۸-۱-دسته بندی ریبویلرها

ریبویلر، تبخیرکننده‌ای است که گرمای مورد نیاز برای تبخیر جریان خروجی از انتهای برج تقطیر را فراهم می‌کند. از نظر نوع سیال خروجی، ریبویلرها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف: دسته‌ای که هر دو فاز را به برج می‌فرستند تا درآنجا بخار از مایع جدا شود

ب: دسته‌ای که فقط بخار را به برج می‌فرستند

ریبویلرهای دسته اول به صورت گردش طبیعی یا اجباری کار می‌کنند. ریبویلرهای گردش طبیعی را اصطلاحاً ترموسیفون[1] می‌نامند. در یک ریبویلر ترموسیفون بایستی هد کافی مایع فراهم باشد تا گردش طبیعی سیال در حال جوشش برقرار باشد. ریبویلرهای دسته دوم که فقط بخار را به برج برمی‌گردانند، ریبویلرهای Kettle نامیده می‌شوند. در جدول (۸-۱) عمده‌ترین انواع ریبویلرها و ترموسیفون‌هایی که در صنعت کاربرد دارند مقایسه شده‌اند.

۸-۱-۱- ریبویلرهای گردش طبیعی

ریبویلرهای گردش طبیعی شامل ترموسیفون عمودی، ترموسیفون افقی، ریبویلرKettle، ترموسیفون یکبارگذر و ریبویلر داخلی می‌باشند.

۸-۱-۱-۱- ترموسیفون عمودی

ترموسیفون عمودی از یک مبدل پوسته و لوله معمولی که عموماً بطورمستقیم روی برج نصب می‌شود، تشکیل شده است. از آنجا که معمولاً در بخش زیرین برج، فضای مورد نیاز برای جدا شدن مخلوط بخار- مایع و تجمع محصول انتهایی وجود دارد، استفاده از ترموسیفون عمودی موجب می‌شود که فضای کمی اشغال گردد.

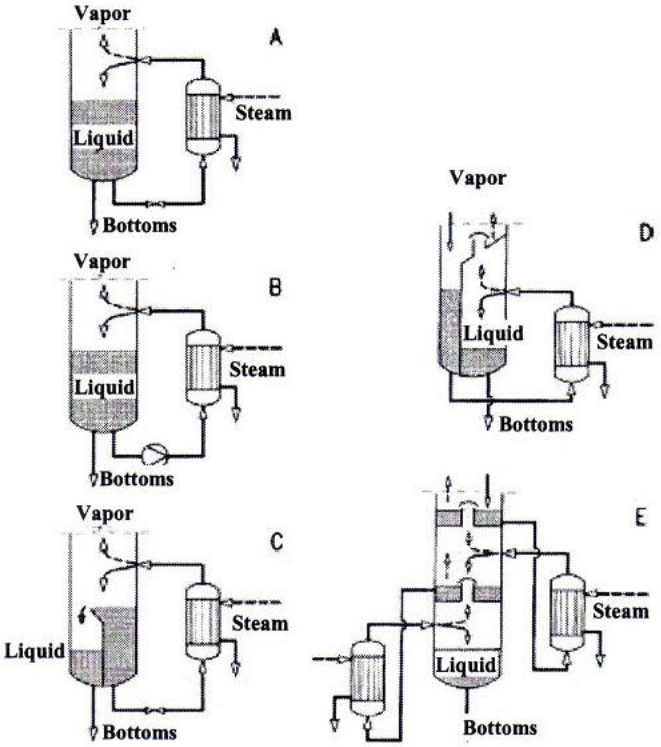
ترموسیفون‌های عمودی معمولاً ارزانترین نوع ریبویلرها هستند که در صورتی که مستقیماً روی برج نصب شوند، نیاز به پی‌ریزی و زیرسازی کاهش می‌یابد. همچنین دراین حالت، خط تخلیه سیال فرآیندی، بسیار کوتاه می‌شود که باعث کاهش افت فشار بخار شده و در مجموع باعث کاهش هزینه‌ها می‌گردد. سیال فرآیندی (سیالی‌که معمولاً بیشترین رسوب دهی را نسبت به بخار دارد) داخل لوله‌ها فرستاده می‌شود. بنابراین تمیزکردن، نگهداری و تعمیرات، آسان خواهد بود. اگر سیال گرم‌کننده تمیز باشد (مثل بخار) می‌توان با طراحی صفحه لوله ثابت، هزینه‌ها را باز هم کاهش داد. ترموسیفون‌ها دارای محدودیت‌هایی هستند که در برخی موارد، استفاده از آنها را محدود می‌نماید. برای مثال ترموسیفونها را نباید برای سیالات ویسکوز و نیز در فرآیندهایی که هد مایع خوراک متغیر است، بکار برد. در شکل (۸-۱) چند نوع ریبویلر ترموسیفون عمودی در اتصال با برج تقطیر نشان داده شده است.

