد و انرژی سینتیک از حالت فشار به مکش در خروجی پمپ تبدیل می‌شود، در این تغییر، موج فشاری شدیدی در امتداد لوله خروجی پمپ و با سرعتی معادل سرعت صوت پیش می‌رود و این موج در اثر برخورد با مانع (منبع آب که آب به آن پمپ می‌گردد) منعکس شده و برگشت می‌کند، موج برگشتی جهت جریان سیال را در پمپ عوض کرده و دبی بیشینه‌ای در جهت عکس، از پمپ جریان می‌یابد و پمپ به صورت توربین در جهت عکس چرخش

⁶⁵ Water Hammer⁶⁶ collapse

اولیه خود، شروع به چرخش می نماید. به این ترتیب کاهش ناگهانی حرکت سیال موجب می شود، فشار داخل لوله خروجی پمپ از فشار اتمسفر کمتر گردد. همچنین به علت اصطکاک درونی پمپ و موتور، کاهش قابل ملاحظه‌ای در خروجی پمپ ایجاد می نماید، که مجموعه این عوامل باعث تبخیر آب و قطع جریان آن در خروجی پمپ می شود و حداقل فشاری در حد فشار بخار آب در لوله خروجی ایجاد می گردد. عمل تشکیل بخار، باعث جدا شدن ستون آب از پمپ می گردد و این کاهش فشار در لوله با سرعت و به صورت موج حرکت نموده و ادامه پیدا می کند تا به مخزنی که آب به آن پمپ می شود می رسد، این حرکت موجی بر اثر برخورد با این مانع منعکس گشته و ستون های آب جدا شده مجدداً به هم متصل شده و به صورت یک موج افزایش یافته دوباره به سمت پمپ بازمی گردد و به پمپ ضربه وارد می نماید و این پدیده مجدداً تکرار می شود. درواقع، جدایی ستون آب یکی از اثرات پدیده ضربه قوچ می باشد که آنرا تشدید می نماید. پدیده ضربه قوچ در زمان روشن کردن پمپ هم به وجود می آید و باعث ازدیاد فشار اضافی در پمپ و لوله می گردد. ولی مشکلات و مخاطرات ناشی از آن، کمتر از ضربه قوچ هنگام خاموش شدن پمپ است.



شکل ۳-۶ - پدیده ضربه قوچ

این پدیده در خطوط لوله جریان تحت فشار و مجاری باز اتفاق می افتد و بوضوح بر قوانین فشار، تغییرات آبی یا تغییرات سرعت جریان و شرایط زمانی و مکانی حرکت سیال استوار است. در بعضی از سیستم های هیدرولیکی تحت فشار، نظیر خطوط انتقال آب، نفت یا شبکه های توزیع و لوله های آب منتهی به توربین ها، تونل های آبی، سیستم های پمپاژ و جریان های ثقلی، پدیده ضربه قوچ با ایجاد موج های سریع، زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی می شود. گاهی اوقات قدرت تخریبی این موج های فشاری به حدی است که نتایج وخیمی به بار می آورد. ترکیدن خطوط لوله در سیستم های انتقال و شبکه های توزیع، خرابی و شکسته شدن شیرها، دریچه های کنترل و پمپ ها از نمونه های بارز تأثیر این پدیده می باشد. برای نمونه، در سال ۱۹۳۴ میلادی قدرت تخریبی ضربه قوچ در پروژه ای موجب شده که قطعه ای از خط لوله به وزن ۱۲ تن تا فاصله ۵۰ متری پرتاب گردد. در واقع امروزه در کلیه طرح های انتقال آب یا سیستم های انتقال سیالات دیگر، بررسی و مطالعه دقیق پدیده ضربه قوچ بعنوان یک امر لازم و ضروری می باشد تا با شناخت کامل اثر آن، برای کنترل اثرات سوء این فرآیند تمهیدات مناسب اتخاذ گردد و سیستم انتقال از خطرات این پدیده مصون بماند.

ضربه قوچ در لوله های انتقال بخار آب، بصورت دو مکانسیم کلی و به علت آب چگالش یافته با سرعت بالا و چگالش ناگهانی بخار آب که به ضربه قوچ بخار القاشده^{۶۷} نیز معروف است، می باشد.

⁶⁷ Steam-induced Water Hammer

۱۱- کمپرسور و انواع آن

تعریف: کمپرسور دستگاهی است که با افزایش فشار گاز، حجم سیستم را کاهش داده و گاز را با فشار تخلیه می‌کند. کمپرسورها از انواع توربوماشین‌های توانگیر بوده و طرز کار کلی آنها مانند پمپها می‌باشد، اما برخلاف تعریف کلی برای پمپها، هم فشار گاز را بالا برده و هم آنرا جابجا می‌نمایند.

کمپرسورهای جابجایی مثبت (Positive Displacement Compressors): در این کمپرسورها انتقال انرژی به سیال به صورت متناوب یا پیرویدیک صورت می‌پذیرد که فشرده شدن گاز توسط کاهش حجم انجام می‌گیرد، به اینصورت که حجم معینی از گاز محصور شده و سپس حجم منطقه محصور شده، کاهش می‌یابد.

کمپرسورهای دینامیکی (Dynamic Compressors): در این نوع کمپرسورها عملیات بالا بردن فشار گاز توسط حرکت دینامیکی با سرعتی که توسط پره‌های دوار کمپرسور به گاز اعمال می‌شود، انجام می‌گیرد و این عمل باعث بالا رفتن انرژی جنبشی گاز می‌گردد.

✓ ویژگی کلی کمپرسورهای جابجایی مثبت (Positive Displacement Compressors):

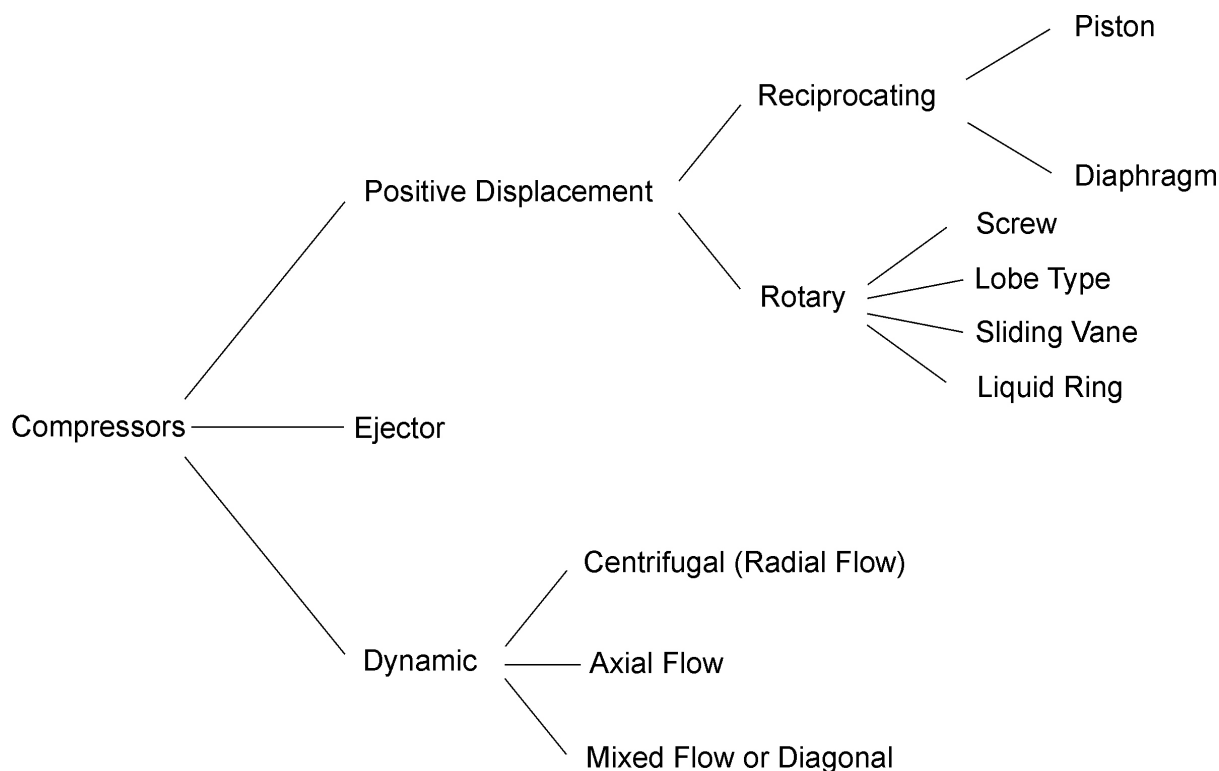
- قدرت تراکم آنها نسبت به نوع دینامیک بیشتر و دبی آنها به مراتب کمتر می‌باشد
- انتقال انرژی به سیال متناوب می‌باشد

❖ ویژگی کمپرسورهای رفت و برگشتی (Reciprocating Compressors):

- دبی پایین و فشار بسیار بالایی دارند
- جریان گاز غیریکنواخت می‌باشد (از روشهایی برای یکنواخت کردن جریان و جلوگیری از وارد شدن ضربه توسط پیستون استفاده می‌شود)
- به قطرات مایع و ذرات جامد بسیار حساس می‌باشند
- غالباً بزرگ و گرانبه می‌باشند و نیاز به فونداسیونهای بزرگ دارند
- عدم حساسیت به تغییر جرم مولکولی گاز و دارا بودن راندمان بالا

❖ ویژگی کمپرسورهای دورانی (Rotary Compressors):

- درواقع از لحاظ کاربرد، در حدفواصل بین کمپرسورهای رفت و برگشتی و گریز از مرکز قرار می‌گیرند
- دبی پایین اما بیشتر از دبی کمپرسورهای رفت و برگشتی دارند و فشار پایینی دارند
- جریان گاز یکنواخت می‌باشد
- برای گازهای چسبنده و حاوی قطرات مایع مناسب می‌باشند



نمودار ۳-۴ - دسته‌بندی کمپرسورها

✓ ویژگی کلی کمپرسورهای دینامیکی (Dynamic Compressors):

- فشارهای پایین و دبی‌های بالایی می‌توانند داشته باشند
- انتقال انرژی به گاز به طور دائمی می‌باشد
- در دورها یا RPM بالا کار می‌کنند (اکثر کمپرسورهای دینامیکی با دورهای 3000 RPM و بالاتر کار می‌کنند)
- وابستگی زیاد به جرم مولکولی و نسبت C_p به C_v گاز دارند
- نیاز به تعمیرات کمتری دارند

۱۲- پدیده surge، stall و Stonewall در کمپرسورهای دینامیکی

stall: زمانی که یک سیستم فرایندی به یک هد بیشتر از هد قابل تولید توسط کمپرسور نیاز دارد، جریان سیال کاهش می‌یابد تا نقطه‌ای که تفکیک جریان^{۶۸} بر روی تیغه‌ها^{۶۹} (مقطع آئرو دینامیکی که نیروی آئرو دینامیکی بوجود می‌آورد) و چرخش بوجود آید که باعث ایجاد مقاومت در مسیر جریان می‌گردد. تفکیک جریان در این حالت در اثر انقطاع جریان گاز بر روی تیغه‌ها به هر دلیل می‌باشد که باعث ایجاد جریان ناپایدار می‌گردد. بمحض اینکه تفکیک جریان روی دهد، هد تولیدی توسط کمپرسور کاهش یافته و فشار خروجی افت می‌نماید. این پدیده غالباً stall یا واماندگی نامیده می‌شود که ممکن است در همه جا اتفاق بیافتد و بعلت طراحی غلط کمپرسور می‌باشد و نه بواسطه دبی کم و یا طراحی لوله‌کشی. این پدیده معمولاً در راه‌اندازی کمپرسورهای گریز از مرکز شایع می‌باشد.

⁶⁸ Flow Separation

⁶⁹ blade

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. در نتیجه 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. 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 دانسیته گاز ناشی از کاهش فشار گاز ورودی، افزایش دمای گاز ورودی و کاهش جرم مولکولی گاز (بعثت تغییر ترکیب درصد گاز)
- افزایش فشار در هدر خروجی کمپرسور به علت بسته شدن مسیر در پایین دست
- بالا بودن فشار در هدر خروجی کمپرسور در زمان درسرویس آمدن کمپرسور و اتصال آن به خط
- کاهش سریع دور به هر علت (مانند زمان توقف اضطراری و یا در کمپرسورهای دور متغیر)
- اشکال در تبدیل انرژی جنبشی به انرژی فشاری در پروانه و پوسته کمپرسور به دلایل مختلف همچون خوردگی پروانه، ارتعاش پره‌ها و تنظیم نادرست پره‌های متغیر راهنمای مجرای ورودی

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 ۱۵۰ 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)

تفاوت‌های دو پدیده:

- پدیده stall نقطه شروع پدیده surge می‌باشد و surge اغتشاش کامل جریان در کمپرسور می‌باشد.
- پدیده surge دارای برخی ویژگی‌ها مانند سر و صدا، ارتعاشات شدید و بالا رفتن دما می‌باشد و بازگشت کامل جریان را داریم.

StoneWall: چوک شدن^{۷۰} یا دیوار سنگی شرایط غیرمعمول عملیاتی می‌باشد که در کمپرسورهای دینامیکی هنگامیکه در دبی بسیار بالای جرمی و فشار کم خروجی کار می‌کنند رخ داده و نرخ جریان در آن نمی‌تواند بیشتر گردد زیرا عدد ماخ^{۷۱} (Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach) به مقدار واحد می‌رسد و درواقع سرعت گاز در اطراف پروانه به سرعت صوت می‌رسد (Sonic Velocity) و در اینحالت گفته می‌شود که جریان چوک گردیده است. این پدیده زمانی بوجود می‌آید که مقاومت در برابر جریان در لوله خروجی کمپرسور بطور قابل توجهی نسبت به مقدار معمول افت نماید. بخاطر مقاومت کم، یک فشار برگشتی بسیار کمی در قسمت تخلیه بوجود می‌آید. خروجی کمپرسور در اثر افت فشار برگشتی افزایش می‌یابد. این منجر به افزایش سرعت گاز در کمپرسور می‌گردد و افزایش در سرعت گاز می‌تواند تا رسیدن به مقدار بیشینه آن در سرعت صوت، اتفاق بیافتد. هنگامیکه سرعت گاز در تمامی قسمتهای کمپرسور به نزدیک سرعت صوت برسد (عدد ماخ ۱)، اینحالت را نقطه چوک یا StoneWall برای عملکرد کمپرسور گفته می‌شود که سرعت و دبی گاز نمی‌تواند بیشتر از این مقدار گردد. افزایش سرعت نسبی گاز ورودی نسبت به تیغه‌های پروانه، کاهش دمای ورودی و افزایش جرم مولکولی گاز باعث ایجاد پدیده دیوار سنگی می‌شوند زیرا در اینحالات عدد ماخ به یک نزدیک می‌گردد. قابل ذکر است که این پدیده، برخلاف پدیده surge چندان مخرب نمی‌باشد.

چوک شدن جریان: این پدیده، یک اثر جریان تراکم‌پذیر بوده که در هنگام عبور یک سیال از یک محدود کننده جریان (مانند گلوگاه یک نازل یا شیر در یک لوله) بوجود می‌آید که دینامیک سیالات و اثر ونتوری^{۷۲} با یکدیگر همراه می‌گردند (پارامتر محدود شده یا چوک شده، سرعت سیال می‌باشد). در حالت سرعت پایینتر از سرعت صوت، بعلاوه عبور سیال از سطح مقطع کوچکتر و با توجه به اصل بقای جرم، سرعت سیال زیاد می‌گردد درحالیکه، در همان زمان، بخاطر اثر ونتوری، فشار استاتیک (به P در معادله برنولی، فشار استاتیک و به ترم $\frac{1}{2} \rho v^2$ فشار دینامیکی اطلاق می‌گردد) و در نتیجه دانسیته سیال در پایین دست محدود کننده جریانی کاهش می‌یابد. جریان چوک شده یک حالت حدی می‌باشد که نرخ جریان با کاهش بیشتر در فشار پایین دست، مادامیکه فشار بالادست معین باشد، افزایش نمی‌یابد. در اینحالت دبی جرمی از فشار پایین دست مستقل گردیده و فقط به به دما و فشار و نتیجتاً دانسیته گاز بالادست محدود کننده جریانی، وابستگی پیدا می‌نماید. (در کاهنده‌های جریانی که برای محدود نمودن و تنظیم دبی تولیدی از چاههای نفت و گاز، قبل از لوله جریانی، از آنها استفاده می‌گردد، از همین اصل استفاده شده تا دبی تولیدی چاه، مستقل از فشار در پایین دست که همان تاسیسات فراورش است، گردد).

در حالت جریان یا سیال تراکم‌ناپذیر مانند آب یا مایعات، دانسیته ثابت می‌ماند. در اینحالت نوعی دیگر از چوک شدن جریان بوجود می‌آید که درصورت کاهش فشار مایع در پایین دست محدودکننده جریانی به زیر فشار بخار آن در آن دما، پدیده کاویتاسیون رخ می‌دهد. به این ترتیب، تشکیل حبابهای بخار، از افزایش نرخ جریان ممانعت می‌نماید.

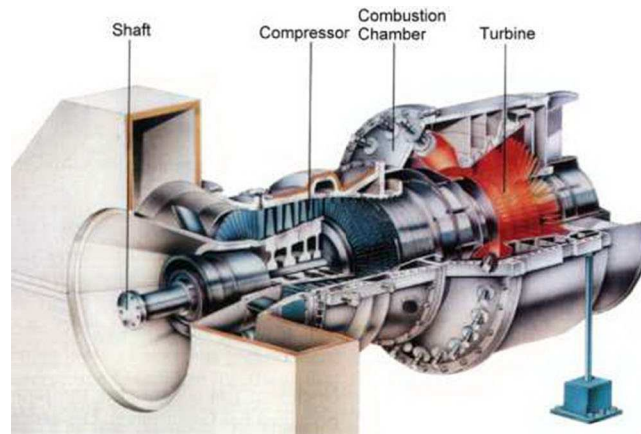
۱۳- توربین و انواع آن

واژه توربین برای اولین بار بوسیله Claude Burdin در سال ۱۸۲۸ بوجود آمد که از لغت یونانی و به معنی چرخنده مشتق شده است. اولین توربین گازی که به منظور تولید انرژی برق مورد استفاده قرار گرفت، در سال ۱۹۳۹ توسط کارخانه Brown Boveri در سوئیس ساخته شد که ظرفیت آن ۴ مگاوات بود. توربین، ماشینی دوار است که می‌تواند از یک سیال انرژی به دست آورد و درواقع هدف آن تولید کار محوری با استفاده از فشار سیال عامل است. ساده‌ترین توربین‌ها یک بخش چرخنده و تعدادی پره دارند که به بخش اصلی متصل شده‌اند. سیال به پره‌ها برخورد می‌کند و بدین ترتیب از انرژی جنبشی سیال برای چرخاندن پره‌ها و ایجاد کار استفاده می‌شود.

⁷⁰ choking

⁷¹ Mach Number

⁷² Venturi Effect



شکل ۷-۳ - نمایی از یک توربین گازی

در توربینهای گازی و بخار دو فرایند عمده انجام می‌گیرد، اول سیال عامل به فشار پایین‌تر منبسط شده و سرعت آن زیاد می‌گردد و دوم جریان سیال با سرعت بالا به مجموعه‌ای از تیغه‌های متحرک برخورد کرده و باعث ایجاد گشتاوری در محور دوار و نهایتاً کار محوری می‌گردد.

انواع توربین‌ها:

- توربین بخار (Steam Turbine): این توربین با استفاده از انرژی حرارتی بخار فشرده، تولید کار مکانیکی می‌نماید. ۸۰ درصد برق دنیا از توربینهای بخاری که در نیروگاههای هسته‌ای، حرارتی و... بکار می‌روند، تولید می‌گردد. روزگاری از این توربینها برای هدایت وسایل نقلیه مانند کشتی استفاده می‌شد.
- توربین گازی (Gas Turbine): این توربین بر اساس انرژی گازهای ناشی از احتراق کار کرده و اساس کار آنها شبیه به توربین بخار بوده، غیر از اینکه در آن از هوا بجای بخار آب استفاده می‌گردد. فرایندهای ترمودینامیکی یک توربین گاز ایده‌آل، همان چرخه برایتون می‌باشد. هر توربین گاز شامل یک کمپرسور برای فشرده کردن هوا، یک محفظه احتراق برای مخلوط نمودن هوای فشرده شده با سوخت و محترق نمودن آن و یک توربین انبساطی برای تبدیل انرژی حرارتی و جنبشی گازهای داغ به انرژی مکانیکی می‌باشد که جریان گاز داغ در قسمت توربین با تیغه‌ها برخورد کرده و آنها را می‌چرخاند و سپس از طریق اگزوز خارج می‌شود. بخش عمده‌ای از انرژی مکانیکی تولید شده (بیشتر از ۵۰ درصد)، صرف چرخاندن کمپرسور محوری شده و قسمتی از انرژی باقیمانده بصورت اصطکاک، قسمتی جهت دستگاههای کمکی و مابقی بسته به کاربرد توربین، صرف چرخاندن ژنراتور برق، پمپ یا کمپرسور که به شفت متصل هستند می‌گردد.
- توربین آبی (Water Turbine): این توربین، موتور دواری است که انرژی جنبشی حاصل از جریان آب یا انرژی پتانسیل ناشی از اختلاف تراز آب را تبدیل به کار مکانیکی می‌نماید. این توربینها طیف وسیعی داشته و از ساده‌ترین چرخهای آسیاب تا بزرگترین توربینهای نیروگاههای آبی را شامل می‌گردند. این توربینها در قرن ۱۹ توسعه یافتند.
- توربین بادی (Wind Turbine): این توربین دستگاهیست که برای تبدیل انرژی جنبشی باد به توان الکتریکی از آن استفاده می‌شود.

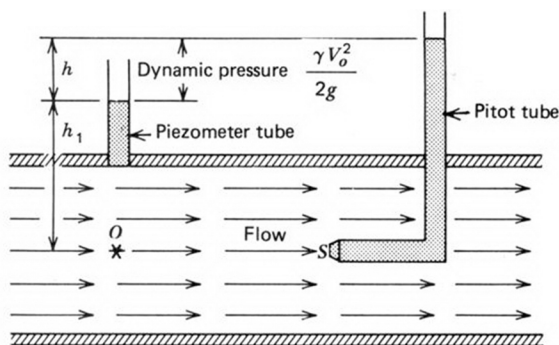
مزایای توربین گازی:

- زمان کوتاه جهت نصب و راه اندازی آن
- پایین بودن هزینه مالی متعلقات آن در مقایسه با توربین بخار
- کوتاه بودن مدت زمان لازم از حالت خاموشی تا روشن شدن و زیر بار قرار گرفتن
- قابلیت مصرف انواع سوخت از نفت خام تا گاز طبیعی
- سادگی نسبی کنترل، تعمیر و نگهداری

۱۴- وسایل اندازه‌گیری دبی و سرعت جریان

لوله پیتوت (Pitot Tube)، ونتوری‌متر (Venturi Meter)، نازل جریان، صفحه اریفیس (Orifice Plate) و روتامتر (Rotameter)

لوله پیتوت^{۷۳} (Henri Pitot): برای اندازه‌گیری توزیع سرعت جریان در کانالهای باز و بسته بکار می‌رود (سرعت در هر نقطه خاص). در حقیقت، با توجه به نوشتن رابطه برنولی برای نقاط O و S (نقطه سکون) که در یک سطح واقع می‌باشند، اختلاف ارتفاع سیال در لوله پیتوت نسبت به لوله پیزومتر (همان h)، معرف فشار دینامیکی سیال در نقطه O خواهد بود.



شکل ۳-۸ - لوله پیتوت

ونتوری متر، صفحه اریفیس و روتامتر: برای اندازه‌گیری دبی جریان می‌باشند.

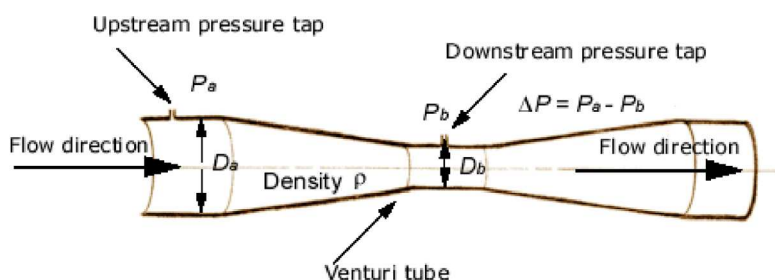
ونتوری متر:^{۷۴}

بر اساس اصل برنولی، در گلوگاه ونتوری متر سطح مقطع عبور جریان کم شده نتیجتاً سرعت جریان زیاد شده و فشار کاهش می‌یابد، با در نظر گرفتن معادله برنولی البته با وارد نمودن ضریب تخلیه جهت در نظر گرفتن اثرات ویسکوزیته و اصطکاک برای سیال حقیقی و نیز نوشتن معادله پیوستگی، می‌توان دبی حجمی را بر حسب افت فشار خوانده شده از ونتوری متر، بدست آورد. در قسمت واگرای مخروط، به تدریج سرعت کم شده و اکثر فشار بازیابی می‌گردد. از ونتوری (Giovanni Battista Venturi) در صنعت بعنوان جت پمپ^{۷۵} یا اژکتور جهت ایجاد فشار منفی و مکش نیز استفاده می‌گردد.

⁷³ Pitot Tube

⁷⁴ Venturi Flow Meter

⁷⁵ Jet Pump



شکل ۳-۹ - ونتوری متر

- ✓ مزایای ونتوری متر :
 - کاربرد آن در اندازه گیری دبی مایعات که دارای ذرات جامد می‌باشند.
 - اکثر فشار بازیابی می‌شود (بعثت افزایش تدریجی زاویه مخروط و کم شدن سرعت و افزایش فشار، همچنین چون زاویه در پایین دست کوچک است، لذا eddy و drag در این جهت کم می‌باشد)

نازل جریان

نازل‌های جریان ممکن است به عنوان ونتوری تیوب تغییر یافته تلقی شوند که برای سنجش دبی جریانهای سرعت بالا به کار می‌روند. افت فشار آنها، بین افت فشارهای ونتوری تیوب و صفحه اریفیس می‌باشد.

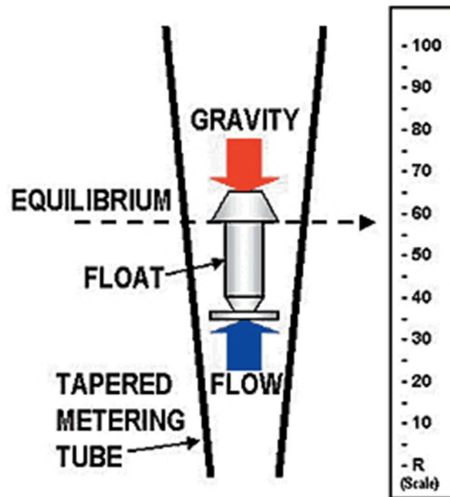
صفحه اریفیس

از اصلی یکسان با اصلی که در نازل ونتوری استفاده می‌شود، یعنی اصل برنولی که وجود وابستگی بین فشار و سرعت سیال را بیان می‌کند، استفاده می‌نماید. هنگامیکه سرعت افزایش می‌یابد، فشار کاهش می‌یابد و بالعکس. یک صفحه اریفیس، یک صفحه نازک با یک سوراخ در وسط آن می‌باشد. سه نوع اصلی Pressure Tappings براساس استاندارد ISO 5167-2 شامل Vena Contracta Tappings و Corner Tappings ، Flange Tappings و Radius Tappings می‌باشد (انواع Pipe Tappings و Vena Contracta Tappings نیز وجود دارند).

- ✓ عیب صفحه اریفیس: عدم بازیابی اکثر فشار پس از ایجاد افت فشار (زیرا وجود eddy ها که در پشت نقطه Vena Contracta ایجاد می‌شوند، تلفات اصطکاکی زیادی به همراه خواهد داشت).
- ✓ مزایای صفحه اریفیس: ارزان بودن و نصب ساده و انعطاف پذیری قطر اریفیس به قطر لوله (در صورت تغییر دبی جریان، تعویض صفحه اریفیس با قطر سوراخ مناسب آسان می‌باشد)

روتامتر:

شامل یک لوله شفاف واگرا (مخروطی شکل) و یک شناور اندازه گیر است که در اثر عبور جریان سیال از پایین به بالای روتامتر، شناور به بالا حرکت کرده و با بالا رفتن آن، سطح مقطع روتامتر افزایش یافته و لذا سطح جریان میان شناور و مجرای مخروطی روتامتر افزایش می‌یابد. شناور تا جایی بالا می‌رود که برابری نیروهای مقاوم سیال، ارشمیدس و وزن آن صفر گردد. در این حالت می‌توان با استفاده از موازنه نیروها، میزان دبی را محاسبه نمود.



شکل ۳-۱۰ - روتامتر

اعداد بدون بعد :

$$Re = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی لزجی}} = \frac{\text{انتقال کلی مومنوم}}{\text{انتقال مولکولی مومنوم}} = \frac{\rho u d}{\mu}$$

عدد رینولدز

$$M = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی الاستیک}} = \frac{\text{سرعت سیال}}{\text{سرعت صوت در سیال}} = \frac{u}{c}$$

عدد ماخ

$$Fr = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی جاذبه}} = \frac{u}{\sqrt{gL}}$$

عدد فرود

فصل چهارم / انتقال

حرارت و مبدل‌های

حرارتی

یکی از زیر شاخه‌های مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی، علم انتقال حرارت است. استفاده از انتقال گرما به دلیل کاربرد گسترده آن در صنایع مختلف بر مبنای پدیده‌های فیزیکی بسیار مهمی استوار شده است که توسط دانشمندان و محققان از قرن شانزدهم به تدریج شناخته و ارائه شده است. دانش پایه و پدیده‌های اصلی علم انتقال حرارت در فاصله سالهای ۱۹۳۰ - ۱۸۸۰ مدون شده و کاربردهای عمده آن از سال ۱۹۳۰ تا کنون گسترش یافته است. انتقال حرارت علاوه بر توضیح چگونگی انتقال انرژی حرارتی، آهنگ این انتقال را در شرایط مشخص، پیش‌بینی می‌کند اما علم ترمودینامیک، سیستمها را فقط در حال تعادل بررسی می‌نماید و در رابطه با نرخ زمانی و طبیعت فعل و انفعالات، اطلاعاتی نمی‌دهد.

مبدل حرارتی دستگاهی است که انرژی حرارتی را از سیالی به سیال دیگر منتقل می‌نماید. سیال ممکن است مایع یا گاز باشد. به این صورت که دو سیال با دماهای مختلف وارد محفظه شده و میان آنها انتقال حرارت صورت می‌گیرد. کاربرد مبدل‌های حرارتی در پالایشگاه، نیروگاه، موتورخانه ساختمان، یخچال، سیستم‌های تهویه مطبوع و .. می‌باشد. از بیشترین مبدل‌های حرارتی که در روز با آن سر و کار داریم، می‌توان به رادیاتور ماشین، شوفاژ و یخچال اشاره نمود.

انتقال حرارت و مبدل‌های حرارتی

۱- انواع انتقال حرارت

هرگاه اختلاف دمایی در دو قسمت از یک ماده یا بین دو ماده وجود داشته باشد، انتقال گرما رخ می‌دهد. در ترمودینامیک این انتقال انرژی، به عنوان گرما تعریف می‌شود. علم انتقال گرما، آهنگ مبادله انرژی گرمایی را توضیح می‌دهد و این تفاوت میان علوم انتقال حرارت و ترمودینامیک می‌باشد. انتقال حرارت در حالت کلی به سه صورت انجام می‌گیرد:

(۱) هدایت یا رسانش (conduction) که قانون هدایت فوریه^{۷۶} (Jean-Baptise Joseph Fourier) برای آن صادق می‌باشد و در جامدات، ارتعاش شبکه بلوری سبب هدایت حرارت بوده و در فلزات، الکترون‌های آزاد عامل اصلی محسوب گردیده و نسبت به ارتعاشات مولکولی نقش مهمتری دارند.

(۲) جابجایی یا همرفت (convection) که قانون سرمایش نیوتن^{۷۷} برای آن صادق می‌باشد و بر سه گونه است:

- جابجایی آزاد مانند جریان نسیم از دریا به سمت ساحل در طول روز و یا نمونه صنعتی آن شامل انتقال حرارت جابجایی در یک هیتر غیرمستقیم (Indirect Heater) که بواسطه بالابردن دمای یک سیال واسط مثل محلول گلیکول، سیال فرایندی را گرم می‌نماید.
- جابجایی اجباری مانند خنک کردن سیالات گرم فرایندی با کولرهای هوایی
- جابجایی در اثر تغییر فاز (جوشش و میعان)

در این نوع انتقال حرارت، انتقال گرما در لایه نازک ساکن چسبیده به دیواره جامد، بصورت هدایت می‌باشد.

(۳) تشعشع یا تابش (radiation) که قانون استفان بولتزمن^{۷۸} (Joseph Stefan & Ludwig Eduard Boltzmann) برای آن صادق بوده و انتقال حرارت در اینحالت با توان چهارم دمای مطلق جسم متناسب می‌باشد و تنها روش انتقال حرارت می‌باشد که به محیط مادی نیاز ندارد. عامل اصلی انتقال حرارت، امواج الکترومغناطیسی یا فوتون‌ها می‌باشند و مهمترین نمونه آن انتقال حرارت از خورشید و نیز نمونه صنعتی آن انتقال حرارت در بخش تشعشعی گرم شدن سیال فرایندی در انواع کوره‌ها می‌باشد.

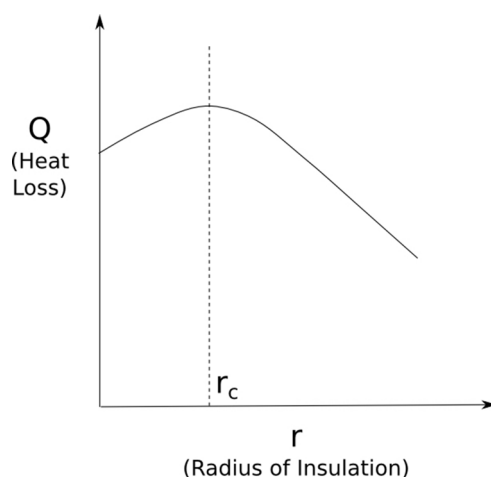
۲- شعاع بحرانی در عایق بندی و علت استفاده از پره‌ها در سطوح

علت استفاده از پره‌ها در سطوح انتقال حرارت، افزایش سطح انتقال حرارت می‌باشد. شعاع بحرانی: در یک دیوار مسطح با افزایش ضخامت عایق، مقاومت حرارتی هدایتی افزایش یافته (بعلت افزایش Δx)، اما مقاومت حرارتی جابجایی ثابت می‌ماند. لذا مقاومت حرارتی کل سیستم افزایش و اتلاف انرژی گرمایی کاهش می‌یابد. در یک کره یا استوانه، با افزایش ضخامت عایق، مقاومت حرارتی هدایتی افزایش یافته اما مقاومت حرارتی جابجایی کاهش می‌یابد و در مجموع، مقاومت حرارتی کل سیستم کاهش و اتلاف انرژی گرمایی افزایش می‌یابد، این روند تا شعاع بحرانی ادامه یافته و در آن نقطه، مقاومت حرارتی مینیموم و اتلاف انرژی گرمایی بیشینه است. پس از آن، روند معکوس می‌گردد. درنتیجه همیشه باید شعاع خارجی عایق از شعاع بحرانی بیشتر باشد تا اتلاف حرارتی در اثر عایق بندی، کاهش یابد.

