

مبدل‌های حرارتی^۱

- هدف‌های رفتاری: در پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:
- ۱- با ساختمان مبدل‌های حرارتی آشنا شود.
 - ۲- انواع جریان‌های سیال را در مبدل‌های حرارتی شرح دهد.
 - ۳- کار با مبدل‌های حرارتی را فرا بگیرد.

۱-۶- مقدمه

مبدل حرارتی وسیله‌ای است که انرژی حرارتی را از یک سیال به یک یا چند سیال که دارای درجه‌ی حرارت متفاوتی هستند، منتقل می‌کند. در این تعریف، مشخص می‌گردد که در یک مبدل حرارتی، حداقل دو سیال وجود دارد که حرارت میان آن دو تبادل می‌شود.

پستانداران مبدل‌های حرارتی پیچیده‌ای دارند که مهم‌ترین این مبدل‌ها شش‌ها (ریه‌ها) هستند که با اشباع هوای بازدم از بخار آب بدن را خنک می‌کند. رادیاتور نیز از انواع مبدل‌های حرارتی است که در آن، آب در گردش داخل موتور، به وسیله‌ی هوا خنک می‌شود. شوفاژها و تهویه‌های مطبوع نیز از انواع مبدل‌ها هستند.

۲-۶- مبدل‌های حرارتی لوله‌ای

از این مبدل، بیش از هر نوع مبدل حرارتی دیگر، استفاده می‌گردد. مبدل‌های حرارتی لوله‌ای خود انواع مختلفی دارند که از آن جمله می‌توان به نوع «تک لوله‌ای»، «دو لوله‌ای»، «لوله‌ی مارپیچی»، «چند لوله‌ای» و «لوله - پوسته^۲» اشاره نمود.

مبدل حرارتی دو لوله‌ای^۳:

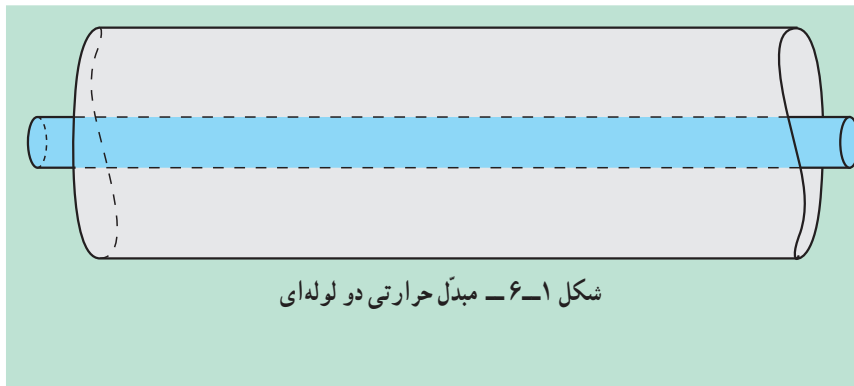
این مبدل‌ها از دو لوله‌ی هم محور تشکیل می‌شود. یکی از دو سیال در لوله‌ی داخلی و دیگری در مجرای حلقوی بین دو لوله یا به عبارتی، در لوله‌ی خارجی جریان دارد.

۱- Heat Exchangers

۲- Shell & Tube

۳- Two pipes

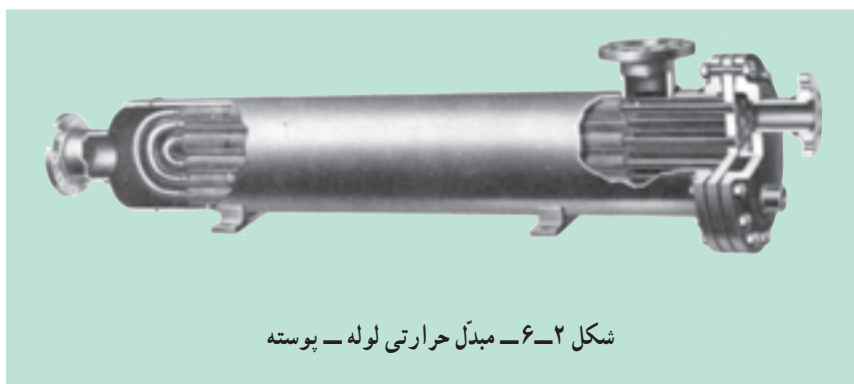
کاربرد این مبدل‌ها هنگامی است که سطح تبادل حرارت مورد نیاز کوچک باشد؛ به ویژه هنگامی که یکی از دو سیال گاز یا مایع، لزج یا دبی آن کم باشد.



شکل ۱-۶ - مبدل حرارتی دو لوله‌ای

مبدل‌های حرارتی لوله - پوسته:

این مبدل از انواع متداول مبدل‌های چند لوله‌ای است که برای انتقال حرارت «مایع-مایع»، «مایع با سیال در حال تبخیر» و «مایع با سیال در حال تقطیر» کاربرد دارد. یک نوع از این مبدل، که شبیه مبدل‌های دو لوله‌ای است از یک پوسته تشکیل شده است که تعدادی لوله‌ی U شکل در داخل آن قرار دارد.



شکل ۲-۶ - مبدل حرارتی لوله - پوسته

۳-۶ - انواع جریان در مبدل‌های حرارتی لوله‌ای

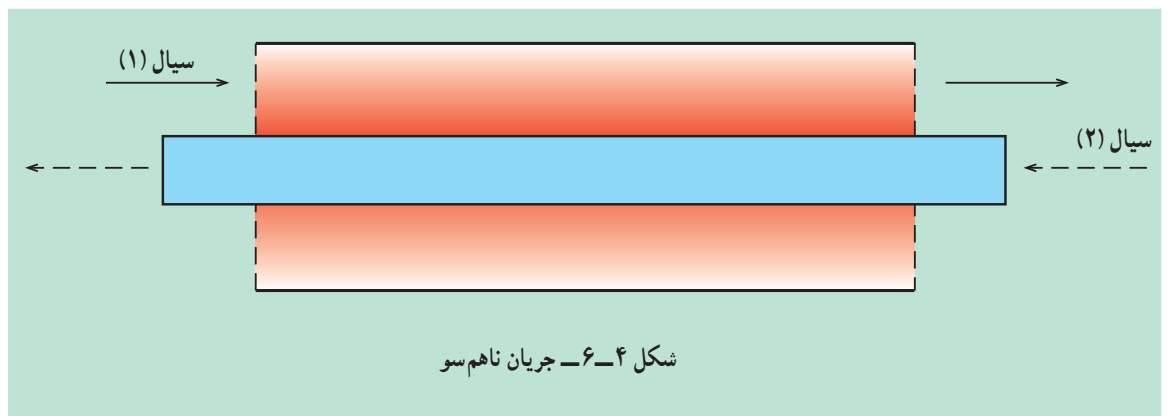
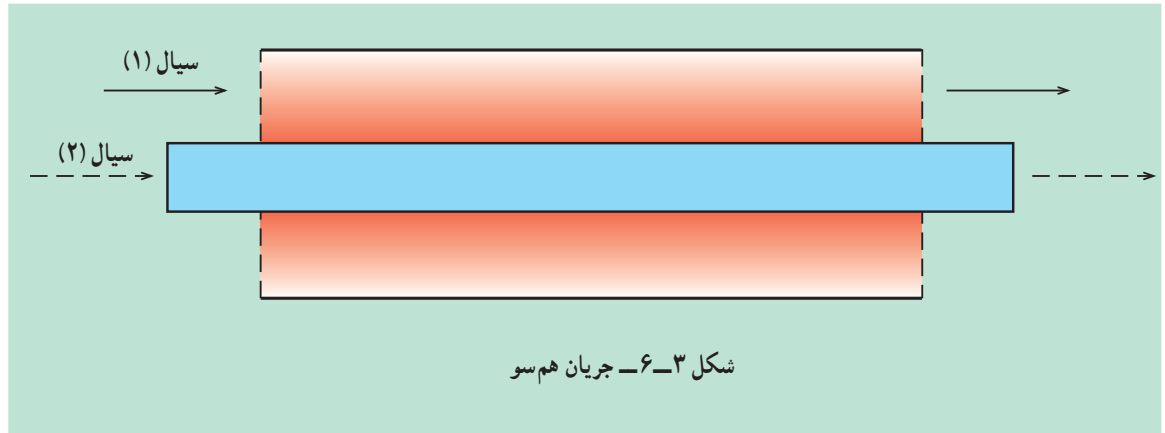
جریان سیالات در مبدل‌های حرارتی لوله‌ای به دو شکل صورت می‌پذیرد:

الف - جریان هم‌سو:

در این نوع مبدل، سیال سرد و گرم هر دو در یک جهت حرکت کرده تبادل حرارت صورت می‌گیرد.

ب - جریان ناهم سو^۱:

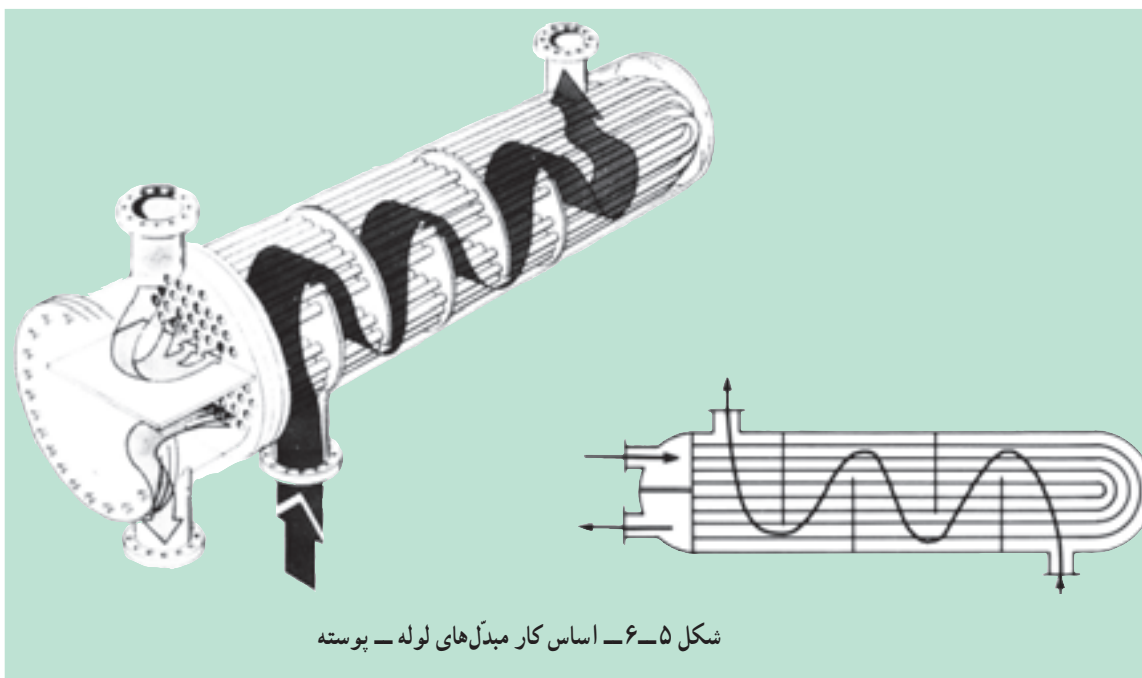
سیال سرد و گرم در دو جهت مخالف حرکت می کند؛ در نتیجه میزان تبادل انتقال حرارت افزایش می یابد و راندمان کار بیش تر می شود.



۴-۶ - اساس کار مبدل های حرارتی لوله - پوسته

معمولاً سیال گرم درون لوله های موجود در پوسته جریان خواهند داشت و در محفظه ی میانی لوله ها (در پوسته) سیال سرد پس از عبور از مسیرهای تعیین شده با سطح جانبی لوله برخورد کرده تبادل حرارت صورت می پذیرد و در انتها از مجرای مخصوص خارج می شود. چگونگی عملکرد مبدل های حرارتی لوله - پوسته در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.