[1] Thermosyphon

جدول (۸-۱) مزایا و معایب انواع ریبویلر و ترموسیفون

نوع	مغایب	مزایا
ترموسیفون عمودی	- نگهداری و تمیز کردن آن مشکل است - تعداد ستون بیشتری مورد نیاز است - فقط درگردش بالا، معادل با حالت تئوری است	- قابل استفاده در نرخهای بسیار بالای انتقال حرارت - نیاز به لوله‌کشی ساده و کم حجم - زمان ماند پایین در منطقه گرم شده - به آسانی مسدود نمی‌شود - قابل کنترل است
ترموسیفون افقی	- نیاز به لوله‌کشی و فضای اضافه دارد - فقط درگردش بالا، معادل با حالت تئوری است	- قابل استفاده در نرخهای انتقال حرارت نسبتاً بالا - دارای زمان ماند پایین در منطقه گرم شده - به آسانی مسدود نمی‌شود - قابلیت کنترل و نگهداری و تمیز کردن آسان است
ریبویلر گردش طبیعی یکبارگذر	- نگهداری و تمیز کردن آن مشکل است - به ارتفاع ستون بیشتری نیاز دارد. - در بیش از نرخ گردش، قابل کنترل نیست - خطر افزایش backup در ستون - خطر تبخیر بیش از اندازه در هرگذر	- قابل استفاده در نرخهای انتقال حرارت نسبتاً بالا - کم حجم و نیازمند به لوله‌کشی ساده - زمان ماند پایین در منطقه گرم شده - به آسانی مسدود نمی‌شود - معادل با حالت تئوری است
ریبویلر کتل	- نرخ انتقال‌حرارت پایین - نیاز به لوله‌کشی و فضای اضافی - زمان ماند بالا در منطقه گرم شده - به آسانی مسدود می‌شود	- نگهداری و نظافت آسان - مناسب برای سیال گرمایشی رسوب زا - معادل با حالت تئوری - دارای فضای خالی برای جدا شدن بخار
ریبویلر گردش اجباری	- به علت حجم اضافی پوسته، نسبتاً گران است. - هزینه پمپاژ بالا - نشت مواد درstuffing box	- مایعات ویسکوز و حاوی جامد-(solid containing) می‌توانند سیرکوله شوند - ایجاد تعادل در میزان رسوب دهی و فرسایش - سرعت گردش قابل کنترل است

از بین انواع مختلف ریبویلرها که در شکل (۸-۱) نشان داده شده است، ریبویلر نوع A، نوع معمول و استاندارد است. ترموسیفون عمودی توسط یک خط خوراک مایع به برج متصل است. معمولاً یک شیر کنترل برای کنترل دبی مایع در نازل ورودی نصب می‌شود. مایع از پایین وارد مبدل می‌شود و پس از گرم شدن، بطور جزئی درون لوله‌ها تبخیر می‌شود. مخلوط بخار- مایع از طریق نازل خروجی، ریبویلر را ترک می‌کند. گردش مایع بدلیل اختلاف درفشار استاتیکی بین مایع در نازل ورودی و سیالی که بطور جزئی در ریبویلر تبخیرشده، صورت می‌گیرد. برای گردش سیال نیازی به استفاده از پمپ نیست بنابراین در طراحی ریبویلر ترموسیفون باید دقت کافی را جهت محاسبه دقیق افت فشار مبذول داشت. در عمل، فقط ۵ درصد وزنی (مایعات غیر آلی) تا ۲۰ درصد وزنی (مایعات آلی) از مایعات ورودی به مبدل تبخیر می‌شوند، بنابراین مایع قبل از تبخیرکامل چندین بار در داخل مبدل گردش می‌کند. این امر باعث جرم گرفتگی کمتر می‌شود. از سوی دیگر این امر موجب افزایش سرعت جریان و بالا رفتن نرخ انتقال‌حرارت می‌شود.