⁷⁶ Fourier's Law

⁷⁷ Newton's Law of Cooling

⁷⁸ Stefan-Boltzmann Law



نمودار ۴-۱ - اتلاف حرارتی بر حسب شعاع عایق

۳- نفوذ حرارتی^{۷۹}

نفوذ حرارتی (α): نسبت قابلیت هدایت حرارتی به ظرفیت حرارتی می‌باشد. هرچه α بزرگتر باشد، انرژی حرارتی بیشتر در جسم منتقل خواهد شد. زیاد بودن α می‌تواند بخاطر بالا بودن ضریب هدایت حرارتی جسم باشد (به این معنی که انتقال انرژی حرارتی بیشتر است) یا بخاطر پایین بودن حاصلضرب ρC_p (به این معنی که مقدار کمی از انرژی حرارتی در حال عبور از جسم جهت بالا بردن دمای جسم، جذب شده و نتیجتاً بیشتر آن منتقل می‌شود).

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$$

۴- مقایسه بین ضرایب هدایت و جابجایی مواد مختلف

ثابت انتقال حرارت هدایتی (k):

فلز خالص K < آلیاژها K < جامد غیر فلزی K < مایعات K < گازها K

ثابت انتقال حرارت جابجایی (h)، ویژگی سیال نبوده و تابعی از تمام پارامترهای تاثیرگذار بر جابجایی مانند: هندسه سطح، چگونگی حرکت سیال و سرعت توده‌ای درون سیال است. بزرگی این ضریب برای حالات مختلف بصورت زیر می‌باشد:

جوشش و کندانس < جابجایی اجباری مایعات < جابجایی اجباری گازها < جابجایی آزاد مایعات < جابجایی آزاد گازها

⁷⁹ Thermal Diffusivity

۵- انواع مبدل‌های حرارتی، مزایا و معایب آنها و علت استفاده از بافلها⁸⁰ در مبدل‌های پوسته-لوله

از لحاظ اکادمیک، دستگاهی که در آن تبادل حرارتی بین سیالات فرایندی صورت می‌گیرد، مبدل حرارتی یا Heat Exchanger نامیده می‌شود.

انواع :

از لحاظ شرایط تماس:

- مستقیم
- غیر مستقیم

از لحاظ سیال فرایندی:

- مایع/مایع
- گاز/مایع
- گاز/گاز

Condenser ها و reboiler ها نیز در تقسیم بندی بالا قرار می‌گیرند.

از لحاظ جهت جریان (در تماس غیر مستقیم):

- جریان همسو یا Co-Current (اختلاف دمای سیال سرد و گرم در طول مبدل کاهش می‌یابد)
- جریان ناهمسو یا Counter Current (اختلاف دمای سیال سرد و گرم در طول مبدل تقریباً ثابت می‌باشد)
- جریان متقاطع یا Cross Current (برای سرمایش یا گرمایش هوا و گاز استفاده می‌شود، بخصوص اگر سیال خنک کننده گاز باشد، از این نوع مبدل استفاده می‌شود)

از لحاظ ساختمان (در تماس غیر مستقیم):

- دو لوله (Double Pipe)، با جریان مخالف یا همسو
- حلزونی (spiral)
- صفحه‌ای (plate)
- پوسته و لوله (Shell & Tube)
- کولرهای هوایی (Air Cooler)

➤ مبدل‌های دو لوله:

مزایا:

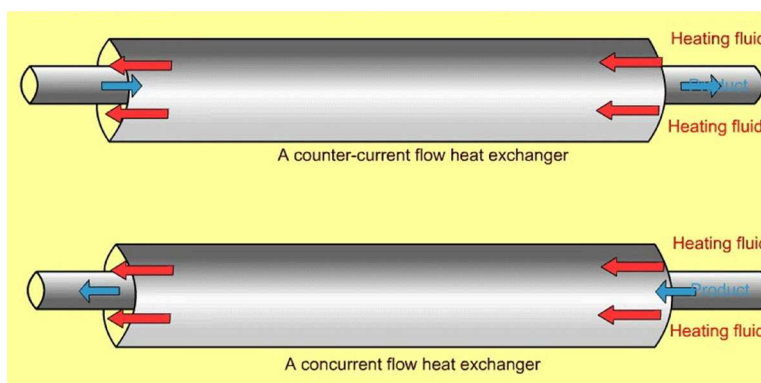
- در هر مسیری که لازم باشد می‌توان با استفاده از اتصالات استاندارد، از این مبدل نصب نمود.

⁸⁰ baffle

- در صورت وجود سیال شدیداً رسوب‌زا یا نیاز به سطح انتقال حرارت کم، از این مبدل استفاده می‌شود زیرا تمیز نمودن و تعویض قطعات آن بسیار ساده است.

معایب:

- میزان انتقال حرارت نسبت به مبدل‌های دیگر، بعلت پایین بودن سطح انتقال حرارت، پایین می‌باشد و استفاده از تعداد زیادی از این مبدل‌ها جهت بالا بردن میزان انتقال حرارت، فضای زیادی اشغال می‌نماید و نیز از لحاظ اقتصادی عملی نمی‌باشد.



شکل ۴-۱ - مبدل دو لوله

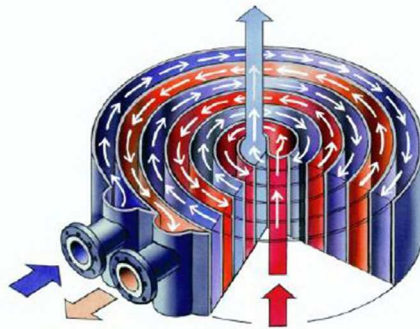
➤ مبدل‌های حلزونی:

مزایا:

- در مقایسه با انواع دیگر مبدل‌ها، بخاطر شکل خاص صفحه‌ها، حجم کمتری را اشغال می‌کند.
- بعلت انحنای مسیر حرکت سیال، علاوه بر افت فشار پایین، ضریب انتقال حرارت بالاتری را فراهم می‌آورد.
- در هر دو مسیر حرکت سیال، امکان تشکیل رسوب کمتر شده و در نتیجه دوره تعمیراتی این نوع مبدل، طولانی‌تر می‌شود.

معایب:

- صفحات بخاطر شکل فنری خود، انرژی پتانسیل زیادی در خود ذخیره کرده و هنگام باز نمودن این نوع مبدل ممکن است با شدت به بیرون پرتاب گردند، به همین جهت سرویس و نگهداری این مبدل، مشکل می‌باشد. همچنین بخاطر همین مشکل، در هنگام جازدن صفحات نیاز به صرف زمان زیادی می‌باشد.



شکل ۴-۲ - مبدل حلزونی

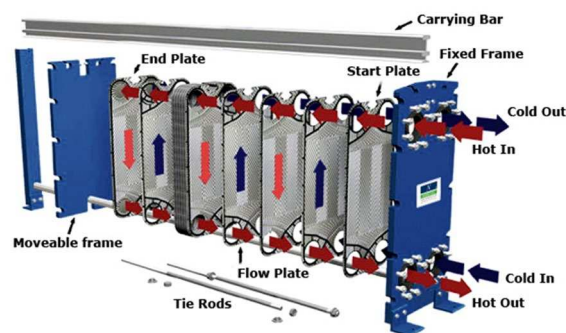
➤ مبدل‌های صفحه‌ای:

مزایا:

- ضریب انتقال حرارت بسیار بالایی دارند.
- فضای کمی اشغال می‌کنند که برای جاهایی مثل سکوها به‌برداری که محدودیت فضایی دارند، مناسب است.

معایب:

- وجود صفحات گسترده فلزی و نیز هزینه ساخت بالا بخاطر شکل خطوط روی صفحات برای افزایش انتقال حرارت
- سرویس و تعمیر این مبدل (بخاطر قرارگیری دقیق gasket ها در جای خود) دشوار می‌باشد.
- این مبدل دارای محدودیت فشاری و دمایی است (در دماهای نزدیک به نقطه ذوب gasket ها و فشار بالای 20 barg نمی‌توان بکار گرفته شود)



شکل ۴-۳ - مبدل صفحه‌ای

➤ مبدل‌های پوسته و لوله (شامل قسمتهای head ، shell و tube):

از لحاظ نوع Rear End Head (سر انتهایی):

- Fixed Tubesheet که دارای Rear Head ثابت می‌باشند.
- U-Type که لوله‌ها به شکل U بوده و حداقل دارای دو گذر لوله می‌باشند.

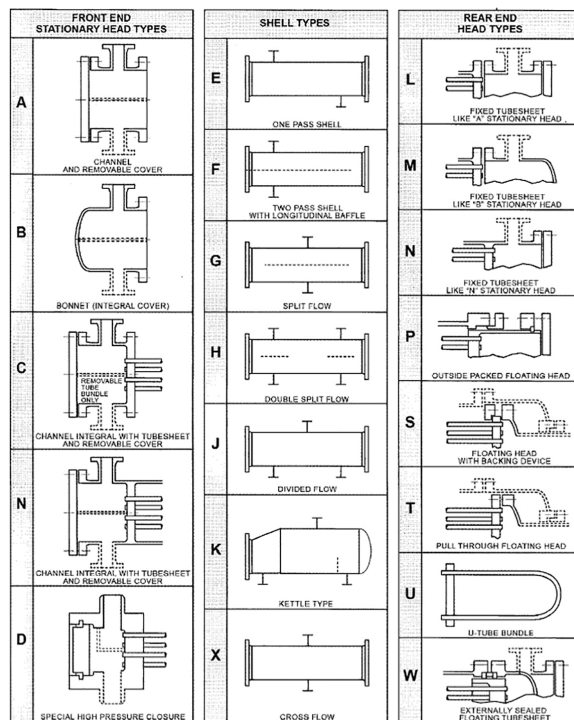
- Floating Head که دارای Rear Head متحرک می‌باشند که برای حالتی که تغییرات دمایی خیلی زیاد باشد، مناسب هستند.

مزایا:

- میزان انتقال حرارت بالا
- سهولت تعمیر و نگهداری آن
- این نوع مبدل تنها مبدلی می‌باشد که در شرایط دمایی بیشتر از 360°C و فشاری بیشتر از 30 barg می‌تواند کار کند.
- بعلت نبود اتصالات داخلی در بعضی از انواع آن (مانند نوع Fixed Tube Sheet یا U-Type)، احتمال نشتی کمتر می‌باشد و نیز در فضای مربوطه به این اتصالات، می‌توان لوله‌های بیشتری را داخل پوسته قرار داد (نوع Fixed Tube Sheet).
- هزینه ساخت کمتر و نیز سهولت در ساخت بعضی از انواع آن وجود دارد (مانند نوع U-Type).
- در بعضی از انواع آن، امکان تعویض لوله‌ها وجود دارد.

معایب:

- در بعضی از انواع آن، محدودیت دمایی و فشاری وجود دارد (بعضی از انواع Floating Head).
- در بعضی از انواع آن بخاطر وجود اتصالات داخلی، تعداد لوله‌های کمتری در پوسته قرار می‌گیرد (نوع Floating Head).
- هزینه ساخت بعضی از انواع آن بالا می‌باشد.
- در بعضی از انواع آن، امکان تعویض لوله‌ها وجود ندارد (در نوع U-Type فقط امکان تعویض لوله‌های محیطی وجود دارد).



شکل ۴-۴ - طرح‌های مختلف برای سرهای جلویی، انتهایی و پوسته مبدل نوع پوسته-لوله بر اساس استاندارد TEMA و برایش دهم

در نرم افزار Aspen HYSYS یکی از حالات شبیه‌سازی مبدلهای حرارتی در حالت پایا، استفاده از مدل Steady State Rating می‌باشد که در این حالت می‌توان در قسمت TEMA Type و بر اساس استاندارد TEMA، حالات مختلف برای Front End Stationary Head، Rear End Head و Shell را (جدول بالا) برای نرم‌افزار تعریف نمود.

مهمترین وظیفه بافلها در مبدلهای پوسته-لوله، ثابت نگه داشتن لوله‌ها در کل مجموعه و جلوگیری از ارتعاشات ناشی از گردابه‌های بوجود آمده توسط جریان روی لوله‌ها می‌باشد. همچنین جریان برگشتی سمت پوسته را هدایت می‌نمایند و در امتداد لوله‌ها به پیش می‌رانند. وظیفه دیگر آنها افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی بعثت تغییر سرعت و جهت جریان می‌باشد.

۶- نحوه توزیع سیالات در سمت پوسته و لوله در مبدلهای پوسته-لوله

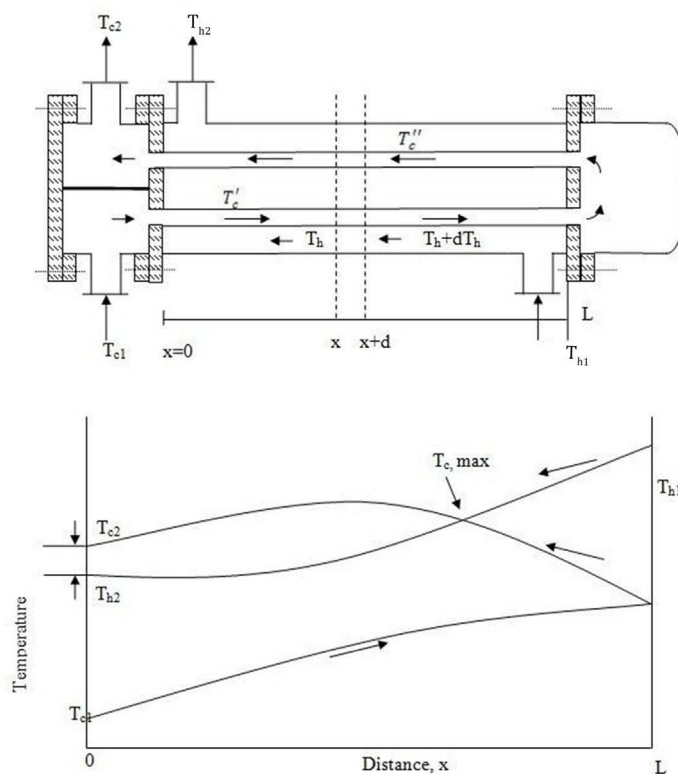
- سیالی که دما و فشار بالاتری دارد، باید وارد لوله شود (به دلیل قطر کمتر، لوله‌ها با ضخامت معمولی، برای مقاومت در برابر فشارها و دماهای بالا مناسب می باشند)
- سیالی که خاصیت رسوب‌دهی داشته باشد، باید وارد لوله شود (در صورت جریان یافتن داخل پوسته، چون سطح مقطع بیشتری دارد، بیشتر رسوب تشکیل می‌شود و بطور کلی تمیز نمودن لوله‌ها آسانتر می‌باشد)
- سیال خورنده، باید وارد لوله شود (تا فقط لوله خورده شود یا فقط لازم باشد تا لوله از مواد مقاوم در برابر خوردگی ساخته شود)
- سیال سمی، باید وارد لوله شود (تا سیال سمی از لحاظ نشتی به محیط، محدود نگه داشته شود)
- سیال کثیف، باید وارد لوله شود (زیرا تمیز کردن لوله آسانتر می‌باشد)، البته سیالهای حاوی مواد جامد را به خاطر ایجاد ساییدگی در خم موجود در لوله‌ها، نمی‌توان وارد بخش لوله نمود.
- سیالی که باید فشار آن بالا نگه داشته شود، باید وارد لوله شود (بخش پوسته، افت فشار بیشتری دارد)
- سیال ویسکوز، باید وارد پوسته شود (زیرا عدد Re پوسته بعثت قطر بیشتر، نسبت به لوله بالاتر و تلاطم و نتیجتاً ضریب انتقال حرارت جابجایی در بخش پوسته نیز بیشتر می‌باشد)
- گازها باید وارد پوسته شوند، زیرا تلاطم در آنجا بیشتر است.

۷- Temperature Cross در مبدلهای پوسته-لوله

در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله یا یک مبدل حرارتی چند گذر، اگر دمای سیال سرد خروجی بیشتر از دمای سیال گرم خروجی باشد، اختلاف این دو دما، به Temperature Cross یا Temperature Pinch منتسب می‌باشد. تقاطع دمایی نشاندهنده یک نیروی محرک منفی برای انتقال حرارت بین سیالات می‌باشد. این مستلزم یک سطح بزرگ برای انتقال حرارت یا سرعتی از سیال برای افزایش ضریب انتقال حرارت کلی می‌باشد. این تقاطع دمایی نامطلوب می‌باشد، بخصوص برای مبدلهای پوسته و لوله، زیرا سطح جانبی لوله بطور موثری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و بنابراین اتلاف هزینه سرمایه‌ای وجود دارد. اگر دماهای خروجی، یک تقاطع دمایی در یک مبدل حرارتی با چندگذر لوله را شکل دهند، یک فاکتور تصحیح LMTD کمتر از مقدار مطلوب رخ خواهد داد. یک راه ساده برای جلوگیری از این پدیده، استفاده از پوسته‌های سری بیشتری می‌باشد. مهندسين ديگر، پيشنهاده مي‌کنند که یک تقاطع دمایی کوچک، قابل قبول بوده و ممکن است یک طراحی با هزینه کمتری نسبت به انتخابهای پیچیده‌تر را ارایه دهد. برای یک مبدل حرارتی پوسته و لوله نوع E با دوگذر لوله و یک گذر پوسته، تقاطع

دمایی در حول وحوش یک بازه نسبتاً باریک از مقدار F ، در حدود 0.78 تا 0.82 رخ می‌دهد. مقادیر F کمتر، بعنوان نماینده‌ای از اینکه تقاطع دمایی اتفاق خواهد افتاد، تفسیر می‌گردد.

از مفهوم تقاطع دمایی در خروجی مبدل، برای تعیین تعداد پوسته مورد نیاز در حالت سری برای گرمای مبادله شده بدون داشتن تقاطع دمایی در هر پوسته مجزا، می‌توان استفاده کرد. تقاطع دمایی برای مبدل حرارتی پوسته و لوله نامطلوب می‌باشد، زیرا سطح جانبی لوله نسبت به هزینه آن بصورت موثری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. یک طراحی بهینه برای حالتی که تقاطع دمایی فقط در قسمت انتهایی گذر لوله دوم بیافتد، معنی می‌دهد.



شکل ۴-۵ - تقاطع دمایی در مبدل پوسته و لوله

طبق شکل بالا که سیال گرم درون پوسته و سیال سرد درون لوله جریان دارد، یک تقاطع دمایی در گذر دوم لوله داریم. در این گذر، گرما از لوله به پوسته منتقل می‌گردد. این خلاف طراحی هدف که بصورت مطلوب انتقال حرارت فقط می‌بایست در یک جهت، از سیال داخل پوسته به سیال داخل لوله، در سرتاسر دو گذر اتفاق بیافتد، می‌باشد. علت این تقاطع دمایی به این صورت است: باوجودیکه اضافه نمودن سطح (یک مقدار زیاد از NTU یا یک ضریب تصحیح $LMTD$ کم، F)، در بالا بردن دمای سیال لوله موثر بوده و تا نقطه x در گذر دوم، افزایش پیدا می‌نماید، اما آن طرف این نقطه، دمای سیال داخل پوسته، از سیال داخل لوله کمتر می‌گردد و سیال داخل پوسته توسط گذر اول به سرعت سرد می‌گردد. بنابراین، اضافه نمودن سطح در گذر دوم لوله سمت چپ نقطه x ، از دیدگاه طراحی حرارتی بی‌فایده می‌باشد. یک طراحی خوب از تقاطع دمایی در مبدلهای پوسته و لوله پرهیز می‌نماید، بنابراین یک حد برای NTU (بیشینه) وجود دارد که بیشتر از آن، تقاطع دمایی بوجود می‌آید که از روی آن یک ضریب تصحیح F برای $LMTD$ بدست می‌آید که بعنوان F کمینه شناخته می‌شود که کمتر از آن، تقاطع دمایی وجود خواهد داشت. تقاطع دمایی برای انواع دیگر پوسته‌های طبق استاندارد $TEMA$ مانند یک گذر پوسته و دو گذر لوله G ، H و J نیز قابل ارزیابی می‌باشد.

۸- دیگ بخار و انواع آن

دیگ بخار^{۸۱} یک ظرف بسته می‌باشد که آب یا سیال دیگری در آن گرم می‌گردد. در آمریکای شمالی معمولاً اصطلاح کوره^{۸۲} برای حالتی که مقصود واقعاً به جوش آوردن سیال نباشد، استفاده می‌گردد. سیال گرم یا تبخیر شده برای استفاده در فرایندها یا کاربردهای گرمایشی گوناگون شامل گرم کردن آب، گرمایش مرکزی، تولید برق و موارد مرتبط با مسایل بهداشتی فاضلاب، از دیگ بخار خارج می‌گردد. دیگ بخار جزئی از یک سیستم تولید کننده بخار است ولی از آنجا که یکی از اصلی‌ترین بخشهای این سیستم می‌باشد، به مولدهای بخار، دیگ بخار اطلاق می‌شود. یک مولد بخار، مجموعه‌ای مشتمل بر: پیش‌گرمکن آب تغذیه^{۸۳} که آب را بوسیله گازهای احتراقی داغ، پیش‌گرم می‌نماید تا در مصرف سوخت صرفه جویی گردد، دیگ بخار یا همان boiler، سوپرهیتر جهت افزایش دمای بخار اشباع توسط انرژی گازهای احتراقی داغ، بازیاب حرارتی و پیش‌گرمکن هوا می‌باشد. در واقع دیگ‌های بخار دستگاههای هستند که آب را به بخار تبدیل کرده و انرژی لازم برای تبدیل آب به فاز بخار را از انواع سوخته‌های فسیلی، تشعشعی و الکتریکی فراهم می‌آورند، آنها پرکاربردترین تجهیزات در صنعت پتروشیمی محسوب می‌شوند و مصرف سوخت بالایی دارند که بخار تولیدی عمده‌ای برای مصارف فرایندی و نیز تولید آب شیرین و تولید برق در توربین‌های بخار کاربرد دارد. برای ایجاد حرارت در دیگ‌های بخار، از ذغال سنگ پودر شده، سوخت مایع (مشتقات نفتی) و یا گاز طبیعی که دارای احتراق تمیز و آلودگی نسبتاً پایینی است، استفاده می‌گردد.

آب خوراک دیگ بخار به BFW(Boiler Feed Water) مشهور می‌باشد که بایستی از یکسری مراحل تصفیه آب، گذشته و میزان ناخالصی‌ها و مواد باقیمانده موجود در آن به حداقل حالت ممکن رسیده باشد. بعنوان مثال اگر آب دریا منبع تامین کننده آب باشد، می‌بایست آب شور بعد از نمک‌زدایی در تاسیسات آب شیرین‌کن، تصفیه و اکسیژن‌زدایی گردد و سختی آن نیز کاهش یابد و مواد شیمیایی خاصی نیز به آن تزریق شود.

مواد شیمیایی، هم به آب تغذیه (اکسیژن‌زداها)^{۸۴} مثل هیدرازین جهت حذف اکسیژن باقیمانده در آب زیر قسمت عمده اکسیژن و دی اکسیدکربن در هوازدا^{۸۵} از آب گرفته می‌شود و آمین خنثی‌کننده که در هر دو فاز می‌تواند وجود داشته باشد، جهت خنثی‌سازی محیط اسیدی بواسطه حضور دی اکسید کربن. ذکر این نکته ضروری می‌باشد که بعضی از اکسیژن‌زداها مانند هیدرازین، می‌توانند به عنوان آمین تشکیل‌دهنده فیلم در تشکیل و نگهداری لایه محافظ در برابر خوردگی نیز ایفای نقش نمایند)، هم به آب محفظه دیگ بخار (مانند تری‌فسفات سدیم برای تنظیم PH آب معمولاً بالاتر از مقدار ۹/۵، جهت جلوگیری از تشکیل رسوب کمپلکس‌های نامحلول کلسیم و منیزیم بعلت وجود سختی احتمالی^{۸۶} و متعاقباً پرهیز از کاهش انتقال حرارت و مسایل خوردگی بعدی) و هم به هدر بخار بعد از دیگ بخار (مانند آمین تشکیل‌دهنده فیلم جهت جلوگیری از خوردگی بواسطه حل شدن دی اکسیدکربن حاصل از تجزیه حرارتی کربناتها و بی کربناتها در بخارات کندانس شده و تشکیل اسید کربنیک و نیز حضور اکسیژن، در صورتیکه ماده اکسیژن‌زدا خاصیت تشکیل دهنده لایه محافظ را نداشته باشد) تزریق می‌گردند. بطور کلی علت تصفیه آب خوراک عبارتست از:

– جلوگیری از تشکیل رسوب در محفظه دیگ بخار

⁸¹ boiler

⁸² furnace

⁸³ economizer

⁸⁴ Oxygen Scavenger

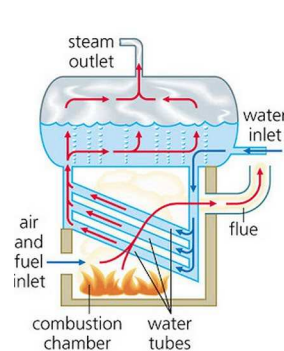
⁸⁵ deaerator

^{۸۶} ترکیبات فسفات با آب، PH محیط را بالا برده و از طرفی با سولفات کلسیم و سولفات منیزیم در این PH بالا واکنش داده و منجر به روی سطح آمدن آنها شده که در نهایت تخلیه و از آب خارج می‌گردند.

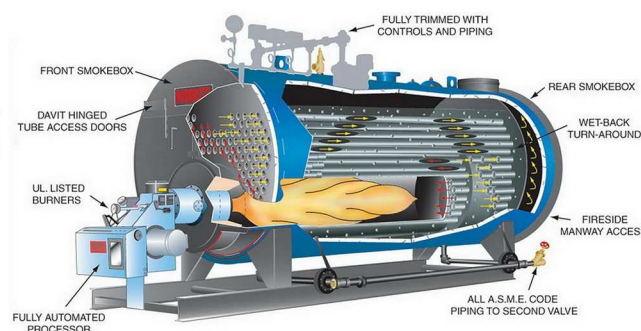
– به حداقل رساندن خوردگی در دیگ بخار و سیستم بخار

– حفظ کیفیت بخار

به مرور زمان غلظت مواد نامحلول در آب دیگ‌های بخار افزایش خواهد یافت، همچنین ذرات جامد حل شده در ضمن تولید بخار در آب، باقی‌مانده و باعث ایجاد رسوب می‌گردند و در غلظت‌های بسیار بالای این ذرات، آب دیگ بخار کف کرده و مقداری از ذرات جامد محلول را وارد فاز بخار می‌نماید که مشکلات زیادی مانند رسوب در سوپرهیتر و پره‌های توربین را به همراه خواهد داشت که بخاطر همین دلایل، بواسطه سیستم دورریز پیوسته و متناوب^{۸۷}، مقداری از آب دیگ بخار تخلیه می‌گردد که همراه آن، بخشی از رسوبات و املاح نیز خارج گردند.



Water Tube Boiler



Fire Tube Boiler

شکل ۴-۶ - شمای دو دیگ بخار متداول

دیگ‌های بخار به صورت زیر طبقه بندی می‌گردند:

- Pot boiler or Haycock boiler (در قرن هجدهم برای تولید بخار بسیار کم فشار با ظرفیت بالا استفاده می‌شده است)
- Fire-Tube boiler (با ظرفیت متوسط و قابل استفاده در کارگاهها و تاسیساتی که مصرف بخار در آنها کم می‌باشد)
- Water-Tube boiler (با ظرفیت بالا و قابل استفاده در مجتمع‌های پتروشیمی یا نیروگاهها)
- Flash boiler (نوع خاص دیگ بخار Water-Tube است که لوله‌ها بهم نزدیک می‌باشند)
- Fire-Tube boiler with Water-Tube firebox (نوعی دیگ بخار ترکیب شده از دیگ‌های بخار Water-Tube و Flash)
- Sectional boiler (با ظرفیت پایین جهت تولید آب گرم برای مصارف خانگی)

آب در دیگ‌های بخار نوع Water-Tube در لوله‌ها جریان دارد و این دیگ‌های بخار قابلیت کار در فشارهای بالا را بخاطر توزیع فشار در لوله‌ها و کوچک شدن قطر drum دارند و ظرفیت تولید آنها بالا است. همچنین این دیگ‌های بخار بخاطر فشار بالاتر و نیز امکان سوپرهیت نمودن آب، قابلیت تولید بخار تا دمای 540°C را داشته و در کل دارای راندمان‌های بالای حرارتی می‌باشند (حدود ۹۵٪). اما آب در دیگ‌های بخار Fire-Tube در پوسته استوانه‌ای این دیگ‌های بخار جریان داشته و لوله‌های حامل گازهای داغ حاصل از احتراق سوخت، از میان آب می‌گذرند. ظرفیت تولید بخار و فشار طراحی در آنها نسبت به دیگ‌های بخار نوع قبلی به مراتب پایین‌تر بوده، درجه حرارت بخار خروجی از آنها در حد اشباع می‌باشد و راندمان حرارتی

⁸⁷ Continuous & Intermittent Blowdown

آنها حداکثر تا ۸۰٪ است که البته با نصب پیش‌گرمکن آب ورودی، راندمان حرارتی چند درصدی بالا می‌رود. مزیت اصلی دیگ‌های بخار نوع Fire-Tube سهولت کاربرد آنها در شرایط ناپیوسته با ظرفیت پایین می‌باشد.

اعداد بدون بعد:

عدد بایوت (نسبت مقاومتهای حرارتی داخل و در لبه جسم)

$$Bi = \frac{\text{توان جابجایی}}{\text{مقاومت هدایتی}} = \frac{h.L}{K}$$

عدد پرانتل - تشابه بین انتقال مومنتوم و انتقال حرارت (نفوذ حرارتی)

$$Pr = \frac{\text{نفوذ مومنتم}}{\text{نفوذ حرارتی}} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{K}{\rho C_p}} = \frac{\mu C_p}{K}$$

که متناظر با عدد اشمیت، $Sc = \frac{\mu}{\rho D}$ در انتقال جرم می‌باشد.

عدد ناسلت (انتقال حرارت در یک فیلم سیال)

$$Nu = \frac{\text{انتقال حرارت جابجایی}}{\text{انتقال حرارت هدایتی}} = \frac{hL}{K}$$

که متناظر با عدد شروود، $Sh = \frac{F}{CD_{AB}} = \frac{FL}{L}$ در انتقال جرم می‌باشد.

عدد پکلت

$$Pe = \frac{\text{انتقال حرارت بواسطه جریان سیال}}{\text{انتقال حرارت بواسطه نفوذ}} = Re.Pr = \frac{C_p L u \rho}{K} = \frac{Lu}{\alpha}$$

عدد استانتون (انتقال حرارت در جابجایی اجباری)

$$St = \frac{\text{انتقال حرارت جابجایی}}{\text{انتقال حرارت بواسطه جریان سیال}} = \frac{Nu}{Re.Pr} = \frac{Nu}{Pe} = \frac{h}{C_p u \rho}$$

عدد گراشف (انتقال حرارت در جابجایی آزاد)

$$Gr = \frac{\text{نیروی شناوری}}{\text{نیروی لزجی}} = g L^3 \beta \Delta T \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^2$$

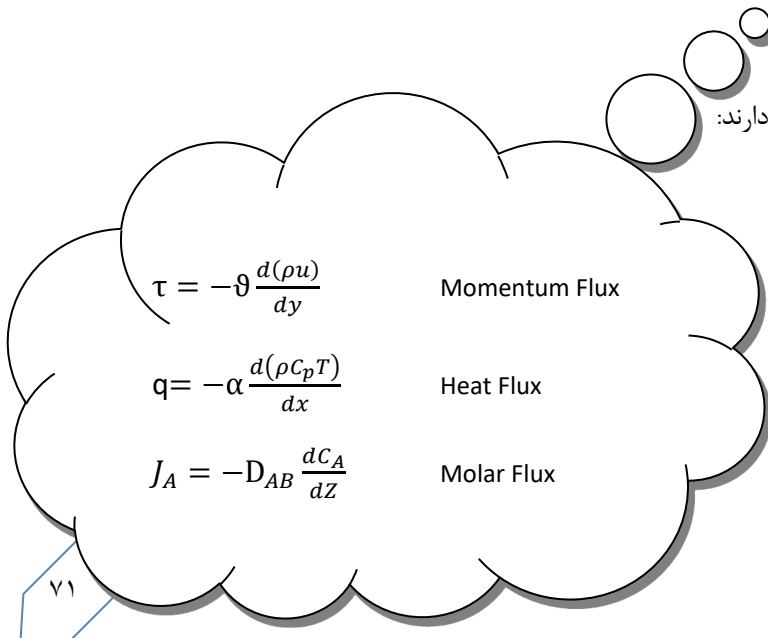
این عدد همان نقش عدد رینولدز در جابجایی اجباری را در جابجایی آزاد ایفا می‌نماید.

عدد گراتز (برای تعیین توسعه یافتگی گرمایی جریان سیال در لوله‌ها)

$$GZ = Re.Pr \cdot \frac{D}{L}$$

تشابه بین پدیده‌های انتقال:

برای جریان آرام این تشابهات بکار می‌روند و ماهیت مولکولی دارند:



فصل پنجم / راکتورهای شیمیایی

واکنش شیمیایی فرآیندی است که طی آن یک یا چند ماده به مواد دیگر تبدیل می‌شوند. بررسی ساز و کار انجام یک واکنش شیمیایی را سینتیک واکنش شیمیایی گویند. علم سینتیک شیمیایی به نحوه انجام واکنش، واکنشهای جانبی، مواد واسط تولیدی و بسیاری از جزئیات یک واکنش می‌پردازد. درواقع سینتیک شیمیایی، ساخت مدلی ریاضی از واکنش است که می‌توان به وسیله آن، ویژگیهای یک واکنش شیمیایی را توضیح داد.