۱- Counter Current flow



شکل ۵-۶- اساس کار مبدل‌های لوله - پوسته

۵-۶- راه اندازی مبدل‌های حرارتی

- ۱- ابتدا سیال سرد وارد پوسته‌ی مبدل می‌شود؛ سپس به تدریج سیال گرم در درون لوله‌ها جریان می‌یابد.
- ۲- چنانچه از مشتقات نفتی یا گازی برای سیالات درون مبدل استفاده می‌کنید حتماً از یک گاز بی‌اثر یا بخار آب - برای تخلیه‌ی هوای درون مبدل و جلوگیری از انفجار- استفاده نمایید.

۶-۶- از کار انداختن مبدل‌های حرارتی

- ۱- ابتدا جریان گرم را درون مبدل قطع کنید تا مبدل به تدریج سرد شود.
- ۲- جریان سرد را قطع نمایید.
- ۳- برای جلوگیری از انفجار در مبدل‌های حرارتی که مخلوط‌های هیدروکربنی در آن نقش سیال را بر عهده دارند، حتماً پس از خاموش کردن دستگاه مبدل را هواگیری نمایید.

۷-۶- خوردگی در مبدل‌های حرارتی

- با توجه به این که در صنایع شیمیایی، بیش‌تر مواد خاصیت خوردندگی دارند، لوله‌های موجود در مبدل‌های حرارتی نیز فرسوده شده بر اثر خوردگی سوراخ می‌شوند که این امر در عمل تبادل حرارت ایجاد اختلال می‌کند. به همین منظور روش مشخص شدن خوردگی در لوله‌ها بیان می‌شود:
- ۱- مبدل حرارتی را از دستگاه خارج نمایید.

- ۲- مواد را در پوسته و لوله‌ی مبدل به‌طور کامل تخلیه کنید.
 - ۳- خروجی مسیر پوسته را ببندید.
 - ۴- آب فشار قوی را در درون پوسته‌ی مبدل وارد کنید.
- توجه: چون خروجی پوسته مسدود است هر لوله‌ای که سوراخ باشد آب را از خود عبور می‌دهد.

۸-۶- آزمایش: مبدل حرارتی دو لوله‌ای - U شکل

- ساده‌ترین نوع مبدل حرارتی پوسته - لوله نوع دو لوله‌ای آن است که در این آزمایش ساختمان و عملکرد آن بررسی می‌شود.
- اجزای تشکیل دهنده‌ی دستگاه (شکل ۶-۶) عبارت‌اند از:
- ۱- لوله‌های U شکل؛
 - ۲- اندازه‌گیر جریان برای آب سرد و گرم؛
 - ۳- شیرهای دروازه‌ای به تعداد ۵ عدد؛
 - ۴- ۸ عدد دماسنج یا حس‌کننده‌ی دما^۱ و یک ترمومتر دیجیتالی؛
 - ۵- مخزن ذخیره‌ی آب گرم؛
 - ۶- پمپ انتقال سیال؛
 - ۷- عایق‌بندی لوله‌های مبدل.

مراحل آزمایش:

به‌وسیله‌ی شیرهای مسیر جریان می‌توان دو نوع جریان هم‌سو یا ناهم‌سو را در درون مبدل ایجاد نمود.

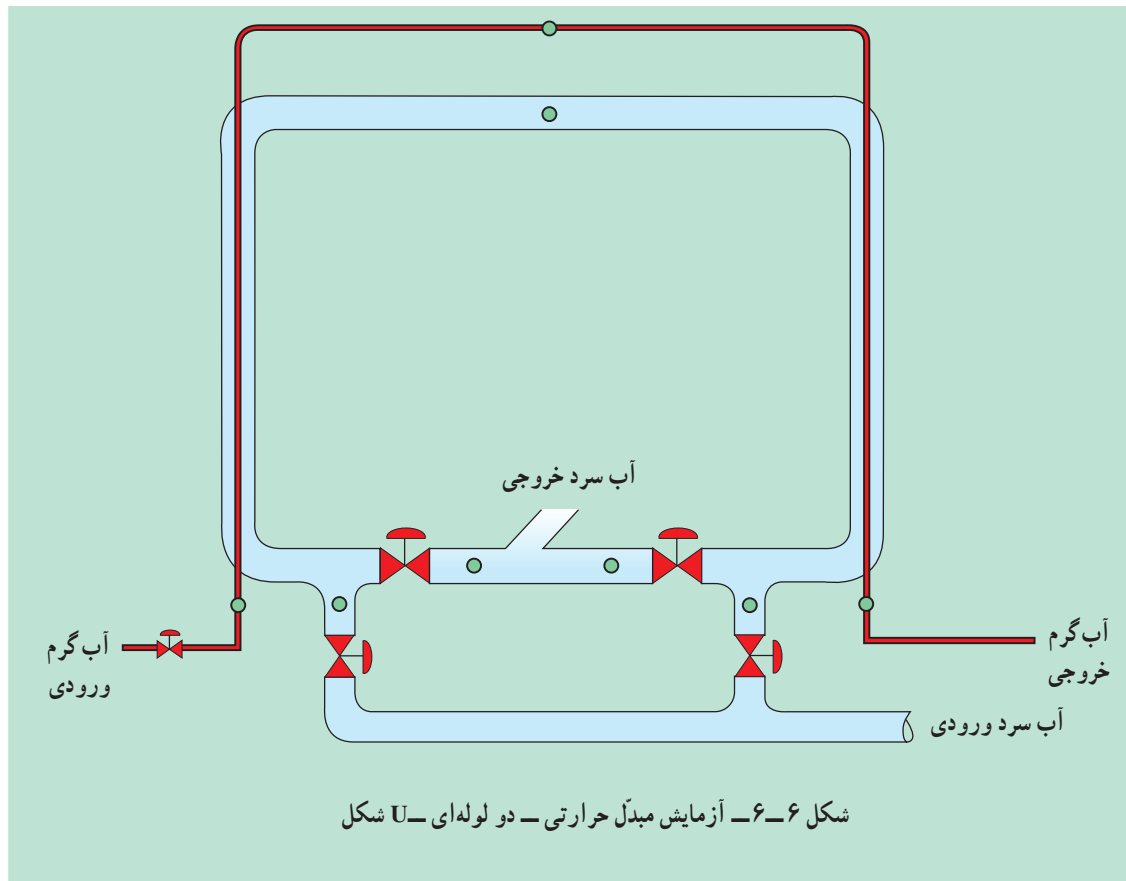
مراحل آزمایش را برای هر دو نوع جریان تکرار نمایید:

- ۱- ابتدا شیرهای جریان آب سرد را باز کنید که در پوسته جریان دارد.
- ۲- آب درون مخزن را تا ۶۰ درجه‌ی سلسیوس گرم کرده سپس پمپ انتقال آب گرم را روشن کنید و مسیر حرکت آب گرم را به‌صورت هم‌سو با آب سرد باز نمایید.
- ۳- پس از مدتی که دمای نقاط مختلف سیال را یادداشت نمودید متوجه خواهید شد که تغییرات دما کاهش می‌یابد؛ بر این اساس، دستگاه به حالت پایدار رسیده است. در این حالت، دمای مربوط به نقاط مختلف را یادداشت نمایید و جدول پیوست را تکمیل کنید.
- ۴- همین مراحل را برای جریان ناهم‌سو تکرار کرده جدول ۶-۱ را تکمیل نمایید.
- ۵- اختلاف دماهای نقاط مختلف سیال را در هر دو حالت هم‌سو و ناهم‌سو با هم مقایسه کرده و نتیجه‌گیری نمایید.

با داشتن مقادیر دما در نقاط مختلف، از لوله و پوسته در هر دو روش هم‌سو و ناهم‌سو، تغییرات دما را با هم مقایسه نمایید؛ هم‌چنین مشخص کنید که در کدام حالت اختلاف دمای نقاط متناظر بیش‌تر است. در گزارش خود به آن اشاره کنید.

جدول ۱-۶

زمان دقیقه	
دبی آب سرد	
دبی آب گرم	
دمای آب سرد ورودی	
دمای آب سرد خروجی	
دمای آب سرد میانی	
دمای آب گرم ورودی	
دمای آب گرم خروجی	
دمای آب گرم میانی	



۹-۶- آزمایش: مبدل حرارتی پوسته - لوله

اجزای تشکیل دهنده‌ی دستگاه (شکل ۷-۶) عبارت است از:

- یک لوله‌ی ۴ اینچ به عنوان پوسته
- ۱۰ عدد لوله‌ی $\frac{1}{4}$ اینچ که درون پوسته قرار می‌گیرد.

- ۶ عدد شیر آب سرد و گرم ورودی و خروجی

- ۴ حسگر دما و ترمومتر برای نمایش

- مخزن ذخیره‌ی آب گرم به همراه هیتر برقی

- پمپ برای انتقال سیال گرم

- دبی‌سنج سیال سرد و گرم

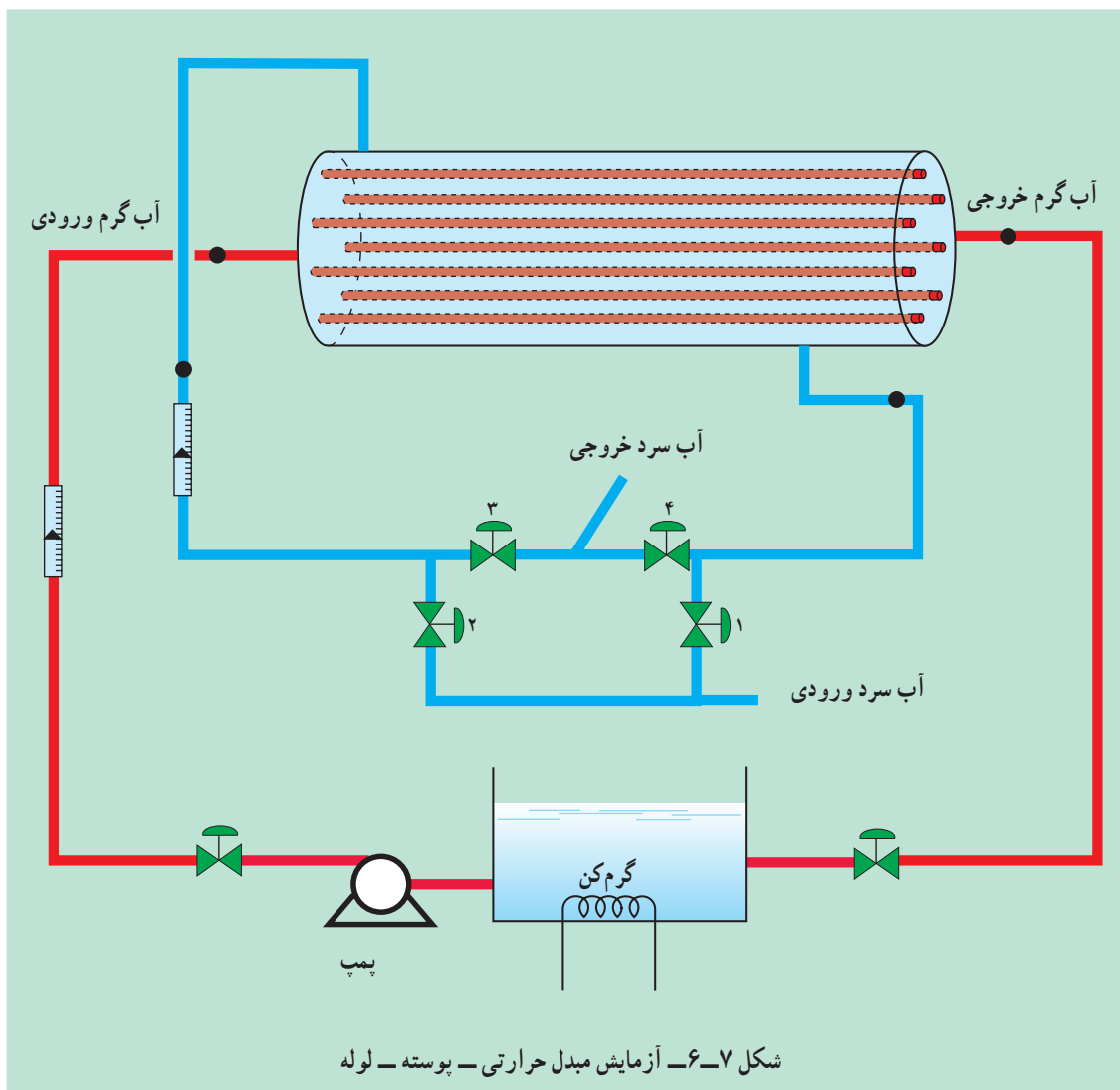
- ترموستات

شرح کار

- ۱- دستگاه را با اجازه‌ی مربی روشن نمایید.
- ۲- شیر آب سرد را باز کنید تا درون پوسته پر شود (به صورت همسو)
- ۳- شیر آب گرم و پمپ مربوطه را روشن نمایید.
- ۴- در فاصله‌ی زمانی متفاوت دماهای ورودی و خروجی را یادداشت کنید.
- ۵- مراحل ۲ تا ۴ را در دبی‌های مختلف آب سرد و گرم انجام دهید.
- ۶- مراحل ۲ تا ۵ را برای جریان ناهمسو تکرار کنید.
- ۷- جدول ۲-۶ را برای دبی‌های مختلف جریان سرد و گرم و هم‌چنین جریان‌های همسو و ناهمسو تکمیل نمایید.
- ۸- تأثیرات افزایش دبی جریان سرد و گرم را در تغییرات دما به صورت منحنی رسم نمایید.
- ۹- نتایج مذکور را برای جریان‌های همسو و ناهمسو تکرار کنید.