شکل (۸-۱) چند نوع ریبویلر ترموسیفون: *(A)* ریبویلر ترموسیفون عمودی، *(B)* ریبویلر ترموسیفون عمودی با جابجایی اجباری، *(C)* ریبویلر ترموسیفون عمودی با هد مایع ثابت، *(D)* ریبویلر ترموسیفون عمودی یکبارگذر، *(E)* ریبویلر ترموسیفون عمودی یکبارگذر با جابجایی آزاد- اجباری

نصب یک پمپ درخط ورودی منجر به گردش اجباری در ریبویلر می‌شودکه در نوع B در شکل (۸-۱) نشان داده شده است. به دلیل نرخ بالاتر گردش مایع، نرخ انتقال‌حرارت نیز افزایش می یابد. کاربرد این نوع ریبویلر در موارد زیر می‌باشد:

- در عملیات تحت خلأ - هنگامی که افت فشار داخل ریبویلر یا ویسکوزیته سیال بسیار زیاد است.
- در هدهای پایین مایع زمانیکه بین محیط گرم‌کننده و مایع درون ریبویلر، اختلاف دمای زیادی وجود داشته باشد.

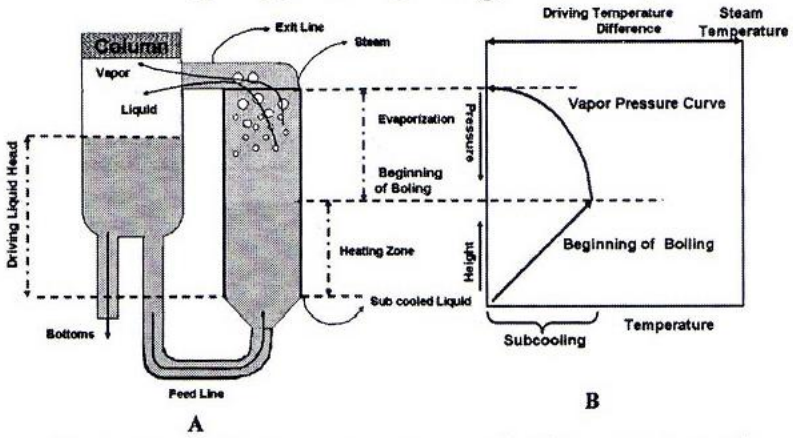
در نوع C طراحی خاصی برای بخش زیرین برج در نظر گرفته شده است تا در صورت نوسان دبی جریان خروجی از برج سطح مایع ثابتی برای جریان ورودی به ریبویلر، تضمین گردد. در نوع D ساختار زیر برج بنحوی است که جریان مایع خروجی از برج فقط یکبار گرم می‌شود. به این ریبویلر اصطلاحاً ترموسیفون عمودی یکبارگذرگویند. در این نوع ریبویلر، زمان ماند مایع بسیار کوتاه است و تنها کسرکوچکی از مایع تبخیر می‌شود.

در نوع E، یک طرح بسیار ماهرانه نشان داده شده است که مزیتهای گردش اجباری را داشته، اما معایب نصب پمپ را ندارد. این ریبویلر ترموسیفون عمودی یکبارگذر با جریان آزاد- اجباری، در برجهای تقطیری نصب می‌شود که در آنها باید یک ماده زودجوش از یک مخلوط دیرجوش جدا شود.

ریبویلرهای ترموسیفون عمودی به دو ناحیه تقسیم می‌شوند:

- ناحیه گرم‌کننده: در این ناحیه، مایع تا دمای جوش، گرم می‌شود.
- ناحیه تبخیر: در این ناحیه، مایع بطور جزئی تبخیرمی گردد. البته در این ناحیه تبخیر تحت تأثیر افت فشار هم صورت می‌گیرد (شکل (۸-۲)).