راکتور شیمیایی نیز وسیله‌ای است که در آن واکنشهای شیمیایی انجام می‌گیرد و طی آن، ماده و یا مواد اولیه خام با ارزش اقتصادی کمتر به محصولات ارزشمند تبدیل می‌شوند. طراحی و بهره‌برداری از راکتورهای شیمیایی از جمله مهمترین وظایف متخصصین صنایع شیمیایی و مهندسين شیمی می‌باشد. طراحی راکتور شیمیایی نیازمند شناخت صحیح از واکنش شیمیایی انجام گرفته در راکتور و درک سنتیک واکنشها می‌باشد. به همین منظور، تسلط بر علومی چون ترمودینامیک و ریاضیات ضروری خواهد بود.

راکتورهای شیمیایی

۱- راکتورهای شیمیایی و انواع آن

راکتور یک ظرف یا محفظه تحت فشار با شکلهای مختلف می‌باشد که در آن به همراه عملیات انتقال جرم و حرارت، واکنشهای شیمیایی نیز صورت می‌گیرد و در آن، مواد ورودی به محصولات (پلیمری و غیر پلیمری) تبدیل می‌گردند. واکنشهای شیمیایی که در داخل راکتور صورت می‌گیرند، به دو دسته کلی متجانس^{۸۸} و نامتجانس^{۸۹} تقسیم بندی می‌گردند. واکنشهای متجانس واکنشهایی می‌باشند که در آنها تمام ترکیب شونده‌ها در یک فاز که ممکن است گاز، مایع و یا جامد باشد، موجود هستند. همچنین در صورتیکه واکنش کاتالیستی باشد، کاتالیست هم بایستی در همان فاز، وجود داشته باشد. واکنشهای نامتجانس، واکنشهایی هستند که برای انجام آنها، حداقل دو فاز لازم است. سیستمهای گاز-مایع، گاز-جامد، مایع-جامد و مایع-مایع از این دسته محسوب می‌گردند. متغیرهای زیادی سرعت واکنش را تغییر می‌دهند. در سیستمهای متجانس، دما، فشار و غلظت متغیرهای واضحی می‌باشند. در سیستمهای نامتجانس، بدلیل آنکه بیش از یک فاز وجود دارد و بایستی در طول واکنش، مواد از یک فاز به فاز دیگر منتقل شوند، علاوه بر دما، فشار و غلظت، سرعت انتقال جرم و سرعت انتقال حرارت نیز اهمیت دارد. بطور کلی انواع واکنشها عبارتند از واکنشهای شیمیایی (احتراق، سنتز، تجزیه، جانشینی یگانه، جانشینی متقابل، اسید و باز) و پلیمری.

انواع راکتورهای شیمیایی

از لحاظ عملکرد:

- راکتورهای ناپیوسته یا Batch
- راکتورهای نیمه پیوسته یا Semi Batch
- راکتورهای پیوسته یا Continuous

از لحاظ ساختمان:

- راکتورهای مخلوط شونده پیوسته یا CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor)
- راکتورهای لوله‌ای یا PFR (Plug Flow Reactor)
- راکتورهای بستر ثابت یا Fixed Bed Reactor
- راکتورهای بستر سیال یا Fluidized Bed Reactor
- راکتورهای بستر متحرک یا Moving Bed Reactor

از لحاظ جریان مواد:

- جریان plug
- جریان mixed

⁸⁸ Homogeneous

⁸⁹ Heterogeneous

○ راکتورهای ناپیوسته (batch)

از دیدگاه تاریخی، راکتورهای ناپیوسته از آغاز صنعت شیمیایی مورد استفاده بوده و هنوز هم بصورت وسیعی در تولید مواد شیمیایی با ارزش افزودنی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این نوع راکتورها، مواد واکنش‌دهنده در همان ابتدا وارد راکتور می‌شوند و سپس جریان خوراک قطع می‌گردد. محتویات راکتور برای مدت مشخصی کاملاً مخلوط شده و پس از مدت زمان معینی که واکنش پیشرفت نمود، محصول و محتویات داخل راکتور تخلیه می‌گردد، راکتور تمیز شده و مجدداً برای نوبت بعدی آماده می‌گردد. در این راکتورها غلظت در طول زمان، تغییر می‌نماید اما اختلاط کامل باعث می‌گردد که در هر لحظه، دما و ترکیب در سرتاسر راکتور یکنواخت باشد. امتیاز این راکتورها در این است که با اختصاص زمان لازم برای انجام واکنش، مواد اولیه با درصد تبدیل بالا به محصولات مورد نظر، تبدیل گشته و نیازی به تجهیزات اضافی نیست. نمونه صنعتی این نوع راکتورها، راکتور تولید فنول فرمالدهید که در ساخت چسب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این نوع راکتورها در موارد زیر بکار می‌روند:

- تولید صنعتی محصولات گرانبه، با کیفیت بالا و در ظرفیت کم مانند داروها
- آزمایش نمودن فرایندهای ناشناخته
- برای محصولاتی که تولید آنها در شرایط مداوم مشکل می‌باشد
- واکنشهای فاز مایع که نیاز به مدت زمان طولانی برای انجام واکنش دارند
- تولید محصولات متعدد در یک راکتور

مزایا:

- انعطاف پذیری بیشتر نسبت به راکتورهای پیوسته برای محصولات متنوع
- بهای اندک

معایب:

- استفاده از این نوع راکتورها، محدود به واکنشهای متجانس در فاز مایع می‌باشد.
- بالا بودن هزینه تولید و عملیات در واحد حجم محصول (بدلیل بالا بودن زمان چرخه و زمان تخلیه و شستشو)
- زمان طولانی لازم برای خالی و پرکردن مجدد و تمیز نمودن آن
- تولید صنعتی در مقیاس بالا در اینگونه راکتورها مشکل می‌باشد.

○ راکتورهای نیمه‌پیوسته (Semi Batch)

راکتورهای نیمه پیوسته موارد استفاده متفاوتی دارند و نیز همان محدودیتهای راکتورهای ناپیوسته را دارا می‌باشند. از امتیازات راکتورهای نیمه‌پیوسته، کنترل خوب دما و واکنشهای گرمازا و واکنشهای نامطلوب و محدود نمودن تولید محصولات ناخواسته است. راکتورهای نیمه‌پیوسته اغلب برای واکنشهای دوفازی که یکی از اجزاء ترکیب شونده گاز باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد که جزء گازی بصورت حباب به داخل فاز مایع، درون راکتور تغذیه می‌گردد. در بسیاری از موارد، در این نوع راکتورها مواد اولیه بصورت پیوسته وارد راکتور شده و زمانیکه میزان تبدیل مطلوب بدست آمد، با افزودن مواد متوقف کننده،

محتویات درون راکتور جهت انجام فرایند بعدی و یا تخلیص، تخلیه می‌گردد (تفاوت این نوع راکتور با راکتور ناپیوسته). مثال صنعتی این نوع راکتور، راکتور PVC که واکنش پلیمریزاسیون تبدیل مونومر وینیل کلراید انجام می‌گیرد، می‌باشد.

○ راکتورهای پیوسته (continuous)

عملکرد راکتورهای پیوسته به گونه‌ای است که همواره مواد اولیه بصورت پیوسته وارد راکتور می‌شوند و محصولات نیز بطور پیوسته از آن خارج می‌گردند. مدت زمانیکه مواد داخل راکتور سپری می‌کنند به حجم راکتور و سرعت حرکت مواد داخل راکتور بستگی دارد. در صنایع شیمیایی استفاده از این نوع راکتورها کاربرد زیادی دارد. بعنوان مثال، تمام راکتورهای واحد PET پتروشیمی تندگویان از نوع راکتور پیوسته می‌باشند.

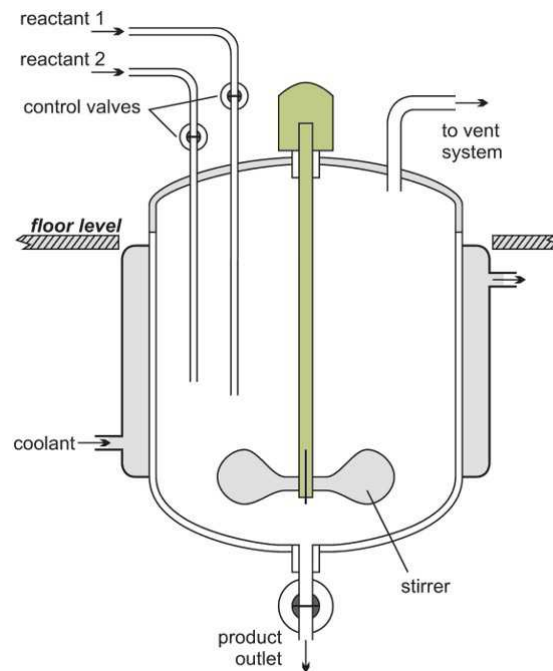
مزایا:

- کاهش هزینه‌های عملیاتی بعلت حذف عملیاتی نظیر پرکردن و خالی کردن راکتور
- پایداری شرایط واکنش و ثبات کیفیت محصول
- امکان تولید حجم بالاتری از محصولات نسبت به دیگر راکتورها

○ راکتورهای مخلوط شونده پیوسته (Continuous Stirred-Tank Reactor)

این نوع راکتورها اغلب به شکل استوانه‌های عمودی مجهز به یک همزن هستند که از لحاظ جریان از نوع mixed و از لحاظ عملکرد از نوع پیوسته می‌باشند. در این راکتورها مواد اولیه وارد راکتور می‌گردند و پس از اختلاط در آن و اقامت برای مدت زمان مشخصی، از راکتور خارج می‌گردند. این راکتورها زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که یک واکنش شیمیایی نیاز به همزدن شدید داشته باشد. کنترل دما در این راکتورها به آسانی انجام می‌گیرد، همچنین این راکتورها برای اغلب واکنشهای متجانس در فاز مایع، استفاده می‌گردند. پارامتر موثر در اندازه راکتور، قطر آن است. از محدودیت‌های این نوع راکتورها، میزان تبدیل پایینتر در مقایسه با سایر راکتورهای پیوسته باز، در واحد حجم محصول می‌باشد. بهمین دلیل حجم راکتور مذکور را بایستی بسیار بزرگ انتخاب نمود تا به درصد تبدیل بالا دست یافت. در صنعت، معمولاً از این نوع راکتورها بصورت سری استفاده می‌گردد. بعنوان مثال راکتورهای واحد PP پتروشیمی بندرامام، بصورت ۵ راکتور از این نوع بصورت سری هستند. در این راکتورها، جریان خوراک و محصول بصورت پیوسته می‌باشد و فرض می‌گردد که محتویات راکتور، کاملاً بهم می‌خورد. این عمل منجر به یکنواختی دما و ترکیب در راکتور می‌شود. بعلت این اختلاط، یک جزء سیال ممکن است در همان لحظه‌ای که وارد راکتور می‌گردد، آنرا ترک نماید یا برای مدت زمان زیادی در داخل راکتور باقی بماند، بنابراین زمان اقامت هریک از اجزاء سیال در راکتور، متفاوت است. برای یکنواخت نمودن دمای داخل این نوع راکتورها عموماً از ژاکت‌های حرارتی و کویلها و در بعضی موارد از مبدلهای حرارتی استفاده می‌گردد.

پره همزن‌ها به شکلهای مختلفی می‌تواند وجود داشته باشد اما آنها را با توجه به نوع جریانی که در راکتور ایجاد می‌کنند به دو دسته جریان محوری و جریان شعاعی تقسیم بندی می‌نمایند. در این نوع راکتورها گاه‌ها از بافلها بر روی جداره داخلی راکتور، جهت ایجاد جریانهای متلاطم و با اختلاط بهتر و نیز شکستن خطوط جریان در مجاورت دیواره‌های مخزن استفاده می‌گردد. بافل باعث می‌شود که جریان از حالت مماسی به محوری تبدیل گردد که باعث اختلاط بیشتر می‌شود.



شکل ۵-۱ - راکتور CSTR

در موارد زیر نیازی به استفاده از بافل نمی‌باشد:

- جهت اختلاط کم مایعات ویسکوز
- راکتورهایی با سطح مقطع مربعی یا مستطیلی
- راکتورهایی که همزن آنها بر روی دیواره نصب شده است
- در سیستمهایی که دارای خاصیت رسوب‌گذاری شدید باشد، ترجیحاً استفاده نمی‌گردد

مزایا:

- مناسب برای تولید در مقیاس انبوه و حجم بالاتری از محصول
- کنترل آسان دما
- دسترسی آسان به فضای داخل راکتور

معایب:

- پایین‌تر بودن میزان تبدیل نسبت به دیگر راکتورهای پیوسته
- بالاتر بودن هزینه ساخت و کنترل آن نسبت به راکتورهای ناپیوسته

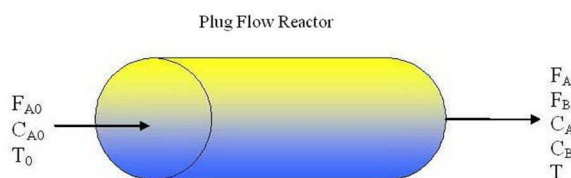
○ راکتورهای لوله‌ای (Plug Flow Reactor)

در صنایع شیمیایی برای فرایندهای با مقیاس بزرگ، معمولاً از راکتورهای لوله‌ای استفاده می‌گردد زیرا نگهداری سیستم راکتورهای لوله‌ای بعلت نداشتن قسمت‌های متحرک، آسان می‌باشد و معمولاً بالاترین درصد تبدیل مواد اولیه در واحد حجم راکتور را در مقایسه با سایر راکتورهای پیوسته دارا می‌باشند. بعنوان مثال راکتور واحد MEG پتروشیمی مارون از این نوع

راکتور می‌باشد. این نوع راکتورها دارای چندین لوله و تیوب بطور افقی و موازی هستند و برخلاف راکتورهای مخلوط شونده پیوسته که دارای یک غلظت مشخص در هر مرحله هستند، دارای یک گرادیان غلظت در طول راکتور می‌باشند و با انجام واکنش در طول راکتور، بتدریج مواد اولیه به محصولات تبدیل می‌شوند. این نوع راکتورها از لحاظ جریان از نوع plug و از لحاظ عملکرد از نوع پیوسته می‌باشند.

اغلب واکنشهای متجانس در فاز گاز، در این نوع راکتورها انجام می‌گیرند. از محدودیت‌های این نوع راکتورها، مشکل کنترل دما برای واکنشهای گرمازایی است که بسیار سریع عمل می‌نمایند و نهایتاً منجر به نقاط داغ^{۹۰} می‌گردند. این نقاط باعث می‌شوند که کیفیت محصول کاهش یافته و راکتور نیز آسیب ببیند. در این راکتورها نیز مانند راکتور ناپیوسته، زمان اقامت برای تمامی اجزاء سیال، مساوی می‌باشد. درواقع، سیستمی متشکل از تعدادی راکتورهای مخلوط شونده پیوسته سری، عملکردی مشابه با یک راکتور لوله‌ای دارد (در اینحالت هرچه تعداد راکتورهای مخلوط شونده پیوسته بیشتر باشد، خواص سیستم به حالت لوله‌ای نزدیکتر می‌گردد) و از طرفی اگر میزان جریان برگشتی به داخل راکتور نوع plug زیاد باشد، عملاً عملکرد این راکتور بصورت راکتوری با جریان mixed می‌گردد.

جریان Plug به جریانی گفته می‌شود که اجزای سیال در داخل آن کاملاً منظم بوده و هیچ جزء از اجزای دیگر سبقت نمی‌گیرد و مخلوط نمی‌شود. البته ممکن است اختلاط شعاعی در این نوع جریان، وجود داشته باشد اما هیچگونه اختلاط یا نفوذ در طول مسیر جریان مشاهده نمی‌گردد، یعنی زمان اقامت همانطور که گفته شد، برای تمام اجزاء سیال در این نوع راکتور یکسان می‌باشد.



شکل ۵-۲ - راکتور PFR

گاهی در راکتورهای لوله‌ای نیز برای اختلاط جریان و تلاطم به ترتیب از انواع همزن و بافل استفاده می‌گردد. همچنین برای کنترل دما، ژاکتهای حرارتی بکار برده می‌شوند.

مزایا:

- مناسب برای تولید در مقیاس انبوه
- عدم وجود قطعه متحرک و بنابراین نگهداری آسانتر راکتور
- درصد تبدیل بالاتر در واحد حجم راکتور نسبت به راکتورهای مخلوط شونده پیوسته
- ساده بودن از لحاظ مکانیکی

⁹⁰ Hot Spot

- حجم کم و هزینه ساخت پایین‌تر نسبت به راکتورهای مخلوط شونده پیوسته

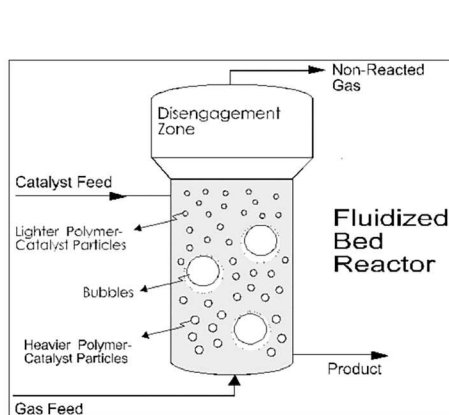
معایب:

- امکان ایجاد نقاط داغ در راکتور در واکنشهای گرمازا
- کنترل دشوارتر راکتور نسبت به راکتورهای مخلوط شونده پیوسته

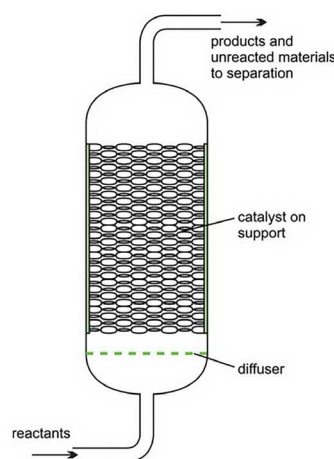
○ راکتورهای بستر ثابت (Fixed Bed Reactor)

در راکتورهای بستر ثابت، بستری که حاوی دانه‌های جامد کاتالیستی است، درون محفظه راکتور قرار می‌گیرد. واکنشهای نامتجانس از نوع گازی و کاتالیستی در این نوع راکتورها انجام می‌گیرد. سیال خوراک بصورت یکنواخت با بستر جامد کاتالیستی در تماس بوده و واکنش هنگام عبور واکنشگرها از روی این بستر انجام می‌شود بطوریکه زمان تماس کافی بین کاتالیست و واکنش دهنده‌ها، رسیدن به درصد تبدیل مورد نظر را امکانپذیر می‌سازد. غالباً واکنشگرها از بالای راکتور بستر ثابت یگانه (تک بستر) وارد شده و به سمت پایین بصورت شعاعی یا محوری می‌باشد که جریان شعاعی به علت افت فشار کمتر آن، ترجیح داده می‌شود و پس از عبور از روی بستر و انجام واکنش، تبدیل به محصولات شده و از پایین راکتور خارج می‌گردند. در این نوع راکتورها بایستی دما، افت فشار و توزیع یکنواخت جریان به دقت کنترل شود. بعنوان مثال نمونه‌ای از این نوع راکتورها در بخش تصفیه نفتای واحد آروماتیک پتروشیمی بندر امام وجود دارد.

راکتورهای بستر ثابت باتوجه به نحوه پرکردن کاتالیست در راکتور به حالت‌های تک بستر، چند بستر افقی، یک پوسته‌ای با چندین لوله پر شده از کاتالیست، یک پوسته‌ای پر شده از کاتالیست به همراه لوله‌هایی برای عبور مواد و بسترهایی با پوسته‌های جداگانه که بصورت سری یا موازی به هم متصلند، تقسیم‌بندی می‌شوند.



Fluidized Bed Reactor



Fixed Bed Reactor

شکل ۵-۳ - شمای دو راکتور بستر سیال و بستر ثابت

مزایا:

- درصد تبدیل بالای آنها در واحد وزن کاتالیست مصرف شده در مقایسه با سایر راکتورهای کاتالیستی
- قیمت پایین‌تر این نوع راکتورها نسبت به راکتورهای مشابه، مخصوصاً نسبت به راکتورهای بستر سیال

معایب:

- مشکل کنترل دما
- مشکل جایگزینی کاتالیست بعد از غیرفعال شدن آن
- گاهی ایجاد پدیده کانالیزه شدن مواد گازی در حین عبور از درون راکتور، باعث کاهش زمان اقامت لازم برای انجام واکنش می‌گردد

○ راکتورهای بستر سیال (Fluidized Bed Reactor)

نوع دیگری از راکتورهای کاتالیستی، راکتور بستر سیال می‌باشد که از لحاظ عملکردی پیوسته می‌باشند. در این نوع راکتورها برخلاف راکتورهای بستر ثابت که کاتالیستهای جامد بصورت ثابت بر روی هم قرار می‌گیرند، کاتالیست در فضای داخل راکتور به علت سرعت بالای سیال ورودی، بصورت معلق درآمده و با واکنشگرها در تماس قرار می‌گیرند. حرکت مداوم مواد داخل راکتور، یک سیستم سوسپانسیونی و معلق را در داخل راکتور ایجاد می‌کند.

راکتورهای بستر سیال همانند راکتور مخلوط شونده پیوسته، محتویات داخل راکتور اگر چه غیرمتجانس می‌باشند اما بخوبی با یکدیگر مخلوط شده و باعث توزیع یکنواخت دما در تمامی نقاط راکتور می‌گردند. به دلیل ظرفیت بالا و کنترل دمای مناسب، این نوع راکتورها کاربرد صنعتی زیادی پیدا نموده‌اند و بطور کلی مزایای اقتصادی قابل توجه راکتورهای بستر سیال، عامل اصلی استفاده موفقیت‌آمیز این راکتورها در صنعت، علیرغم بعضی معایب آنها، می‌باشد.

در راکتورهای بستر سیال که کاتالیست آنها به سرعت غیرفعال می‌گردد، می‌توان از ویژگی معلق بودن ذرات کاتالیست در راکتور و قابلیت جابجایی آسان آنها استفاده نمود و یک بخش احیاءکننده کاتالیست متصل به راکتور را در نظر گرفت. اضافه کردن این بخش اگر چه باعث افزایش قیمت ساخت راکتور می‌گردد ولی بدلیل عدم نیاز به احداث واحد جداگانه‌ای برای احیاء کاتالیست، از نظر اقتصادی توجیه می‌گردد. اما در فرایندهایی که کاتالیست آنها به سرعت غیرفعال نمی‌شود، مانند راکتورهای "اکسی کلریناسیون EDC" پتروشیمی ارونند و یا فرایندهایی که کاتالیست استفاده شده، طی انجام واکنش مصرف شده و به همراه محصولات خارج می‌گردد مانند راکتور واحد LLDPE پتروشیمی امیرکبیر، دیگر نیازی به احداث بخش احیاءکننده کاتالیست نمی‌باشد.

مزایا:

- مخلوط شدن سریع جامدات و توزیع یکنواخت دما در تمامی نقاط داخل راکتور و نتیجتاً عدم وجود نقاط داغ
- ظرفیت بالا و مناسب بودن برای عملیات در مقیاس بزرگ
- سهولت احیا و جایگزین نمودن کاتالیست
- جریان ملایم و مایع مانند ذرات، اجازه می‌دهد که عملیات بصورت اتوماتیک و بطور ساده کنترل گردد
- این نوع راکتورها، در مقابل تغییرات سریع به آرامی عملکرد نشان می‌دهند
- گردش ذرات جامد بین دو بستر سیال، امکان برداشت (یا اضافه نمودن) مقدار زیادی حرارت تولید شده (یا مورد نیاز) در راکتورهای بزرگ را فراهم می‌نماید

- سرعت انتقال جرم و حرارت بالا در مقایسه با سایر روشهای تماس
- بعلت بالا بودن شدت انتقال حرارت، سطح انتقال حرارت نسبتاً کمتری مورد نیاز می‌باشد

معایب:

- برای بسترهای حبابی شامل ذرات ریز، نحوه جریان گاز و انحراف از حالت ایده‌آل باعث بازده پایین تماس می‌گردد.
- مخلوط شدن ذرات کاتالیست در بستر و خروج تصادفی آنها، باعث فراوری غیریکنواخت کاتالیست در احیاءکننده می‌گردد که نتیجه آن کاهش بازده راکتور می‌باشد.
- ذرات جامد کاتالیست شکننده، خرد شده و توسط گاز به بیرون حمل می‌گردند که بایستی جایگزین گردند.
- خوردگی لوله‌ها و ظروف بخاطر اصطکاک با ذرات جامد، می‌تواند جدی باشد.

○ راکتورهای بستر متحرک (Moving Bed Reactor)

در راکتورهای بستر ثابت اگر کاتالیست مصرفی در فرایند، بگونه‌ای باشد که احیاء آن بایستی بطور مداوم و در فواصل زمانی کوتاه صورت پذیرد، بستر کاتالیستی چنین راکتورهایی را بصورت متحرک درمی‌آورند و راکتور بگونه‌ای طراحی می‌گردد تا بتوان کاتالیست را بصورت مداوم احیاء نمود.

راکتورهای بستر متحرک شامل دو بخش راکتور و احیاءکننده می‌باشند. کاتالیست در بستر این راکتورها، متحرک بوده یعنی از محفظه بیرون می‌آید و پس از احیاء، مجدداً به داخل راکتور باز می‌گردد. درواقع زمانیکه عمر فعال کاتالیست کوتاه باشد و یا بتوان کاتالیست را بطور مداوم احیاء نمود، از این نوع راکتورها استفاده می‌گردد. برای حرکت کاتالیست، از جریانهای گازی استفاده شده و کاتالیستهایی که از پایین راکتور خارج می‌شوند، توسط جریان گازی به سمت ظرف جمع‌آوری کننده کاتالیست، هدایت می‌شوند تا از آنجا به داخل احیاءکننده بروند و سپس به راکتور بازگردانده می‌شوند.

در راکتورهای بستر متحرک، کاتالیستها در جهت مشخصی حرکت می‌کنند ولی در راکتورهای بستر سیال بطور نامنظم و در کل فضای داخلی راکتور پراکنده شده و جهت مشخصی ندارند. بعنوان مثال راکتور دهیدروژناسیون واحد MTBE پتروشیمی بندر امام، بصورت بستر متحرک می‌باشد که خوراک از پایین راکتور وارد شده و بصورت شعاعی درون بستر کاتالیستی پراکنده شده و سپس به سمت جداره راکتور به حرکت در می‌آید و حین عبور از بستر، واکنش داده و نهایتاً محصول از راکتور خارج می‌گردد و کاتالیست درون بستر، از بالا به پایین، عمود بر حرکت شعاعی واکنشگرها در حرکت می‌باشد. مثالی دیگر شامل بخش CCR واحد آروماتیک پتروشیمی بوعلی‌سینا می‌باشد که از چهار راکتور بستر متحرک پشت سر هم تشکیل یافته است.

۲- پارامترهای موثر در عملکرد راکتورها

برای راکتورها، سه پارامتر مهم جهت توصیف عملکرد راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد:

درصد تبدیل یا conversion: نسبت مقدار مواد واکنشگر مصرف شده در راکتور به مقدار مواد واکنشگر ورودی به آن می‌باشد. اگر واکنش برگشت پذیر باشد، حداکثر درصد تبدیلی که به آن می‌توان دست یافت، درصد تبدیل تعادلی نامیده می‌شود.

yield: نسبت مقدار جرمی و یا مولی محصول مطلوب تولید شده به مقدار جرمی و یا مولی مواد واکنشگر (محدود کننده) ورودی به راکتور و یا مواد واکنشگر (محدود کننده) مصرف شده می‌باشد.

گزینش‌پذیری یا selectivity: نسبت مقدار محصول مطلوب تولید شده به مقدار محصول یا محصولهای نامطلوب می‌باشد. درواقع گزینش‌پذیری پارامتری است که نشان می‌دهد چگونه شرایط (دما، فشار و غلظت واکنشگرها) را کنترل نماییم تا از بین همه واکنشهایی که انجام می‌شود، میزان محصول مطلوب حداکثر و میزان محصول نامطلوب حداقل گردد.

متغیرهای مهمی که بر عملکرد راکتور تاثیر دارند عبارتند از:

غلظت راکتور: هنگامی که بیش از یک ماده واکنش‌دهنده وجود داشته باشد، اغلب استفاده از مقدار بیش از نیاز یکی از واکنش‌دهنده‌ها، نتیجه مطلوبی بدست خواهد داد. مخصوصاً اگر بخواهیم یکی از مواد بطور کامل مصرف گردد (به علت قیمت بالا یا خطرناک بودن). گاهی اوقات مناسب است که یک ماده خنثی همراه با خوراک به راکتور تغذیه گردد و یا قبل از پیشرفت کامل واکنش، محصول تولیدی خارج شود. بعضی اوقات نیز استفاده از یک مسیر برگشتی از فرآورده‌های جانبی ناخواسته به راکتور، مطلوب می‌باشد.

در مورد واکنشهای برگشت‌ناپذیر اگر یکی از ترکیبات ورودی بیشتر از مقدار مورد نیاز به واکنش وارد گردد، می‌توان ماده دیگر را به سمت کامل کردن سوق داد. اما اگر واکنش برگشت‌پذیر باشد، هدف افزایش درصد تبدیل تعادلی می‌باشد. اگر یکی از خوراکها را به مقدار اضافی وارد نماییم، می‌توانیم درصد تبدیل تعادلی را افزایش دهیم. گاهی با حذف مداوم محصول یا یکی از محصولات از راکتوری که واکنش در آن درحال پیشرفت است، می‌توان درصد تبدیل تعادلی را افزایش داد.

دمای راکتور: افزایش سرعت مولکولها در دمای بالاتر، تعداد برخوردهای موثر را افزایش می‌دهد. انتخاب دمای راکتور به عوامل زیادی بستگی دارد. عموماً این انتخاب باید به گونه‌ای باشد که سرعتهای زیاد واکنش و حجم کمتر راکتور را ایجاد نماید. به طور عملی محدودیت‌هایی در انتخاب دمای راکتور وجود دارد: از جمله ملاحظات ایمنی، محدودیت‌های جنس ساختمان راکتور، حداکثر دمای عملکرد کاتالیست و یا حداکثر دمای عدم تغییر خواص مواد اولیه و محصولات. برحسب نوع واکنش، انتخاب دما متفاوت خواهد بود.

اگر یک واکنش گرماگیر باشد، عملکرد در دمای بالا، باعث افزایش درصد تبدیل می‌گردد. همچنین دمای بالا سرعت واکنش را زیاد و حجم راکتور را کم می‌کند. بنابراین برای چنین واکنشهایی، تا آنجا که ممکن است، دما بالا درنظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که با ملاحظات ایمنی، محدودیت‌های جنس ساختمان راکتور، تخریب و عمر کاتالیست و تغییر خواص مواد اولیه و محصولات مطابقت داشته باشد.

برای واکنشهای برگشت‌ناپذیر گرمازا، تا آنجا که ممکن است، با توجه به ساختمان مواد، عمر کاتالیست و مسایل ایمنی، بایستی دما را بالا درنظر گرفت. دراینصورت حجم راکتور حداقل خواهد شد. اما چنانچه واکنشی گرمازا و برگشت‌پذیر باشد، عملکرد در دمای پایین حداکثر مقدار درصد تبدیل تعادلی را ایجاد خواهد نمود. لیکن عملکرد در دمای پایین، سرعت واکنش را کاهش می‌دهد و درنتیجه باعث افزایش حجم راکتور خواهد گردید. بنابراین، برای اینحالت در ابتدای واکنش که از تعادل دور هستیم، استفاده از دمای بالا به منظور افزایش سرعت واکنش مناسب‌تر بوده و هنگامیکه با گذشت زمان به شرایط تعادلی نزدیک می‌شویم، برای افزایش درصد تبدیل تعادلی، دما را بایستی پایین آورد.

اگر در راکتور، واکنشها و محصولات جانبی نیز تولید شود، دما باید به گونه‌ای انتخاب گردد که محصولات جانبی کمتری تولید گردد. در اینحالت اغلب افزایش تولید محصول مطلوب، نسبت به حجم راکتور ترجیح داده می‌شود.

فشار راکتور: در فاز گاز به علت فاصله بین مولکولها و حرکت زیاد و برخورد آنها، برای کنترل سیستم، از پارامتر فشار استفاده می‌شود. افزایش فشار در واکنشهای برگشت‌ناپذیر گاز، سرعت واکنش را زیاد می‌نماید و لذا حجم راکتور را کاهش می‌دهد.

این امر به دو علت ایجاد می‌گردد: هم به علت کاهش زمان اقامت مورد نیاز برای یک تبدیل معین در راکتور و هم به وسیله افزایش دانسیته گاز و در نتیجه افزایش برخوردهای موثر بین آنها.

به طور کلی پارامتر فشار، اثر ناچیزی بر روی سرعت واکنشهای فاز مایع دارد. انتخاب فشار در واکنشهای برگشت پذیر فاز بخار به این امر بستگی دارد که آیا واکنش همراه با کاهش و یا افزایش در تعداد مول‌ها است و یا اینکه تولید محصول با واکنشها و محصولات جانبی، همراه است یا خیر. اگر واکنش برگشت پذیر با کاهش تعداد مول‌ها همراه باشد، افزایش فشار راکتور، درصد تبدیل تعادلی و سرعت واکنش را افزایش و حجم راکتور را کاهش می‌دهد، بنابراین در این حالت باید فشار در بالاترین حد عملیاتی تنظیم گردد، نباید از این نکته غافل شد که فشار بالا از طریق توان بالاتر کمپرسور تامین می‌گردد که از نظر هزینه، قابل توجه است، بعلاوه ساختمان مکانیکی لازم برای فشار بالا، هزینه گزافی را ایجاد می‌نماید. در واکنشهای برگشت پذیر که با افزایش تعداد مول‌ها همراه است، کاهش فشار راکتور، درصد تبدیل تعادلی را افزایش ولی سرعت واکنشهای فاز بخار را کاهش و حجم راکتور را افزایش می‌دهد. بنابراین در ابتدای کار که از تعادل دور هستیم، استفاده از فشارهای بالا به منظور افزایش سرعت واکنش مناسب‌تر بوده و هنگامیکه به شرایط تعادلی نزدیک می‌شویم، برای افزایش درصد تبدیل بالا، فشار را بایستی کاهش داد.

اگر در راکتور، واکنشها و محصولات جانبی نیز تولید شود، فشار باید به گونه‌ای انتخاب گردد که محصولات جانبی کمتری تولید گردد. در این حالت اغلب افزایش تولید محصول مطلوب، نسبت به حجم راکتور ترجیح داده می‌شود.