جدول ۲-۶

زمان - دقیقه	دمای آب سرد ورودی	دمای آب سرد خروجی	دمای آب گرم ورودی	دمای آب گرم خروجی



خودآزمایی

- ۱- مبدل حرارتی را به گونه‌ای مختصر شرح دهید.
- ۲- انواع جریان مربوط به مبدل حرارتی را شرح دهید.
- ۳- چه هنگام از مبدل حرارتی دو لوله‌ای استفاده می‌شود؟
- ۴- اساس کار مبدل‌های حرارتی پوسته - لوله را شرح دهید.
- ۵- برای یافتن خوردگی در مبدل‌ها چه روشی را پیشنهاد می‌کنید؟
- ۶- حرارت انتقال یافته در روش همسو بیشتر است یا ناهمسو؟ چرا؟

کنترل فرآیند

هدف‌های رفتاری: در پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:

- ۱- با نحوه‌ی کنترل سطح، به هنگام کار آشنا شود.
- ۲- با نحوه‌ی کنترل دما در حین کار آشنا شود.
- ۳- با نحوه‌ی کنترل فشار به هنگام کار آشنا شود.

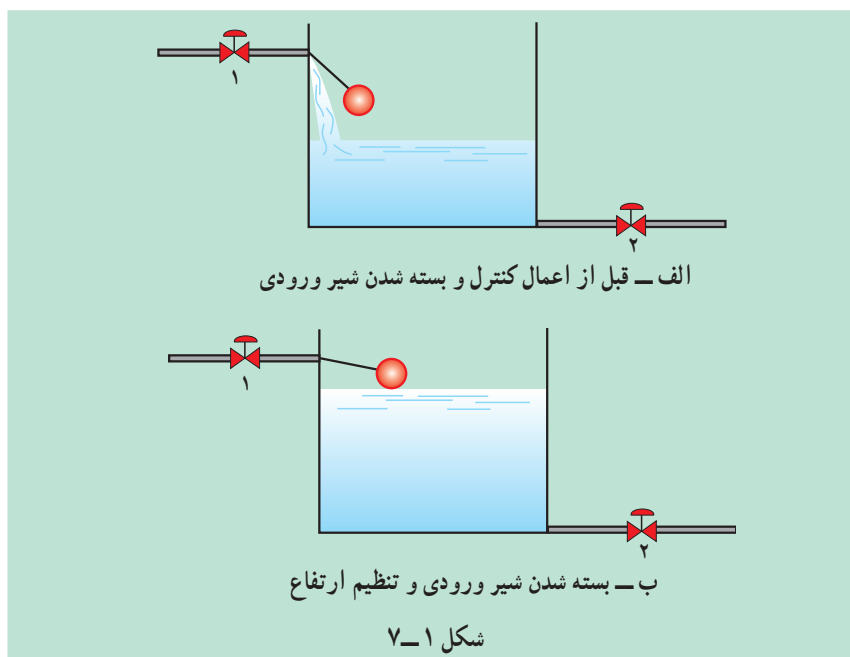
۱-۷-۱ مقدمه

اصولاً در فرآیندهای شیمیایی، به وسیله‌ی کنترل عوامل تعیین کننده نظیر فشار، دما و سطح، علاوه بر نظارت بر کیفیت محصول، امکان بروز خطرهای جانبی کار نیز به حداقل خواهد رسید؛ به همین منظور، در این فصل علاوه بر تعریف ساده از سه نوع کنترل یادشده، آزمایش را نیز انجام خواهید داد.

۲-۷-۲ کنترل سطح مایع^۱

با نظارت بر ارتفاع مایعات در تانک‌های ذخیره، مخازن، راکتورها و نظایر آن، می‌توان علاوه بر افزایش بازدهی دستگاه از پر شدن و سرریز شدن تانک‌ها و مخازن جلوگیری کرد. سرریز شدن مخازن در کارخانجات شیمیایی که مواد آتش‌زا و سمی را شامل می‌شوند بسیار خطرناک بوده، ممکن است علاوه بر آلودگی محیط، خطرات آتش‌سوزی و خسارت‌های مالی و جانی را در پی داشته باشد.

برای درک بهتر موضوع به شکل ۱-۷ توجه نمایید برای تنظیم ارتفاع مایع در شکل از یک شناور استفاده شده است. شیر ۱ و ۲ به ترتیب برای مایع ورودی و خروجی تعبیه شده‌اند.



همان گونه که در شکل مشاهده می کنید تنظیم ارتفاع مطلوب در تانک به دو شیوه

است :

۱- شیر خروجی را بیش تر باز نمایید یا به عبارتی مصرف را بیش تر کنید.

۲- شیر ورودی را ببندید تا ارتفاع مایع از این طریق کنترل شود.

عمل کرد: با افزایش ارتفاع مایع در تانک، شناور به سمت بالا رانده می شود که

در نتیجه، مسیر شیر ورودی بسته خواهد شد بر اثر مصرف از طریق شیر خروجی ارتفاع

کاهش می یابد و در نتیجه، شناور به سمت پایین آزاد شده مسیر مایع ورودی باز خواهد شد.

بدین ترتیب، به راحتی می توان ارتفاع مایع را در تانک تنظیم نمود.

در جداره‌ی تانک‌ها و مخازن از وسایلی برای نشان دادن ارتفاع مایع استفاده

می شود که به صورت

شیشه‌های مدور در

جداره‌ی تانک‌ها قرار

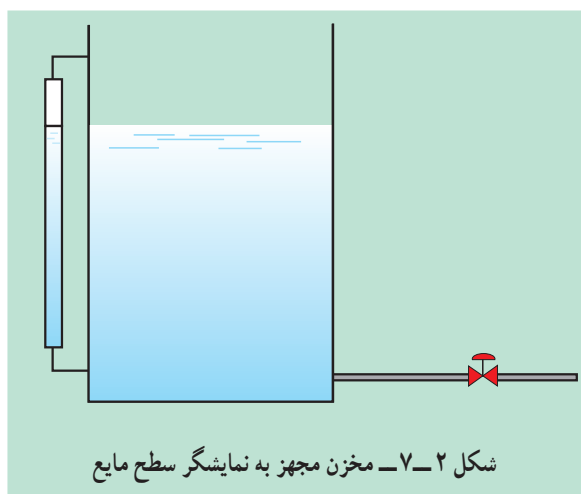
دارد. به این وسایل

«نمایشگر سطح مایع»

می گویند که در شکل ۷-۲

طرحی از آن را مشاهده

می کنید.

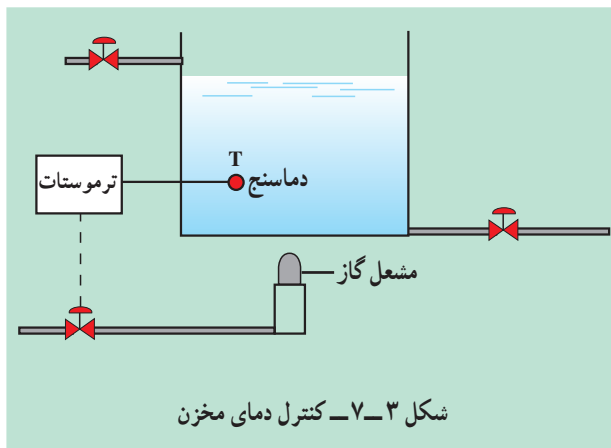


۷-۳- کنترل دما^۱

از کارهای مهمی که باید در صنایع صورت پذیرد، کنترل صحیح دماست که افزایش یا کاهش غیرطبیعی و نامطلوب دما علاوه بر خطرات، بر کیفیت محصول نیز تأثیرات بسیاری خواهد گذاشت.

در شکل ۷-۳ کنترل ساده‌ی دما، برای یک مخزن مجهز به گرم‌کن (مشعل) نشان داده شده است.

دمای داخل تانک به وسیله‌ی ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود و چنانچه از حد مجاز بیش‌تر شود با ترموستات، فرمان قطع جریان گرم به مخزن داده خواهد شد؛ به عبارتی، شیر عبور جریان گاز بسته خواهد شد و دمای مخزن به حالت طبیعی باز خواهد گشت و چنانچه دمای داخل مخزن کاهش یابد، ترموستات با ارسال فرمان باعث باز شدن شیر گاز شده دمای مخزن را دوباره به حالت مطلوب خواهد رسانید.

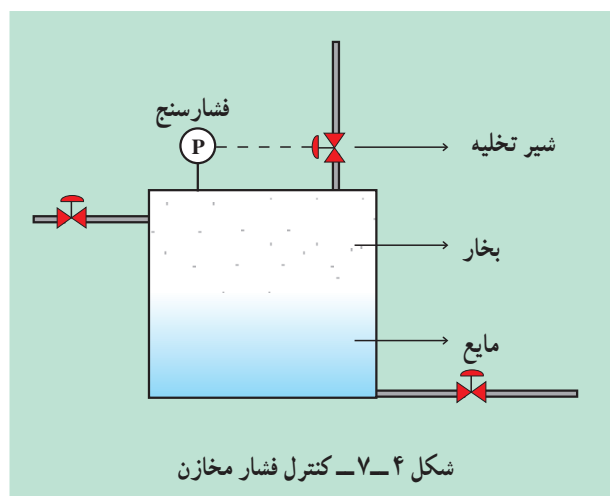


۷-۴- کنترل فشار^۲

مخازن تحت فشار، تانک‌های ذخیره‌ی مواد شیمیایی و نفتی، یا مخازن ذخیره‌ی گاز، به منظور ایمنی، باید به کنترل‌کننده‌ی فشار مجهز باشند. دیگ‌های زودپز که در منازل استفاده می‌شود نمونه‌ی ساده‌ای از مخازن تحت فشار است. آب‌گرمکن‌های منازل نیز نمونه‌ای دیگر برای کنترل فشار است، در شکل ۷-۴ کنترل فشار به سادگی نشان داده شده است.

^۱- Temperature control

^۲- Pressure Control



وقتی دمای داخل آب گرمکن افزایش پیدا کند فشار نیز بالا خواهد رفت و بخار ایجاد شده ازدیاد فشار را تشدید می کند. همان گونه که در شکل نشان داده شده به وسیله ی کنترل کننده ی فشار فرمانی ارسال می شود؛ در نتیجه، شیر اطمینان بالای آب گرمکن باز شده مقداری از بخار به بیرون فرستاده می شود تا فشار مخزن تقلیل بیابد و به حالت تعادل برسد.

۷-۵- شیرهای کنترل^۱

معمولاً در صنعت، شیرهای کنترل، آخرین وسیله ی کنترل کننده ی مدار کنترل هستند که به وسیله ی اثرات مکانیکی یا اثرات الکتریکی باز و بسته خواهند شد و کنترل نهایی را برعهده خواهند داشت (برای مطالعه ی بیش تر به کتاب «عملیات دستگاهی در صنایع شیمیایی» مراجعه شود).