ضریب انتقال‌حرارت در ناحیه تبخیر بسیار بالاتر از ناحیه گرم‌کننده است، بنابراین تغییرات در طول این دو ناحیه اثر زیادی بر نرخ انتقال گرما دارد. در قسمت B شکل (۸-۲)، پروفایل دما در طول لوله مبدل نشان داده شده است. به خاطر فشار مایع در خط ورودی، دمای سیال ورودی به ریبویلر، زیر سرد است. در ناحیه گرم‌کننده، دما تا نقطه جوش بالا می‌رود که بستگی به هد محلی مایع دارد. جوشش، هنگامی آغاز می‌شود که مایع به دمای جوش محلی برسد، در اینجا ناحیه گرم‌کننده تمام شده و ناحیه تبخیر آغاز می‌شود. چنانچه تبخیر یک جزئی باشد، حالت مایع از منحنی فشار بخار پیروی می‌کند.



شکل (۸-۲) نمای شماتیک یک ریبویلر ترموسیفون عمودی *(A)*- پروفایل دمایی *(B)*.

در فشار اتمسفریک، طول لوله ناحیه گرم‌کننده ۵۰-۲۰ ٪ کل طول لوله است که با کاهش فشار، افزایش می‌یابد. در فرآیندهای تحت خلأ، طول ناحیه گرم‌کننده ۹۰٪ طول کل یا حتی بیشتر است. از آنجا که فقط ناحیه تبخیر باعث گردش مایع می‌شود، نرخ گردش با کاهش فشار بطور محسوسی کاهش می‌یابد تا جایی‌که ممکن است گردش مایع متوقف شود.

۸-۱-۱-۲- ترموسیفون افقی

ترموسیفون افقی نیز مانند نوع عمودی از یک مبدل پوسته و لوله معمولی تشکیل شده است و برای استفاده از آن در زیر برج، باید فضای لازم برای تجمع محصول انتهایی و جدا شدن مخلوط بخار- مایع وجود داشته باشد. سیال فرآیندی در پوسته تبخیر می‌شود، بنابراین این نوع ریبویلر باید در فرآیندهایی بکاررود که رسوب دهی نداشته یا رسوب دهی آنها درحد متوسط باشد. نصب ترموسیفون‌های افقی به پی‌ریزی[1] جداگانه نیاز دارد همچنین این ترموسیفون‌ها نسبت به نوع عمودی، فضای بیشتری را اشغال می‌کنند ضمن اینکه لوله‌کشی خارجی آنها پیچیده‌تر و پرهزینه‌تراست. در این ریبویلرها، برای اطمینان از انجام عملیات رضایت بخش، تبخیر باید تا ۵۰ درصد محدود شود. همچنین این نوع ترموسیفون برای خوراکهای ویسکوز و خوراکهایی که سطح مایع ورودی به آنها نوسان دارد، نباید بکار رود.

زمانی که بارحرارتی زیادی مورد نیاز باشد ریبویلرهای ترموسیفون عمودی به دلیل اینکه سیال فرآیندی داخل لوله‌ها قرار دارد، نسبت به حالت افقی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در این حالت با توجه به اینکه سطح انتقال حرارت بالا نیاز به طول لوله بلندتری (طول مبدل بلند) دارد، ارتفاع بخش پایینی برج از سطح زمین نیز افزایش خواهد یافت. لازم به ذکراست که برای سیال فرآیندی با ویسکوزیته متوسط نیز، ترموسیفون‌های افقی به عمودی ارجحیت دارد. همچنین بر پایه نظریه Collins، اگر ویسکوزیته سیال کمتر از ۰/۵cp باشد، استفاده از ریبویلر عمودی اقتصادی‌تر است. استفاده می‌شوند، استفاده از ریبویلر افقی مزایای زیر را دارد:

---

[1] *Fondation*

- سطح مقطع زیاد
- قرار گرفتن سیال فرآیند در قسمت پوسته، با امکان رسوب دهی کمتر و دسترسی آسان جهت تمیزکردن بیرون لوله‌ها
- انعطاف‌پذیری بالا در افزایش نرخ گذر مایع
- افزایش نقطه‌جوش کمتر از واحدهای عمودی

استفاده از لوله‌های پره‌دار می‌تواند عملکرد جوشش را در بخش پوسته مبدل‌های ترموسیفون افقی بهبود بخشد. به علت سیرکولاسیون بالای جریان فرآیندی در ریبویلرهای ترموسیفون افقی، افزایش دمای سیال فرآیندی نسبت به نوع kettle کمتر بوده و این امر موجب افزایش انتقال‌حرارت در این نوع مبدل‌ها می‌گردد.