فاز راکتور: اگر امکان یک انتخاب آزاد بین واکنشهای فاز مایع و واکنشهای فاز گاز وجود داشته باشد، معمولاً فاز مایع ترجیح داده می‌شود، چون حجم راکتور مورد نیاز در واکنشهای فاز مایع کوچکتر است و نیز تجهیزات مورد استفاده برای فاز مایع کم هزینه‌تر می‌باشد.

کاتالیست: کاتالیست‌ها روی میل ترکیبی مواد اثر گذاشته و باعث افزایش سرعت واکنش شیمیایی می‌شوند بدون آنکه خود در واکنش مصرف گردند (امروزه به اشتباه لفظ کاتالیست برای بعضی از آغازکننده‌های واکنشهای پلیمری که خود در طول واکنش مصرف می‌شوند، نیز اطلاق می‌گردد). برای شروع واکنش، واکنشگرها باید به سطح مناسبی از انرژی برسند که به این سطح انرژی، انرژی اکتیواسیون گفته می‌شود. این انرژی از انرژی اولیه واکنشگرها بیشتر است و مواد برای رسیدن به انرژی اکتیواسیون، نیاز به مدت زمان زیاد و دما و فشار بالایی دارند، در نتیجه سرعت واکنش بسیار کند و ایمنی نیز کم خواهد شد. کاتالیست‌ها، انرژی اکتیواسیون لازم برای واکنش مواد اولیه را کاهش داده و باعث می‌شوند که واکنش در شرایط ایمن‌تری از دما و فشار انجام پذیرد. از مزایای استفاده از کاتالیست، کاهش فشار و دمای عملیاتی، افزایش ایمنی واحد و کاهش هزینه ساخت دستگاهها می‌باشد و عیب آن نیز، گرانی قیمت بودن آن است.

اختلاط: در صنایع شیمیایی و بخصوص در راکتورها، با مخلوط کردن و همزدن مکانیکی مواد، احتمال برخوردهای موثر آنها را افزایش داده و باعث افزایش سرعت واکنش بین مواد می‌شود. در نتیجه اختلاط یکی از ابزارهای رسیدن به کیفیت مطلوب واکنش است. اهداف مخلوط کردن شامل تماس دو سیال اختلاط ناپذیر، پخش یکنواخت حبابهای گاز در فاز مایع، معلق نمودن ذرات جامد در مایعات، کمک به بهبود انتقال جرم بین فازهای مخلوط شده و مهمتر، توزیع مناسب دما در راکتورها و جلوگیری از ایجاد نقاط داغ در آنها می‌باشد.

فصل ششم / کنترل فرایندها

کنترل فرایند یک رشته مهندسی است که برای حفظ خروجی یک فرایند خاص در محدوده مورد نظر، معماری‌هایی را شکل داده و مکانیزم‌ها و الگوریتم‌هایی را ایجاد می‌نماید. یک فرایند شیمیایی عملاً آرایش منطقی و مهندسی از واحدهای پردازش‌کننده نظیر راکتورهای شیمیایی، مبدل‌های حرارتی، برج‌های جذب و تقطیر، پمپ‌ها، تبخیرکننده‌ها و... می‌باشد. هدف وجودی فرایند، تبدیل مواد خام ورودی و اولیه به محصولاتی با ارزش افزوده بالا می‌باشد. در حین عملیات، این هدف باید تحت یک سری قیود اعم از قیود فنی، اقتصادی، ایمنی و همچنین اغتشاشات محیطی انجام پذیرد. لذا بدیهی است که برای یک فرایند، هم پایش و هم کنترل مورد نیاز می‌باشد. در صورت کنترل موفق فرایندهای تولید مواد شیمیایی، علاوه بر کیفیت بالاتر محصول نهایی، دورریز محصولات نیز بسیار کاهش می‌یابد. از این منظر است که در کشورهای پیشرفته، همواره تلاش جهت تنظیم، طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های کنترلی جدیدتر و موثرتر بصورت نهادینه شکل گرفته است و حتی سرمایه‌گذاری‌های زیادی در جهت این هدف، انجام می‌گیرد.

کنترل فرایندها

۱- فلسفه علم کنترل فرایند و چگونگی کنترل فرایندهای شیمیایی

بطور کلی علم کنترل فرایند جهت کنترل پارامترهای عملیاتی نظیر ارتفاع مایع، فشار و دمای ظروف تحت فشار یا خلاء و دبی جریانها بصورت اتوماتیک، بوجود آمده است. اطلاعات مربوط به پارامترهای فرایندی و ارسال آنها، توسط انواع ترانسمیترها^{۹۱} به اتاق کنترل صورت پذیرفته و سپس مقدار عددی پارامتر ارسال شده (بعنوان مثال ساده، میزان درصد ارتفاع نفت خام در یک ظرف فرایندی) در مازول کنترلی با مقدار مقرر که توسط اپراتور اتاق کنترل تعیین می‌شود، مقایسه می‌گردد و فرمان لازم برای کنترل آن پارامتر، از کنترل‌کننده برای انواع شیرهای کنترلی ارسال می‌شود و به این ترتیب شیر کنترلی (مانند شیر کنترلی تنظیم ارتفاع سطح نفت خام در یک تفکیک‌گر دو یا سه فازی که با هوا میزان باز یا بسته بودن آن تغییر می‌کند) با توجه به نوع فرایند کنترل و با توجه به فرمان دریافتی، باز یا بسته شده تا پارامتر فرایندی بصورت اتوماتیک و زیر نظر اپراتور اتاق کنترل تحت کنترل قرار گیرد. اپراتور مراقب دستگاه می‌تواند با خواندن انواع گیج‌های^{۹۲} دیجیتال و آنالوگ دمایی، فشاری و غیره از مقدار متغیرهای فرایندی آگاه شده و اتاق کنترل را نیز در جریان قرار دهد. همچنین شیرهای قطع-وصلی اضطراری و تخلیه اتوماتیک مانند SDV (Shut Down Valve) یا BDV (Blow Down Valve) ها که شیرهای اتوماتیک می‌باشند نیز در زمانهای اضطراری و با توجه به فرمان ارسال شده برای آنها، جهت جلوگیری از خطرات و نهایتاً کنترل فرایند، کاملاً باز یا کاملاً بسته می‌گردند.

۲- تعاریف Process Gain (Kp) ، SP (Set Point) ، PV (Process Value) ، OP (OutPut) ، اغتشاش، خطا، افت کنترل،

overshoot ، زمان مرده (DeadTime) ، تاخیر زمانی (Lag Time)

Process Gain (Kp) : که با Controller or Proportional Gain (Kc) متفاوت است و بهره فرایند می‌باشد یعنی در پاسخ به تغییر در خروجی کنترل‌کننده، چقدر متغیر فرایندی اندازه‌گیری شده تغییر خواهد نمود. بهره کنترل‌کننده یا بهره تناسبی به صورت تقسیم عدد ۱۰۰ بر درصد Proportional Band تعریف می‌گردد.

Set Point (SP) : مقدار مقرر یا مطلوب برای متغیر فرایندی که می‌بایست بر روی آن مقدار تنظیم گردد.

PV (Process Value) : مقدار متغیر فرایندی اندازه‌گیری شده مانند فشار یک تفکیک‌گر یا دمای نفت

OP (OutPut) : خروجی کنترل‌کننده در زمان t می‌باشد مانند مقدار باز بودن شیر کنترلی

اغتشاش: تغییری است ناخواسته که در متغیرهای خارجی فرایند، صورت می‌گیرد مانند تغییر دمای محیط که باعث می‌شود تغییرهای خروجی از مقادیر مطلوب انحراف پیدا نمایند.

خطا (error): اختلاف بین SP و PV در هر لحظه

افت کنترل یا خطای ماندگار (offset): خطای حالت پایدار می‌باشد، یعنی اختلاف بین SP و PV ، هنگامیکه زمان به بی نهایت میل نماید.

overshoot : مقداری است که متغیر فرایندی از مقدار مقرر در خلال یک تغییر در بار سیستم یا در مقدار مقرر، تجاوز می‌نماید. درواقع همان عکس‌العمل شدید سیستم در لحظه ورود یک تغییر به آن می‌باشد.

⁹¹ transmitter

⁹² gauge

زمان مرده (Dead Time): اختلاف زمان بین لحظه وارد شدن اغتشاش و لحظه شروع پاسخ سیستم کنترلی می‌باشد که به آن گاهی delay نیز اطلاق می‌گردد. این زمان مرده به ماهیت فرایند، موقعیت دستگاههای اندازه‌گیری و کنترل کننده‌ها بستگی دارد. زمان انتقال مواد یا انرژی از نقطه‌ای از واحد به نقطه دیگر، اغتشاشات خارجی و لویپهای کنترلی باعث بوجود آمدن این تاخیر در سیستم فرایندی می‌شود.

تاخیر زمانی (Lag Time): میزان زمان بعد از زمان مرده می‌باشد که متغیر فرایندی نیاز دارد تا به $\frac{63}{3}$ درصد از مقدار نهایی خود، پس از یک تغییر پله‌ای در موقعیت شیر برسد. این مفهوم با متغیر قابل مقداردهی که در بعضی از سیستم‌های کنترلی وجود دارد و سرعت عکس‌العمل یک کنترل کننده را می‌توان با آن تنظیم نمود، متفاوت است.

۳- اثر افزودن کنترل انتگرالی و مشتقی به کنترل تناسبی در کنترل کننده‌های PID و انواع روشهای تنظیم پارامترهای کنترلی در این نوع کنترل کننده

کنترل کننده‌های (Proportional-Integral-Derivative) PID :

بصورت خلاصه می‌توان گفت، اگر کنترلی وجود نداشته باشد، مقدار متغیر تا رسیدن به مقدار جدید حالت یکنواخت، افزایش می‌یابد. حال اگر کنترل تناسبی^{۹۳} وجود داشته باشد، سیستم کنترل قادر است که افزایش متغیر اندازه‌گیری را متوقف نماید و در نهایت، در یک حالت یکنواخت جدید نگاه دارد. اضافه نمودن کنترل انتگرالی^{۹۴} باعث حذف افت کنترل^{۹۵} می‌گردد و متغیر اندازه‌گیری شده در نهایت به مقدار معین شده باز می‌گردد. این، مزیت کنترل انتگرالی با زیان بخشی رفتار نوسانی‌تر آن می‌باشد. اضافه نمودن کنترل مشتقی^{۹۶} بهبودی خاصی در پاسخ، ایجاد می‌نماید. افزایش متغیر اندازه‌گیری شده، سریعتر و با نوسان کمتر، متوقف می‌شود.

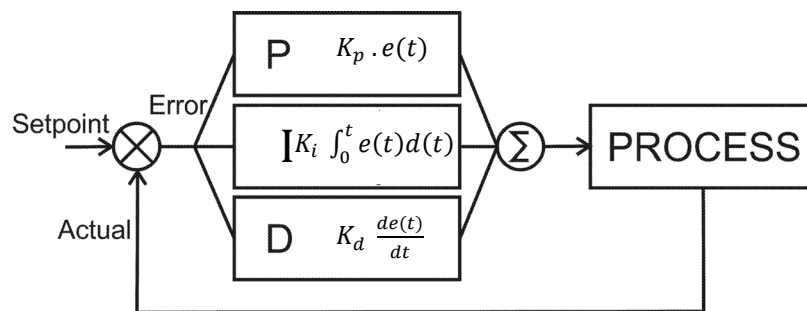
درواقع اگر به پاسخی سریع در مقابل اغتشاش ورودی نیاز باشد یا افت کنترل حالت پایدار مهم نباشد، استفاده از کنترل کننده فقط تناسبی، مناسب است. بطور کلی افزایش k تناسبی، باعث کنترل دقیق‌تر و بهتر فرایند می‌گردد، اما آنرا نمی‌توان نامحدود افزایش داد زیرا افزایش بیشتر از محدوده پایداری، باعث ناپایداری در پاسخ سیستم می‌گردد و با افزایش آن نیز در محدوده پایداری، زمان رسیدن به پاسخ نهایی، کاهش اما نوسان پاسخ افزایش می‌یابد. هنگامیکه وجود خطا نامطلوب باشد، می‌بایست از عمل انتگرال‌گیری برای رفع آن استفاده نمود. نقص عمل انتگرالی افزایش نوسان پاسخ می‌باشد و احتمال ناپایداری در فرایند را نیز افزایش می‌دهد. هرچه این عمل طولانی‌تر باشد، احتمال ناپایداری بیشتر است. اگر پاسخ کنترل کننده تناسبی-انتگرالی در مقابل اغتشاش به حد کافی نباشد، می‌توان از عمل مشتق‌گیری نیز استفاده نمود تا دوره نوسان پاسخ را کاهش داد. درواقع به این ترتیب با محاسبه مشتق تغییرات، جهت تغییرات خطا نسبت به SP مشخص می‌گردد.

⁹³ Proportional Control

⁹⁴ Integral Control

⁹⁵ offset

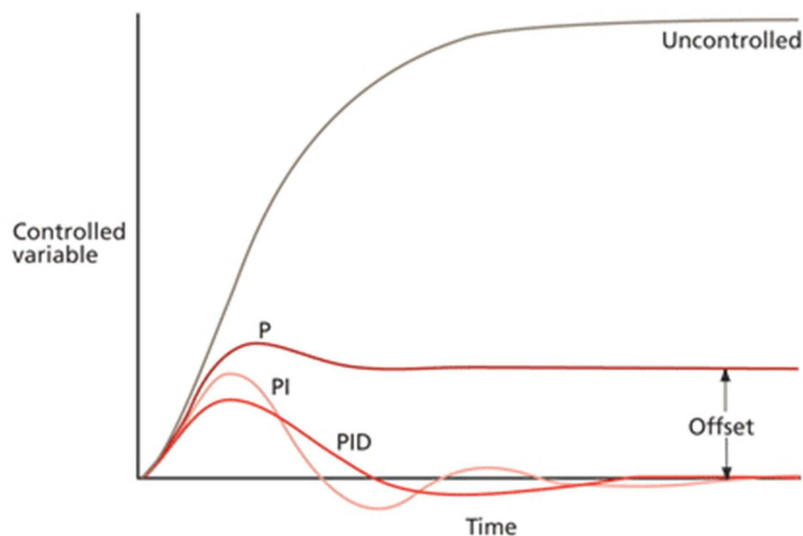
⁹⁶ Derivative Control



شکل ۶-۱ - نحوه عملکرد کنترل کننده PID (آرایش نوع موازی)

$$OP(t) = K_p E(t) + K_i \int E(t) + K_d \frac{dE(t)}{dt}$$

در شکل ۶-۱، آرایش نوع موازی برای کنترل کننده PID دیده می‌شود. بطور کلی سه نوع آرایش اصلی یعنی الگوریتم *series* یا *real*، *classical*، *interactive*، *ideal*، *noninteractive*، *standard* یا *ISA* و الگوریتم *parallel* که عموماً در کتاب‌های درسی دانشگاهی راجع به آن بحث می‌گردد، وجود دارد. در عمل تناسبی، رابطه‌ای خطی بین ورودی یا خطا و خروجی کنترل کننده وجود دارد، در عمل مشتقی، خروجی کنترل کننده متناسب با نرخ تغییرات ورودی یا خطا (مشتق خطا نسبت به زمان) نسبت به زمان می‌باشد و در عمل انتگرالی، خروجی کنترل کننده متناسب با انتگرال ورودی یا خطا می‌باشد.



نمودار ۶-۱ - اثر افزودن کنترل کننده‌های گوناگون به سیستم

روشهای مختلفی جهت تنظیم مدار کنترل کننده PID وجود دارد. معمولاً موثرترین روشها نیازمند توسعه بعضی از حالات مدل فرایندی و سپس انتخاب پارامترهای تناسبی، انتگرالی و مشتقی بر اساس پارامترهای مدل دینامیکی می‌باشد. روشهای تنظیم دستی، بخصوص برای سیستمهایی با زمانهای مدار طولانی، می‌تواند نسبتاً زمان‌بر باشد. انتخاب روش تاحد زیادی تابع اینکده آیا بتوان مدار کنترلی را بصورت *offline* درآورد یا خیر و تابع زمان پاسخ سیستم می‌باشد. اگر سیستم را بتوان *offline* نمود، اغلب بهترین روش تنظیم، متضمن تحمیل سیستم به یک تغییر پله‌ای در ورودی، اندازه‌گیری خروجی بصورت تابعی از زمان و استفاده از این پاسخ جهت تعیین پارامترهای کنترلی می‌باشد.

روشهای مختلف تنظیم پارامترهای کنترلی عبارتند از: تنظیم دستی، Ziegler-Nichols، Tyreus-Luyben، Cohen-Coon و ابزارهای نرم‌افزاری می‌باشد که هر یک، مزایا و معایبی دارند.

۴- تفاوت کنترل پسخور و پیشخور و تعریف کنترل نمودن مستقیم (direct) و معکوس (reverse) در کنترل پسخور

در کنترل پسخور یا Feedback، اغتشاشات، فرایند را آشفته کرده و بعد از تحت تاثیر قرار دادن آن، اندازه‌گیری شده و سپس سیستم کنترلی پاسخ مناسب را ارایه می‌دهد. در این کنترل، کنترل‌کننده به مقدار Process Value و Set Point نیازمند است تا بتواند با تغییر output شیر کنترلی، مقدار متغیر فرایندی را کنترل نماید. این روش، یک کنترل مدار بسته یا کنترل Closed Loop می‌باشد.

اما سیستم کنترلی در کنترل پیشخور یا Feedforward، قبل از اینکه فرایند تحت تاثیر اغتشاشات قرار گیرد، پاسخ داده و سیستم را کنترل می‌نماید. معمولاً اگر کنترل پسخور نتواند متغیر فرایندی را بخوبی کنترل نماید، از کنترل پیشخور استفاده می‌شود. در این کنترل، اغتشاشات ورودی قابل اندازه‌گیری بوده و می‌بایست بین اغتشاش ورودی مورد نظر، متغیر فرایندی که بایستی کنترل شود و متغیر عملیاتی که بواسطه آن عمل کنترل انجام می‌گیرد، رابطه ریاضی برقرار نمود. بعنوان مثال برای کنترل نمودن پیشخور دمای مایع خروجی از یک reboiler که با بخار آب گرم می‌گردد (مانند reboiler برج دفع واحد شیرین سازی آمین)، می‌بایست رابطه‌ای ریاضی بصورت $F_s = \frac{C_p}{\lambda} F(T_2 - T_1)$ ، بین دمای مایع خروجی (متغیر فرایندی، T_2)، دمای مایع ورودی (اغتشاش، T_1) و دبی بخار آب (متغیر عملیاتی، F_s) برقرار نمود.

برای استفاده از سیستم کنترل پیشخور، می‌بایست موارد زیر در نظر گرفته شود:

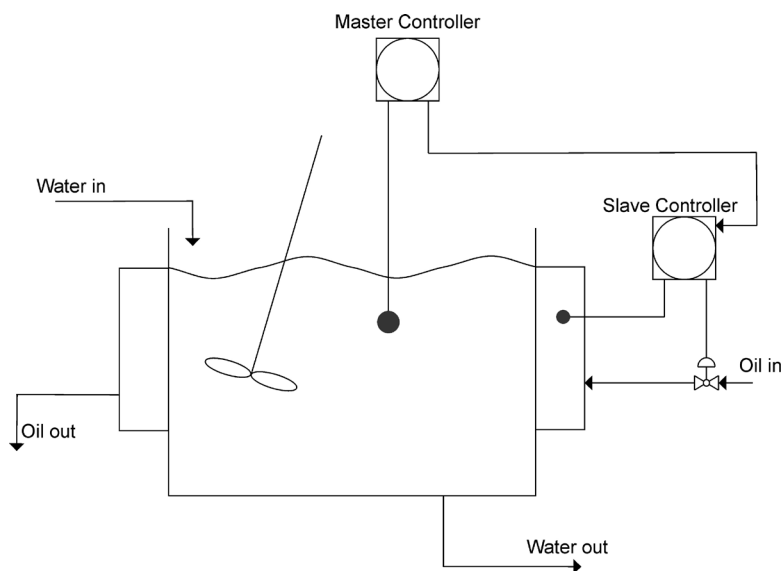
- اگر نوسانات ورودی به فرایند قابل اندازه‌گیری نباشد، نمی‌توان از این نوع کنترل استفاده نمود.
- مدل نسبتاً دقیقی از سیستم فرایندی مورد نیاز می‌باشد.
- اگر اغتشاشی بغیر از اغتشاش مورد نظر که در رابطه وجود دارد در فرایند وارد گردد، عمل اصلاحی بواسطه این کنترل در فرایند، انجام نخواهد گرفت.

در کنترل پسخور هرگاه تغییرات Process Value و output در یک جهت باشند، کنترل مستقیم (direct) و در غیر اینصورت معکوس (reverse) گفته می‌شود. بعنوان مثال کنترل سطح نفت در یک تفکیک‌گر، از نوع کنترل مستقیم می‌باشد زیرا در صورت افزایش سطح نفت در تفکیک‌گر و بیشتر شدن مقدار آن از مقدار مقرر، شیر کنترلی بیشتر باز خواهد شد. کنترل دمای یک گرمکن نفت با سوخت گازی که در آن گرم شدن نفت بصورت غیرمستقیم و بکمک گرم کردن سیال واسط می‌باشد، از نوع کنترل معکوس می‌باشد زیرا اگر دمای نفت افزایش یافته و از مقدار مقرر بیشتر شود، شیر کنترل دبی سوخت گازی بیشتر بسته شده تا مقدار حرارت داده شده به سیال کاهش یابد. روش کنترل پیشخور، با کنترل مدار باز یا کنترل Open Loop متفاوت می‌باشد.

۵- کنترل آبشاری^{۹۷}

سیستمهای کنترلی وجود دارند که در آنها با تغییر دبی جریان غیرفرایندی، یکی از مشخصات جریان فرایندی کنترل می‌شود. این سناریو تا زمانی کاربرد دارد که مشخصات جریانهای غیرفرایندی، نوسانات زیادی نداشته باشد. اگر در منبع آنها، نوسانات زیادی رخ دهد، کنترل فرایند با روش مذکور، غیر ممکن یا بسیار زمانبر می‌باشد. زیرا کنترل‌کننده اول هیچ سیگنالی از تغییرات جریانهای غیر فرایندی دریافت نمی‌کند تا عملکرد خود را اصلاح نماید.

در کنترل آبشاری، کنترل‌کننده اول بجای ارسال سیگنال روی شیر کنترلی، روی کنترل‌کننده دوم سیگنال می‌فرستد تا بتوان دبی جریان غیرفرایندی را براساس مشخصات آن کنترل نمود و به این ترتیب، آن مشخصه جریان فرایندی کنترل می‌گردد. با استفاده از کنترل آبشاری، تاخیر زمانی کنترل نیز تا حد زیادی از بین می‌رود. در این نوع کنترل، لوپ کنترل ثانویه داخل لوپ کنترلی اولیه قرار دارد. در حقیقت لوپ کنترلی دوم برای تغییر دادن متغیر فرایندی کنترل‌کننده اول در نظر گرفته شده و لوپ کنترل اول، Set Point کنترل دوم را کنترل می‌نماید. کنترل‌کننده اول master و کنترل‌کننده یا کنترل‌کننده‌های بعدی را slave می‌نامند که به این ترتیب خروجی کنترل‌کننده master بصورت Set Point برای کنترل‌کننده slave می‌باشد.



شکل ۶-۲ - کنترل آبشاری

بعنوان مثال فرایندی را در نظر می‌گیریم که آب در یک مخزن دو جداره با روغن داغ داخل جداره بیرونی، گرم می‌شود (شکل بالا). در حالت اول، دمای آب خروجی، اندازه‌گیری شده و سیگنال به کنترل‌کننده فرستاده شده و کنترل‌کننده نیز با ارسال فرمان برای شیر کنترلی دبی روغن، دبی آنرا تنظیم نموده تا دمای آب خروجی از مخزن کنترل گردد. این روش تا زمانی مناسب است که دمای منبع روغن داغ، نوسان زیادی نداشته باشد. در صورت وجود نوسان زیاد، کنترل فرایند در زمان طولانی انجام می‌گیرد یا به هیچ عنوان انجام نخواهد گرفت. در حالت دوم و استفاده از کنترل آبشاری، دو کنترل‌کننده و دو سنسور اندازه‌گیر وجود دارد.

⁹⁷ Cascade Control

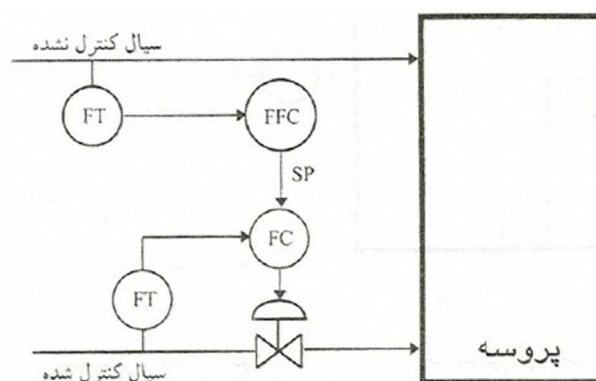
کنترل‌کننده اول سیگنال را از سنسور دمای آب دریافت و بجای اینکه روی شیر کنترلی سیگنال بفرستد، آنرا روی کنترل‌کننده دوم ارسال می‌کند. کنترل‌کننده دوم نیز با تغییر دبی روغن ورودی، دمای روغن داغ را کنترل می‌نماید. در این شرایط، کنترل‌کننده اول با تعریف مقدار مقرر جدید، بطور غیرمستقیم، دمای روغن را کنترل می‌نماید و اگر دمای روغن داخل جداره خارجی افت نماید، کنترل‌کننده دوم با توجه به سیگنالی که از سنسور روغن داغ دریافت نموده است، شیر کنترل را باز می‌نماید و دمای روغن بر اساس مقدار مقرر تنظیم می‌گردد که سیگنال آن را از کنترل‌کننده اول دریافت نموده است.

۶- کنترل‌های Ratio و Split-Range

کنترل نسبت^{۹۸}: گاهی به جای کنترل مقدار مطلق یک کمیت، کنترل مقدار آن، نسبت به کمیتی دیگر مطرح می‌گردد. در چنین مواردی معمولاً با یک کمیت کنترل ناپذیر روبرو هستیم و ناچاراً باید کمیت یا کمیت‌های دیگری را متناسب با آن تنظیم نمود. کمیت کنترل‌ناپذیر را کمیت مستقل یا وحشی و کمیت وابسته را که متناسب با کمیت مستقل تنظیم می‌گردد، کمیت آرام یا کنترل‌پذیر می‌نامند. هدف از بکارگیری این نوع کنترل‌کننده، حفظ نسبت دو متغیر (مستقل و وابسته) بر روی یک عدد ثابت می‌باشد. این کنترل‌کننده، نوع خاصی از سیستم کنترل پیش‌خور می‌باشد.

تنظیم نسبت سوخت به هوا نمونه معروفی از کنترل نسبت می‌باشد. در این حالت، دبی هوا کمیت مستقل و دبی سوخت که نسبت به دبی هوا تنظیم می‌گردد، کمیت آرام می‌باشد. کمیت مستقل (دبی جریان هوا) توسط اندازه‌گیر دبی، اندازه‌گیری و به کنترل‌کننده نسبت، ارسال می‌گردد و با توجه به مقدار دبی کمیت آرام (دبی سوخت) که آن هم توسط اندازه‌گیر دبی، اندازه‌گیری و بطور همزمان به کنترل‌کننده مذکور ارسال شده است و نیز با توجه به تنظیمات موجود، کنترل‌کننده Ratio دبی مورد نیاز برای دبی سوخت را تعیین می‌نماید. این مقدار مطلوب یا همان Set Point به شیر کنترلی بر روی جریان سوخت ارسال می‌گردد.

مثال دیگر این نوع کنترل‌کننده، کنترل دبی گاز شیرین ورودی به برج دفع جهت شیرین سازی نفت خام واحد فراورش نفت می‌باشد که با توجه به دبی گاز شیرین و نیز دبی نفت خام ورودی به برج (دبی نفت ورودی به برج کمیت مستقل بوده و نمی‌توان آنرا کنترل نمود زیرا از طریق تفکیک‌گر مرحله آخر و بواسطه شیر کنترلی سطح نفت، به برج دفع وارد می‌شود) و تنظیمات کنترل‌کننده، مقدار گاز شیرین تنظیم می‌گردد.



شکل ۶-۳ - تنظیم مقدار جریان سیال به روش کنترل نسبت

کنترل تقسیم مقیاس^{۹۹}: گاهی مشکلات فنی ایجاب می‌نماید که متغیر فرایندی را در یک محدوده، از طریق یک عنصر نهایی و در محدوده دیگر، از طریق عنصر نهایی دیگری کنترل نماییم. در اینحالت کنترل‌کننده در یک محدوده آن متغیر فرایندی، به یک عنصر نهایی و در محدوده‌ای دیگر، به عنصر نهایی دیگری فرمان می‌دهد و به این روش که در آن، سیگنال خروجی یک کنترل‌کننده به دو یا چند عنصر نهایی، که محدوده تغییرات آنها کاملاً مستقل از یکدیگر می‌باشند، ارسال می‌گردد را کنترل تقسیم مقیاس گویند. بعنوان نمونه تفکیک‌گری در یک سکوی نفتی را در نظر بگیرید که بدلیل خاصی شامل دو شیر کنترل سطح مایع، یکی قبل از تفکیک‌گر و یکی بعد از پمپ ارسال نفت به خشکی می‌باشد که کنترل اولیه سطح مایع را شیر کنترلی بعد از پمپ انجام داده و بخاطر رژیم جریان داخل خط لوله ورودی و اینکه کاملاً باز و یا بسته شدن این شیر مذکور به تنهایی کارساز نمی‌باشد، شیر کنترل دوم نیز بایست وارد عمل گردد. در اینحالت، دامنه خروجی کنترل‌کننده در حوزه خطاهای احتمالی و نیز نوع محرک‌ها، بایستی بگونه‌ای باشد که هر شیر کنترلی در محدوده خاص خود فعال بوده و شیر کنترل دیگر، غیر فعال باقی بماند.

۷- کنترل MPC

کنترل پیش‌بین^{۱۰۰}، نوعی کنترل پیشرفته فرایند است که از دهه ۱۹۸۰ در صنایع فرایندی در تاسیسات شیمیایی و پالایشگاههای نفت به کار می‌رود. در سالهای اخیر، این کنترل در مدل‌های بالانس سیستم‌های قدرت نیز به کار رفته است. کنترل‌کننده‌های پیش‌بین، مبتنی بر مدل‌های دینامیکی فرایند، عمدتاً مدل‌های خطی تجربی هستند که با شناسایی سیستم به دست آمده‌اند. این نوع کنترل، توانایی پیش‌بینی رخداد‌های آینده و اتخاذ اعمال کنترلی متناسب با آنها را دارد، درحالی‌که کنترل‌کننده‌های PID و LQR این توانایی پیش‌بینی را ندارند. کنترل پیش‌بین بطور کلی بصورت یک کنترل دیجیتالی بکار برده می‌شود.

این نوع کنترل‌کننده در کنترل فرایندهایی بکار می‌رود که در آنها یک یا چند ورودی، بیش از یک خروجی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. مدل‌های به کاررفته در این نوع کنترل، معمولاً مدل‌هایی برای نشان دادن رفتار سیستم‌های دینامیکی پیچیده هستند. پیچیدگی اضافی الگوریتم کنترل پیش‌بین، عموماً برای کنترل مناسب سیستم‌های ساده که اغلب با کنترل‌کننده‌های PID به خوبی کنترل می‌شوند، ضرورتی ندارد. از مشخصه‌های دینامیکی رایجی که برای کنترل‌کننده‌های PID دشوار می‌باشند، شامل تاخیرهای زمانی طولانی و دینامیک‌های مرتبه بالا هستند. مدل‌های MPC تغییرات متغیرهای وابسته سیستم مدل‌شده که نتیجه تغییرات متغیرهای مستقل هستند را پیش‌بینی می‌کنند. این نوع کنترل با استفاده از اندازه‌گیریهای فعلی واحد، حالت دینامیکی فعلی فرایند، مدل‌های MPC و اهداف و حدود متغیر فرایندی، تغییرات آینده متغیرهای وابسته را محاسبه می‌کند. این تغییرات به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که درحالی‌که محدودیت‌ها روی متغیرهای مستقل و وابسته رعایت می‌شوند، متغیرهای وابسته نزدیک به هدف نگه داشته شوند. بطور معمول MPC تنها اولین تغییر در هر متغیر مستقل را برای اجرا صادر کرده و محاسبه را برای زمانیکه تغییر بعدی مورد نیاز است، تکرار می‌نماید.

با وجود آنکه بسیاری از فرایندهای واقعی خطی نیستند، اغلب می‌توان آنها را در بازه عملیاتی کوچکی، تقریباً خطی در نظر گرفت. روش‌های MPC خطی در بیشتر کاربردها با مکانیسم پس‌خور بکار می‌روند که خطاهای پیش‌بینی ناشی از عدم تطابق ساختاری بین مدل و فرایند را جبران می‌کنند. هنگامی که مدل‌های خطی به اندازه کافی برای نشان دادن غیرخطی بودن فرایند واقعی دقیق نیستند، از روش‌های گوناگونی می‌توان استفاده کرد. در برخی از موارد، متغیرهای فرایندی می‌توانند قبل و/یا بعد از مدل MPC خطی، برای کاهش غیر خطی بودن، تغییر یابند. فرایند می‌تواند بواسطه MPC غیرخطی که مستقیماً از یک مدل غیرخطی در کاربرد کنترلی استفاده می‌نماید، کنترل گردد. مدل غیرخطی ممکن است به شکل یک برازش منحنی

⁹⁹ Split-Range Control

¹⁰⁰ Model Predictive Control

تجربی (بعنوان مثال شبکه های عصبی مصنوعی) یا یک مدل دینامیکی بسیار دقیق بر مبنای موازنه‌های بنیادی جرم و انرژی باشد.

قابل ذکر است که در نرم‌افزار Aspen HYSYS ، تمامی حالات کنترل گفته شده، در حالت دینامیکی قابل شبیه‌سازی می‌باشد.

فصل هفتم / مسایل مختلف عملیاتی

بر هر مهندس شیمی که به دنبال تجربه کار فرایندی می‌باشد، چه بعنوان یک مهندس فرایند یا فرآورش و چه بعنوان یک بهره‌بردار در تاسیسات، الزام است تا با ادوات و تجهیزات فرایندی، ظروف عملیاتی، خطوط انتقال، عملیات بهره‌برداری و فرایندهای مختلف و اصطلاحات فرایندی آشنا گردد. حتی یک مهندس طراح خوب می‌بایست علاوه بر دارا بودن دانش فنی قوی، تجربه کافی در زمینه عملیات بهره‌برداری را کسب نموده باشد تا طراحی خود را هوشیارانه و با ذهنیت مناسب، انجام دهد.