۷-۶- آزمایش: کنترل سطح، دما و فشار آب گرمکن

هدف: بررسی و مشاهده ی کنترل دما، سطح و فشار روی آب گرمکن و آشنایی با ادوات ساده ی کنترل.

ساختمان این دستگاه از این بخش ها تشکیل شده است:

- ۱- مخزن ذخیره ی آب، همراه با شناور.
- ۲- آب گرمکن گازی مجهز به ترموستات و شیر اطمینان و فشارسنج.

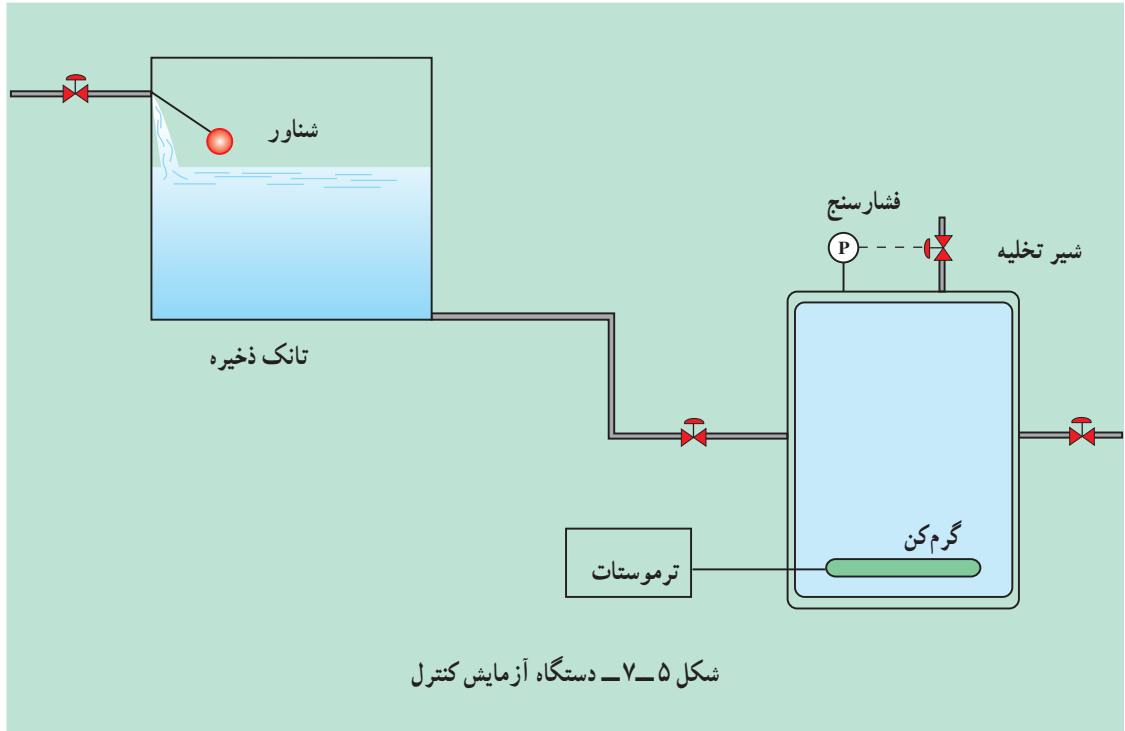
روش آزمایش:

با توجه به شکل ۵-۷ این مراحل را انجام دهید:

- ۱- شیر ورودی آب را به مخزن ذخیره باز کنید تا پر شود.
* زمانی که شناور عمل نماید مسیر آب ورودی به گونه‌ی خودکار قطع می‌شود.
- ۲- شیر خروجی تانک را باز کنید تا آب به آب‌گرمکن وارد شود.
- ۳- شبکه‌ی حرارتی را بسته به نوع روشن نمایید و روی دمای 60° درجه‌ی سلسیوس تنظیم کنید.
- * وقتی که دما به 60° درجه‌ی سلسیوس برسد ترموستات به طور خودکار مسیر منبع حرارتی را قطع خواهد کرد.
- ۴- برای کنترل فشار باید در دماهای بالا کار کنید. ترموستات را روی 100°C قرار دهید.
- ۵- در این دما بخارات تولید می‌شود که باعث ازدیاد فشار مخزن خواهد شد در این حالت فشار را از طریق فشارسنج بخوانید.
- ۶- بر اثر افزایش فشار شیر اطمینان عمل خواهد کرد و بخشی از بخار خارج خواهد شد. فشار مرحله‌ی دوم را نیز بخوانید.

فعالیت آزاد:

با نصب یک فشارسنج بردن روی دیگ زودپز می‌توان اثر کنترل فشار را به وسیله‌ی سوپاپ‌های اطمینان دیگ مشاهده نمود.



خودآزمایی

- ۱- چرا کنترل در هر واحد صنعتی لازم است؟
- ۲- چنانچه شبکه‌ی کنترل سطح مایع در یک مخزن مواد شیمیایی عمل نکند چه اتفاقی می‌افتد؟
- ۳- نحوه‌ی کنترل دمای آب‌گرمکن را شرح دهید.
- ۴- با یک مثال ساده کنترل فشار را توضیح دهید.

برج‌ها و ستون‌ها

هدف‌های رفتاری: در پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:

- ۱- دستگاه‌های انتقال جرم را توضیح دهد.
- ۲- برج‌ها و ستون‌های عملیات انتقال جرم را توضیح دهد.
- ۳- دستگاه تفکیک و ستون جذب سینی‌دار را بیان کند.
- ۴- برج جذب پرشده را توضیح دهد.
- ۵- با برج‌ها و ستون‌ها کار کند.
- ۶- از کارخانجات نفت و گاز و پتروشیمی یا پالایشگاه بازدید بعمل آورد.

۸-۱- مقدمه

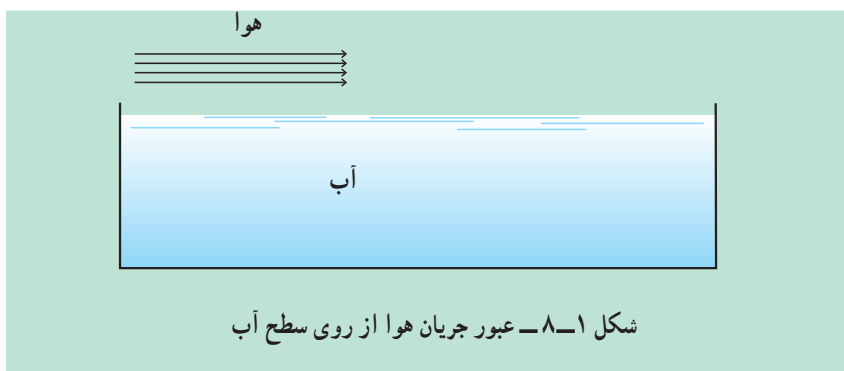
بسیاری از فرآیندهای مهندسی شیمی با مسئله‌ی تغییر غلظت در محلول‌ها و مخلوط‌ها سروکار دارند که این تغییرات الزاماً به وسیله‌ی واکنش‌های شیمیایی صورت نمی‌پذیرند. این عملیات بیش‌تر به جداسازی مخلوط‌ها و سازنده‌های آن‌ها مربوط می‌شود. در مورد مخلوط‌ها این اعمال ممکن است به شیوه‌های مکانیکی مانند فیلتراسیون یک مخلوط معلق و جدانمودن جزء جامد از مایع یا جداسازی اجزای مختلف و خردشده‌ی یک مخلوط با اندازه‌های مختلف از طریق غربال نمودن، یا جداسازی ذرات جامد آسیاب شده با استفاده از اختلاف جرم ویژه‌ی آن‌ها صورت گیرد. عملیاتی را که طی آن تغییراتی در ترکیب مخلوط‌ها به وجود می‌آید، عملیات انتقال جرم^۱ نامند. اهمیت این عملیات کاملاً واضح بوده و به ندرت می‌توان یک فرآیند شیمیایی را یافت که نیاز به خالص‌سازی اولیه‌ی مواد خام یا جداسازی نهایی محصولات از محصولات جانبی حاصل از واکنش نداشته باشد، و به دلایل مذکور عموماً عملیات انتقال جرم مورد استفاده قرار می‌گیرد. با مشاهده‌ی برج‌های تقطیر متعددی که در یک پالایشگاه نفت امروزی دیده می‌شود و در هر یک از آن‌ها عملیات انتقال جرم صورت می‌پذیرد، به اهمیت این اعمال می‌توان پی برد.

غالباً قسمت اعظم هزینه‌های مربوط به یک فرآیند صرف انجام جداسازی‌های وابسته به آن می‌گردد. مخارج مربوط به این جداسازی‌ها یا خالص‌سازی‌ها بستگی مستقیم به نسبت غلظت نهایی به غلظت ابتدایی مواد جداشده خواهد داشت. اگر این نسبت بزرگ باشد قیمت

تمام شده‌ی محصول بالاتر خواهد رفت. به عنوان مثال سولفوریک اسید یک محصول نسبتاً ارزان قیمت است چون گوگرد در طبیعت به صورت تقریباً خالص یافت می‌شود در صورتی که اورانیوم خالص به دلیل آنکه عیار سنگ معدن آن در طبیعت بسیار کم است، ماده‌ی گرانبهائی می‌باشد.

جمع‌بندی

عملیات انتقال جرم به وسیله‌ی انتقال یک فاز به داخل فاز دیگر در مقیاس مولکولی مشخص می‌شود. مثلاً وقتی آب از درون یک استخر به داخل جریان هوایی که بر روی سطح آب در حرکت است (شکل ۸-۱)، تبخیر می‌شود نوعی انتقال جرم است.



مولکول‌های بخار آب از میان مولکول‌های هوا روی سطح به درون توده‌ی هوا نفوذ کرده و از آن جا بیرون برده می‌شوند. این عمل جابجا شدن مولکول‌ها یک جابه‌جایی کلی نیست. مثلاً نمی‌توان آن را با پمپ کردن یک مایع که در آن به دلیل اختلاف فشار موجود، تمام مایع منتقل می‌شود مقایسه کرد. در این قبیل مسایل، انتقال جرم در نتیجه اختلاف غلظت انجام گرفته و ماده‌ی نفوذکننده از محلی با غلظت بیش‌تر به محلی که دارای غلظت کمتری است، منتقل می‌شود.

۸-۲- تقسیم‌بندی عملیات انتقال جرم

این تقسیم‌بندی به صورت جدول ۸-۱ می‌باشد.

جدول ۸-۱

۱- تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر

- ۱- گاز - گاز : غیر قابل انجام در صنعت
- ۲- گاز - مایع : جداسازی آمونیاک از مخلوط هوا و آمونیاک به وسیله آب
- ۳- گاز - جامد : خشک کردن گازهای مرطوب
- ۴- مایع - مایع : جداسازی آب و استن به وسیله تتراکلرید کربن
- ۵- مایع - جامد : جداسازی طلا از سنگ معدن
- ۶- جامد - جامد : غیر قابل انجام در صنعت

عملیات انتقال جرم

۲- جداسازی فازها با استفاده از غشاء

- ۱- گاز - گاز : جداسازی هلیوم به وسیله غشاهای پلیمری از گاز طبیعی
- ۲- مایع - مایع : شیرین‌سازی آب دریا
- ۳- گاز - مایع : جداسازی الکل از آب به وسیله یک غشاء به نوعی که الکل در طرف دیگر غشاء تبخیر شود.

۱-۲-۸- تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر

این گروه از نوع دیگر مهم تر می باشد و اغلب عملیات انتقال جرم در این دسته بندی واقع می شود.