Yilmaz مبدل‌های از نوع X، G و H از سری TEMA را برای نوع ترموسیفون پیشنهاد کرده است. انتخاب هر یک از آنها بستگی به میزان افت فشار، ضریب انتقال‌حرارت و جرم گرفتگی دارد. در اغلب موارد انواع H، J،G و E، برای این منظور استفاده می‌شوند. لازم به ذکر است میزان سیرکولاسیون در مبدل‌های ترموسیفونی بستگی به توزیع فشار در ورودی مبدل دارد که شامل موارد زیر می‌باشد:

- فشار استاتیکی سطح مایع
- افت فشار در مدخل ورودی
- افت فشار دوفازی در خروجی
- افت فشار در داخل خود مبدل

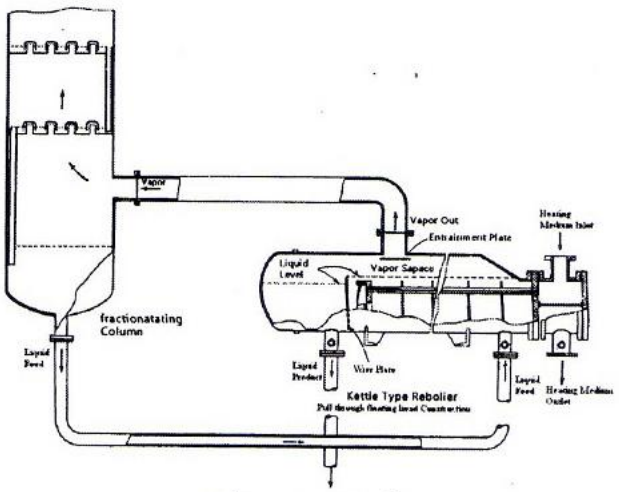
Yilmaz حداکثر سرعت خروجی از ریبویلر ترموسیفون افقی را با رابطه زیر بیان‌کرده است:

$$V_{max} = 771.15(\rho_{tph})^{-0.5} \qquad (۱-۸)$$

که در آن V_{max} حداکثر سرعت خروجی از ریبویلر (m/s) و ρ_{tph} دانسیته در فاز همگن (Kg/m^3) می باشد.

۸-۱-۱-۳- ریبویلرهای Kettle

این ریبویلرها معمولاً از یک دسته لوله U شکل که در یک پوسته قرار دارند، تشکیل شده‌اند. درون لوله‌ها سیال سرویس جریان دارد. پوسته به اندازه‌ای بزرگ است که فضای لازم برای تجمع مایع در زیر دسته لوله و جدا شدن مخلوط بخار- مایع در بالای دسته لوله، وجود داشته باشد. معمولاً حجم پوسته ۱/۴ برابر حجم دسته لوله است. در شکل(۸-۳) یک ریبویلر کتل که در انتهای یک برج تقطیر نصب شده، نشان داده شده است.



شکل (۸-۳) ریبویلر کتل

ریبویلرهای کتل دارای یک سرریز داخلی هستند که برای حفظ سطح مایع بالای دسته لوله تعبیه شده است. مایع خارج شده از ریبویلر از پشت این سرریز تأمین می‌گردد. هنگامی که سیال فرآیندی، رسوب ده است و برای تمیزکردن لوله‌ها باید عملیات مکانیکی صورت گیرد، به یک دسته لوله مستقیم و کلگی شناور Pull-Through نیاز است. با استفاده از ریبویلرهای کتل، بخش زیرین برج ساده می‌شود، زیرا نه فضای جداکننده مایع- بخار و نه فضایی برای تجمع مایع لازم است، همچنین بافل‌گذاری داخلی برج نیز به حداقل می‌رسد.

باید توجه داشت که در ریبویلر نوع کتل، اگر مایع تجمع یافته در پشت سرریز، به بیش از ۱/۲ متر از طول پوسته نیاز داشته باشد، بهتر است از یک ترموسیفون بجای آن استفاده شود. در بین انواع ریبویلرها، ریبویلرهای کتل به کمترین ارتفاع برج از کف[1] نیازدارند، بنابراین در مواردی که نیازی به پمپ شدن محصولات پایینی برج نباشد، ریبویلرهای کتل کاربرد بیشتری دارند.