مسایل مختلف عملیاتی

۱- نفت خام، درجه API و دسته بندی نفت‌های خام

نفت خام مایعی غلیظ (ویسکوز) و عمدتاً به رنگ سیاه یا قهوه‌ای تیره می‌باشد که اساساً از هیدروکربنها (پارافینی، نفتنی و آروماتیک) تشکیل شده است. علاوه بر این، مقدار کمی ترکیبات گوگردی، نیتروژن دار، اکسیژن دار و مقدار جزئی فلزات نیز در نفت خام وجود دارد. در مورد نفت یا فراورده‌های نفتی برای بیان چگالی، از درجه (API) (American Petroleum Institute) استفاده می‌شود که ارتباط آن با جرم مخصوص، بصورت زیر است:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{SpGr @ } 60^{\circ}\text{F}} - 131.5$$

که می‌بایست جرم مخصوص نفت خام را در دمای ۶۰ درجه فارنهایت اندازه‌گیری نمود. همانطور که مشاهده می‌گردد، این درجه با دانسیته نفت خام، نسبت عکس دارد و هرچه این درجه بیشتر باشد، نفت خام سبکتر و نتیجتاً مرغوبتر می‌باشد زیرا فراورده‌های ارزشمندتری را می‌توان از آن به دست آورد. اولین بار، ادوین دریک^{۱۰۱} در سال ۱۸۵۹ میلادی در پی تلاشهای زیاد، موفق شد در تیتوسویل پنسیلوانیا در عمق ۲۰ متری به نفت برسد. در کشور عزیزمان ایران، اولین بار در سال ۱۲۸۷ هجری شمسی، اولین چاه در مسجد سلیمان به نفت رسید.

دسته بندی نفت‌های خام:

- نفت خام سبک: با درجه API بیشتر از ۳۱،۱
- نفت خام نسبتاً سبک: با درجه API بین ۲۲،۳ و ۳۱،۱
- نفت خام سنگین: با درجه API کمتر از ۲۲،۳
- نفت خام فوق سنگین (قیر): با درجه API کمتر از ۱۰

طبقه‌بندی فراورده‌های نفتی اصلی بر اساس افزایش جرم مولکولی عبارتند از: گازهای سبک، گازهای مایع شده (عمدتاً پروپان و بوتان) یا همان LPG، بنزین یا gasoline، نفتا یا naphtha، سوخت جت یا Jet Fuel، نفت سفید یا kerosene، گازوئیل یا Diesel Oil یا gasoil، نفت سوخت سبک، روغنهای سبک، روغنهای سنگین، روغنهای سیلندر، پارافینها و مومها یا wax، نفت سوخته‌های سنگین یا Heavy Fuel Oil، آسفالت و قیر یا Asphalt & Bitumen و کک یا coke

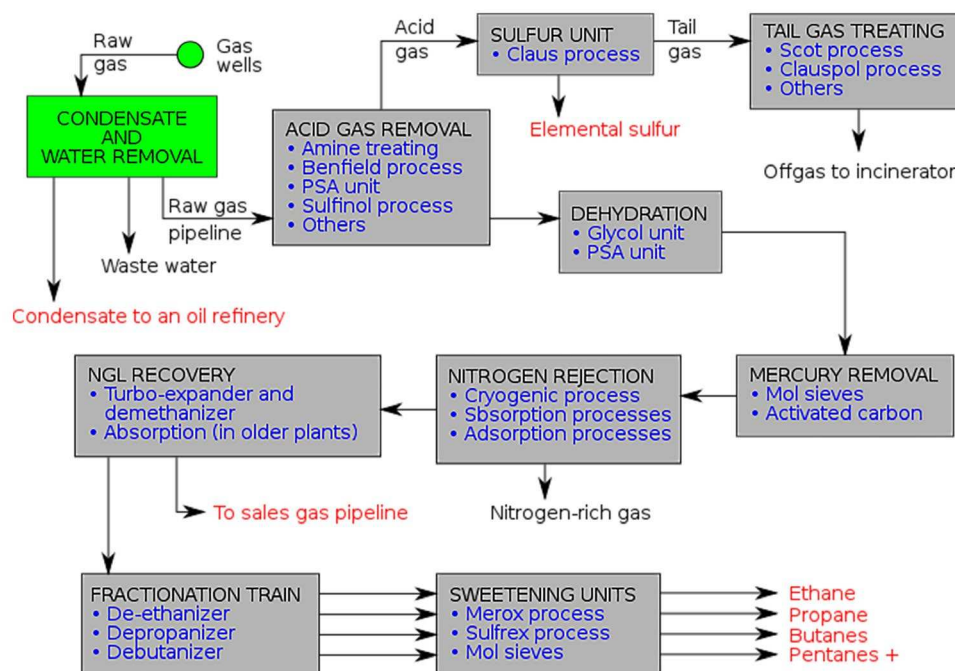
۲- تفاوت بین LNG، LPG، NGL و CNG

مایعات گاز طبیعی (NGL (Natural Gas Liquids): در تاسیسات فراورش گاز طبیعی، گاز طبیعی خام را بواسطه جدا نمودن ناخالصیها مانند مواد جامد، آب، دی‌اکسیدکربن، سولفید هیدروژن و جیوه تصفیه می‌نمایند. گاز طبیعی خام بصورت عمده، از متان تشکیل یافته است. هنگامیکه این گاز به محصولات نهایی فراورش و تصفیه می‌گردد، مجموعاً هیدروکربنهای سنگینتر (پروپان، بوتانها، پنتانها) در شکل مایع، به NGL منتسب می‌گردند. محصولات فرعی شامل میعانات

¹⁰¹ Edwin Drake

گازی^{۱۰۲} (ترکیبات هیدروکربنی تثبیت شده شامل C₅+)، گوگرد، اتان و NGL می‌باشد. بعد از مراحل جداسازی گازهای اسیدی، آب، جیوه و گاهاً نیتروژن، نوبت به بازیافت NGL به کمک فرایند تبرید توسط انبساط گاز از میان یک Turbo-Expander^{۱۰۳} و به دنبال آن، تقطیر در برج تقطیر متانزدا در دمای پایین می‌رسد. البته در بعضی از واحدهای فراورش گاز، از فرایند جذب نفت lean^{۱۰۴} بجای فرایند تبرید استفاده می‌شود.

در بعضی مواقع، NGL بدست آمده جهت جدانمودن اتان، پروپان (LPG) و بوتان از یکدیگر، به برجهای تقطیر اتانزدا، پروپانزدا و بوتانزدا فرستاده می‌شود. NGL مصارف گوناگونی شامل افزایش بازیافت نفت در چاههای نفت، فراهم آوردن مواد خام برای پالایشگاههای نفت یا نیروگاههای پتروشیمی بعنوان منابع انرژی دارد.



نمودار ۷-۱- طرح جریان بلوکی فراورش گاز طبیعی

گاز مایع (LPG (Liquefied Petroleum Gas): محصول فرعی فرایندهای تصفیه و تولید گاز طبیعی و پالایش نفت خام می‌باشد. LPG عمدتاً از پروپان و مقداری بوتان تشکیل یافته است و چون نقطه جوش آن پایینتر از دمای اتاق می‌باشد، در دماها و فشارهای معمولی بسرعت تبخیر می‌گردد. بنابراین آنرا تحت فشار ۸ تا ۱۰ اتمسفر در مخازن فلزی با استحکام، نگهداری می‌نمایند. با توجه به کیفیت سوخت LPG و کاهش انتشار آلاینده‌ها، استفاده از آن در جهان بصورت فزاینده‌ای مورد توجه می‌باشد.

¹⁰² Natural Gas Condensate

¹⁰³ Cryogenic Turbo-Expander Process

¹⁰⁴ Lean Oil Absorption Process

گاز طبیعی مایع (LNG (Liquefied Natural Gas: گاز طبیعی که جهت انتقال یا ذخیره‌سازی بصورت مایع، در فشار اتمسفری و در دمای بسیار پایین یعنی در حدود دمای -260°F ، سرد شده و به مایع چگالیده شده، LNG نامیده می‌شود و اساساً شامل متان (بیش از ۹۰ درصد) بوده و درصد کمی نیز اتان، پروپان، بوتان، مقداری آلکانهای^{۱۰۵} سنگینتر و نیتروژن در خود دارد. البته قبل از فرایند سردسازی گاز طبیعی، می‌بایست پنتان‌ها، آروماتیکها و هیدروکربنهای سنگینتر بعنوان میعانات از گاز طبیعی جدا و تثبیت گردند (برای فروش یا برای تولید بنزین از آنها استفاده می‌گردد)، همچنین گازهای اسیدی (دی‌اکسیدکربن و سولفید هیدروژن)، آب، مرکاپتانها، هلیوم و نیز جیوه احتمالی از گاز طبیعی جدا می‌گردند.

گاز طبیعی متراکم شده (CNG (Compressed Natural Gas: گازی است که برای سوخت موتور بجای بنزین، گازوییل و LPG، به یک فشار بالا متراکم می‌شود (2900-3600 Psig) و اساساً شامل متان بوده، اما می‌تواند حاوی مقادیری اتان نیز باشد. با توجه به اینکه گاز طبیعی تصفیه شده خالص فاقد بو است، جهت پی‌بردن به نشتی احتمالی گاز، آنرا بودار نموده و به CNG، ماده odorant پایه گوگردی می‌زنند.

۳- تفکیک‌گرها، ظروف قطره‌گیر، ظروف لخته‌گیر، Gas Scrubber ها و انواع برجها در صنعت از لحاظ عملکرد

سیال تولیدی از چاههای نفت معمولاً به صورت دو فاز (گاز و نفت) و بعضی مواقع نیز بصورت سه فاز (گاز، نفت و آب) تولید می‌گردد. برای به مصرف رساندن هر فاز بطور جداگانه، باید آنها را بنحوی از یکدیگر جدا نمود. این عمل جداسازی، در ظروف مختلفی که تحت طراحی خاصی ساخته شده‌اند، انجام می‌گیرد. این ظروف بنام تفکیک کننده‌ها^{۱۰۶} معروف می‌باشند که می‌توانند با توجه به تعداد فازها، دو یا سه فازی باشند. در مواردی که فشار جریان نسبتاً زیاد باشد، عمل تفکیک در مراحل متعدد صورت می‌گیرد. عوامل اصلی تفکیک فازها، بخصوص فازهای نفت و گاز از یکدیگر، انبساط ناگهانی^{۱۰۷}، افت فشار ناگهانی (در بعضی مواقع)، اختلاف دانسیته دو فاز مایع و گاز و زمان اقامت فاز مایع می‌باشد که تجهیزات مکانیکی ثابت درون تفکیک‌گرها به امر تفکیک کمک می‌نمایند.

در صورت وجود گاز سولفید هیدروژن همراه نفت خام، بعلت نوع خاص مخزن هیدروکربنی، برج جداکننده‌ای بنام برج عربان‌ساز بعنوان مرحله آخر، جهت برطرف نمودن سولفید هیدروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این برج سینی‌دار، از طریق تماس مستقیم و ناهمسو با گاز شیرین، عمل جدا نمودن این ماده انجام می‌شود. این عمل می‌تواند بسته به شرایط عملیاتی بصورت Hot Stripping یا Cold Stripping انجام گیرد.

جهت جدا نمودن قطرات نفت احتمالی همراه با گاز جدا شده (این گازها جهت فراورش برای مصرف، به تاسیسات گازی و یا برای سوزاندن، به سمت مشعل هدایت می‌گردند) از نفت در تفکیک‌گرها و به تله انداختن آنها، بواسطه انبساط ناگهانی^{۱۰۸}، از ظرف قطره‌گیر^{۱۰۸} استفاده می‌گردد. یک ظرف قطره‌گیر افقی می‌بایست به نسبت دبی گاز، قطر کافی داشته باشد تا سرعت گاز را به اندازه کافی کم نموده تا قطرات مایع ته‌نشین گردند. مصارف گاز فراورش شده شیرین و بدون آب می‌تواند در توربینهای گازی، مصارف خانگی و صنعتی، تزریق به مخازن هیدروکربنی و .. باشد.

¹⁰⁵ alkane

¹⁰⁶ separator

¹⁰⁷ Sudden Expansion

¹⁰⁸ Knock Out Drum

در ورودی پالایشگاهها و تاسیسات فراورش گاز و مابین خروجی خط لوله انتقال گاز و تجهیزات فرایندی، ظرفی با حجم کافی بنام ظرف لخته‌گیر^{۱۰۹} برای جمع‌آوری و ذخیره موقت لخته‌های ورودی و نهایتاً ارسال آنها به واحد مربوطه برای فراورش آن وجود دارد. این لخته‌ها در واقع همان توده‌های پخش شده میعان‌ات گازی به داخل جریان گاز بصورت نامنظم (در اثر وجود رژیم‌های جریانی مختلف در خط لوله انتقال دوفازی) می‌باشند که اگر از جریان گازی جدا نشوند، باعث عدم عملکرد صحیح تاسیسات پایین‌دستی می‌گردند. بنابراین لخته‌گیر بعنوان مهار کننده اغتشاشات جریان خوراک تاسیسات فراورش گاز، کار جداسازی اولیه فازهای مایع و گاز و نیز نگهداری موقت مایعات هیدروکربنی رو نیز انجام می‌دهد.

این لخته‌گیرها به سه شکل مخزنی^{۱۱۰}، لوله‌ای^{۱۱۱} و Parking Loop وجود دارند.

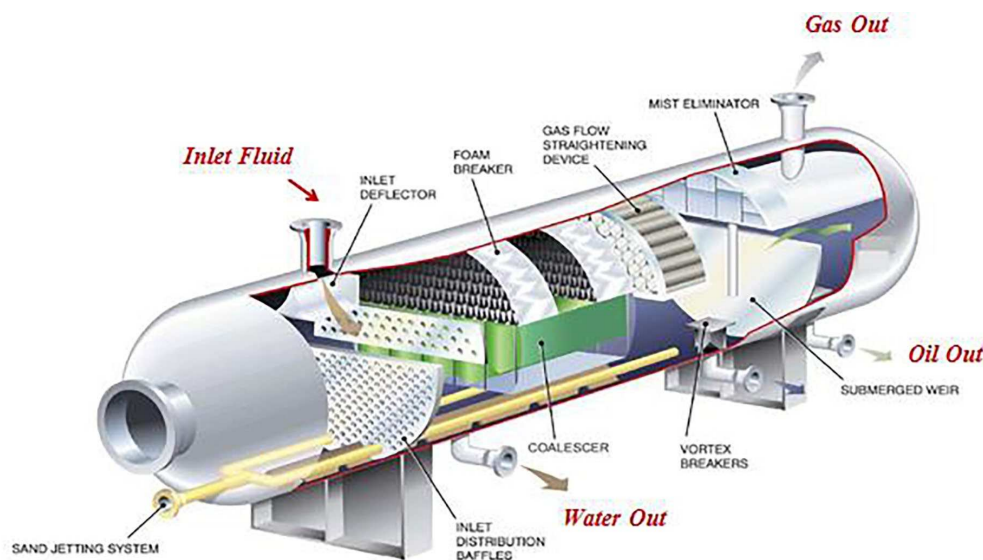
در مواردی که نسبت گاز به نفت^{۱۱۲} بسیار زیاد باشد و یا هدف جدا نمودن ناخالصیهایی مانند آب از گاز باشد، از Gas Scrubber استفاده می‌گردد.

انواع تفکیک‌گرها از لحاظ ساختمان:

- تفکیک‌گرهای افقی که پر استفاده‌ترین و معمولترین تفکیک‌گرها در صنعت نفت بوده و بخصوص برای تفکیک سه فاز و یا زمانیکه نفت تولید کف می‌نماید، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- تفکیک‌گرهای عمودی که عمل تفکیک تحت تاثیر دو عامل نیروی ثقل و گریز از مرکز صورت می‌گیرد و بخصوص برای زمانیکه نسبت گاز به نفت، زیاد بوده و یا چاهها تولید شن می‌نمایند و گل حفاری با نفت همراه می‌باشد، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- تفکیک‌گرهای کروی^{۱۱۳} که اصول جداسازی در آنها نیز مانند تفکیک‌گرهای افقی و عمودی می‌باشد ولی امروزه استفاده از آنها بخصوص برای زمانیکه نفت تولید کف می‌نماید، کاهش یافته است (توضیح بیشتر در مورد این نوع تفکیک‌گر در قسمت واژه نامه انگلیسی این کتاب آمده است).



شکل ۷-۱- نمایی از ادوات داخلی یک تفکیک‌گر افقی نفت و گاز

¹⁰⁹ Slug Catcher

¹¹⁰ Vessel Type

¹¹¹ Finger Type

¹¹² Gas Oil Ratio (GOR)

¹¹³ Spherical Separator

معمول‌ترین اجزای مکانیکی که در داخل یک تفکیک‌گر افقی که پرکاربردترین جداکننده‌ها می‌باشد، بکار می‌روند عبارتند از:

- صفحه منحرف کننده ورودی (Inlet Diverter)
- صفحه آرام‌کننده روزنه‌دار یا صفحه توزیع کننده ورودی (Perforated Baffle Plate or Inlet Distributor Baffle)
- صفحه شکننده کف (Defoaming or Foam Breaker Baffle/Plate)
- جداکننده قطرات مایع (Mist Extractor/ Eliminator or Demister)
- موج شکن (Wave Breaker)
- شکننده گرداب (Vortex Breaker)
- Submerged Baffle, Bucket or Weir
- سیستم شستشوی شن و ماسه (Sand Jetting System/Sand Removal System)

صفحه منحرف کننده ورودی: جهت تغییر در اندازه حرکت سیال ورودی به تفکیک‌گر و جدا نمودن اولیه فازهای گاز و نفت خام از یکدیگر در ورودی می‌باشد. توزیع کننده‌های ورودی در تفکیک‌گرها می‌توانند پیچیده‌تر و بصورت Multi Vane Inlet Distributor باشند.

صفحه آرام‌کننده روزنه‌دار یا صفحه توزیع کننده ورودی: بطور کلی این صفحات جهت آرام نمودن منطقه ورودی در تفکیک‌گرهای افقی، توزیع مجدد جریان مایع در ظروف طویل، فرو نشاندن surge در ظروف نصب شده برای واحدهای تولید نفت خام، ذخیره و تخلیه آن بصورت شناور (FPSO) و نیز جهت توزیع گاز بالا یا پایین دست حذف کننده‌های مه می‌باشند. صفحه شکننده کف: یکسری از صفحات موازی شیب‌دار یا تیوبها می‌باشند یا بصورت ماتریسی که برای بهم آمیختن حبابهای کف بکار می‌روند.

جداکننده قطرات مایع: همانطور که از نامش بر می‌آید، قطرات کوچک مایع حمل شده توسط گاز را بواسطه برخورد (تغییر در جهت جریان و سرعت)، نیروی گریز از مرکز و یا پیوسته نمودن آنها بهم و نتیجتاً ته‌نشینی بواسطه نیروی وزن، جدا می‌نماید. موج شکن: بافلهایی هستند که هرگونه رفتار موجی را که ممکن است در اثر سیال ورودی بوجود آید، کاهش می‌دهند.

شکننده گرداب: از چرخش و پدیده گرداب، در زمانیکه شیر کنترل سطح مایع باز است، جلوگیری می‌نماید. Submerged Baffle, Bucket or Weir: جهت جدا نمودن فازهای نفت و آب همراه از یکدیگر بواسطه تجمع این دو فاز در بخش ته نشینی در اثر وزن در یک سو و جدا شدن بصورت دوفاز بعلاوه اختلاف دانسیته آنها در آن بخش و سپس سرریز نمودن نفت در سوی دیگر می‌باشد.

سیستم شستشوی شن و ماسه: در صورت وجود چاههای نفت با تولید شن و ماسه، برای بهم زدن ماسه و مواد جامد ته‌نشین شده در کف تفکیک‌گرهای افقی و نهایتاً فلاش نمودن^{۱۱۴} آنها از درون ته‌کش‌های ظرف، از این سیستم استفاده می‌شود. زیرا مواد جامد در کف ظرف ته‌نشین شده و به شدت کلوخه و متراکم گردیده و بر کارایی عمل تفکیک، اثر منفی می‌گذارند. مزیت این سیستم، شستشو و خارج نمودن شن و ماسه در حین اینکه ظرف عملیاتی در سرویس می‌باشد، است. تفکیک‌گرها مجهز به شیرهای کنترلی فشار و سطح مایع به ترتیب برای کنترل فشار تفکیک‌گر و سطح مایع درون آن، شیرهای ایمنی فشار و Rupture Disk ها، شیرهای اضطراری نرمال باز، اداوات ابزار دقیق مانند انواع gauge های فشار، دما و

¹¹⁴ flushing

سطوح نفت و آب، ترانسسمیترهای فشار، دما، سطوح نفت و آب و دبی برای گاز و نفت خروجی از تفکیک‌گر، انواع سوویچها^{۱۱۵} و نیز انواع شیرهای دستی برای مقاصد مختلف می‌باشند.

انواع برجها در صنعت: در صنعت می‌توان به انواع برجهای تقطیر جهت جداسازی اجزای نفت خام و مخلوطها مانند برجهای تقطیر اتمسفریک، برجهای تقطیر در خلاء و برجهای تقطیر آزنوتروپی، برجهای جذب مانند برج TEG (Triethylene Glycol) جهت جذب بخار آب و حذف آن از جریان گازی یا برج آمین در واحدهای شیرین سازی گاز جهت جذب گازهای اسیدی دی‌اکسیدکربن و سولفید هیدروژن از جریان گازی و یا برجهای دیواره مرطوب مانند برج جذب اسید کلریدریک در آب که توام با ایجاد گرمای زیادی می‌باشد. برجهای دفع مانند برج عربان‌ساز جهت شیرین نمودن نفت خام (دفع سولفید هیدروژن از جریان نفت) بواسطه گاز شیرین بصورت سرد/گرم یا برج احیای آمین، برجهای استخراج مایع-مایع (استخراج با حلال) مانند برجهای جداسازی اجزاء روغنهای مخصوص روغن‌کاری با نقطه جوش بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد توسط حلالهایی مانند فتل و فورفورال و یا برجهای استخراج در واحد جداسازی اتانول، اشاره نمود.

۴- مشعل گازی

مشعل گازی^{۱۱۶} که به آن Flare Stack نیز گفته می‌شود، وسیله‌ای احتراقی جهت سوزاندن گاز در تاسیسات صنعتی مانند پالایشگاهها و تاسیسات فراورش نفت، پالایشگاهها و تاسیسات فراورش گاز، سکوها گازی و نفتی و کارخانجات شیمیایی می‌باشد. مشعل، گاز خروجی از ادوات فرایندی تحت فشار و یا اتمسفری در خلال شرایط معمول یا غیر معمول فرایندی را جمع‌آوری و پس از سوزاندن به محل ایمن در اتمسفر منتقل می‌نماید (هیدروکربن گازی را بدلائل مختلف از جمله مخاطرات خطرات انفجار و زیست محیطی، نمی‌توان به اتمسفر تخلیه نمود).

مشعل در تاسیسات صنعتی، در درجه نخست جهت سوزاندن گازهای قابل اشتعال آزاد شده توسط شیرهای ایمنی در زمان افزایش فشار ناخواسته، تخلیه فشار ادوات فرایندی در زمانهای راه‌اندازی واحد و یا قطع عملیات (تعطیلی واحد^{۱۱۷}) و کلاً شرایط عملیاتی غیر معمول، در دوره‌های نسبتاً کوتاه می‌باشد. اما در مناطقی که فاقد تاسیسات فراورش گاز همراه^{۱۱۸} (شامل گاز آزاد و گاز محلول در نفت خام) جدا شده از نفت خام و یا خطوط لوله انتقال و دیگر زیرساخت‌های حمل گاز هستند و یا امکان تزریق مجدد گاز جدا شده به مخزن هیدروکربنی، جهت ذخیره‌سازی برای آینده و نیز جبران کاهش فشار مخزن هیدروکربنی وجود ندارد، معمولاً مقادیر زیادی از گاز تفکیک شده بعنوان گاز زاید و غیر قابل استفاده، سوزانده و اصطلاحاً فلر می‌گردد. اکثر مشعلهای تاسیسات صنعتی دارای ظرف قطره‌گیر در بالادست خود می‌باشند تا مقادیر مایع، شامل هیدروکربن و یا آب، را که ممکن است همراه گازها باشند، بواسطه پدیده انبساط ناگهانی حذف نمایند. گاهی بخار آب یا گاز شیرین جهت ایجاد نیروی مومنتوم خارجی برای مخلوط شدن موثر هوا و گاز و بهبود احتراق و عدم تشکیل دود سیاه، به شعله تزریق می‌گردد (مقدار دبی بخار از حدی نباید بیشتر باشد). همچنین در سیستم مشعل، بمنظور آماده نگاه داشتن سیستم برای انجام وظیفه، مقدار کمی از گاز دائماً بصورت شعله پیلوت^{۱۱۹} به همراه سیستم جرقه‌زن، در حال سوختن می‌باشد. این پیلوت در مواقعی که نیاز است مجدداً گاز آتش زده شود، در اثر قطع موقت جریان گاز مشعل (بعلت تعطیلی موقت واحد) و یا فلر

¹¹⁵ switch

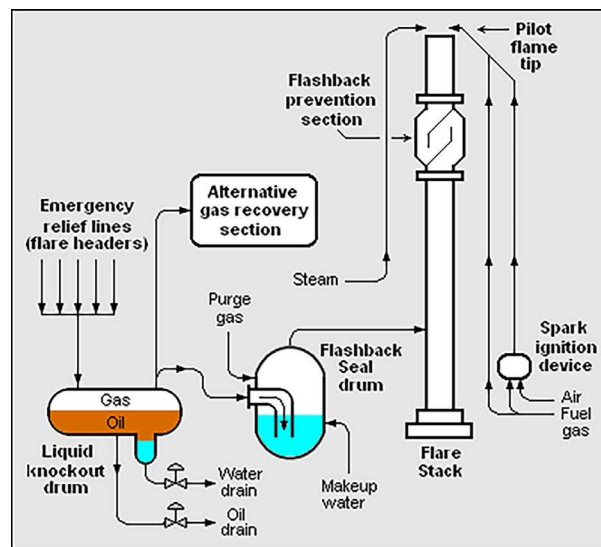
¹¹⁶ Gas Flare

¹¹⁷ Plant Shut Down

¹¹⁸ Associated Gas

¹¹⁹ Pilot Flame

نمودن گاز بصورت متناوب، استفاده می‌گردد. در سیستم مشعل، گاهاً یک ظرف آب‌بندی، معمولاً محتوی آب یا مخلوط آب و گلایکول، قبل از دودکش مشعل و برای جلوگیری از برگشت شعله از بالای دودکش مشعل و نیز غالباً یک بخش برای همین منظور (جلوگیری از برگشت شعله و یا ورود هوا)، در قست بالایی دودکش مشعل وجود دارد. بطور کلی، سیستم مشعل معمولاً شامل یک ظرف قطره‌گیر، یک ظرف آب‌بندی، یک سیستم بازیافت گاز، یک سیستم تزریق بخار یا گاز شیرین، یک شعله شمعی و دودکش مشعل^{۱۲۰} شامل یک بخش برای جلوگیری از برگشت زدن شعله در قسمت بالای مشعل می‌باشد. طراحی فلر و اجزاء آن بر اساس استانداردهای ISO 23251/API 521 و ISO 25457/API 537 انجام می‌گیرد.



شکل ۷-۲- طرح جریانی از یک سیستم کلی دودکش مشعل عمودی در یک واحد صنعتی

برای اینکه همیشه سیستم مشعل گازی توسط گاز هیدروکربنی، تحت فشاری بیشتر از فشار اتمسفر قرار گیرد تا هوای محیط به دور آن راه پیدا ننماید، همیشه می‌بایست یک جریان دایمی از Purge Gas یا Sweep Gas برقرار باشد. قبل از عملیات راه‌اندازی واحد یا قبل از تعمیرات اساسی، بایستی تجهیز یا لوله از گازهای قابل اشتعال، قابل انفجار، سمی و گازهایی که در اثر تماس با اکسیژن هوا خاصیت خوردگی پیدا کرده و باعث آسیب می‌شوند، توسط گاز بی اثری چون نیتروژن با خلوص بالا عاری گردند. اما بطور خاص برای هدر مشعل گازی که در سرویس می‌باشد، این گاز که معمولاً گاز طبیعی می‌باشد، دائماً جریان دارد تا علاوه بر اینکه بکمک آب‌بندهای مکانیکی، از ورود هوا به دودکش مشعل گازی و خطر آتش‌سوزی جلوگیری بعمل آورده شود، یک گاز sweep نیز جهت خارج نمودن گازهای تجمع‌یافته خورنده برای هدر مشعل گازی فراهم آورد.

برای جلوگیری از برگشت شعله و یا ورود هوا به سیستم مشعل گازی، همیشه تجهیزاتی که جزیی از سیستم مشعل گازی هستند، نصب می‌گردند. این تجهیزات عبارتست از:

Liquid Seal Drum ها بعد از ظروف قطره‌گیر، Molecular Seal ها، Dynamic Seal ها و Flame Arrestor ها در قسمت بالایی

مشعل^{۱۲۱}

¹²⁰ Flare Stack

¹²¹ Flare Tip

Liquid Seal Drum: این ظروف که معمولاً حاوی آب یا مخلوط آب و گلایکول هستند، از برگشت هوا یا گاز و نیز شعله احتمالی جلوگیری می‌نمایند. گاز مشعل یا گاز purge قبل از اینکه به قسمت بالای مشعل گازی برسد، مجبور است که بصورت حباب از میان مایع داخل ظرف مذکور، عبور نماید که به این ترتیب از برگشت گاز یا ورود هوا، جلوگیری بعمل می‌آید. همچنین این ظروف بعنوان یک ظرف قطره‌گیر نهایی برای سیستم مشعل گازی، محسوب می‌گردند.

Molecular(Density) Seal or Buoyancy Seal: این آب‌بندها معمولاً در قسمت زیرین بالای (در قسمت Flare Tip) مشعل گازی قرار گرفته و از ورود هوا به مشعل، بواسطه نوع مسیر عبور گاز purge و به تله افتادن گاز هیدروکربنی سبک در قسمت بالای لوله U شکل، جلوگیری می‌نمایند. این آب‌بندها از اختلاف دانسیته بین هوای محیط و گاز هیدروکربنی Purge استفاده می‌نمایند. اشکالاتی مانند وزن بالا، نیاز به خط تخلیه، ایجاد خوردگی در آن‌ها که برای تعمیر می‌بایست کل واحد تعطیل گردد، احتمال مسدود شدن مسیر و هزینه بالای طراحی و ساخت، استفاده از این آب‌بندها را کمتر و محدودتر نموده است.

Dynamic(Velocity) Seal or Fluidic Seal: این نوع آب‌بندها بعنوان یک مورد دیگر از آب‌بندهای گازی می‌باشند که از ونتوری بدون دیواره (یک مجموعه بافلها) استفاده می‌نمایند که سرعت گاز purge را افزایش داده و با ایجاد اثر گردابی در حین خروج گاز، هوای وارد شده را بیرون می‌کشند و به جریان گازی اجازه می‌دهند که در یک مسیر یکطرفه خارج گردیده و بدین ترتیب از بازگشت هوا به مشعل جلوگیری بعمل می‌آید.

Flame Arrestor: که برای vent های اتمسفری و نیز مشعلهای با دبی کم گاز بکار می‌روند، با مکانیسم گرفتن گرما در قسمت کانالهای موجود از شعله برگشتی، از برگشت آن جلوگیری بعمل آورده و شعله برگشتی احتمالی را خاموش می‌نماید. مهمترین اشکال آن، این است که کانالها و یا منافذ آن به راحتی مسدود می‌گردند. این تجهیز می‌بایست در حدود ۱۰ قطر لوله از خروجی مشعل گازی، نصب گردد.

۵- شیرین‌سازی گاز طبیعی^{۱۲۲}

گازهایی که از منابع نفتی حاصل می‌شوند، گاهاً حاوی مقادیر متفاوتی سولفید هیدروژن و دی‌اکسیدکربن هستند. گاز طبیعی به دلیل بوی بد حاصل از محتویات گوگردی آن، گاز ترش^{۱۲۳} نامیده می‌شود. گازهای اسیدی مذکور، ترکیبات بسیار خورنده و سمی بوده، موجب کاهش ارزش حرارتی گاز و نتیجتاً نزول قیمت آن شده و به تجهیزات و محیط‌زیست صدمات جدی وارد می‌نمایند. از طرف دیگر، گاز سولفید هیدروژن بشدت خطرناک و کشنده می‌باشد. همچنین از ترکیب این دو گاز اسیدی با آب، ترکیباتی نظیر اسید سولفوریک و اسید کربونیک تولید می‌گردد. بنابراین یکی از مهمترین بخشهای فرآوری گاز طبیعی، جدا نمودن دی‌اکسیدکربن و گوگرد می‌باشد. برای تصفیه گاز طبیعی، از روشهای مختلفی استفاده می‌شود که می‌توان آنها را به دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود:

✓ **فرایندهای ناپیوسته^{۱۲۴}**: پایه این فرایندها برای جذب گازهای اسیدی بر حسب جذب فیزیکی یا جذب شیمیایی

(بوسیله یک مایع یا یک جامد) می‌باشد. در این فرایندها نیازمند دو یا بیشتر از یک برج هستیم. بنابراین همیشه

یکی از آنها در حال جذب گازهای اسیدی و دیگری در حال احیای شدن می‌باشد.

¹²² Natural Gas Sweetening

¹²³ Sour Gas

¹²⁴ Batch Processes

✓ فرایندهای پیوسته^{۱۲۵}:

❖ جذب شیمیایی در فاز مایع و استفاده از حلالهای شیمیایی شامل:

- محلولهای آمین شامل: MEA/DEA/TEA/MDEA/DIPA/DGA
- فرایندهای کربنات شامل کربنات پتاسیم داغ، فرایند Catacarb (میزان محلول کربنات پتاسیم بیشتر است)، فرایند Vacuum Carbonate، فرایند Giammarco-Vetrocoke، فرایند Benfield (عامل فعال‌کننده دی‌اتانول آمین می‌باشد) و فرایند Seaboard (احیاء جاذب توسط هوا انجام می‌گیرد)

❖ جذب فیزیکی در فاز مایع و استفاده از حلالهای فیزیکی شامل فرایندهای: Purisol، Fluor، Selexol، Rectisol، Estasolvan و Water Absorption و نیز محلولهای ترکیب شده فیزیکی/شیمیایی مانند Sulfolane/(DIPA or MDEA) در فرایند Sulfinol و ..