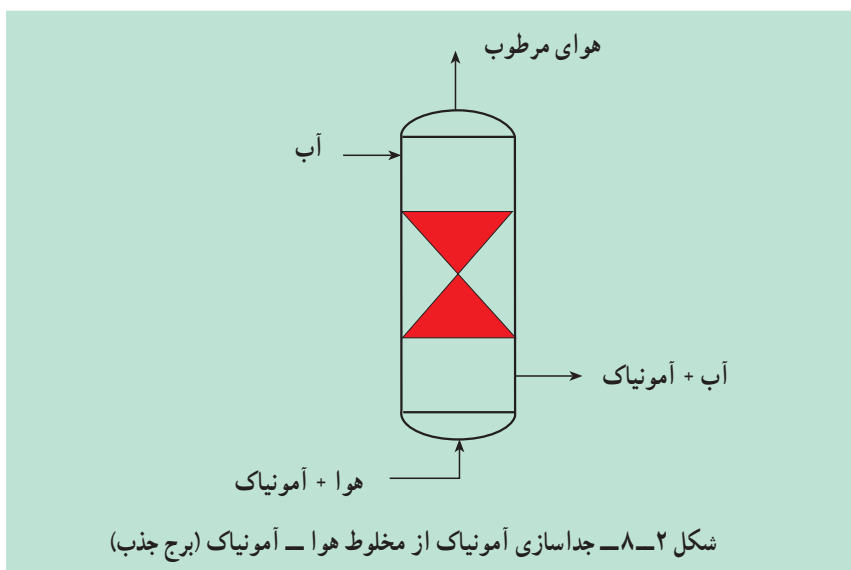
وجود سه فاز مختلف یعنی گاز، مایع و جامد امکان مجاور شدن دو فاز را با یکدیگر به شش صورت فراهم می کند.

گاز- گاز:

به جز موارد استثنایی، تمام گازها به طور کامل با یکدیگر مخلوط می شوند و لذا در این گروه فرآیندهای متداول در صنعت انجام پذیر نیست.

گاز- مایع:

جداسازی آمونیاک را از مخلوط گازی هوا- آمونیاک به وسیله ی آب می توان از این دسته نامید. در این حالت بخش عمده ای از آمونیاک موجود در هوا به داخل آب نفوذ خواهد کرد و این در حالی است که هوا در آب نفوذ نمی کند. این عمل را در صنعت جذب^۱ می نامند (شکل ۲-۸).



چنانچه هوا در تماس با محلول آمونیاک- آب قرار گیرد، قسمتی از آمونیاک از آب جدا شده و درون هوا نفوذ خواهد کرد. این فرآیند در صنعت دفع^۲ نامیده می شود.

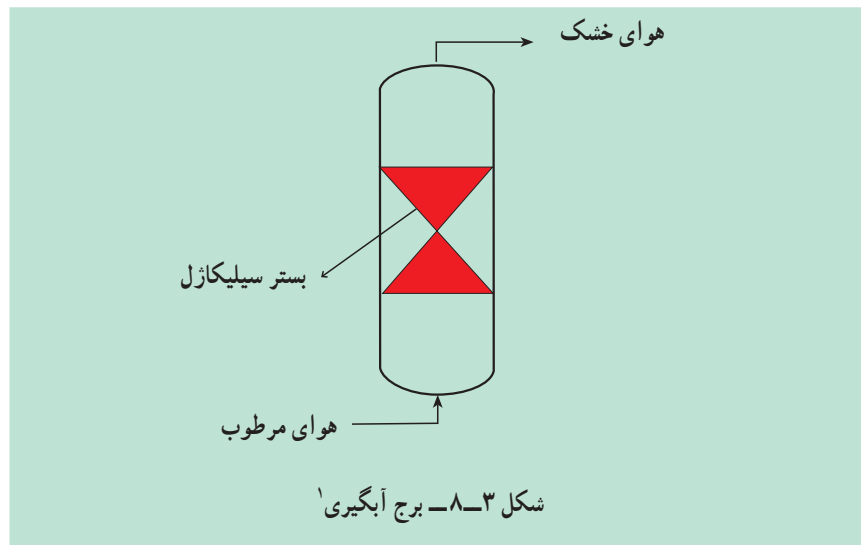
گاز- جامد:

اگر مخلوطی از هوای مرطوب در معرض یک ماده ی جاذبه ی رطوبت مثل سیلیکاژل فعال شده قرار بگیرد، بخار آب به درون فاز جامد نفوذ نموده و هوا خشک می شود این فرآیند را در صنعت خشک کردن^۳ می نامند (شکل ۳-۸).

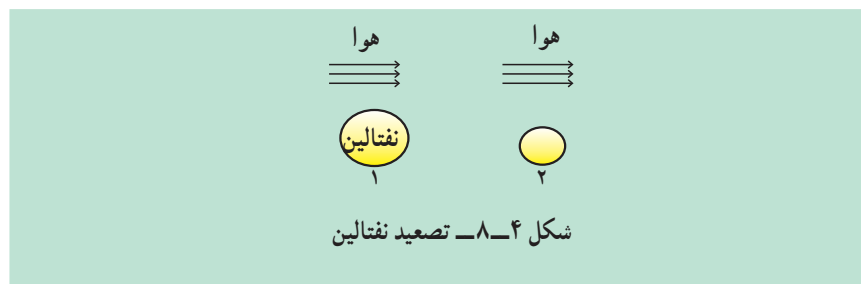
۱ - Absorption

۲ - Stripping

۳ - drying



هم چنین نفوذ نفتالین در هوا نیز نوعی انتقال از فاز جامد به گاز می باشد. این عملیات در صنعت تصعید^۲ نامیده می شود (شکل ۴-۸).



مایع - مایع:

اگر محلول استن - آب را در یک قیف جداکننده با تتراکلرید کربن تکان داده و اجازه دهند تا فازها از یکدیگر جدا شوند، قسمت عمده ی استن از فاز آب جدا شده و وارد فاز تتراکلرید کربن می شود. این عملیات را در صنعت استخراج مایع-مایع^۳ می نامند.

فعالیت ۱:

- ۱- مقدار مشخصی از آب و استن را با یکدیگر مخلوط کنید.
- ۲- مقدار مشخصی تتراکلرید کربن به محلول اضافه کنید و خوب به هم بزنید.
- ۳- به وسیله ی قیف جداکننده دو فاز مجزا را از یکدیگر جدا کنید.
- ۴- حجم های ثانویه را یادداشت کنید.
- ۵- میزان نفوذ استن را در تتراکلرید به دست آورید.

۱- Dehydration Column

۲- Sublimation

۳- Liquid - Liquid Extraction

مایع – جامد:

جداسازی طلا از سنگ‌های معدن توسط محلول‌های سیانید یا جداسازی روغن از پنبه دانه به وسیله‌ی هگزان از این گروه می‌باشد. در این قبیل موارد نفوذ از جامد به مایع صورت می‌پذیرد.

اگر ناخالصی رنگی موجود در محلول‌های شربت قند نیشکر با کربن فعال^۱ مجاور شوند مواد رنگی بر روی سطح کربن جامد جمع خواهد شد. این عمل را جذب سطحی^۲ می‌نامند.

جامد – جامد:

چون سرعت انتقال مواد درون فازهای جامد خیلی کند می‌باشد در این دسته هیچ عملیات صنعتی صورت نمی‌گیرد.

۲-۲-۸- جداسازی فازها با استفاده از غشاء:

نقش غشاء جلوگیری از مخلوط شدن دو فاز محلول در یکدیگر است. وجود غشاء باعث جداسازی مواد از یکدیگر در اثر کنترل راه عبور سازنده‌ها از یک سو به سوی دیگر غشا می‌گردد به عبارتی یک سازنده از غشاء عبور می‌کند تا جداسازی صورت بگیرد.

گاز – گاز:

اگر یک مخلوط گاز که دارای سازنده‌های مختلفی با جرم مولکولی متفاوت است با غشاء تماس داشته باشد، سازنده‌های مخلوط با شدت‌های گوناگونی که بستگی به جرم مولکولی آن‌ها دارد از درون غشاء عبور خواهند کرد. هلیوم را از گاز طبیعی با استفاده از غشاهای پلیمری فلوروکربن جدا می‌کنند در این حالت گاز هنگام عبور از غشاء ابتدا درون آن حل شده و سپس نفوذ می‌نماید. جداسازی در این حالت در اثر اختلاف حلالیت سازنده انجام خواهد شد.

گاز – مایع:

اگر محلولی از آب و الکل در مجاورت با یک غشاء مناسب غیرمتخلخل که قدرت حل کردن الکل را داشته باشد، قرار دهیم، الکل پس از عبور از غشاء در سمت دیگر تبخیر خواهد شد.

مایع – مایع:

اگر محلول شربت قند چغندر حاوی ناخالصی‌های کلوییدی باشد می‌توان ناخالصی‌های موجود را با استفاده از حلال آب و یک غشاء نیمه‌تراوا جدا ساخت، آب و قند از غشاء عبور می‌نمایند در صورتی که ذرات درشت کلوییدی قادر به عبور نخواهند بود. هم‌چنین اگر حلالی را از محلولی که در آن است با استفاده از غشایی که فقط بتواند حلال را از خود عبور دهد، جدا کنند، فرآیند را اسمز^۳ می‌گویند.

بدیهی است که با استفاده از فشاری مخالف و غالب بر فشار اسمزی می‌توان

۱ – Active Carbon

۲ – Absorption

۳ – Osmosis

جریان حلال را معکوس کرد و حلال و حل‌شونده بدین ترتیب با عمل اسمز معکوس^۱ از یکدیگر جدا خواهند شد و این، یکی از فرآیندهای متداول در شیرین کردن آب دریاست.

۳-۸ - انتخاب روش جداسازی

خصوصیات فیزیکی مواد موردنظر و هزینه‌ی عوامل اصلی در انتخاب روش جداسازی خواهند بود. مثلاً روغن‌های نباتی را از دانه‌ی آن‌ها می‌توان از طریق فشردن دانه یا استخراج به کمک حلال به دست آورد. عموماً روشی که هزینه‌ی کمتری داشته باشد مورد استفاده قرار خواهد گرفت. بندرت عوامل دیگر ممکن است در تصمیم‌گیری دخالت کنند. مثلاً ساده‌ترین روش، با وجودی که ممکن است کم‌هزینه‌ترین روش نباشد، به دلیل سادگی مطلوب‌ترین است. در برخی از موارد به لحاظ عدم وجود اطلاعات کافی برای طراحی، یک روش ارزان را کنار می‌گذارند. تجربیات کاری گذشته نیز می‌تواند در تصمیم‌گیری نهایی نقش بسیار مهمی را ایفا کند.

۴-۸ - اصول طراحی

در طراحی هر واحد مربوط به انتقال جرم، چهار عامل اصلی باید تعیین گردد:

- ۱- تعداد مراحل ایده‌آل (تعداد مراحل که فازها با یکدیگر تماس دارند).
- ۲- زمان لازم برای تماس فازها
- ۳- شدت جریان‌های مجاز فازها
- ۴- انرژی‌های مورد نیاز برای عملیات انتقال جرم.

در این فصل مبحث برج‌های جذب و دفع و دستگاه‌های تفکیک‌کننده نفت و گاز را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۵-۸ - برج تفکیک‌کننده نفت و گاز^۲

نفت استخراج شده از مخازن زیرزمینی حاوی گاز، آب شور، شن و سنگریزه و ناخالصی‌های دیگری می‌باشد که وجود چنین ناخالصی‌هایی باعث شده است تا از دستگاه‌هایی استفاده شود و در این ادوات نفت از ناخالصی‌های مذکور جدا شود. از آن جایی که نفت دارای مقادیر زیادی گاز حل شده می‌باشد و این گازها در حین انتقال نفت توسط خطوط لوله ایجاد مشکل و انسداد خط جریان را می‌کنند لذا ضرورت جداسازی گاز را از نفت توجیه می‌کند. هم چنین گاز جدا شده از نفت حاوی هیدروکربن‌های سبک و غنی می‌باشد که خود دارای ارزش‌های فراوان اقتصادی هستند.