در مورد رابطه بین ارتفاع برج از سطح زمین و محل ریبویلر، باید گفت که انتهای پوسته یک ریبویلر عموماً در حداقل فاصله ممکن بالای پایه قرار دارد. این فاصله با توجه به فضای مورد نیاز برای لوله‌کشی، تعیین می‌شود و معمولاً حدود ۱ متر است. برای ریبویلرهای گردش طبیعی، یک موازنه فشار در مدار ریبویلر، ارتفاع دقیق برج از سطح را تعیین می‌کند. نقاط مرجع معمول برای موازنه فشار، خط مماس انتهایی برج[2] و انتهای پوسته ریبویلر است. برای ریبویلرهای گردش اجباری، برج، معمولاً ۴/۵ متر بالای پایه قرار دارد تا NPSH مناسب برای پمپ فراهم شود. در صورت لزوم، این ارتفاع از سطح می‌تواند با کاهش NPSH مورد نیاز پمپ، تا ۱/۵ متر کاهش یابد. اما به هرحال این امر موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در هزینه پمپ می‌شود.

بطورکلی مبدل‌های کتل گرانتر از ریبویلرهای ترموسیفون هستند. در ریبویلرهای کتل، زمان ماند مایع در دمای جوش، طولانی‌تر است، بنابراین برای مواد بسیار رسوب‌ده یا فرآیندهای پلیمری، توصیه نمی‌شوند. در مقایسه‌کلی ریبویلرهای افقی، عمودی و کتل، Yilmaz چند نتیجه جالب را که از طراحی ریبویلرهای افقی به دست آمده‌اند به صورت زیر بیان‌کرده است:

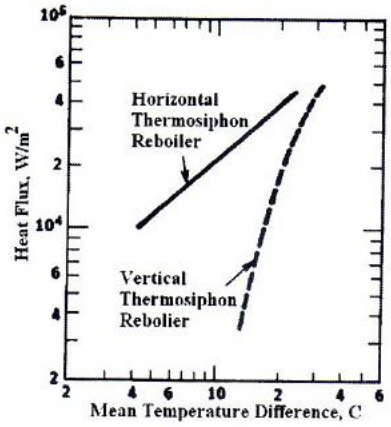
- این واحدها در یک اختلاف متوسط دمایی یکسان، دارای بالاترین شارگرمایی می‌باشند.
- ترموسیفون‌های افقی دارای عملکرد حرارتی بهتری نسبت به انواع عمودی و کتل می‌باشد.

---

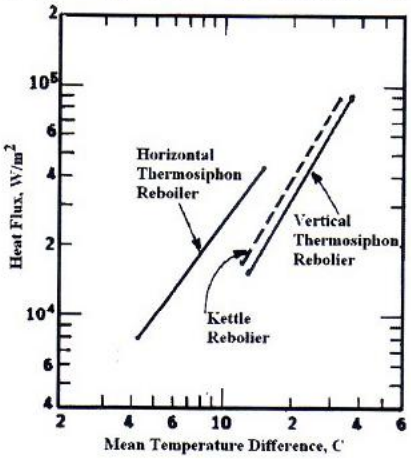
[1] .Tower elevation

[2] .Bottom Tangent Line of the Tower

نتیجه این مقایسه در شکل‌های (۸-۴-الف) و (۸-۴-ب) آورده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود، ریبویلر ترموسیفون افقی در اختلاف دمای متوسط پایین، بارحرارتی بیشتری را منتقل می‌نماید.



شکل (۸-۴-الف) داده‌های انتقال‌حرارت جوشش ریبویلرهای یک هیدروکربن خالص در فشار پایین در ریبویلرهای افقی و عمودی



شکل (۸-۴-ب) داده‌های انتقال‌حرارت جوشش ریبویلرهای یک هیدروکربن مخلوط درریبویلرهای ترموسیفون افقی و عمودی در مقایسه با یک ریبویلرکتل

۸-۱-۱-۴- ترموسیفون یکبارگذر

در این نوع ترموسیفون، خوراک ریبویلر فقط شامل مایعی است که از سینی انتهایی برج، پایین می‌ریزد، بنابراین ریبویلرهای یکبارگذر معادل یک مرحله تئوری هستند. سایر مزایای این نوع ترموسیفون مشابه انواع دیگر ترموسیفون گردش طبیعی است.