❖ جذب شیمیایی در فاز جامد (فرایند اکسید آهن)

❖ جذب فیزیکی در فاز جامد (غیرالهای مولکولی) یا جذب سطحی

❖ تبدیل مستقیم سولفید هیدروژن

❖ استفاده از تکنولوژی غشاء

❖ سایر فرایندها مانند فرایند Tripotassium Phosphate، فرایند Sodium Phenolate، فرایند

Alkazid و فرایندهای اکسایش-کاهش کاتالیستی SulFerox یا LO-CAT

استفاده از حلالهای شیمیایی:

○ فرایندهای آمین: در بیشتر فرایندهای شیرین سازی گاز، از محلول آلکانول آمین استفاده می‌شود که الکل‌های مشتق شده از آمونیاک هستند. این فرایندها شامل دو برج جذب و دفع می‌باشند.

○ فرایند کربنات پتاسیم داغ: کربنات پتاسیم (K_2CO_3) یکی دیگر از مواردی است که می‌تواند با گازهای اسیدی واکنش دهد. در این روش بدون اینکه نیازی باشد کربنات پتاسیم سرد گردد، فقط با کم کردن فشار در برج احیاء، محلول احیاء می‌شود.

○ استفاده از محلولهای ترکیب شده: این محلولهای ترکیب شده، هم خانواده آمین‌ها هستند. شهرت آنها بواسطه کاهش اندازه تجهیزات و صرفه‌جویی در انرژی، در مقایسه با بقیه آمین‌ها می‌باشد. طیف گسترده‌ای از این محلول‌های شیمیایی با پایه MDEA تهیه شده‌اند.

استفاده از حلالهای فیزیکی:

در این فرایندها، محلول بدون هیچ واکنش شیمیایی، گازهای اسیدی را جذب می‌کند. محلول‌های فیزیکی هیدروکربن‌های همراه گاز را در خود حل می‌نمایند (مخصوصاً هیدروکربن‌های سنگین). این فرایندها از جهت اینکه برای دفع گازهای اسیدی نیاز به حرارت نداشته یا مقدار آن کم است، ممتاز می‌باشند. حلالیت در مرحله اول و مهمتر از همه، به فشار بخار و در مرحله دوم، به دما بستگی دارد.

استفاده از بسترهای جامد:

استفاده از جامدات برای شیرین سازی گاز بر پایه جذب گازهای اسیدی بر روی سطح (جذب فیزیکی بر روی سطح جامد) و یا واکنش اجزاء بر روی سطح (جذب شیمیایی بر روی سطح) می‌باشد. استفاده از این بسترها جهت شیرین سازی گاز که دارای مقدار سولفید هیدروژن و مرکاپتانهای کم و متوسط هستند، بهترین فرایند است.

- استفاده از غربالهای مولکولی (جذب فیزیکی): این جاذبها کریستالهای متخلخل آلومینوسیلیکاتی هستند که ساختمان اسکلتی آنها از مجموعه‌ای از چهاروجهی‌های SiO_4 و AlO_4 تشکیل شده‌اند که با ترتیب منظمی با شرکت اتمهای اکسیژن به یکدیگر متصل شده‌اند. اتصال این اجزاء به این نحو، یک شبکه حفره‌ای را بوجود آورده است که اندازه این حفرات در حد ابعاد مولکولها می‌باشد.
- بستر اکسید آهن (جذب شیمیایی): در این فرایند گاز ترش در تماس با اکسید آهن قرار می‌گیرد که نتیجه آن، تشکیل سولفید آهن است. وقتی اکسیژن (هوا) به سولفید آهن می‌رسد، آنرا به اکسید آهن و سولفور تبدیل می‌کند.

تبدیل مستقیم سولفید هیدروژن:

در این فرایند از واکنش شیمیایی برای تبدیل سولفید هیدروژن به گوگرد، توسط اکسید کردن استفاده می‌شود. این واکنشها بطور معمول بر پایه واکنش H_2S یا H_2S ، SO_2 استوار هستند. محصول این واکنشها آب و گوگرد می‌باشد. این فرایندها هر کدام دارای کاتالیستهای مخصوص هستند.

استفاده از تکنولوژی غشاء:

عبور گاز از یک فیلم ریز پلیمری، از یک منطقه فشار بالا به یک منطقه فشار پایین، باعث جداسازی گازهای اسیدی می‌شود. بنابراین گازی که از غشاء عبور می‌کند دارای فشار پائین است. سیستم غشاء برای جذب حجم زیادی از دی‌اکسیدکربن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶- مرکاپتان زدایی از نفت خام یا برشهای نفتی و گاز طبیعی

گوگرد فراوان‌ترین عنصر بعد از کربن و هیدروژن در نفت خام می‌باشد. ترکیبات گوگرد به دو صورت آلی و معدنی در نفت خام وجود دارند. گوگرد معدنی از قبیل گوگرد عنصری، سولفید هیدروژن و FeS بصورت حل نشده یا معلق در نفت خام، می‌تواند وجود داشته باشد. منبع اصلی گوگرد در نفت خام را ترکیبات آلی از قبیل تیولها، سولفیدها و تیوفنیکها تشکیل می‌دهند. مرکاپتانها نوعی از سولفیدهای آلی هستند که بطور گسترده‌ای در محصولات نفتی وجود داشته و اغلب موجب افت کیفیت محصول نهایی می‌گردند.

حذف گوگرد از نفت خام به دلایل زیر انجام می‌گردد:

- ۱- حذف گوگرد باعث کاهش یا محدود شدن خوردگی در طول عملیات پالایش، حمل و نقل و دستگاههای مصرف کننده از قبیل وسایل نقلیه می‌گردد.
- ۲- حذف گوگرد باعث حذف بوی بد محصولات نفتی خواهد شد.
- ۳- حذف گوگرد از سوختهای سنگین باعث جلوگیری از آلودگی هوا و جلوگیری از انتشار دی‌اکسید گوگرد در محیط زیست در زمان سوختن می‌شود.

فناوری‌های گوگردزدایی از نفت خام یا برشهای نفتی شامل موارد زیر می‌باشد:

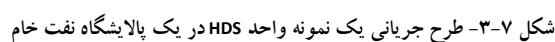
- گوگردزدایی هیدرو یا Hydrodesulfurization (HDS)
- گوگردزدایی استخراجی یا Extractive Desulfurization و نیز استخراج بوسیله مایعات یونی
- گوگردزدایی جذب سطحی یا Adsorptive Desulfurization
- گوگردزدایی اکسیداسیونی یا Oxidative Desulfurization (ODS)
 - اکسیداسیون خودکار یا autooxidation
 - اکسیداسیون شیمیایی
 - اکسیداسیون کاتالیستی یا Catalytic Oxidation
 - اکسیداسیون فتوشیمیایی یا Photochemical Oxidation
 - اکسیداسیون فراصوت یا Ultrasound Oxidation
- گوگردزدایی بیو یا Biodesulfurization (BDS) شامل گوگردزدایی بیو هوازی و بیو بی‌هوازی
- گوگردزدایی مبتنی بر آلکیل‌اسیون یا Alkylation-Based Desulfurization
- گوگردزدایی مبتنی بر تجزیه بوسیله کلر یا Chlorinolysis-Based Desulfurization
- گوگردزدایی مبتنی بر آب فوق بحرانی یا Supercritical Water-Based Desulfurization (SCW)

در ادامه به توضیح مختصر بعضی از روشهای مهم پرداخته می‌شود:

○ گوگردزدایی هیدرو یا Hydrodesulfurization (HDS)

گوگردزدایی هیدرو معمول‌ترین روش مورد استفاده برای کاهش گوگرد از نفت خام یا برشهای نفتی در صنعت نفت می‌باشد. در این روش، همزمان نفت خام و هیدروژن بر پایه کاتالیستی که مختص روش HDS می‌باشد، به راکتور شیمیایی وارد می‌شوند. درواقع در راکتور، واکنش تجزیه بوسیله هیدروژن^{۱۲۶} اتفاق افتاده و باند شیمیایی کربن و سولفور شکسته می‌شود به این ترتیب، در طول فرایند HDS، گوگرد موجود در ترکیبات آلی گوگرددار، به سولفید هیدروژن تبدیل می‌گردد. کاتالیستهای استاندارد که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل نیکل-مولیبدن/آلومینا و کبالت-مولیبدن/آلومینا است. در راکتورهای شیمیایی اغلب از کاتالیستهای نیکل-مولیبدن استفاده می‌گردد زیرا هیدروژن محدود نیست اما زمان تماس محدود می‌باشد. این فرایند در راکتور بستر ثابت در دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد و فشار مطلق ۳۰ تا ۱۳۰ اتمسفر و در حضور کاتالیست ذکر شده، اتفاق می‌افتد.

¹²⁶ hydrogenolysis



گوگردزدایی به روش استخراج به حلالیت ترکیبات آلی گوگرددار در حلال معینی بستگی دارد و این فرایند را روش استخراج مایع-مایع می‌نامند که دو فاز مایع باید باهم غیر قابل امتزاج باشند. این روش به دلیل آسان بودن کاربرد صنعتی آن، نداشتن نیاز به هیدروژن و نیز شرایط فرایند، مورد توجه قرار گرفته است. این فرایند یک فرایند استخراجی کاملاً فیزیکی می‌باشد.

استفاده از مایعات یونی برای حذف گوگرد از سوخت‌هایی مثل سوخت دیزلی، جایگزین خوبی برای حلال‌های آلی مرسوم می‌باشد.

گوگردزدایی به روش جذب به توانایی یک جاذب جامد برای جذب انتخابی ترکیبات آلی گوگرددار از نفت خام، بستگی دارد. کارایی این روش به خواص ماده جاذب بستگی دارد، خواصی چون انتخابی بودن روش برای ترکیبات آلی گوگرددار نسبت به هیدروکربنها، ظرفیت بالای جاذب، پایداری و قابل بازیافت بودن جاذب. دو رویکرد برای این روش می‌تواند اتفاق بیافتد: جذب فیزیکی و جذب واکنش‌پذیر. مواد جاذب زیادی برای گوگردزدایی آزمایش می‌گردند. جاذب‌هایی مانند کربن فعال شده، زئولیت‌ها، آلومینا، سیلیکاها، بکسیت و جاذب‌های آلی، فلزی

گوگردزدایی اکسیداسیونی، شامل واکنش شیمیایی بین یک ماده اکسیدکننده و گوگرد می‌باشد. این روش بطور کلی شامل دو مرحله جدا از هم یعنی اکسیداسیون گوگرد که در آن ماهیت ترکیبات گوگرددار تغییر می‌کند و حذف گوگرد می‌باشد.

اکسیداسیون شیمیایی مستقیم بوسیله پراکسید هیدروژن (H_2O_2) یا هیدروپراکسید آلی انجام می‌گیرد. این روش بوسیله پراکسیدها، روش گرانی است. اکسیدکننده‌های دیگری نیز از پراکسیدها برای اکسیداسیون نفت سنگین مانند اسیدنیتریک، دی‌کرومات پتاسیم، پرمنگنات پتاسیم و ازت، بررسی شده‌اند.

○ اکسیداسیون کاتالیستی یا Catalytic Oxidation

اکسیداسیون کاتالیستی شامل چندین روش و نوع کاتالیست می‌باشد. اول، کاتالیستهای اکسیداسیونی وجود دارد که سد انرژی اکسیداسیون را با تسهیل واکنش اکسیداسیون خودبه‌خودی بر روی سطح فعال کاتالیستی، کاهش می‌دهند. دوم، موادی که به عنوان حامل اکسیژن عمل می‌کنند و معرف‌های اکسیداسیون فعالتری از اکسیژن هستند. سوم، کاتالیستهایی وجود دارند که تجزیه هیدروپراکسیدها را تسهیل می‌کنند، در نتیجه در مرحله انتشار واکنش اکسیداسیون، به واکنش سرعت می‌بخشند.

○ گوگرد زدایی مبتنی بر آلکیلایون یا Alkylation-Based Desulfurization

که شامل گوگردزدایی بر پایه آلکیلایون کربن و بر پایه آلکیلایون گوگرد می‌باشد که روش اول، برای گوگردزدایی از نفت سنگین مناسب نیست و برای گوگردزدایی ترکیبات تیوفنیک گوگرددار در مقیاس کوچک، آزمایش و در مقیاس بزرگ تجاری، برای نفت سبک به کار رفته است. روش دوم، برای گوگردزدایی از ترکیبات گوگرددار آروماتیک مناسب نیست و از آنجا که نفت سنگین حاوی مواد آروماتیک است، این فناوری برای گوگردزدایی از نفت‌های سنگین نیز مناسب نخواهد بود.

○ روشهای DMC (Demercaptanization of Gas Condensates) و DMD (Demercaptanization of Distillate)

با استفاده از این فرایندها می‌توان COS ، D_2S ، CS_2 و مرکاپتانهای موجود در محصولات میان تقطیر از قبیل نفتا، بنزین و LPG و همچنین نفت خام و میعانات گازی را حذف نمود. این تکنولوژی‌ها بسته به میزان و نوع مرکاپتانهای موجود در خوراک، انواع متفاوتی دارند که معمولاً شامل:

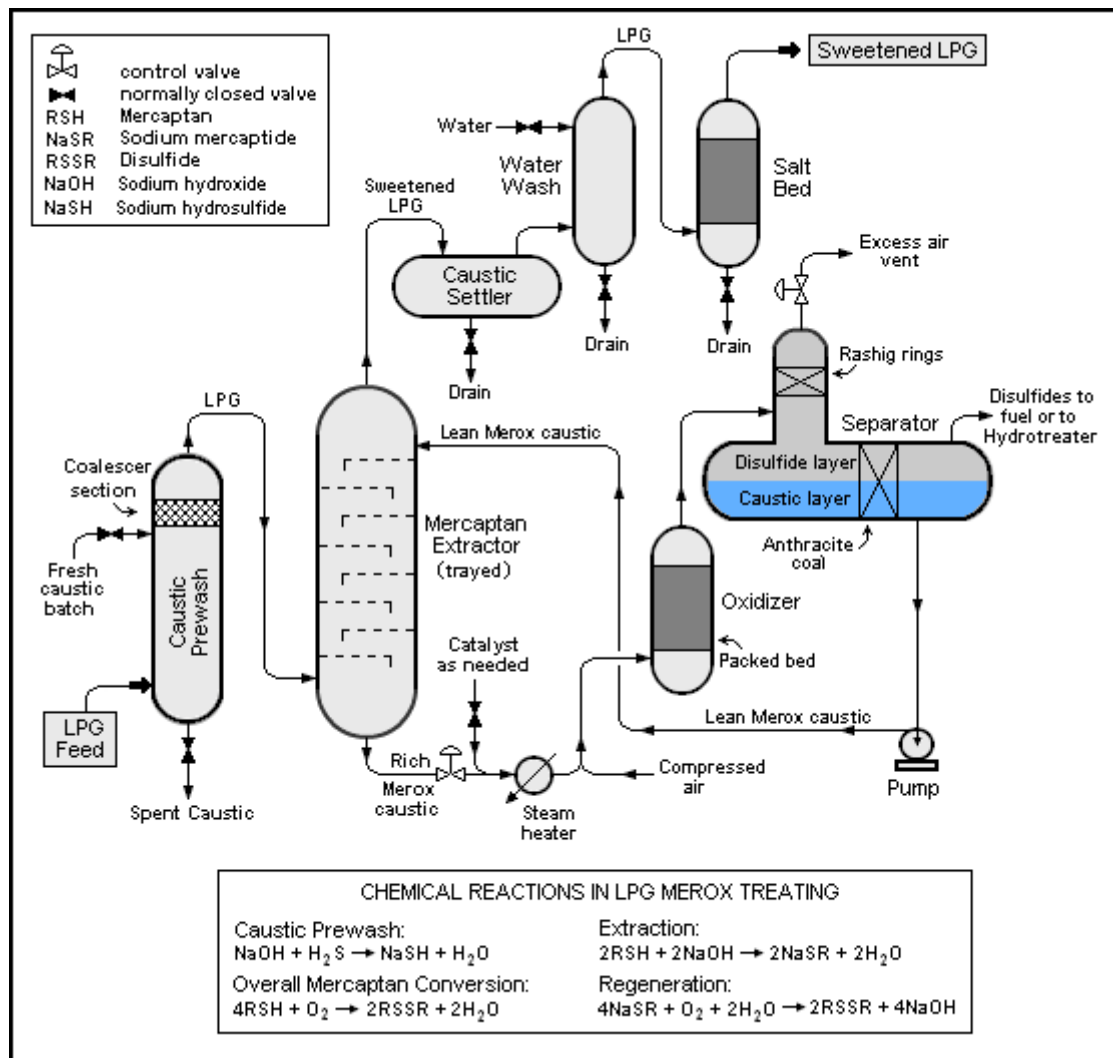
- استخراج COS ، D_2S ، CS_2 و مرکاپتان‌های سبک، توسط محلول کاستیک
- اکسیداسیون مرکاپتان‌های سنگین موجود در خوراک که توسط محلول کاستیک استخراج نمی‌شوند. که مرکاپتان‌های سنگین خوراک، در راکتور اکسیداسیون و در حضور هوای غنی از اکسیژن، محلول کاستیک و کاتالیست IVKAZ، به دی‌سولفید تبدیل می‌گردند.
- احیای کاستیک مصرفی در مراحل استخراج بالا

فرایندهای اختصاصی حذف مرکاپتان و سولفید هیدروژن

❖ فرایند MEROX

Merox مخفف عبارت Mercaptan Oxidation می‌باشد و یک فرایند شیمیایی کاتالیستی اختصاصی که توسط شرکت Honeywell-UOP توسعه یافت و در پالایشگاههای نفت و تاسیسات فراورش گاز طبیعی جهت حذف مرکاپتانها از LPG، پروپان، بوتانها، نفتاهای سبک، نفت سفید و سوخت جت بوسیله تبدیل آنها به غیرسولفیدهای هیدروکربنی مایع، استفاده می‌گردد. این فرایند نیازمند یک محیط آلكالینی می‌باشد که در بعضی از روشهای آن، توسط یک محلول آبی هیدروکسید سدیم، یک باز قوی، که عموماً به کاستیک موسوم است، فراهم می‌آید. در روشهای دیگر این فرایند، محیط آلكالینی توسط آمونیاک، که یک باز ضعیف می‌باشد، ایجاد می‌گردد. کاتالیست در بعضی از روشهای این فرایند، یک مایع می‌باشد. در روشهای دیگر، کاتالیست به شکل دانه‌های زغال چوب اشباع شده می‌باشد.

هنگامیکه نفت سفید گوگردزدایی می‌گردد، معمولاً فرایند Merox اقتصادی‌تر از استفاده از یک فرایند گوگردزدایی هیدرو کاتالیستی برای تقریباً هدف یکسان می‌باشد. مرکپتان‌های اصلی که در این فرایند حذف می‌شوند شامل Methanethiol ، Ethanethiol ، 1-Propanethiol ، 2-Propanethiol ، Butanethiol ، Tert-Butyl Mmercaptan و Pentanethiol می‌باشد.



شکل ۷-۴- طرح جریانی برای یک واحد فراورش Merox مرسوم برای استخراج مرکپتان‌ها از LPG

فرایند مرسوم Merox ، برای استخراج و حذف مرکپتان‌های LPG ، مانند پروپان ، بوتان‌ها و مخلوطی از پروپان و بوتان‌ها، می‌تواند برای استخراج و حذف مرکپتان‌ها از نفت‌های سبک نیز استفاده گردد. این یک فرایند دو مرحله‌ای می‌باشد که در مرحله نخست، ماده خام LPG یا نفتای سبک، با یک محلول سود سوزآور H_2O_2 در یک ظرف استخراج‌کننده سینی‌دار حاوی کاتالیست مایع اختصاصی شرکت Honeywell-UOP، تماس داده می‌شود. مرحله دوم مربوط به احیا بوده که نیازمند گرم کردن و اکسیداسیون محلول سود سوزآور است که استخراج‌کننده را ترک می‌نماید.

اما فرایند مرسوم Merox ، برای حذف مرکپتان‌های سوخت جت یا نفت سفید، یک فرایند تک مرحله‌ای می‌باشد. واکنش اکسیداسیون مرکپتان در یک محیط آلكالینی اتفاق می‌افتد، بطوریکه مواد خام سوخت جت یا نفت سفید، با هوای فشرده

مخلوط شده و به یک راکتور بستر ثابت جریان می‌یابند. کاتالیست شامل دانه‌های زغال چوب می‌باشد که با کاتالیست اختصاصی شرکت Honeywell-UOP اشباع شده است. مرکپتان زدایی مرسوم برای سوخت جت یا نفت سفید، مانند فرایند مشابه برای LPG، نیازمند شستشوی اولیه مواد خام با سود سوزآور، جهت حذف سولفید هیدروژنی که ممکن است با شیرین‌سازی تداخل ایجاد نماید، است.

❖ فرایند Selexol

یک فرایند از نوع جذبی احیاء شونده برای حذف سولفید هیدروژن، دی‌اکسید کربن، کربونیل سولفید و مرکپتان‌ها از گاز طبیعی و گاز سنتز است که تحت لیسانس شرکت Honeywell-UOP می‌باشد و از محلول‌های فیزیکی برای جذب استفاده می‌گردد.

❖ فرایند SulFinol

یک فرایند از نوع جذبی احیاء شونده برای حذف سولفید هیدروژن، دی‌اکسید کربن، کربونیل سولفید و مرکپتان‌ها از گاز طبیعی و گاز سنتز است که تحت لیسانس شرکت Shell می‌باشد که بر حسب نوع محلول بکار رفته، به چند روش تقسیم می‌شود که بطور کلی محلول مورد استفاده در این فرایند، از ترکیب محلول‌های فیزیکی/شیمیایی مانند Sulfolane/(DIPA or MDEA) است و در بعضی از روش‌ها از محلول piperazine بعنوان تسریع‌کننده استفاده می‌گردد.

❖ فرایند SulFerox

یک فرایند اکسایش-کاهش با پایه محلول آهن می‌باشد که سولفید هیدروژن در گاز ترش به گوگرد عنصری تبدیل می‌گردد و تحت لیسانس شرکت Shell می‌باشد. این فرایند شامل سه مرحله جذب، احیا و بازیافت گوگرد است.

۷- پدیده هیدرات گازی در خطوط لوله انتقال نفت و گاز

هیدرات گازی: عبارتند از جامدهای بلورین با پایه آبی که از لحاظ ظاهری شبیه به یخ می‌مانند، بطوریکه مولکولهای غیرقطبی کوچک (به طور نمونه گازها) یا مولکولهای قطبی با نیمه‌های آب گریز بزرگ، در داخل قفسهای باندهای هیدروژنی مولکولهای آب، به تله می‌افتند. به عبارت دیگر، هیدراتهای اندرونگیر^{۱۲۸} ترکیبهای اندرون‌گیری هستند که مولکول میزبان، آب و مولکول مهمان، بطور نمونه یک گاز یا یک مایع می‌باشد. بدون پشتیبانی مولکولهای به تله افتاده، ساختار شبکه اندرونگیرهای هیدرات، به ساختار کریستالی یخ متداول یا آب مایع، متلاشی می‌شود و پایداری کریستال هیدرات تحت تاثیر پیوند هیدروژنی بین مولکولهای میزبان و نیروهای واندروالس که بین مولکولهای میزبان-مهمان بوجود می‌آید، قرار دارد. بیشتر گازهای با جرم مولکولی کم (شامل اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن، دی‌اکسیدکربن، متان، سولفید هیدروژن، آرگون، کریپتون و زنون)، علاوه بر بعضی از هیدروکربنهای سنگین‌تر و فرئون‌ها، در دماها و فشارهای مناسب، تشکیل هیدرات خواهند داد. یکی از راههای پیشگیری از تشکیل هیدرات در خطوط لوله، استفاده از ممانعت‌کننده‌ها می‌باشد:

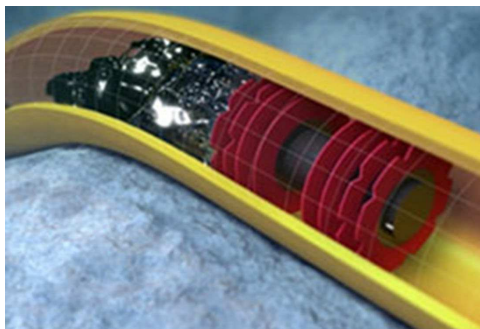
- ممانعت کننده‌های ترمودینامیکی که شرایط ترمودینامیکی تعادل هیدرات را بسمت دماهای کمتر و فشارهای بیشتر، جابجا می‌کنند (مانند متانول، مونو اتیلن گلیکول یا MEG، دی اتیلن گلیکول یا DEG و تری اتیلن گلیکول یا TEG).
- ممانعت کننده‌های سینتیکی و ممانعت کننده‌های ضد تشکیل کلوخه که اولی باعث کاهش سرعت سینتیک تشکیل هسته و دومی باعث جلوگیری از بهم چسبیدن کریستالهای هیدرات می‌گردند.

علاوه بر استفاده از ممانعت کننده‌ها، روشهایی مانند تغییر شرایط عملیاتی (دما و فشار) بطور موقت، بمنظور جلوگیری از تشکیل هیدرات گازی و نیز کاهش دمای نقطه شبنم آبی گاز طبیعی با استفاده از سیستم نم‌زدایی نیز وجود دارد. پدیده هیدرات گازی همیشه نامطلوب نبوده است و اگر چه در صنعت بدلیل مشکلاتی که در خطوط لوله ایجاد می‌نماید، بعنوان یک پدیده مزاحم تلقی می‌گردد، اما کاربردهای صنعتی زیادی را برای این پدیده می‌توان بر شمرده: جداسازی مخلوط گازی، استفاده در علم بیوتکنولوژی، شیرین نمودن آب دریا، بعنوان یک منبع عظیم انرژی، استفاده در حمل گاز طبیعی، جهت حمل هیدروژن، استفاده از هیدرات پروپان و دی‌اکسیدکربن جهت حذف آب از فاضلاب ماشین کاغذسازی و استفاده در صنایع غذایی. برای کسب اطلاعات بیشتر، می‌توانید به جزوه آشنایی با هیدرات گازی اینجانب مراجعه نمایید.

۸- توپک‌رانی در خطوط لوله انتقال نفت و گاز

توپک‌ها^{۱۲۹} ابزاری هستند که درون خط لوله قرار گرفته و در طول آن با استفاده از فشار سیال فرایندی یا سیال دیگری به حرکت در می‌آیند، به این عملیات، توپک‌رانی می‌گویند. توپک‌رانی یکی از مراحل عملیاتی جهت بهره برداری، نگهداری و حفاظت از خطوط لوله می‌باشد. این عملیات با اهداف مختلف در طول مدت زمان سرویس‌دهی خطوط لوله از هنگام ساخت و نصب خط لوله تا زمانیکه از آن استفاده می‌شود، انجام می‌گیرد. واکس‌ها، میعانات گازی، آب، براده‌ها، ذرات شن و دیگر ذرات خارجی رسوب کرده بر دیواره داخلی خط لوله، همگی می‌توانند بر ظرفیت، عملکرد و یکپارچگی سیستمهای خط لوله هیدروکربنی تاثیر بگذارند.

لذا هدف از توپک‌رانی، تمیز کردن و خارج کردن این مواد، اندازه‌گیری قطردرونی خط لوله، پوشش دادن جداره لوله با ضدخورنده‌ها و بازدید درونی خط لوله می‌باشد. سیال پیشران توپک، گاز یا مایع است. گاز می‌تواند هوای کمپرس شده یا گاز داخل خط لوله باشد و مایع می‌تواند آب، مواد تمیز کننده یا سیالی که در حین عملیات بهره‌برداری در خط لوله جریان دارد مانند نفت خام باشد (سرعت مجاز در خطوط لوله انتقال نفت بین ۱ تا ۵ متر بر ثانیه و در خطوط لوله انتقال گاز بین ۲ تا ۷ متر بر ثانیه می‌باشد).



شکل ۷-۵- چگونگی حرکت توپک درون خط لوله و تمیز نمودن آن

انواع توپک:

- توپک‌های utility که برای مقاصد تمیز کاری، ایجاد حایل فیزیکی بین دو سیال متفاوت و پاکسازی آب در خطوط لوله بکار می‌روند، شامل:
- توپک‌های بدنه فلزی (Mandrel Cleaning Pig و Mandrel Sealing Pig)، اسفنجی (Foam Pig)، Solid، Cast Pig و کروی (Spherical Pig/ Sphere/ Ball)
- توپک‌هایی که برای تعمیر و نگهداری خطوط لوله بکار می‌روند، شامل:
- توپک‌های مغناطیسی (Magnetic Pig)، Plugging Pig یا Isolation Pig، Hyperbaric Spheres و High DP and Secondary Barrier Pig، توپک‌های حل‌پذیر (Soluble Pig) و توپک‌های خاص دیگر
- توپک‌های ژل (Gel Pig) که همراه با توپک‌های معمول جهت بهینه نمودن عملیات تمیز کاری، پاکسازی آب و خشک نمودن خطوط لوله بکار می‌روند.
- توپک‌های هوشمند (Smart Pig یا Intelligent Pig) که علاوه بر بازبینی سطح داخلی خطوط لوله جهت پیدا نمودن محل و میزان اشکال بوجود آمده، برای فراهم آوردن اطلاعات شرایط داخل خط لوله نیز بکار می‌روند.
- در قسمت واژه‌نامه انگلیسی این کتاب، به توضیح مختصری برای توپک‌های مذکور پرداخته شده است.

۹- اندازه لوله‌های مورد استفاده در صنعت نفت و گاز و schedule آنها

لوله‌ها از اصلی‌ترین قسمت‌ها و اجزاء می‌باشند که باعث پیوند بین دستگاه‌ها و ایجاد مسیر می‌شوند. بطور کلی لوله‌های مورد استفاده در صنعت، بصورت بدون درز^{۱۳۰} و درزدار^{۱۳۱} می‌باشند که نوع بدون درز آن، از یک قطعه شمش با اعمال خاصی بر روی آن بوجود می‌آید، اما نوع درزدار آن با جوش دادن ورقه‌های فلزی که قبلاً بصورت لوله فرم داده شده‌اند، بدست می‌آید. لوله‌های فولادی اعم از Carbon Steel & Alloy Steel و Stainless Steel معمولاً توسط اندازه نامی لوله^{۱۳۲} با استاندارد ANSI/ASME B36.10M و ANSI/ASME B36.19M شامل ضخامت جداره، قطر خارجی و قطر اسمی و نیز مشخصه وزن، معین می‌گردند. برای مشخص نمودن ضخامت جداره و قطر خطوط لوله انتقال سیال (خطوط لوله طویل فولادی بدون درز و جوشی) یا همان pipeline نیز از استاندارد API 5L که درواقع استاندارد ساخت خط لوله انتقال می‌باشد، استفاده می‌گردد.

اندازه‌های متداول لوله‌ها ۱/۲، ۳/۴، ۱، ۱ ¼، ۱ ½، ۲، ۲ ½، ۳، ۳ ½، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۴ اینچ می‌باشند که اندازه‌های ۱/۴، ۱ ½، ۲، ۳ ½، ۵ و ۱۴ اینچ بسیار کم استفاده می‌شوند، چون معمولاً برای خرید آنها می‌بایست بصورت سفارشی خرید نمود. اندازه‌های زیر ۱/۲ اینچ را تیوب می‌نامند. اندازه‌های ۱/۸، ۱/۴، ۳/۸ اینچ معمولاً برای خطوط ابزار دقیق یا سرویس و خطوط متصل به تجهیزات می‌باشند (البته این اندازه‌ها، مطابق با استاندارد گفته شده و با توجه به دارا بودن شاخص schedule، لوله محسوب می‌شوند). تیوب‌ها برخلاف لوله‌ها دارای طول مشخصی نمی‌باشند و ضخامت آنها در سرتاسر تیوب، یکسان است. قطر اسمی تیوب‌ها با قطر خارجی آنها یکسان می‌باشد و شاخص ضخامت آنها بر اساس پارامتری بنام BWG (Birmingham Wire Gauge) مانند شاخص ضخامت لوله‌ها که توسط پارامتری بنام schedule بیان می‌شود، مشخص می‌شود.

¹³⁰ seamless¹³¹ Electric Resistance Welded (ERW)¹³² Nominal Pipe Size

طول لوله‌ها بصورت ۶ یا ۱۲ متری هستند و به شاخه معروف است. هر اندازه لوله با ضخامت جداره‌های مختلفی (با توجه به فشار و دمای عملیاتی) ساخته شده که دارای سه استاندارد گفته شده می‌باشد. بعنوان مثال لوله Carbon Steel با قطر اسمی ۴ اینچ، همیشه دارای قطر خارجی ۱۱۴/۳ میلی‌متر بوده که اگر schedule آن ۸۰ باشد، ضخامت جداره آن ۸/۵۶ میلی‌متر و وزن آن به ازای هر متر، ۲۲/۳۳ کیلوگرم خواهد بود.

۱۰- انواع شیرهای صنعتی و کاربرد آنها

شیرها مهمترین وسیله مکانیکی برای کنترل جریان سیالات و فشار بوده و در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، میدان کاربرد بسیار گسترده‌ای دارند. بصورت خلاصه، مهمترین شیرهای صنعتی عبارتند از:

- **شیر دروازه‌ای (Gate Valve):** یکی از پرکاربردترین شیرهای صنعتی می‌باشد که دارای قیمت نسبتاً ارزان و افت فشار پایینتر است. این نوع شیر معمولاً در مواردی کاربرد دارد که هدف از بکارگیری آن، قطع یا وصل کامل جریان باشد و از آن بعنوان تنظیم کننده جریان استفاده نمی‌شود زیرا نرخ جریان با حرکت محور شیر، بطور یکسان تغییر نمی‌نماید و نیز نشیمنگاه این شیر در برابر سایش حساس می‌باشد. به این شیر گاهی Slide Valve نیز گفته می‌شود. بطور کلی این شیر کاربرد وسیعی در خطوط لوله آب سرد و گرم داشته و مهمترین مورد استفاده آن در انتقال مایعات ویسکوز می‌باشد.

انواع: شیر با بندآور^{۱۳۳} گوه‌ای و موازی. **معایب:** این نوع شیر در هنگام وضعیت اندکی باز، دارای لرزش می‌گردد، سایش دیسک و نشیمنگاه آن زیاد است و همانطور که گفته شد برای کاربردهای تنظیمی جریان مناسب نمی‌باشد. همچنین باز و بسته نمودن این شیر معمولاً به زمان زیادی نیاز دارد. بعنوان مثال شیر Through Conduit از نوع بندآور موازی بوده و کاربرد اصلی آن در خطوط انتقال برای توپکرانی می‌باشد. این نوع شیر دروازه‌ای خود به دو نوع اصلی Through Conduit Expanding Gate Valve و Through Conduit Slab (Floating) Gate Valve تقسیم بندی می‌شود.