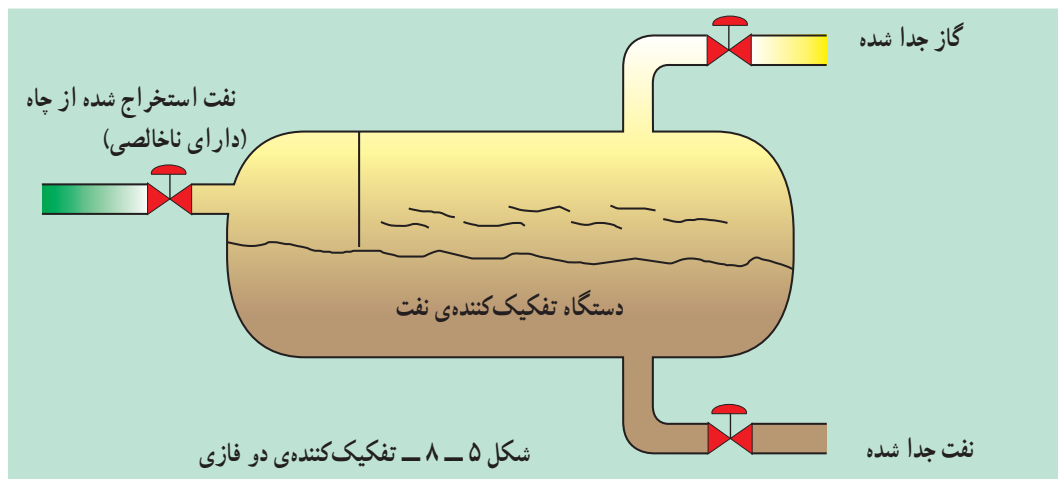
۱- Reverse Osmosis

۲- Oil and Gas separator

تفکیک کننده‌ها به‌طور کلی به دو صورت وجود دارند :

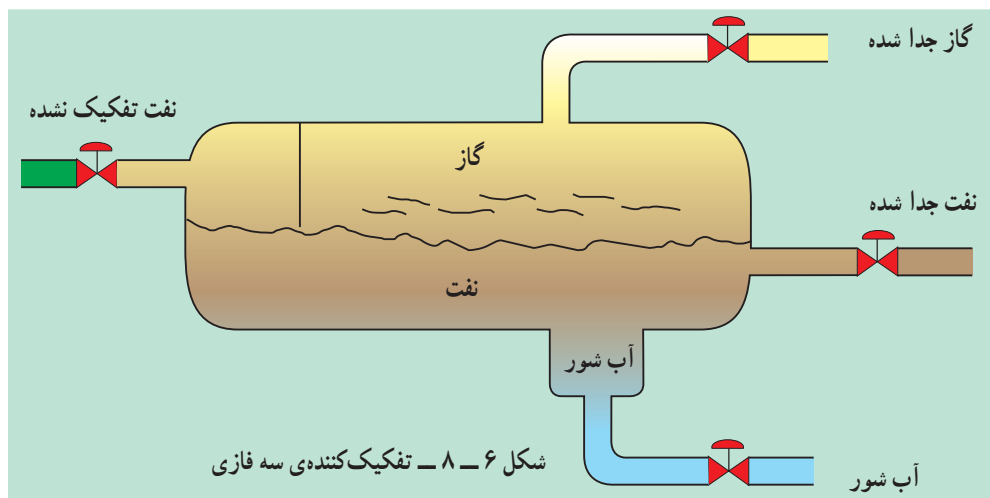
۱-۵-۸ - تفکیک کننده‌های دو فازی^۱

در این دستگاه‌ها دو فاز گاز و نفت از یکدیگر جدا می‌شوند (مطابق شکل ۵-۸). فاز گاز از بالای تفکیک کننده و فاز نفت (مایع) از پایین دستگاه خارج می‌شوند. اصولاً تفکیک کننده‌ها به صورت افقی در مسیر جریان نفت قرار می‌گیرند و به دلیل شرایط خاص دمایی و فشاری باعث جدایی دو فاز از یکدیگر می‌شود. این عملیات را تبخیر ناگهانی^۲ می‌نامند.



۲-۵-۸ - تفکیک کننده‌های سه فازی^۳

در این دستگاه‌ها سه فاز نفت و گاز و آب شور (حاوی نمک) از یکدیگر جدا می‌شوند. فاز گاز از بالای دستگاه، فاز نفت و آب (مایع) از پایین تفکیک کننده و بر اساس چگالی از یکدیگر جدا می‌شوند. یعنی آب شور پایین‌تر از نفت قرار می‌گیرد و پس از تجمع در ته دستگاه تخلیه می‌شوند (شکل ۶-۸).



۱- Two phase separator ۲- Flash vaporization ۳- Three phase separator

۳-۵-۸- وسایل داخلی دستگاه‌های تفکیک کننده

برای آن که عمل تفکیک به خوبی انجام شود و نفت تا حد مطلوب عاری از گاز شود وسایلی در داخل دستگاه تفکیک به کار برده می‌شود که هر کدام به نوبه‌ی خود عملی جداگانه برای جدا کردن گاز از نفت انجام می‌دهند. وسایل داخلی دستگاه عبارتند از:

۱- سینی منحرف کننده^۱

۲- ورقه‌های محوکننده‌ی کف^۲

۳- ورقه‌های جداکننده‌ی گاز از نفت^۳

۴- ورقه‌های نم‌گیر^۴

۵- گرداب شکن^۵

۴-۵-۸- طرز کار وسایل داخل دستگاه تفکیک کننده

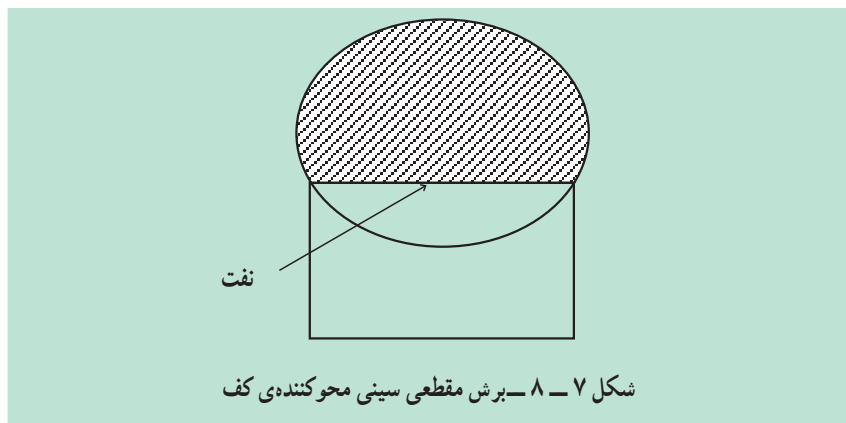
سینی منحرف کننده:

سینی مزبور در نقطه‌ای که نفت و گاز وارد دستگاه تفکیک می‌شود، نصب شده است. این سینی به اشکال مختلفی وجود دارد.

نفت موقعی که وارد دستگاه تفکیک می‌گردد با سینی منحرف کننده برخورد می‌کند. روی این سینی چند میله وجود دارد. نفت پس از برخورد با میله‌ها به سمت پایین هدایت می‌شود. وجود میله‌ها برای ایجاد تنش در نفت و در نهایت جداسازی بیشتر نفت و گاز می‌باشد. در این حالت گازهای سبک زیادی جدا می‌شوند. گازهای جدا شده از نفت به طرف بالای دستگاه تفکیک هدایت می‌شود.

ورقه‌های محوکننده‌ی کف:

نفتی که از سینی منحرف کننده به طرف پایین سرازیر می‌شود هنوز دارای مقادیر گاز می‌باشد و در نتیجه‌ی ریزش به طرف پایین، مقداری کف تولید می‌کند. برش مقطعی از ورقه‌های محوکننده‌ی نفت را در شکل ۷-۸ مشاهده می‌کنید.



۱- Deflector Dish

۲- Defoaming Baffles

۳- Dividing plates

۴- Mist Eliminator

۵- Vortex Breaker

وظایف ورقه‌ی محوکننده‌ی کف عبارت است از :

۱- از تولید کف در داخل دستگاه جلوگیری کرده و اگر کفی ایجاد شود آن را از

بین می‌برد.

۲- از تلاطم نفت درون دستگاه جلوگیری می‌کند.

۳- باعث می‌شود گاز بیش‌تری از نفت جدا شود.

ورقه‌های جداکننده‌ی گاز از نفت:

نفتی که از سینی منحرف‌کننده به طرف پایین سرازیر می‌شود مقدار دیگری گاز

دارد. این گاز به وسیله‌ی ورقه‌ی جداکننده از نفت جدا می‌شود.

گرداب‌شکن:

گرداب‌شکن یا مانع عبور گاز از لوله‌ی نفت در محل لوله‌ی خروجی نفت قرار

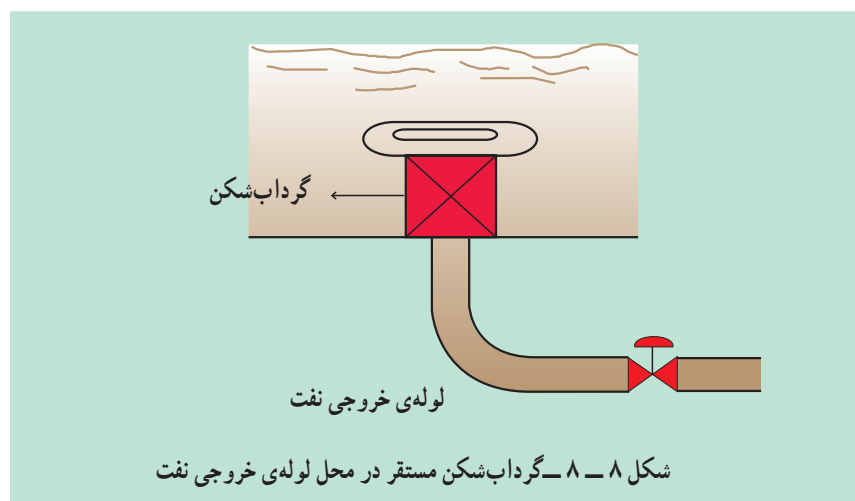
دارد. معمولاً جایی که مایع باشد در قسمتی که عمق آن از جاهای دیگر بیش‌تر است،

گرداب ایجاد می‌شود و همین گردابی که تولید شده باعث می‌شود مقدار گازی که از نفت

جدا شده از سوراخ بین گرداب همراه نفت خارج شده و به مراحل بعدی تفکیک برود. در

نتیجه عمل تفکیک در دستگاه‌های بعدی را با مشکل مواجه سازد. شکل ۸-۸ نمای از

گرداب‌شکن را نمایش می‌دهد.



نم‌گیر:

نم‌گیر نزدیک لوله‌ی خروجی گاز قرار دارد. وظیفه‌ی نم‌گیر گرفتن رطوبت و

قطرات نفتی است که همراه گاز می‌باشد.