۸-۱-۱-۵- ریبویلرهای داخلی

یک ریبویلر داخلی شامل یک دسته لوله است که از طریق فلنج در سمت برج، مستقیماً داخل برج قرار داده می‌شود. در شکل (۸-۵) یک ریبویلر داخلی نشان داده شده است. از این نوع ریبویلر برای فرآیندهای با بارگرمایی کم استفاده می‌شود، چون بر اساس هزینه نصب به فوت مربع، می‌توانند بسیار اقتصادی‌تر از انواع دیگر باشند. مزایای یک ریبویلر داخلی عبارتند از:

۱. عدم نیاز به پوسته داخلی

۲. حذف لوله‌کشی گردشی

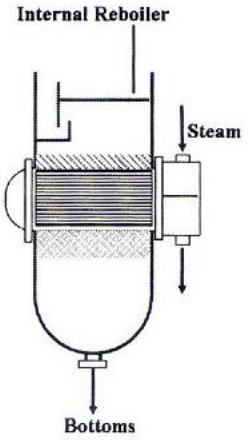
۳. عدم نیاز به بافل‌گذاری در ته برج

معایب یک ریبویلر داخلی عبارتند از:

۱. طول دسته لوله، محدود به قطر برج است.

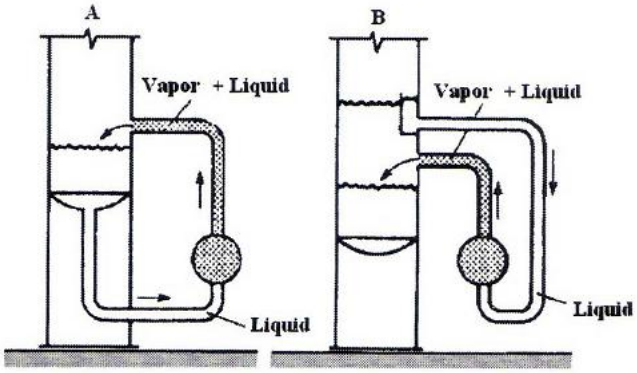
۲. ممکن است نصب فلنج روی برج نسبتاً گران باشد.

به دلیل محدودیت طول دسته لوله، ممکن است قطر مبدل به اندازه قابل توجهی بزرگ شود، تا جایی‌که استفاده از این ریبویلر مقرون به صرفه نخواهد بود. عموماً اگر قطر مورد نیاز دسته لوله بیش از ۹۱۴ mm باشد و یا قطر ستون تقطیر کوچکتر از ۱۸۳ mm باشد، استفاده از یک ریبویلر کتل اقتصادی‌تر خواهد بود.



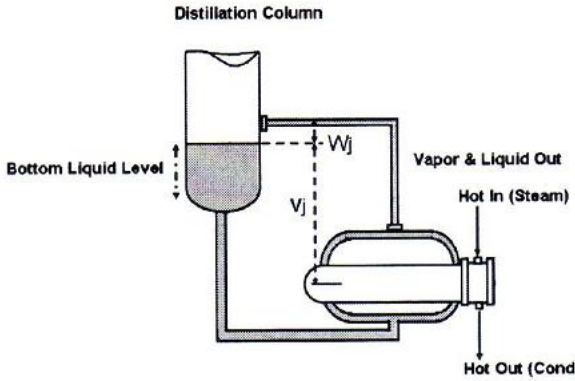
شکل(۸-۵) ریبویلر داخلی

در شکل‌های (۸-۶-الف) تا (۸-۶- د) انواع جریان سیال در مبدل‌های ترموسیفون نمایش داده شده است. در ترموسیفون افقی، جریان سیال فرآیند از داخل پوسته عبور می‌کند، در صورتیکه در ترموسیفون عمودی، جریان سیال فرآیندی وارد بخش لوله‌های مبدل می‌شود. همچنین در (۸-۶-الف) تفاوت ریبویلر نوع گردشی با نوع یکبارگذر، نشان داده شده است.