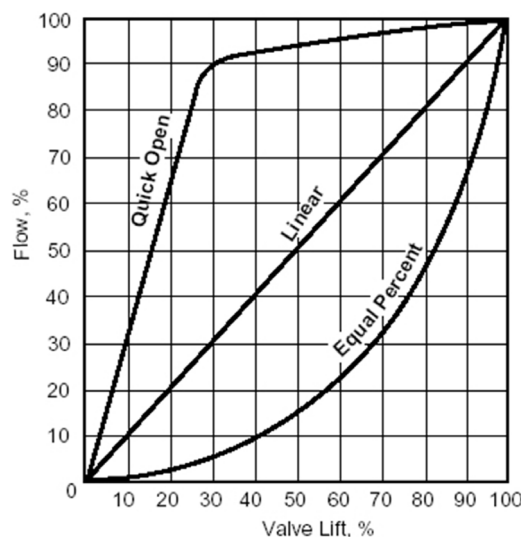
- **شیر توپی (Ball Valve):** شیری است با حرکت چرخشی که در آن از دیسکی که به شکل کره با مجرای در وسط آن بعنوان بندآور استفاده می‌گردد. سرعت عملکرد این شیر بخاطر نوع طراحی و تغییر در وضعیت شیر، بالا می‌باشد. این شیر در گروه شیرهای با افت فشار ناچیز دسته بندی می‌شود، همچنین بواسطه ایجاد جریان آشفته و تلفات ناشی از اصطکاک در حالت نیمه باز و نیز سایش نشیمنگاه شیر در اینحالت، بایستی فقط در کاربردهای کاملاً باز یا کاملاً بسته استفاده گردد.

انواع این شیر از لحاظ بدنه شامل Single ، Fully Welded ، Side Entry (2 and 3 pieces) ، Split Body (2 and 3 pieces) ، Body (End and Top Entry) می‌باشند و نیز از لحاظ port شامل Full Bore (سوراخ شیر با قطر داخلی لوله یکسان می‌باشد)، Reduced Bore (سوراخ شیر یک اندازه از قطر داخلی لوله، کوچکتر می‌باشد)، V Port و multiport (شیر سه یا چهارراهه یا بیشتر) هستند و دسته‌بندی‌های دیگری چون Cavity Filler و Trunnion نیز وجود دارد.

مزایای این شیر آنرا به یکی از پرمصرفترین شیرهای صنعت پتروشیمی تبدیل نموده است. **مزایا:** قیمت ارزان، سبکی، حجم کم، نصب و تعمیر راحت، آب بندی خوب، سرعت عملکرد بالا و افت فشار بسیار کم نسبت به شیرهای مشابه

- **شیر کروی (Globe Valve):** شامل نسل اول تا سوم: کاربرد آن برای کنترل و تنظیم جریان سیال، بخاطر طراحی شکل بندآور و تغییر جهت حرکت سیال می‌باشد. این شیر در حالت مستقیم، می‌تواند طوری قرار گیرد که جریان از زیر دیسک وارد شیر شود (انرژی جنبشی سیال مانع از بسته شدن شیر شده و کمک به باز شدن آن نماید) و یا جریان از بالای دیسک

وارد گردد که حالت اول جهت اجتناب از احتمال جدا شدن قطعه‌ای از مجموعه ساقه^{۱۳۴} و بندآور، برای مواقعی است که شیر بیشتر وظیفه کنترل جریان را داشته باشد و حالت دوم برای مواقعی که بستن سریع جریان مورد نیاز باشد، مفید است. در هنگام مقایسه بین یک شیر کروی و یک شیر دروازه‌ای، معمولاً نشستی از نشیمنگاه شیر کروی کمتر می‌باشد. انواع از لحاظ ساختمانی: شیرهای T شکل، شیرهای Y شکل و شیرهای زاویه‌ای. انواع از لحاظ باز شدن: Quick Opening، Linear و Equal Percentage. شیر نوع Quick Opening در حرکت‌های اولیه ساقه (تا حدود ۳۰٪)، دبی زیادی را از خود عبور می‌دهد و در انتهای حرکت ساقه، جریان کمی از شیر عبور می‌کند. این نوع شیر برای کاربردهای قطع-وصل جریان استفاده می‌شود که جهت ایجاد سریع دبی بیشینه طراحی شده است. در شیر از نوع Linear نسبت تغییرات حرکت شیر و تغییرات مقدار جریان، بدون توجه به موقعیت بندآور، همیشه یکسان است. بعنوان مثال در موقعیت ۲۰٪ باز بودن این نوع شیر، ۲۰٪ جریان را خواهیم داشت. از این نوع شیر در جایی که افت فشار شیر سهم عمده‌ای از افت فشار کلی سیستم دارد، استفاده می‌گردد. در شیر از نوع Equal Percentage تغییر در مقدار جریان به ازای تغییر واحد در حرکت شیر، مستقیماً متناسب با مقدار جریانی است که درست قبل از بوجود آمدن تغییر، وجود داشته است. بعبارت دیگر وقتی مقدار جریان کم است، تغییرات (شیب) کم و وقتی مقدار جریان زیاد است، تغییرات نیز زیاد خواهد بود. عموماً از این نوع شیر در کنترل فشار استفاده می‌شود.



نمودار ۷-۲- انواع حالات باز شدن شیرهای کروی

برای طراحی شیرهای کنترلی (دستی یا اتوماتیک) و تعیین میزان دبی سیالی که از خود عبور می‌دهد، یک ضریب جریانی شیر^{۱۳۵} (در سیستم آحاد انگلیسی) یا فاکتور جریانی شیر^{۱۳۶} (در سیستم آحاد SI) تعریف می‌گردد. تعریف ضریب جریانی شیر در سیستم آحاد انگلیسی به صورت مقدار دبی آب برحسب USgal/min در دمای 60°F است که از شیری با افت فشار 1 psi عبور می‌کند.

مزایا: سرعت نسبتاً بالای واکنش شیر بعلاوه فاصله کمی که بندآور بین حالت باز و بسته طی می‌کند و نیز سادگی تعمیر آن بدون نیاز به جدا شدن از خط لوله.

¹³⁴ stem

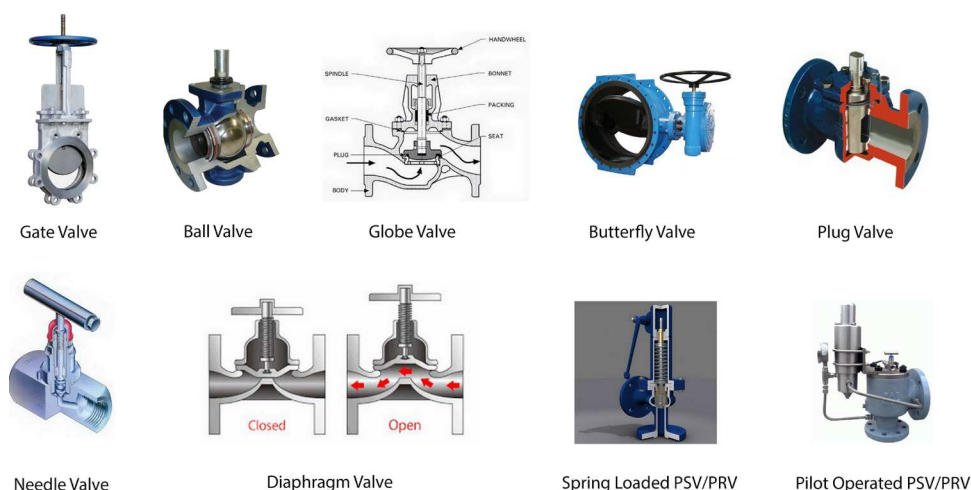
¹³⁵ Valve Flow Coefficient (C_v)

¹³⁶ Valve Flow Factor (K_v)

معایب: اساسی‌ترین مشکل این شیر، انتقال فشار و نیروی سیال به بندآور و ساقه می‌باشد. همچنین مواردی چون میزان نشت‌بندی و ضریب جریانایی پایین‌تر نسبت به بعضی از انواع دیگر شیرهای کنترلی به غیر از شیرهای کنترلی نوع کروی، انواع دیگری از شیرهای کنترلی مانند شیرهای پروانه‌ای، دیافراگمی، جریان محوری و انواع شیرهای کنترلی توپی نیز موجود می‌باشند. برای کسب اطلاعات بیشتر، می‌توانید به جزوات آشنایی با شیرهای کنترلی اینجانب مراجعه نمایید.

- **شیر پروانه‌ای (Butterfly Valve):** این شیر برای مقاصد قطع، وصل و نیز کنترل شدت جریان، استفاده می‌گردد. خصوصیات این شیر افت فشار کم و عملکرد سریع و آسان آن می‌باشد. این نوع شیر در مواردیکه انتقال حجم بسیار بالای سیالات مدنظر باشد یا هنگامیکه دوغابهای حاوی مقدار زیاد ذرات معلق و نهایتاً گازهایی با فشار نسبتاً پایین وجود داشته باشد، از انتخاب‌های اصلی طراحان می‌باشد. مزایا: بطور کلی در طراحی این شیر، از وزن و حجم آن بشدت کاسته شده و سبب شده تولید این شیر به دلیل وزن کمتر آن، هزینه نسبتاً کمی در پی داشته باشد. از مزایای دیگر این شیر می‌توان به کمتر جاگیر بودن آن و نیاز به نیروی نسبتاً کمی برای باز و بسته کردن آن، اشاره نمود و نیز فرسایش شیر بسیار پایین می‌باشد. تعمیر این نوع شیر، بدلیل کم بودن تعداد اجزای متحرک آن و نیز نبود محفظه‌ای برای به دام انداختن سیال و نتیجتاً بروز خوردگی در آن، بطور نسبی ارزانتر است. انواع: شیر پروانه‌ای متحدالمرکز که معمولاً کلاس فشاری ۱۵۰ و ۳۰۰ داشته و شیر پروانه‌ای خارج از مرکز (دارای دما فشار عملیاتی بالا)

- **شیر سماوری (Plug Valve):** کاربرد مهم آن برای زمانیست که به سرعت نیاز باشد جریان را به خط لوله قطع یا جریانایی را به سرعت برقرار نمود و نیز در فرایندهایی که قطع و وصل جریان در دفعات مکرر مدنظر باشد. این شیر مانند شیر دروازه‌ای برای تنظیم جریان بکار نمی‌رود. یکی دیگر از کاربردهای اینگونه شیر، استفاده از آن برای تغییر مسیر جریان می‌باشد. (شیر با چند مجرای ورودی و خروجی). دیسک این شیر، یک جسم صلب بشکل مخروط ناقص یا استوانه بوده که دارای یک سوراخ می‌باشد که برای عبور جریان تعبیه شده است. از این نوع شیر در سرویسهای مختلف مایع و گاز استفاده می‌شود. مزایا: سرعت عمل در تغییر وضعیت شیر. معایب: نیاز به نیروی زیاد برای باز نمودن و یا بستن آن.



شکل ۷-۶- انواع شیر دستی و اطمینان/ایمنی

- **شیر دیافراگمی (Diaphragm Valve):** کاربرد آن در موارد خاص می‌باشد مانند حالتی که سیال خطرناکی در خط لوله وجود داشته باشد و هرگونه نشتی به خارج از شیر، تحت هر شرایطی غیر قابل قبول باشد یا در حالتی که سیستم، تحت خلا باشد و کوچکترین منفذی در شیر، باعث شکستن خلا و توقف تولید گردد. علت نامگذاری این شیر بخاطر وجود یک دیسک قابل انعطاف یا همان دیافراگم در درون آن می‌باشد. این شیر در موارد باز نمودن مسیر، تنظیم میزان جریان و نیز بستن مسیر سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به انعطاف‌پذیری دیافراگم شیر، معمولاً خطوط جریان، کمتر دچار اغتشاش شده و تلاطم حاصل از کنترل جریان، بسیار کمتر از شیرهای دیگر می‌باشد. از مزایای دیگر این شیر، ایزوله نمودن قسمتهای مختلف شیر توسط دیافراگم، در برابر سیال عبوری می‌باشد. باتوجه به این خاصیت، این شیر در برابر سیالات حاوی ذرات جامد معلق و سیالات خورنده، مقاومت خوبی از خود نشان داده و برای اینگونه سیالات، مناسب می‌باشد. نقطه ضعف اساسی: همان دیافراگم می‌باشد، زیرا جنس آن معمولاً از الاستومر است که نسبت به دما و فشارهای بالا حساس بوده و کاربرد اینگونه شیر را برای دما و فشارهای بالا محدود می‌نماید. انواع: straight-through و weir

- **شیر سوزنی (Needle Valve):** یک شیر سوزنی جهت تنظیم دقیق میزان جریان عبوری سیال، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شیر از لحاظ ساختار، بسیار شبیه به شیر کروی بوده با این تفاوت که بجای دیسک، دارای یک قسمت مخروطی شکل بلند شبیه به یک سوزن، در انتهای ساقه شیر می‌باشد. از موارد کاربرد آن می‌توان به استفاده از آن در کنترل‌کننده‌های فشار پمپ‌ها یا بعنوان قسمتی از اجزای سیستمهای کنترل احتراق اتوماتیک، اشاره نمود. همچنین کاربرد عمده آن در مسیر قرارگیری gauge های فشار جهت جلوگیری از بروز صدمات ناشی از surge ناگهانی در خطوط لوله به آنها می‌باشد.

- **شیر یکطرفه (Non-Return Valve and Check Valve):** شیر یکطرفه با هدف جلوگیری از بازگشت سیال در یک سیستم لوله کشی^{۱۳۷} نصب و استفاده می‌گردد. این شیر توسط جریان سیال در لوله‌ها عمل می‌نماید، فشار سیال عبوری از درون لوله باعث باز شدن آن گردیده و هرگونه برگشت سیال، باعث بسته شدن شیر خواهد شد. گاهی گفته می‌شود که بین این دو شیر، از لحاظ سیال سرویس دو سمت شیر، کاربرد در لوله‌های افقی و عمودی، الزامات عملکرد و .. تفاوت‌هایی وجود دارد. انواع بر اساس حرکت بندآور: نوسانی (swing)، توپی (ball)، دیسکی (disk)، با دیسک دو تکه (Split Disk)، با دیسک وارونه (Tilting Disk)، دیافراگمی (diaphragm)، بالارفتنی (lift) و قطع‌کننده‌ای (stop).

- **شیر اطمینان یا ایمنی (Relief Valve or Safety Valve):** در صنعت، ظروف تحت فشار بایستی بوسیله شیر ایمنی و اطمینان محافظت شوند که آن، یک شیر خودکار می‌باشد که برای فعال شدن نیاز به اپراتور نداشته و بر مبنای تنظیمی^{۱۳۸} که قبلاً صورت گرفته، در صورت بالا رفتن فشار تا حدی معین، عمل نموده و فشار اضافی را تخلیه می‌نماید و مجدداً در کمی پایینتر از فشار تنظیم شده، مسیر تخلیه را مسدود نموده و از هدر رفتن سیال جلوگیری می‌کند. شیر اطمینان یا ایمنی را باید طوری انتخاب کرد که در صورت بهم خوردن تعادل در فشار ظرف و یا مخزن ذخیره، باز شده و مقادیر اضافی مایع یا گاز را خارج نماید. علاوه براین، ظرفیت شیر باید بگونه‌ای باشد که در مواردی که مخزن ذخیره، ظرف تحت فشار و یا هدر در معرض آتش‌سوزی و یا انفجار قرار می‌گیرد، بتواند مقدار زیادی مایع یا گاز داخل مخزن را که در اثر حرارت تغییر حالت داده است را به خارج منتقل نماید. شیرهای ایمنی و اطمینان در فشاری در حدود ۱۰ درصد بیشتر از فشاری که ظرف تحت فشار یا مخزن ذخیره باید نگه دارد (فشار کارکرد) و یا در حدود بالاترین فشاری که می‌تواند تحمل کند (فشار طراحی)، طراحی

137 Piping System

138 Set Pressure

می‌گردند. انواع از لحاظ سیال سرویس: شیرهای ایمنی و اطمینان با توجه به کاربرد و محل بکارگیریشان به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- شیرهای ایمنی (Safety Valve): برای محافظت فشاری مسیرها یا ظروف حاوی گازها
 - شیرهای اطمینان (Relief Valve): برای محافظت فشاری مسیرها یا ظروف حاوی مایعات
 - شیرهای ایمنی-اطمینان (Safety-Relief Valve): برای محافظت فشاری مسیرها یا ظروف حاوی گاز و مایع و یا جریان دوفازی
- تفاوت اساسی شیرهای ایمنی و اطمینان در طرز باز شدن آنها و ماهیت سیال سرویس آنها (گاز تراکم‌پذیر و مایع تراکم‌ناپذیر) می‌باشد.

انواع از لحاظ ساختاری: فنری (Spring Loaded)، پیلوت‌دار (Pilot Operated) و وزنه‌ای (Weight Loaded).
نوع فنری می‌تواند شامل Conventional و Balanced Bellows/Piston باشد. معایب عمومی نوع فنری: احتمال خرابی و باز نشدن شیر در وضعیت اضطراری و تغییر خواص فنر در اثر عواملی چون خستگی یا تغییرات دمایی
البته قابل ذکر می‌باشد که شیرهای ایمنی خلاء شکن برای جلوگیری از ایجاد پدیده collapse در اثر بوجود آمدن خلاء در مخزن اتمسفری با سقف ثابت^{۱۳۹} بخاطر ایجاد مکش پمپ تخلیه مایع متصل به مخزن و یا سرد شدن گاز داخل و چگالش آن نیز وجود دارند. همچنین این شیرها می‌توانند بصورت ترکیب با شیرهای ایمنی فشار و بصورت Pressure/Vacuum Safety/Relief Valve برای مخازن ذکر شده باشند.

برای مخازن پرشده با مایع یا برای قسمتی از لوله مابین دو شیر که احتمال به تله افتادن مایع در حالت فرایند عادی یا تعمیرات وجود دارد از Thermal Relief Valve استفاده می‌شود که ساختاری مشابه با شیرهای ایمنی دارند تا از ظرف یا لوله در مقابل افزایش فشار بخاطر انبساط حرارتی، محافظت بعمل آید که این TRV ها معمولاً اندازه‌های کوچکی دارند (عمدتاً ۳/۴ یا ۱/۲ اینچ)، زیرا تقریباً اکثر مایعات تراکم‌ناپذیر بوده و بنابراین خروج مقدار نسبتاً کمی از سیال از این شیرها، یک کاهش قابل توجهی در فشار را فراهم می‌آورد.

۱۱- انواع فلنج‌ها^{۱۴۰} در صنعت نفت و گاز و کلاس فشاری آنها

فلنج‌ها یکی از اتصال دهنده‌های لوله‌ها، شیرآلات و دستگاه‌ها به یکدیگر می‌باشند. فلنج‌ها بصورت قطعه دیسکی شکل بوده که همیشه بصورت جفت به کمک پیچ و مهره، دو قطعه را به یکدیگر متصل می‌سازند و به آسانی نیز باز می‌گردند. آب بندی بین دو فلنج توسط gasket و در فشارهای بالاتر، توسط Ring Gasket که در بین آنها قرار داده می‌شود، انجام می‌گیرد.

• دسته بندی از لحاظ تحمل فشار:

- دسته بندی فشار مطابق با استاندارد ANSI/ASME B16.5 و ANSI/ASME B16.47
مطابق این استاندارد فلنج‌های فولادی و آلیاژهای آن به کلاسهای ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ تقسیم بندی می‌شوند که با توجه به جنس فلنج و دمای عملیاتی، فشار مجاز کاری برای آن فلنج مذکور از جداول مربوطه بدست می‌آید. فشار کارکرد، بصورت سرانگشتی، حدود ۲/۴ برابر اعداد فوق می‌باشد. به عنوان مثال فلنج با کلاس کاری ۱۵۰ از جنس گروه ۱/۱ مواد، فشار عملیاتی برابر 19.2 barg در دمای عملیاتی 50°C خواهد داشت.

¹³⁹ Fixed Roof Tank

¹⁴⁰ flange

- دسته بندی فشار مطابق با استاندارد ISO 7005

در این استاندارد فشار تحمل فلنجهای فولادی و آلیاژهای آن، با PN نشان داده شده که این بیانگر فشار اسمی بر حسب barg می‌باشد. بعنوان مثال PN40 یعنی فشار کارکرد فلنج، در حدود 40 barg می‌باشد. برای بدست آوردن فشار مجاز کاری، می‌بایست به جداول مربوطه بر اساس جنس فلنج و دمای عملیاتی مراجعه نمود.

- دسته بندی فشار مطابق با استاندارد API 6A (فلنجهای نوع 6B و 6BX)

این نوع فلنجهای دارای تحمل فشار بیشتری نسبت به فلنجهای گروه ANSI/ASME هستند و به کلاسهای ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ رده‌بندی می‌گردند (البته بعضی از کلاسهای فشاری این استاندارد با کلاسهای فشاری استاندارد ASME تطابق دارد).

طبق استاندارد ANSI/ASME B16.34 که مربوط به شیرهای صنعتی فلنجی، رزوه‌ای و جوشی می‌باشد، کلاس فشاری ۴۵۰۰ نیز وجود دارد که مربوط به شیرهای نوع جوشی است.

• دسته بندی از لحاظ نوع Facing (بر اساس استاندارد ASME B16.5 و ASME B16.47):

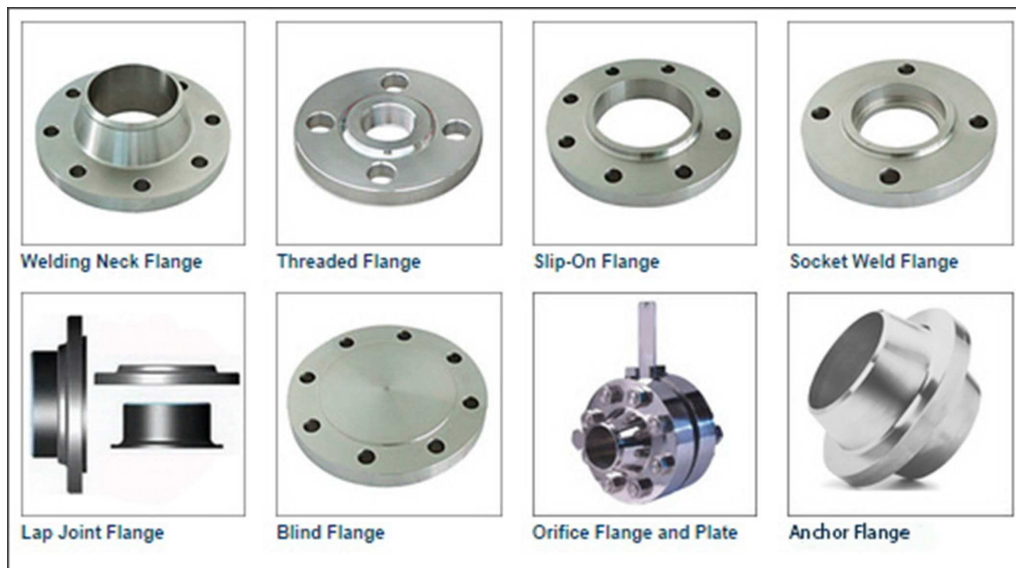
- Raised Face (RF): یکی از شناخته شده‌ترین انواع فلنج می‌باشد که در تاسیسات صنعتی کاربرد زیادی دارد و به راحتی قابل شناسایی می‌باشد. بدلیل اینکه سطح آب بندی فلنج بالاتر از محل دایره‌ای شکل بستن پیچها قرار گرفته است، این فلنج را به این نام می‌خوانند. هدف از استفاده از این نوع فلنج، تمرکز بیشتر فشار بر روی گسکت بوده که از این راه قابلیت فشار و نیروی حاصل از پیچها را هرچه بیشتر بر روی گسکت منتقل نموده که نهایتاً موجب اتصال محکم‌تر و آب‌بندی بهتر اتصالات می‌گردد.

- Flat Face (FF): این نوع فلنج دارای سطح آب بندی بدون برجستگی می‌باشد و در واقع محل آب‌بندی گسکت، همان محل تخت بدنه اصلی فلنج می‌باشد. اغلب اسباب و ادواتی از فلنج تخت استفاده می‌نمایند که در آنها جفت شدن فلنج یا اتصالات فلنجدار، از نوع ریخته‌گری باشند. معمولاً فلنجهای چدنی و یا فولادی که در فشارهای کم کاربرد دارند، از این نوع ساخته می‌شوند.

- Ring Type Joint (RTJ): از این نوع فلنجهای در فشارهای بالا (کلاس ۹۰۰ مربوط به استاندارد ASME و بالاتر) و یا در دماهای بیش از ۸۰۰°F استفاده می‌گردد. سطح آب‌بندی این نوع فلنج دارای یک شیار زاویه‌دار است که با رینگ که عمدتاً از جنس Stainless Steel می‌باشد، آب‌بندی می‌گردد. نیروی حاصل از فشار پیچها، رینگ فولادی را در داخل شیار موجود، در بین دو فلنج، فشرده و پرس می‌نماید و موجب آب‌بندی فلز بر روی فلز در بین دو فلنج می‌گردد.

- Tongue and Groove (T & G): در این نوع فلنج، اندازه زبانه و شیار نباید مطابق یکدیگر باشد. بر روی پیشانی یکی از فلنجهای یک حلقه برجسته (زبانه) و بر روی دیگری یک شیار بگونه‌ای ماشین کاری شده است که در هنگام فشار ناشی از پیچها، هر دو با یکدیگر همخوانی داشته و در هم جفت می‌گردند. شکل آنها با نر و مادگی‌های معمولی متفاوت می‌باشد، چون قطر داخلی زبانه و شیار، تا داخل بدنه فلنج، امتداد نیافته است و همین قابلیت موجب نگهداری رینگ در داخل و خارج شیار می‌گردد. اتصال این گونه فلنجهای دارای مزیت دیگری نیز می‌باشد. آنها بصورت خود تنظیم عمل کرده و مانند چسب، فلنجهای را محکم در هم نگه می‌دارند، اتصال نر و مادگی نیز با درهم رفتن در یکدیگر، محورهایی که در زیر فشار خط می‌باشند را در یک راستا نگه داشته و نیازی به ماشینکاری عمده‌ای ندارد.

- **Male and Female (M & F)**: در این نوع فلنج، پیشانی فلنجهای می‌بایست با یکدیگر یکسان باشند. روی سطح پیشانی این نوع فلنجهای ناحیه‌ای وجود دارد که بیش از پیشانی یک فلنج معمولی، امتداد یافته است (نری) و فلنج دیگر یا فلنج جفت‌شونده دارای یک تو رفتگی ماشینکاری شده در داخل پیشانی خود می‌باشد (مادگی). این نوع پیشانی بیشتر بر روی پوسته مبدلهای حرارتی جهت کانال و پوشش فلنجهای بکار می‌رود. این نوع فلنجهای دارای آب بندی بهتر و قابلیت در هم فشردگی متریال آب بندی را دارا بوده، اما هزینه ساخت نسبتاً بالا و غیر قابل دسترس بودن آنها از لحاظ تجاری و نیز رعایت قوانین سخت‌گیرانه در طراحی سیستم لوله‌کشی، از معایب و پیچیدگی استفاده از آنها محسوب می‌گردد.



شکل ۷-۷- انواع فلنج از لحاظ نوع اتصال به لوله

• دسته بندی از لحاظ نوع اتصال به لوله (بر اساس استاندارد ASME B16.5 و ASME B16.47):

- فلنج گردن‌دار جوشی (Welding Neck Flange)
 - فلنج روکار (Slip-On Flange)
 - فلنج با جوش محافظه‌ای (Socket Weld Flange)
 - فلنج لبه‌دار (Lap Joint Flange)
 - فلنج رزوه‌ای یا دنده‌ای (Threaded or Screwed Flange)
 - فلنج مهارکننده (Anchor Flange)
 - فلنج اریفیس (Orifice Flange)
 - فلنج کور (Blind Flange)
- توضیح مختصر این نوع فلنجهای در قسمت واژه نامه انگلیسی این کتاب آورده شده است.

۱۲- انواع یاتاقان‌ها^{۱۴۱} از لحاظ عملکرد و ساختمان

یاتاقانها دارای دو نقش اساسی در ماشین آلات دوار هستند:

۱- نگهدارنده محور، بطوریکه از تزلزل و لقی آن در داخل بدنه جلوگیری نمایند.

۲- جلوگیری از حرکت جانبی محور و بر خورد قسمتهای متحرک و ثابت

یاتاقانها را از نظر باری که به آنها وارد می شود به سه گروه تقسیم می کنند:

- شعاعی (Journal Bearing): یاتاقانهای شعاعی، اجزایی از ماشین آلات هستند که مجموعه محور را در زمان تغییر

دور و بار در مرکز قرار داده و بارهای شعاعی را تحمل می نمایند.

- محوری (Thrust Bearing): اگر به شفت بار محوری وارد شود یاتاقان شعاعی نمی تواند مانع از حرکت شفت گردد

و لذا باید از یاتاقان محوری استفاده کرد. یاتاقان محوری یاتاقانی است که هنگام کار، بار محوری را تحمل

می نماید.

- شعاعی-محوری: این یاتاقان علاوه بر بار شعاعی، بار محوری را نیز تحمل می نماید.

یاتاقانها از نظر ساختمان و عملکرد نیز به چهار گروه تقسیم می شوند:

- لغزشی

- کشکی

- غلتکی

- مغناطیسی

۱۳- حفاظت کاتدی

امروزه خوردگی شیمیایی فلزات از جمله مشکلات اساسی و هزینه ساز صنایع بزرگ به خصوص صنعت نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاهی، آب و فاضلاب و.. می باشد. لوله های انتقال و توزیع سوخت و آب، اسکله ها، کشتی ها، کندانسورها، دکل های انتقال نیرو، مخازن ذخیره سوخت و دیگر سازه های مدفون و یا غوطه ور در یک الکترولیت متناسب با شرایط موجود و با توجه به ساختار متالورژیکی خود، خورده شده و بعد از مدتی کار یک سیستم و پروسه فعال را مختل کرده و منجر به ضرر و زیانهای غیرقابل پیش بینی می شوند.

این مبحث باعث انگیزه انجام تحقیقات وسیعی در این زمینه شده است تا روشهای عملی مقابله با خوردگی شیمیایی فلزات به عرصه ظهور برسد. در خصوص پیشگیری از خوردگی سکوهاي نفتی دریای و casing های چاههای نفتی ساحل، ظروف، خطوط لوله مدفون، کف مخازن ذخیره روزمینی و مخازن زیرزمینی فلزی، نتیجه تحقیقات و آزمایشات انجام شده دو روش عمده زیر می باشد:

(۱) استفاده از انواع پوشش

(۲) استفاده از سیستم حفاظت کاتدی

اگر پوشش ها دائمی بودند و هنگام نصب و یا کار آسیب نمی دیدند، لوله های فلزی هرگز خورده نمی شدند. پوششهای موجود هیچ یک دارای راندمان صد درصد نمی باشند و پیدایش عیوب در لایه های محافظ یا وجود سوراخها، حتی اگر اتفاقی باشد ما

¹⁴¹ bearing

را ملزم می‌نماید که حفاظت مکمل و نوع دومی را برای سازه‌های مدفون یا غوطه‌ور بکار ببریم. روش تکمیلی یاد شده، سیستم حفاظت کاتدی می‌باشد که در این روش با کاتد نمودن سازه در حال خورده شدن، که قبلاً آند بوده است، مربوط به یک سلول الکتروشیمیایی، می‌توان از خوردگی آن جلوگیری نمود. کاتد کردن سازه با جایگزینی یک منبع تامین کننده الکترون انجام‌پذیر است که این منبع تامین کننده یک منبع الکتریکی و یا یک فلز فعال‌تر (بعنوان آند) از سازه می‌باشد. بدیهی است استفاده از هریک از روشهای یاد شده مستلزم صرف هزینه‌های اقتصادی می‌باشد ولی با یک بررسی کارشناسی می‌توان نتیجه گرفت که صرف هزینه‌های اولیه جهت پوشش دادن سازه و نصب سیستم حفاظت کاتدی نه تنها از خطرات جانبی در آینده جلوگیری می‌کند، بلکه هزینه‌های مربوط به تعویض قطعات، تعمیرات و جبران خسارات و زیانهای وارده را کاهش داده و هزینه‌های لازم جهت نصب چنین سیستمهایی را از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌سازد.

اصول خوردگی براساس خواص فعل و انفعالات الکتروشیمیایی است که در آند تولید الکترون و در کاتد مصرف الکترون صورت می‌پذیرد. اکثر اوقات، یونهای فلزی با یونهای منفی داخل الکترولیت واکنش داده و محصولات خوردگی تشکیل می‌شوند (برای مثال زنگ آهن در فولاد). در نهایت بایستی از نظر بار الکتریکی یک تعادل برقرار شود. جهت متعادل شدن واکنش از نظر بار الکتریکی، باید یک جریان از الکترولیت به سمت فلز حرکت کند و الکترونها در محیط دیگری که منطقه کاتدی نامیده می‌شود، مصرف شوند. میزان انتقال جریان در این واکنشها سرعت خوردگی را تعیین می‌نماید.

لازمه انجام واکنشهای مربوط به خوردگی وجود مناطق آندی و کاتدی می‌باشد. اگر الکترونهای سازه از یک منبع خارجی تامین شوند، میزان حرکت الکترونها از سطح فلز کاهش و سرعت واکنش کاتدی افزایش می‌یابد. در واقع با وارد شدن یک پتانسیل کاتدی، قطعه مهندسی به یک کاتد یا همان قطب منفی تبدیل گردیده و جریان از طرف محیط به تمام سطح لوله می‌رسد، پس در حقیقت دیگر خوردگی نخواهیم داشت و لوله محافظت می‌گردد.

جریان کاتدی توسط یک منبع خارجی تامین می‌گردد که این منبع خارجی یا یک آند فلزی (همان روش آندهای فدا شونده) و یا یک منبع ولتاژ برق DC (همان روش اعمال جریان) به همراه بستر آندی می‌باشد. بدیهی است برای داشتن یک سیستم حفاظت کاتدی، بایستی مدار الکتریکی آن کامل باشد برای این منظور لازمست تا اجزای تشکیل دهنده این مدار شناخته و مورد ارزیابی قرار گیرند که شامل کاتد، آند، الکترولیت، اتصالات الکتریکی و منبع تغذیه می‌باشد.