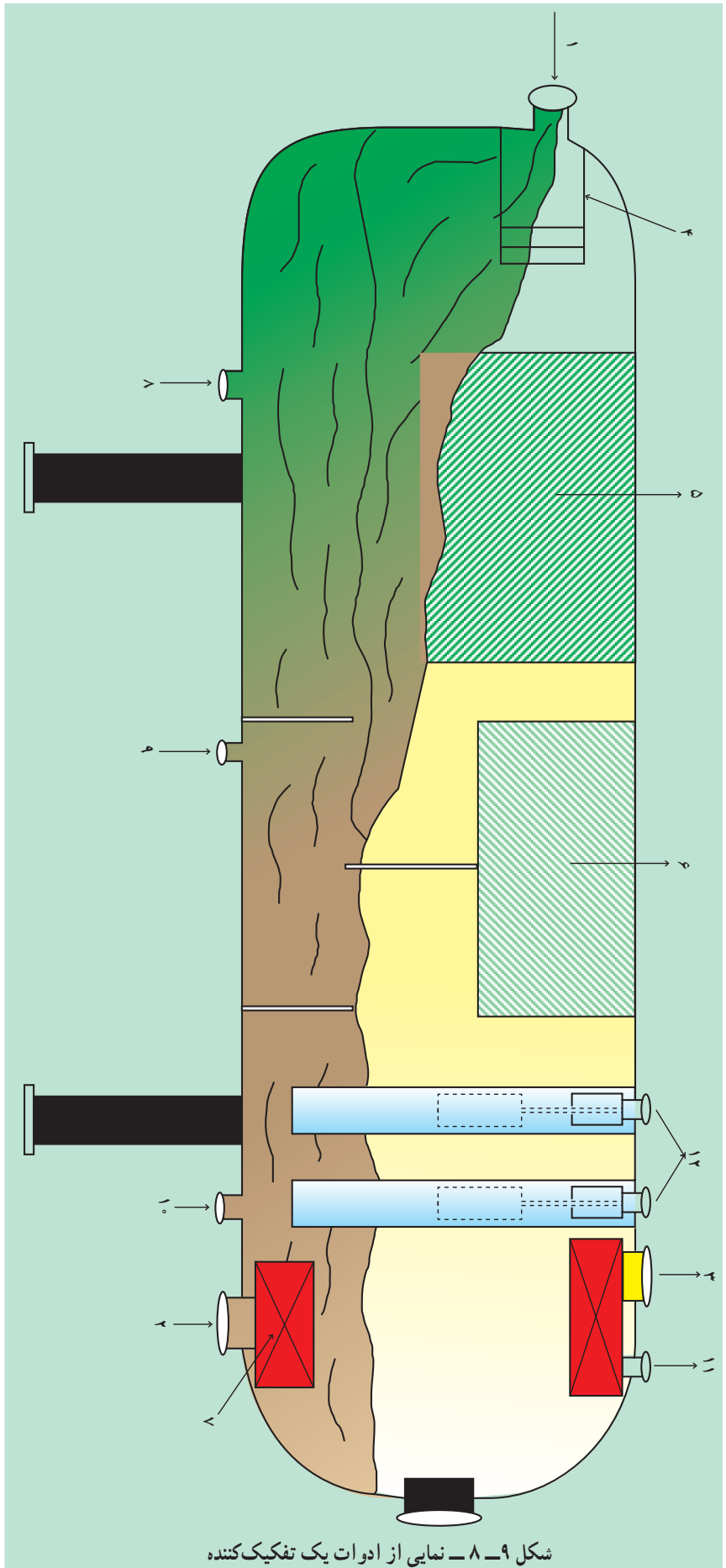
نفت در اثر برخورد با سینی منحرف‌کننده مقدار زیادی گاز خود را از دست می‌دهد.

هم‌چنین ورقه‌ی جداکننده نیز مقدار دیگری گاز را از نفت جدا می‌کند. این گازها همراه

مقداری از قطره‌های نفت می‌باشد. این قطره‌ها نباید همراه گاز از بالای دستگاه خارج شود

به همین دلیل از نم‌گیر استفاده می‌شود.

شکل ۸-۹ نمای کلی از یک دستگاه تفکیک‌کننده‌ی گاز و نفت را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۸ - نمایی از ادوات یک تفکیک کننده

جدول قطعات تفکیک کننده ی مربوط به شکل ۹-۸

شماره	توضیح
۱	نازل نفت ورودی ^۱
۲	نازل نفت خروجی ^۲
۳	نازل گاز خروجی ^۳
۴	سینی منحرف کننده ^۴
۵	سینی محو کننده ی کف ^۵
۶	موانع حذف رطوبت ^۶
۷	مانع جریان گردابی (گرداب شکن) ^۷
۸	نازل تخلیه ی مایع (ته کش) ^۸
۹	نازل تخلیه ی مایع (ته کش)
۱۰	نازل تخلیه ی مایع (ته کش)
۱۱	تخلیه ی گاز ^۹
۱۲	کنترل کننده ی سطح نفت ^{۱۰}

-
- ۱_ Oil Inlet Nozzle
 - ۲_ Oil Outlet Nozzle
 - ۳_ Gas Outlet Nozzle
 - ۴_ Deflector Dish
 - ۵_ Defoaming Baffles
 - ۶_ Mist Eleminator Baffles
 - ۷_ Vortex Breaker
 - ۸_ Drain
 - ۹_ Vent
 - ۱۰_ Liquid level controller

اختلال در عملیات تفکیک:

مهمترین معایی که در حین عملیات تفکیک ممکن است پیش بیاید به شرح زیر

می باشد:

الف - رفتن گاز همراه نفت^۱ از پایین دستگاه تفکیک:

(شکل ۸-۱۰)

علائمی که مشخص کننده این حالت هستند، عبارتند از:

۱- پایین آمدن سطح نفت در دستگاه تفکیک

۲- کم شدن حرارت لوله ی خروجی نفت دستگاه تفکیک

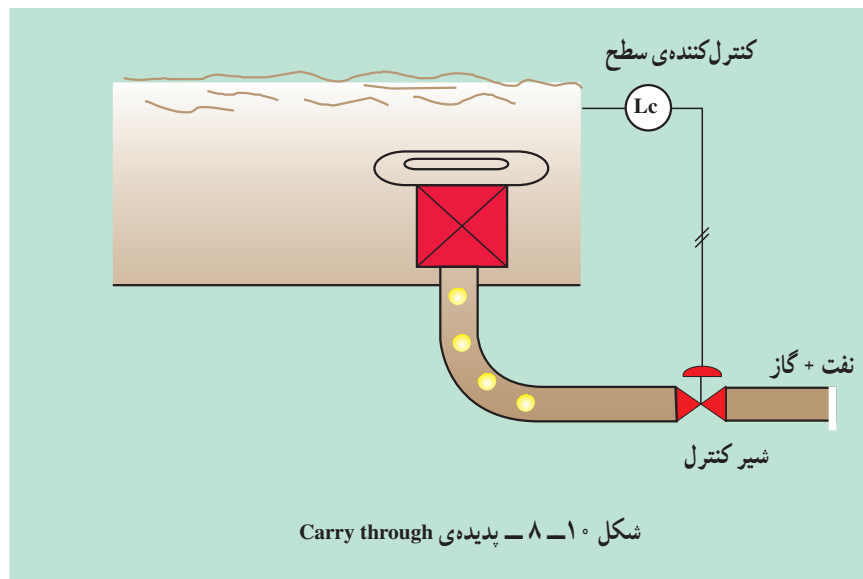
۳- زیاد شدن صدای لوله ی خروجی نفت

طریقه ی برطرف کردن این مشکل عبارتست از:

۱- افزایش سطح نفت در دستگاه تفکیک

۲- ممکن است شیر کنترل سطح نفت خراب شده باشد که باید توسط نیروهای

تعمیرات مستقر در کارخانه، شیر کنترل را اصلاح کرد.



ب - خروج نفت همراه گاز^۲ از بالای دستگاه تفکیک:

(شکل ۸-۱۱)

اگر نفت همراه گاز از لوله ی خروجی گاز بالای دستگاه تفکیک خارج شود این

مشکل پیش می آید. علائم شناخت این پدیده عبارتند از:

۱- زیاد شدن بیش از حد سطح نفت در دستگاه

۲- دود کردن مشعل^۳ اصلی کارخانه

۱- Carry through

۲- Carry over

۳- Stock flare

۳- زیاد شدن درجه‌ی حرارت لوله‌ی خروجی گاز

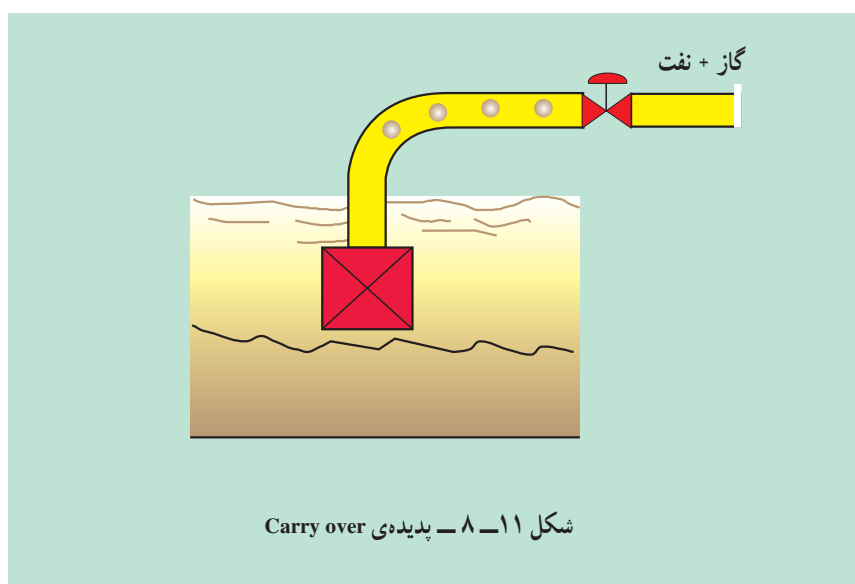
۴- کم شدن فشار دستگاه تفکیک

۵- تغییر صدای لوله‌ی گاز خروجی (صدا کمتر می‌شود).

برطرف کردن این مشکل :

۱- سطح نفت باید در دستگاه تفکیک پایین آورده شود. علت ممکن است مربوط به شیر کنترل سطح نفت باشد یا اینکه ممکن است شیر کنترل فشار از تنظیم خارج شده باشد.

۲- سرمای شدید و باران نیز باعث این مشکل خواهد شد، لذا در این حالت باید درجه حرارت دستگاه تفکیک را افزایش داد.