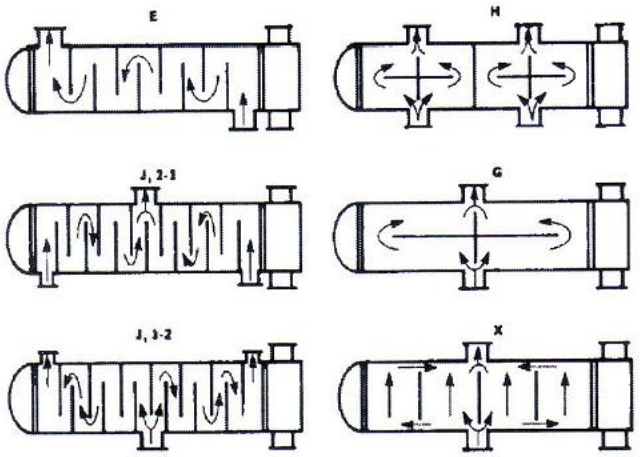


شکل(۸-۶-الف) ریبویلر ترموسیفون افقی

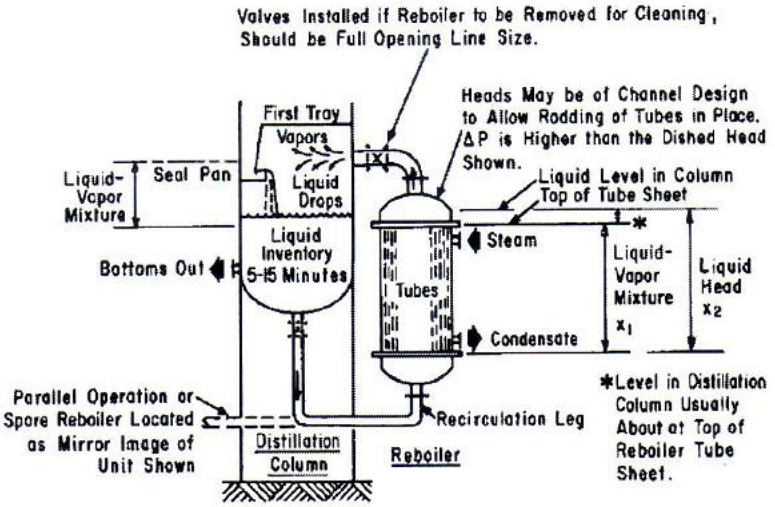
سمت چپ) سیستم گردش مجدد خوراک سمت راست) سیستم گردش یکبار گذر (که هر دو دارای گردش طبیعی می‌باشند)



شکل(۸-۶-ب) ریبویلر ترموسیفون افقی روی برج تقطیر: طراحی پوسته و لوله، جوشش در پوسته



شکل(۸-۶-ج) انواع پوسته انتخاب شده برای ریبویلرهای ترموسیفون افقی، جوشش در پوسته



شکل(۸-۶-د) ریبویلر ترموسیفون عمودی گردش طبیعی

۸-۱-۲- ریبویلرهای گردش اجباری

۸-۱-۲-۱- ریبویلرهای Pump-Through

در ریبویلرهای Pump-Through سیالی که باید تبخیر شود توسط یک پمپ وارد ریبویلر می‌شود. تبخیر ممکن است در طرف پوسته یا لوله روی دهد. از آنجا که این نوع ریبویلر گرانتر از ریبویلرهای با گردش طبیعی است فقط در حالات خاص زیر، مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱. در مورد سیالات بسیار ویسکوز یا رسوب‌ده

۲. زمانیکه نرخ گردش بالا با یک افزایش کوچک در دما مورد نیاز باشد تا تجزیه حرارتی محصول حداقل شود

۳. وقتی‌که اندازه یک ریبویلر با گردش طبیعی بطور نامعقولی بزرگ باشد، مثلاً به چندین پوسته و لوله‌کشی پیچیده نیاز باشد

۴. در سیستم‌هایی که هد هیدرواستاتیکی آنها محدود باشد

۸-۱-۲-۲- ریبویلرهای کوره‌ای

ریبویلرکوره‌ای، از یک ریبویلرکه با شعله مستقیم گرم می‌شود و خوراک مایع آن از قسمت تخلیه یک پمپ تأمین می‌شود، تشکیل شده است. ریبویلرهای‌کوره‌ای جزء‌گرانترین تجهیزات بشمار می روند و از آنها فقط زمانی استفاده می‌شود که دمای مورد نیاز به قدری بالا باشد که نتوان از بخار یا یک سیال فرآیندی استفاده‌کرد. همچنین زمانی که بار حرارتی مورد نیاز بسیار زیاد باشد، باید از کوره استفاده کرد.