با توجه به نوع آند بکار رفته و نحوه عملکرد، سیستم حفاظت کاتدی به دو روش عمده تقسیم بندی می‌گردد:

○ روش فلز یا آند فداشونده^{۱۴۲} (روش گالوانیک)

در جاهایی که امکان ایجاد ایستگاه حفاظت کاتدی وجود ندارد، از این روش برای حفاظت استفاده می‌شود. به طور مثال در بخشهایی که شبکه برق وجود ندارد و یا مسیرهای کوتاه و یا تجهیزات موقت. همچنین از این روش، جهت حفاظت کاتدی سازه‌هایی که به جریان کمی نیاز داشته و یا در خاکی با مقاومت الکتریکی پائین مستقر می‌باشند، استفاده می‌گردد.

در این روش به شیوه یک پیل گالوانیک و با استفاده از جدول استاندارد الکتروشیمیایی و با اتصال فلزات فعال‌تر یا با پتانسیل الکترودی منفی‌تر (از لحاظ الکتروشیمیایی در جدول) به سطح قطعه یا لوله داخل محیط الکترولیت، باعث می‌گردد تا قطعه یا خط لوله به قطب کاتد تبدیل شده و فلز فعال‌تر به عنوان قطب آند، خود را فدای قطعه مهندسی نماید.

آندهای فداشونده شامل آلیاژهایی از منیزیم، روی و آلومینیوم می‌باشند. این آندها در خاک یا در آب به صورت ساده و یا همراه با یک پشت‌بند^{۱۴۳} مخصوص، بصورت انفرادی و یا گروهی به خط لوله تحت حفاظت کاتدی، متصل می‌گردند.

¹⁴² Sacrificial Metal or Anode

¹⁴³ backfill

محدودیت‌هایی در استفاده از این نوع آندها وجود دارد که مربوط به اختلاف پتانسیل فصل مشترک سازه-آند و میزان مقاومت الکتریکی الکترولیت می‌باشد. بطور کلی از آندهای فداشونده در موارد زیر می‌توان استفاده نمود:

- خطوط لوله با پوشش خوب که نیاز به جریان حفاظتی خیلی کمی دارند.
- خطوط لوله کوتاه با پوشش خوب
- رفع مشکلات مربوط به تداخل و جریان های سرگردان
- در نقاط مشخصی بر روی خطوط لوله (نقاط بحرانی) که ممکن است تنها چند فوت از خط لوله نیاز به حفاظت داشته باشد.
- فراهم نمودن حفاظت موقتی قسمتی از خط لوله مدفون که در شرایط خوردگی موضعی قرار دارد. مانند منطقه عبور خط لوله از عرض رودخانه
- جهت حفاظت کف مخازن رو زمینی که دارای سطح وسیعی نباشند.

○ روش اعمال جریان^{۱۴۴}

برای سازه‌های بزرگتر یا جاهایی که ضریب مقاومت الکترولیت بالا باشد، آندهای فدا شونده برای فراهم آوردن حفاظت، جریان کافی را تامین نمی‌نمایند که در اینحالت، سیستمهای حفاظت کاتدی از طریق اعمال جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. حفاظت از این طریق در حقیقت ساخت و کنترل یک سلول خوردگی بزرگ است. در این سلول، پایانه منفی جریان مستقیم به خط لوله و پایانه مثبت به یک رسانای مصرف شدنی دفن شده وصل می‌شود و این رسانا آند نامیده می‌شود. جریان مستقیم معمولاً از طریق یک یکسوکننده به لوله وارد می‌گردد و در حقیقت یک مدار الکتریکی بوسیله عبور جریان توسط الکترولیت از آند به خط لوله به وجود می‌آید.

یک سیستم اعمال جریان باید شامل بستر آندی متصل به منبع جریان DC، اغلب یک ترانسفورماتور-یکسوکننده متصل به منبع جریان AC و کابل هادی جریان باشد. موقعیت این منابع جریان در طول خط لوله بستگی به امکان دسترسی به نیروی برق متناوب و میزان کاهش پتانسیل دارد. کاهش میزان حفاظت یک خط لوله از محل نصب سیستم حفاظت کاتدی نیز بستگی به مقاومت طولی خط لوله و هدایت پوشش لوله دارد.

اشکال معمول آندها در این روش، بصورت اشکال تخته‌ای و میله‌ای یا نوارهای پیوسته از فلزات مختلف می‌باشند. عمده‌ترین آندی که در روش اعمال جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد، آند چدن پرسیلیس می‌باشد، این نوع آندها در پشت بندهای کربنی، کارایی آندهای گرافیتی را داشته و در خاکهایی با مقاومت ویژه کم نسبت به آندهای گرافیتی ارجحیت دارند.

۱۴- ادوات سرچاهی

پس از حفاری و تکمیل چاه گازی و نفت، به منظور کنترل آن و همچنین در جهت بهره‌برداری از چاه نسبت به موقعیت و احتیاجات پیش بینی شده آن، ادواتی داخل و نیز بر روی چاه تعبیه می‌گردند. قسمتی از این ادوات مستقیماً بر روی خود چاه و بخشی از آن در مجاورت چاه و در ارتباط با قسمت اول کار گذاشته می‌شوند.

ادوات مذکور با توجه به مورد استفاده چاه، نحوه تکمیل آن، فشار و وجود گازهای اسیدی، طراحی می‌گردند. مجموعه ادواتی که مستقیماً بر روی خود چاه تعبیه می‌شود بنام تاج چاه یا X-Mas Tree (Christmas Tree) معروف است که مدل‌های

¹⁴⁴ Impressed Current

مختلفی نیز دارد. وجود اختلاف در بعضی از قسمتهای تاج چاههای مختلف، در بسیاری از موارد نیز با هم مشابه هستند و فقط گاهی نوع وسیله به کار رفته متفاوت می‌باشد در حالیکه عمل مشابه انجام می‌دهد.

○ وسایل موجود بر روی تاج چاه عبارتند از :

Base Flange : این سرلوله بر روی بزرگترین جداره فلزی چاه که از زمین بیرون آمده نصب می‌باشد و بقیه وسایل موجود در تاج چاه با اتکاء بر این سرلوله نصب می‌گردند. این سرلوله خود در بعضی موارد مبداء اندازه‌گیری عمق چاه می‌باشد. شیرهای جانبی بر روی جدارهای مختلف چاه (Side Valves) : بررسی وضع بین جدارهای چاه از نظر فشار و نوع سیال احتمالی موجود در آنها از طریق این شیرها انجام می‌گیرد و قادرند فشار احتمالی بین فضاهای جداری و حلقوی (دالیز) را تخلیه نمایند. عملیات Gas Lift و نیز تزریق مواد شیمیایی به Tubing چاه بصورت پیوسته، در صورت وجود ادوات مخصوص درون چاه، از طریق همین شیرهای نصب شده بر روی سرلوله مغزی^{۱۴۵} امکان‌پذیر است. بدون استثناء، شیر بر روی هر جداره وجود داشته که اندازه آن‌ها معمولاً ۲ اینچ می‌باشند.

شیر اصلی پایینی (Bottom Main Valve or Lower Master Valve) : این شیر معمولاً از نوع دروازه‌ای می‌باشد. مهمترین نقطه دسترسی به چاه همین شیر است و در صورت خراب شدن، لازم است که با حضور دکل حفاری (در صورتیکه نتوان چاه را به طور موقت مسدود کرد) بایستی تعمیر و یا تعویض گردد. باز و بسته کردن این شیر قدغن است و همیشه در حالت باز می‌باشد، مگر اینکه اجازه عملیات با آن قبلاً صادر شده باشد. (علت این امر این است که معمولاً باز و بسته کردن مداوم شیرها، آنها را در معرض اشکالاتی قرار می‌دهد و چون این شیر از موقعیت بخصوصی برخوردار است، از این نظر از کار کردن با آن پرهیز می‌گردد). محل قرار گرفتن آن درست در بالای شیرهای جانبی ذکر شده در بالا می‌باشد.

شیر اصلی بالایی (Top Main Valve or Upper Master Valve) : مشخصات این شیر شبیه شیر اصلی زیرین است و محل قرار گرفتن آن در بالای شیر اصلی زیرین می‌باشد. عموماً باز و بسته کردن چاه توسط این شیر انجام می‌گیرد.

شیر ایمنی سطحی (Surface Safety Valve or SSV) : این شیر بر روی شیر اصلی بالایی قرار می‌گیرد. وضعیت بخصوصی دارد که جهت باز و بسته شدن قابل تنظیم است و چنانچه فشار چاه بیش از اندازه کم یا زیاد شود، بطور خودکار بسته می‌گردد (با فشار روغن هیدرولیک Control Line باز نگه داشته شده است). بر روی نوع معمولی آن پیلوتهای مخصوصی نصب می‌گردند. یکی از این پیلوتهای روی حداقل و دیگری روی حداکثر فشار موردنظر، باتوجه به چاه، تنظیم می‌گردد. مدل‌های جدید این شیر به کمک دستگاهی که در مجاور چاه تعبیه می‌گردد با پانل کنترلی کار می‌کند.

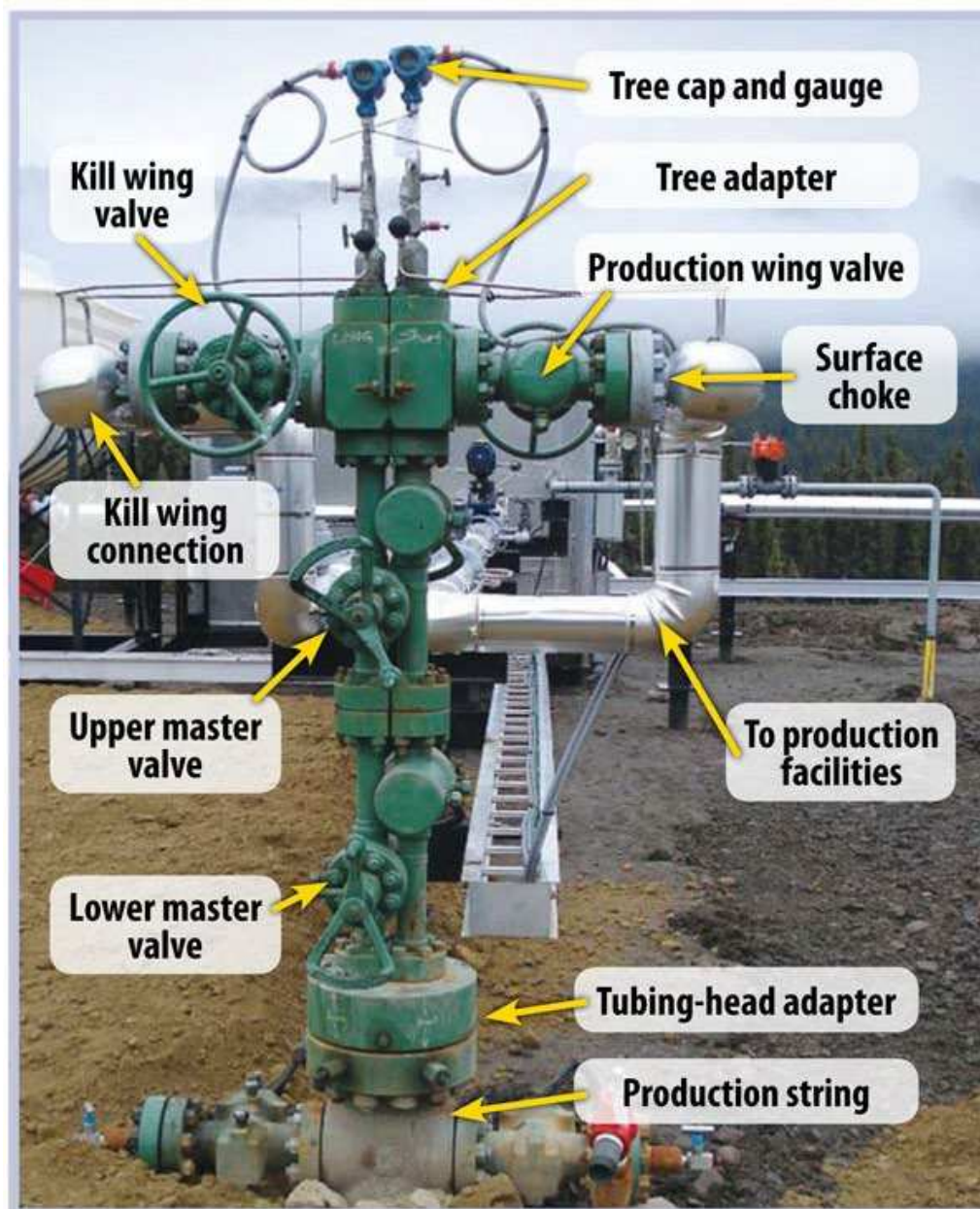
لوله انحراف‌دهنده (Swept Bend) : در حقیقت از یک سه راهه که از یک طرف بر روی شیرایمنی سر چاه متصل است و از طرف بالا به قسمت فوقانی چاه مربوط می‌شود و راه سوم در مسیر لوله جریانی چاه می‌باشد، تشکیل یافته است و به اندازه‌های متفاوت موجود است که از آن جهت تغییر دادن جریان نفت یا گاز با حداقل افت فشار به سمت لوله جریانی یا گودال آتش استفاده می‌گردد.

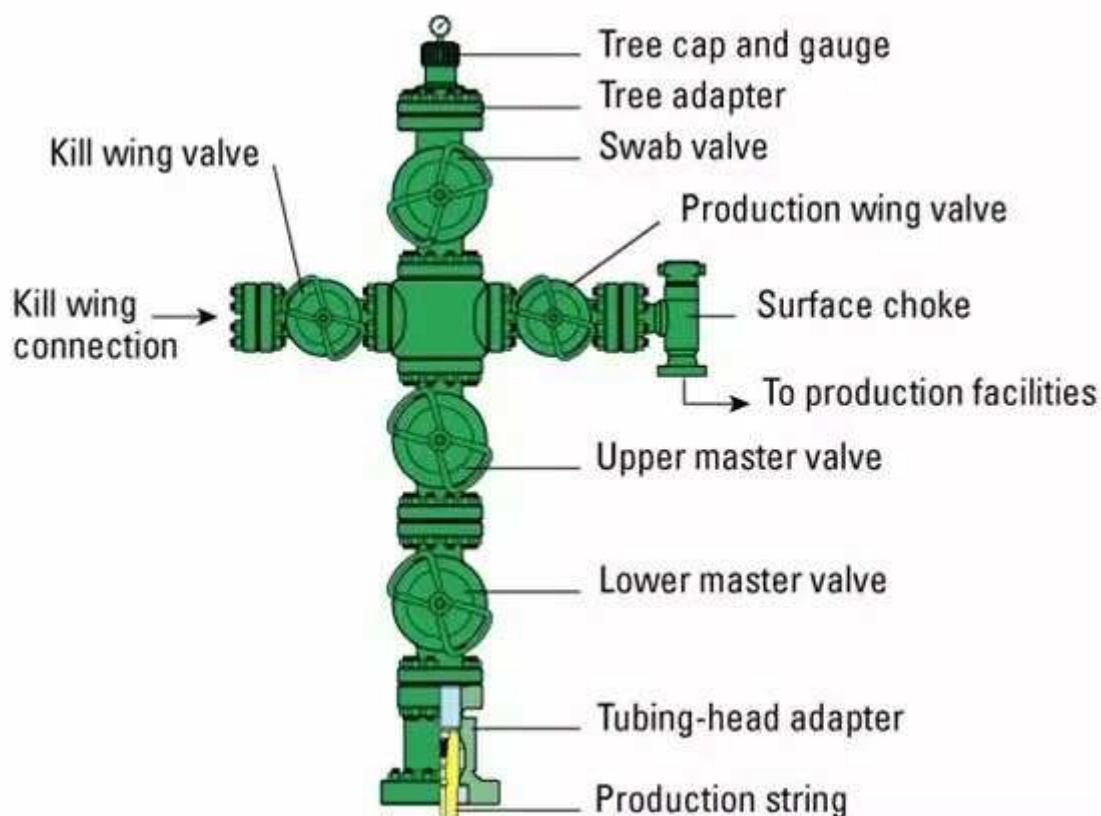
شیر عمقی (Dipping or Swab Valve) بر روی قسمت بالایی سه راهه فوق، متصل می‌شود و در حقیقت مجرای ورود ابزار مختلف به چاه می‌باشد (Wireline/Slickline or Coiled Tubing Service) و زمانی که قرار است عملیاتی در داخل چاه صورت گیرد (مثلاً تهیه نمودار یا اندازه‌گیری فشار داخلی چاه) با باز و بسته کردن این شیر، عملیات کنترل می‌گردد علاوه بر آن هنگامیکه اندازه‌گیری فشار سرچاه منظور باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت عادی، شیر مذکور بسته می‌باشد.

همانطور که اشاره شد قرار دادن ادوات فوق با توجه به وضع کلی چاه و نحوه پیش‌بینی بهره برداری از چاه می‌باشد و لذا مطالب ذکر شده در بالا فقط به صورت کلی است و ممکن است با یک نمونه به خصوص تفاوت‌های ظاهری داشته باشد. مساله مهم قابلیت تحمل فشار می‌باشد که ادوات فوق بایستی متناسب با فشار چاه در نظر گرفته شوند. دسته بندی فشار این ادوات مطابق با استاندارد API 6A می‌باشد (کلاسهای ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰). تمامی ادوات مذکور، مانند درخت کاجی در داخل حوضچه‌ای به نام cellar که در حقیقت مبدا حفاری چاه بوده است، برای چاه‌های خشکی قرار دارند.

○ ادوات دیگر موجود بر روی چاه و در رابطه با تولید از چاه عبارتند از :

تله سنگ (Stone Trap or Sand Trap or Grit Trap): این وسیله در مسیر تولید چاه قرار دارد و همانطور که از اسم آن بر می‌آید در حقیقت به صورت تله‌ای برای جلوگیری از عبور قطعات سنگ جدا شده از سنگ مخزن هیدروکربنی و یا ذرات دیگر خارج شده از چاه تعبیه می‌گردد. در بعضی موارد پیش از آن نیز یک شیر دروازه‌ای قرار داده می‌شود.





شکل ۷-۸- شمایی از تاج سرچاهی

قبل و بعد از اتصال لوله جریانی چاه^{۱۴۶} به آن، محللهائی برای اندازه‌گیری فشار نیز در نظر گرفته می‌شوند (می‌توان محللهای نمونه‌گیری نیز تعبیه نمود. تله سنگ خود به شکل لوله‌ای با ضخامت بیشتر از لوله‌های مجاور خود می‌باشد.

شیر بهره‌برداری (Production Wing Valve): این شیر معمولاً از نوع شیرهای دروازه‌ای است ولی از نمونه‌های دیگر شیرها نیز استفاده می‌گردد. این شیر ابتدای لوله تولید چاه قرار دارد و معمولاً مورد استفاده آن برای انتقال تولید چاه به واحد بهره‌برداری پایین‌دستی و یا برگرداندن تولید چاه به گودال آتش^{۱۴۷} می‌باشد.

شیر کشتن چاه (Kill Wing Valve): در مواقع لزوم، از این مسیر برای تزریق سیال به هدف ایمن‌سازی چاه و جلوگیری از خسارات احتمالی (اصطلاحاً چاه را می‌کشند)، استفاده می‌شود. همچنین برای مواردی چون پوششپ بصورت ناپیوسته به چاه برای کنترل خوردگی رشته تکمیلی و مسیر تولید درون‌چاهی و نیز تزریق اسید، از آن استفاده می‌گردد.

لوله جریانی (Flow Line): بلافاصله بعد از شیر تولید شروع می‌شود و با توجه به موقعیت چاه به سمت نزدیکترین واحد بهره‌برداری به چاه کشیده می‌شود. قطر آن بستگی به قدرت تولید چاه و مشخصات منطقه دارد. طول این لوله تولید بستگی به دوری و نزدیکی چاه از واحد بهره‌برداری مورد نظر دارد.

شیر روی لوله آتش (Burning Line Vale): از این شیر که معمولاً شیر دروازه‌ای می‌باشد، برای باز و بسته کردن جریان چاه به طرف گودال آتش استفاده می‌گردد.

¹⁴⁶ Flow Line¹⁴⁷ Burn Pit

کاهنده جریان (Choke Valve): وسیله‌ای با ترکیب با یک اریفیس که جهت کنترل جریان سیال تولیدی از چاه استفاده می‌گردد که در دو نوع ثابت و قابل تنظیم وجود دارد. در بحث مکانیک سیالات و در بخش چوک شدن جریان، توضیح مختصری در این مورد نیز داده شده است.

گودال آتش (Burn Pit): در حقیقت محل سوزاندن سیال خروجی از چاه واقع در خشکی و به منظور تمیزکردن و یا بررسی وضع چاه می‌باشد. در مجاور انتهای لوله آتش، گودالی در زمین حفر می‌گردد و محل آن بستگی به موقعیت چاه و باد غالب دارد، لیکن معمولاً در فاصله‌ای بیش از حدود ۴۰۰ متری قرار دارد. اندازه تقریبی آن گودالی با قطر ۴۰ متر است که عمقی در حدود ۵ متر دارد.

○ لوله‌های داخلی چاه عبارتند از :

لوله‌های جداری (casing): به منظور جلوگیری از ریزش دیواره چاه و کنترل بهتر چاه و قطع ارتباط بین لایه‌های مختلف، از لوله‌های جداری استفاده شده که اطراف آنها سیمان می‌گردد. اندازه‌های آنها عموماً بصورت ۱۸ ۵/۸ ، ۱۳ ۳/۸ ، ۹ ۵/۸ و ۷ اینچ می‌باشد.

لوله مغزی (tubing): لوله مغزی درون آخرین لوله جداری نصب می‌گردد و از بالا بوسیله Tubing Hanger و از پایین بوسیله نگهدارنده‌های دیگر بنام packer ، درون چاه نگه داشته می‌شود. موارد استفاده از لوله مغزی شامل بهره‌برداری از چند لایه، جلوگیری از خورده شدن لوله‌های جداری، نصب شیر ایمنی عمقی^{۱۴۸}، تزریق موارد شیمیایی، پمپ درون چاهی، گاز رانی و سرعت بخشیدن به سیال می‌باشد.

لوله آستری (liner): در انتهای لوله جداری در بعضی از چاهها برای هدف خاصی نصب می‌گردد.

۱۵- بخشهای مختلف تاسیسات فراورش نفت و گاز، پالایشگاههای نفت و گاز و مجتمع‌های پتروشیمی

اینگونه تاسیسات عمدتاً شامل موارد زیر هستند:

- واحدهای مختلف فرایندی که شامل ادوات و تجهیزات فرایندی بوده که قلب یک تاسیسات می‌باشند.
- واحد تولید آب‌شیرین (در صورت دور بودن از شهرها و دردسترس بودن آب دریا) برای مصارف نیروی انسانی و فرایندی و یا واحد تصفیه آب صنعتی حاوی املاح، با توجه به میزان مصرف، مقدار املاح، شرایط اقتصادی و موجود می‌تواند بصورت

❖ روشهای تقطیری شامل :

- Multiple-Effect Distillation (MED)
- Multi-Stage Flash distillation (MSF)
- Vapor-Compression desalination (VC)

❖ تکنولوژی غشاء شامل :

- Forward Osmosis (FO)
- Reverse Osmosis (RO)
- Electrodialysis Reversal (EDR)
- Nanofiltration (NF)
- Membrane Distillation (MD)

¹⁴⁸ Downhole Safety Valve or Subsurface Safety Valve (SSSV)

Ion Exchanger ها (مانند رزین‌های تبادل یونی)، Freezing Desalination و Geothermal Desalination و Solar Desalination ، Seawater Greenhouse یا ترکیبی از روشهای مذکور باشد که درواقع زیر مجموعه بخش utility می‌باشد.

- اتاق کنترل که به منزله مغز تاسیسات، برای پایش و کنترل فرایندهای موجود می‌باشد.
- بخش utility (تاسیسات پشتیبان و یا جانبی) شامل :
 - هوا بصورت پکیج تولید هوا (شامل کمپرسورها، خشک‌کن‌ها^{۱۴۹}، فیلترها و ادوات مرتبط) برای تولید هوای ابزار دقیق برای شیرهای کنترلی و شیرهای اضطراری و نیز هوای utility برای مصارف فرعی مانند تمیزکاری
 - آب شامل آب آتش‌نشانی برای سیستم اطفاء حریق و آب شیرین جهت مصرف، به‌همراه مخازن ذخیره و پمپهای مربوطه
 - برق شامل انواع اتاقهای برق با ولتاژهای متفاوت، اتاقهای سویچ، باطری و UPS، اتاق ژنراتور اضطراری و انواع ترانسفورماتورها
 - سیستم تولید نیتروژن به روشهای مختلف مانند روش PSA^{۱۵۰} (شامل کمپرسورها، خشک‌کن‌ها، فیلترها و ادوات مرتبط) یا استفاده از تکنولوژی غشا، جهت عملیات purging و گاز پتویی^{۱۵۱}
 - سیستم تولید بخار برای فشارها و دماهای خاص (شامل انواع دیگ‌های بخار، پکیجهای هوازدا، پکیجهای مواد شیمیایی و ادوات مرتبط)
 - سیستم سوخت گازی
 - سیستم گازوییل بعنوان سوخت
- سیستم تصفیه آب نفتی^{۱۵۲} (در تاسیسات فراورش نفت و گاز) شامل :

API & CPI (Corrugated Plate Interceptor) & TPI (Tilted Plate Interceptor) Separators
- انواع پکیج تزریق مواد شیمیایی برای مقاصد مختلف مانند مواد شیمیایی ضد کف، ضد خوردگی محلول در فازهای مختلف، تعلیق شکن^{۱۵۳}، ضد رسوب^{۱۵۴}، ضد تشکیل هیدرات^{۱۵۵} و مواد شیمیایی خاص مانند اکسیژن‌زدا یا H₂S Scavenger ها

¹⁴⁹ Air Dryer

¹⁵⁰ Pressure Swing Adsorption technology

¹⁵¹ Blanket Gas

¹⁵² Oily Water System

¹⁵³ demulsifier

¹⁵⁴ Anti-Scaling Agent or Scale Inhibitor

¹⁵⁵ antifreeze (Hydrate Inhibitor)

پیوست

تعدادی از استانداردها و انجمن‌های علمی معتبر جهانی و ایران در ارتباط با صنایع نفت و گاز:

- ASME = American Society of Mechanical Engineers
- AIChE = American Institute of Chemical Engineers
- API = American Petroleum Institute
- ANSI = American National Standards Institute
- ASTM = American Society for Testing and Materials
- AGA = American Gas Association
- NFPA = National Fire Protection Association
- NACE = National Association of Corrosion Engineers
- ISO = International Organization for Standardization
- ISA = International Society of Automation
- IEC = International Electrotechnical Commission
- TEMA = Tubular Exchanger Manufacturers Association
- BSI = British Standards Institution
- DIN = Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization)
- JSA = Japanese Standards Association
- GPSA = Gas Processors Suppliers Association
- IPS = Iranian Petroleum Standards
- IGS = Iranian Gas Standards

مراجع

کتاب:

- زونتاک، بورگناک و ون‌وایلن، (۱۳۷۸)، "مبانی ترمودینامیک کلاسیک"، (ترجمه ملک‌زاده، کاشانی‌حصار و معتمدی)، انتشارات نما
- اسمیت و ون‌نس، (۱۳۷۸)، "ترمودینامیک مهندسی شیمی"، (ترجمه کلباسی)، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر
- سمیع‌پور، (۱۳۹۰)، "ترمودینامیک مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی (کتاب ارشد)"، انتشارات پوران پژوهش
- تربیال، (۱۳۷۸)، "انتقال جرم"، (ترجمه سهرابی و کاغذچی)، انتشارات مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- مک‌کیب، اسمیت و هریت، (۱۳۷۹)، "عملیات واحد در مهندسی شیمی"، (ترجمه امینی و صالحی)، انتشارات سالکان
- سمیع‌پور، (۱۳۸۹)، "انتقال جرم و عملیات واحد (کتاب ارشد)"، انتشارات پوران پژوهش
- استریتز، وایلی و بدفورد، (۱۳۷۸)، "مکانیک سیالات"، (ترجمه ملک‌زاده، کاشانی‌حصار و معتمدی)، انتشارات نما
- وطنی و مخاطب، (۱۳۸۴)، "اصول طراحی هیدرولیکی خطوط لوله انتقال جریانهای دوفازی"، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تهران
- سمیع‌پور، (۱۳۸۱)، "مکانیک سیالات مهندسی شیمی (کتاب ارشد)"، انتشارات پوران پژوهش
- نجمایی، (۱۳۷۴)، "ضربه قوچ"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت
- این‌کروپرا و دویت، (۱۳۷۸)، "مقدمه‌ای بر انتقال گرما"، (ترجمه رستمی و حمایت)، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
- کرن و دونالد، (۱۳۷۱)، "طراحی مبدلهای حرارتی"، (ترجمه ملک‌زاده، کاشانی‌حصار)، انتشارات دیبا
- سمیع‌پور و خلجی، (۱۳۸۰)، "انتقال حرارت (کتاب ارشد)"، انتشارات موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران
- شکرابی (۱۳۸۸)، "انتقال حرارت مهندسی شیمی (کتاب ارشد)"، انتشارات علوی فرهیخته
- کاگ‌ناور و کاپل، (۱۳۷۵)، "کنترل فرایندها"، (ترجمه گودرزینیا)، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی
- نیک‌آذر، (۱۳۸۹)، "مبانی کنترل فرایند در مهندسی شیمی"، انتشارات مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- گوهرخی، ترابی، نجفی و شعبانی (۱۳۸۷)، "شبیه سازی دینامیکی فرایندهای شیمیایی با نرم‌افزار HYSYS Dynamic 2006"، انتشارات شرکت دانشگران صنعت پژوه
- کیهانی و افشاریان، (۱۳۸۹)، "کنترل فرایند (سیستمهای کنترل خطی) (کتاب ارشد)"، انتشارات پوران پژوهش
- رازی‌فر، (۱۳۹۵)، طراحی تجهیزات فرایندی، انتشارات اندیشه سرا.
- ابوالحمد، (۱۳۸۱)، "مبانی پالایش نفت"، انتشارات دانشگاه تهران
- یوسفی (۱۳۸۹)، "اصول و ساختار ولوها، فلنچ‌ها و گسکت‌ها"، انتشارات اتحاد-جهان‌نو

- Narayanan, "A Textbook of Chemical Engineering Thermodynamics", Asoke K. Ghosh, Phi Learning, 2013

- Ahmed, "Reservoir Engineering Handbook", Gulf Professional Publishing, 2002

- Hyne, "Dictionary of Petroleum Exploration, Drilling & Production", PennWell Books, 1991
- Stewart & Arnold, "Gas-Liquid and Liquid-Liquid Separators", Gulf Professional Publishing, 2008
- Cordell & Vanzant, "The Pipeline Pigging Handbook", Clarion Technical Publishers, 2003
- Thulukkanam, "Heat Exchanger Design Handbook", CRC Press, 2013
- Arthur Kohl & Richard Nielsen, "Gas Purification", Gulf Publishing Company, 1997

مقاله:

- یارویی، اوجی، حصیمی و صفری، (۱۳۹۴)، "طراحی و استفاده از ظروف لجن‌گیر در مسیر ورودی تاسیسات بهره‌برداری نفت به منظور رفع مشکلات پیگ‌رانی"، چهارمین همایش علمی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی، تهران، ایران
- طهرانی، (۱۳۹۲)، "مایعات گاز طبیعی، (NATURAL GAS LIQUIDS)"

نشریه:

- حصیمی، (۱۳۹۰)، "اثر ژول-تامسون چیست؟"، نشریه علمی، فنی و آموزشی مشارکت شرکت نفت فلات قاره ایران، شماره اول
- حصیمی، (۱۳۹۱)، "هیدرات گازی چیست؟"، نشریه علمی، فنی و آموزشی مشارکت شرکت نفت فلات قاره ایران، شماره هفتم
- موسوی‌حجازی، (۱۳۸۸)، "آشنایی با اصول فرآورش گاز با آمین"، انتشارات داخلی شرکت ملی گاز ایران
- قربانی، (۱۳۹۲)، "بررسی روشهای حذف ترکیبات گوگرددار از نفت خام"، فصلنامه تخصصی، علمی-ترویجی فرایند نو

جزوه آموزشی:

- طاهری‌مقدم، (۱۳۸۸)، "انواع، نحوه عملکرد و انتخاب پمپ‌ها در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی"، شرکت نفت فلات قاره ایران، منطقه عملیاتی قشم
- طاهری‌مقدم، (۱۳۸۸)، "انواع، نحوه عملکرد و انتخاب کمپرسورها در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی"، شرکت نفت فلات قاره ایران، منطقه عملیاتی قشم
- ارغش، (۱۳۸۵)، "آشنایی با توربین گازی"، شرکت نفت فلات قاره ایران، منطقه عملیاتی خارگ
- دانشگران صنعت پژوه، (۱۳۸۴)، "اصول دیگ‌های بخار"، شرکت ره‌آوران فنون پتروشیمی
- غلامی و پارسه، (۱۳۹۰)، "بویلر"، دانشگاه تربیت معلم سبزوار، دانشکده نفت و پتروشیمی
- مهاجر و کاووسی، "راکتورهای شیمیایی"، دانشگاه تربیت معلم سبزوار
- جیریایی، "حفاظت کاتدی و اصول آن"
- آموزش عملیات بهره‌برداری گاز و گاز مایع، (۱۳۸۴)، "آشنایی با عملیات چاههای گازی"، مرکز آموزش فنون اهواز، شرکت ملی نفت ایران

- آموزش عملیات بهره‌برداری گاز و گاز مایع، (۱۳۸۴)، "آشنایی با عملیات بهره‌برداری نفت"، مرکز آموزش فنون اهواز، شرکت ملی نفت ایران
- حصیمی، (۱۳۹۱)، "آموزش اپراتور بهره‌برداری تاسیسات فراورش نفت هنگام"، شرکت نفت فلات قاره ایران، منطقه عملیاتی قشم

بسته‌های نرم‌افزاری-آموزشی:

- بسته‌های نرم‌افزاری آموزش اپراتور بهره‌برداری مربوط به شرکت ملی صنایع پتروشیمی
- بسته‌های نرم‌افزاری-آموزشی پتروشیمی بندر امام
- PowerPoint های شرکت پمپ /بار/ در مورد پمپ

Internet:

- <http://en.wikipedia.org>
- <http://petrowiki.org>
- <http://daneshnameh.roshd.ir>
- www.linkedin.com
- www.efunda.com
- www.iranpetrotech.com
- www.hatltd.com
- www.engineeringtoolbox.com
- www.waterworld.com
- www.daneshju.ir
- www.glossary.oilfield.slb.com
- www.e-education.psu.edu