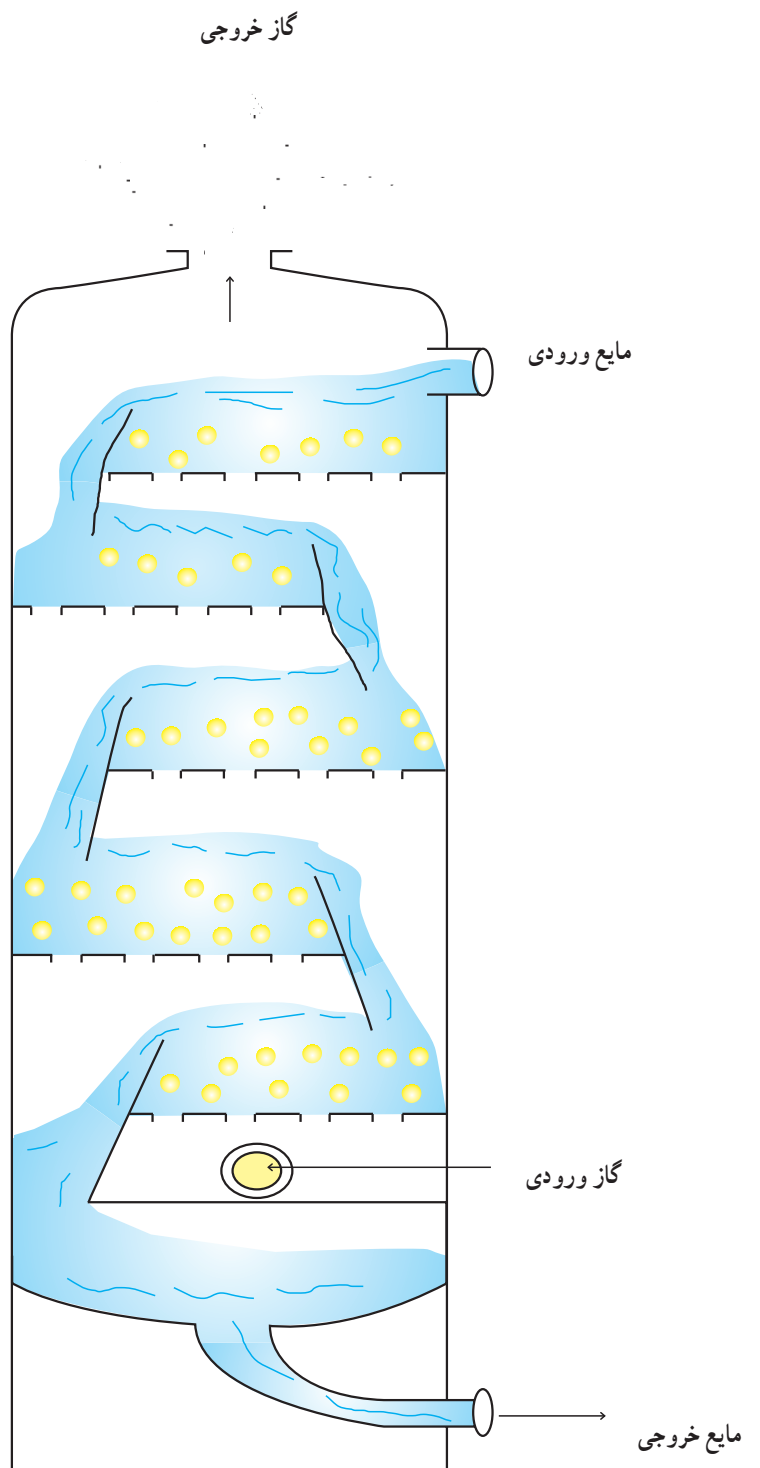
شکل ۱۱-۸ - پدیده‌ی Carry over

۶-۸- برج‌های سینی‌دار^{۱*}

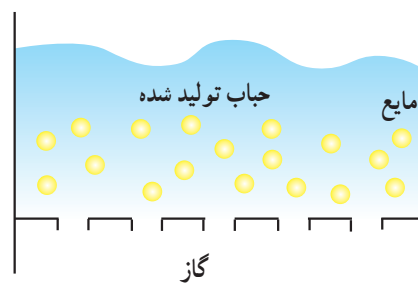
برج‌های سینی‌دار استوانه‌هایی عمودی هستند که در آن‌ها مایع و گاز به صورت مرحله‌ای در سینی‌ها یا صفحات، تماس حاصل نمایند. در شکل ۱۲-۸ یک نوع از آنها دیده می‌شود. مایع از بالای برج وارد شده و تحت اثر نیروی جاذبه به طرف پایین حرکت می‌کند. مایع در مسیر خود از طریق یک مجرا به سینی پایین می‌ریزد. گاز از پایین به بالا حرکت می‌کند و از طریق روزنه‌های موجود در صفحات (سینی‌ها) به صورت حباب درآمده و به درون مایع پراکنده می‌شود و ایجاد کف می‌کند. سپس گاز و مایع از یکدیگر جدا شده و به سرعت سینی‌های بعدی حرکت می‌کنند. هر سینی برج به منزله یک مرحله می‌باشد زیرا تماس کافی در روی هر کدام از سینی‌ها بین فازها انجام می‌شود.

۱- Tray towers

* برای اطلاعات بیشتر به کتاب عملیات دستگاهی در صنایع شیمیایی مراجعه شود.



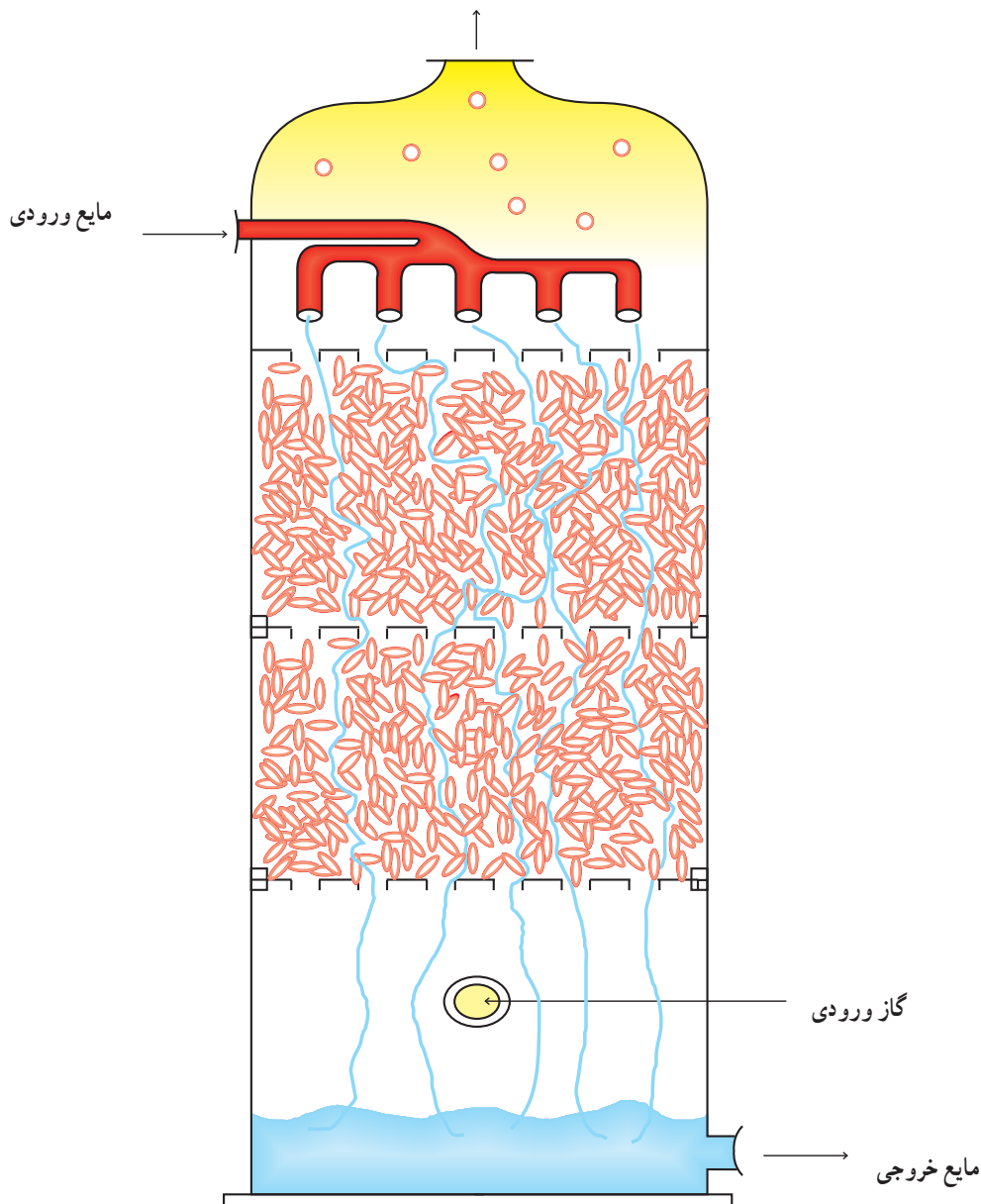
شکل ۱۲-۸- الف - نمایی از یک برج با سینی مشبک



شکل ۱۲-۸- ب - مقطعی از یک سینی مشبک

۷-۸- برج‌های پرآکنده^۱

همان‌طور که در شکل ۸-۱۳ دیده می‌شود، در این دستگاه‌ها مایع و گاز به صورت متقابل یا همسو در تماس مداوم با یکدیگر قرار می‌گیرند. برای ایجاد سطح تماس بین دو فاز، در این برج‌ها از قطعات پرکن^۲ (آکنه) استفاده می‌شود. در دستگاه‌های مذکور، فاز مایع از بالا وارد شده و سطح پرکن‌ها مرطوب می‌شود. گاز از پایین وارد شده و از میان فضاهای خالی بین پرکن‌ها عبور کرده و به سمت بالا می‌رود. روی سطح پرکن‌ها عملیات انتقال بین فازها انجام می‌شود.^۳ گاز خروجی



شکل ۸-۱۳- برج پرآکنده

۱- Packed Tower

۲- Packing

۳- به کتاب عملیات دستگاهی در صنایع شیمیایی مراجعه شود.

- پرکن‌ها باید دارای خواص زیر باشند :
- الف - سطح تماس زیادی را بین مایع و گاز ایجاد نمایند.
- ب - با مایع و گاز عبوری در برج واکنش ندهند.
- ج - دارای استحکام باشند تا استفاده از آن‌ها به آسانی امکان‌پذیر باشند.
- د - ارزان قیمت باشند.

۸-۸- اشکالات حین عملیات

- ۱- اگر سرعت فاز گاز زیاد باشد باعث می‌شود قطرات مایع از یک سینی به سینی بالاتر منتقل شود در نتیجه بازدهی برج کاهش پیدا کرده و خلوص محصول کاهش می‌یابد. این مشکل ماندگی مایع^۱ نام دارد. برای نقص این مشکل باید سرعت فاز گاز را کم کرد.
- ۲- در صورتی که شدت گاز کم باشد، مایع از سوراخ‌های سینی به سمت سینی پایینی انتقال پیدا می‌کند. این پدیده را ریزش می‌نامند^۲. اگر شدت گاز خیلی کم باشد تمام مایع به سمت پایین خواهد ریخت و تقریباً عملیات متوقف خواهد شد. در این حالت باید سرعت فاز گاز را افزایش داد.
- در حقیقت باید سرعت فاز گاز را بر اساس سرعت فاز مایع به درستی بهینه و تنظیم نمود.

۸-۹- بازدید

از آنجایی که هزینه‌ی ساخت و تجهیز کارگاه این بخش خیلی زیاد خواهد شد و نتایج مطلوب عملی نیز حاصل نمی‌شود، توصیه این است که حتماً از کارخانجات نفت، گاز، پالایشگاه و پتروشیمی دیدن به عمل آید. درحین بازدید برج‌های سینی‌دار و پر شده را به تفصیل بازدید نموده و از هنرآموزان گزارش بازدید خواسته شود.

خودآزمایی

- ۱- عملیات انتقال جرم به چند دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی می‌شود؟ نام ببرید.
- ۲- خشک کردن جزء کدام دسته از عملیات می‌باشد؟ با مثالی توضیح دهید.
- ۳- شماتیک یک برج دفع را رسم کرده و جریان‌های هر کدام را براساس جداسازی آمونیاک به وسیله‌ی آب از مخلوط هوا - آمونیاک نام‌گذاری کنید.
- ۴- تحقیقی در ارتباط با شیرین‌سازی آب دریا انجام دهید.
- ۵- عوامل اصلی را در طراحی دستگاه‌های انتقال جرم نام ببرید.
- ۶- وسایل داخلی دستگاه تفکیک گاز - مایع را نام ببرید.
- ۷- از گرداب شکن به چه منظوری استفاده می‌شود؟
- ۸- علائم خروج نفت همراه گاز از بالای دستگاه تفکیک را نام ببرید.
- ۹- پرکن‌ها در برج‌های پر شده باید چه خصوصیتی داشته باشند؟
- ۱۰- پدیده‌ی ریزش را شرح داده و بگویید چگونه برطرف می‌شود؟

منابع و مراجع

- ۱- حسن مدنی، مکانیک سیالات و هیدرولیک، انتشارات امیرکبیر
- ۲- دیوید همیل بلاو، اصول شیمیایی و مبانی محاسبات در مهندسی شیمی، مک گراهیل
- ۳- کاگ ناور و کابل، کنترل فرآیندها، مک گراهیل
- ۴- سید پندار توفیقی، طراحی و تنظیم سیستم‌های کنترل در واحدهای شیمیایی نفت و گاز، آموزش صنعت نفت جنوب، ۱۳۷۴.
- ۵- Streeter - willey - bedford, fluid Mechanic, Mc Graw Hill, 1999.
- ۶- J. P. Holman, Heat Transfer, Mc Graw Hill, 1990.
- ۷- J. P. Holman, Experimental Method of Engineering, 1998.
- ۸ - Miller, Flow Meaurement Engineering Hand book, 1997.
- ۹- KarraSik, Pump Hand book, 1998.
- ۱۰- Coulson & Richardson, Coulson & Richardson's Chemical Engineering, 1999.
- ۱۱- William. R. Apblett. Jr, Shell & Tube Heat Exchanger, Foster Wealer, development Corporation, 1991.
- ۱۲- G. Walker, Industrial Heat Exchanger a basic guide, University of Calgary.
- ۱۳- Sulzer Company, Pump for The offshore Oil Industry.
- ۱۴- Sulzer Company, Turbo Compressors, Standardized line of Compressor, 1990.
- ۱۵ - EBARA Corporation, Caoing Manual, 1993.
- ۱۶- MANNES MANN. Demag Company, Centrifugal, 1994. Compressor of The Oil & gas Industry, 1994.
- ۱۷- Platon Instrumentation flow bits, flow & Pressure Measurement & Control Equipment, 1991.
- ۱۸ - Treyball, R, Mass Transfer operations, Mc. Graw. Hill, 1996.

