

مقدمه

پیشرفت روز افزون صنایع و همگام با آن، بالا رفتن هزینه انرژی در سراسر دنیا، باعث شده است که واحدهای صنعتی با دقت و ملاحظه بیشتری نسبت به گذشته طراحی گردند و در طراحی آنها از تجهیزاتی استفاده شود که هم کارایی قابل قبولی داشته باشند و هم انرژی کمتری نسبت به تجهیزات سنتی مصرف کنند.

در بحران کنونی انرژی و نیاز به روشهای بهتر نگهداری و بهره برداری اقتصادی از انرژی، جوش آورهای ترموسیفون توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این تجهیزات در صنایع شیمیایی، پتروشیمی و بسیاری صنایع وابسته دیگر کاربرد فراوانی دارند، علاوه بر اینکه اخیراً در سایر زمینه ها نیز جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند؛ جوشش مایعات در لوله های عمودی ترموسیفون حلقه بسته در سردسازی، نیروگاههای برق و راکتورهای هسته‌ای کاربرد یافته است، از چنین سیستمی برای انتقال انرژی خورشیدی نیز استفاده می‌شود.

ویژگی عمده این جوش آورها نرخ انتقال حرارت بالا در آنهاست که باعث شده در رده تجهیزات موثر و کارآمد به حساب آورده شوند، همچنین از نظر مصرف انرژی بسیار به صرفه هستند زیرا گردش سیال در آنها به طور طبیعی صورت می‌گیرد و نیازی به استفاده از پمپ نمی‌باشد، بنابراین هزینه های نصب پمپ، مصرف انرژی و تعمیرات و نگهداری آن از واحد حذف می‌شود، نصب آسان، ابعاد کوچک و تمایل به جرم‌گیری کم از دیگر محاسن آنهاست.

در یک جوش آور ترموسیفون جریان دوفازی پیچیده‌ای وجود دارد که بر جنبه های طراحی و عملیاتی آن تاثیر می‌گذارد.

روشهایی که به طور رایج و سنتی برای طراحی جوش آورهای ترموسیفون عمودی به کار می‌روند، غالباً نتایج بسیار محافظه کارانه‌ای می‌دهند و منجر به طراحی های بیش از حد نیاز^۱ می‌شوند. علت عمده این امر در برآورد افت فشار سیال دوفازی است؛ در این روشها معمولاً افت فشار سیال دوفازی، بدون در نظر گرفتن لغزش بین فازها و الگوی جریان دوفازی محاسبه می‌شود.

یکی دیگر از دلایلی که باعث شده جوش آورهای ترموسیفونی در سالهای اخیر شهرت بیشتری یابند، این واقعیت است که طراحی جریان دوفازی بخار – مایع، اکنون با مدل‌های بهتر جریان دوفازی و پیش-بینی صحیح‌تر خواص ترموفیزیکی، با دقت بیشتری نسبت به گذشته صورت می‌گیرد.

فصل اول این پایان نامه به جوش آورها اختصاص دارد. در فصل دوم در مورد تاریخچه، سیر تکامل و موارد کاربرد ترموسیفونها در گذشته، حال و آینده بحث شده است. در مورد جریان دوفازی، در فصل سوم توضیح داده شده است و در آن مفاهیم بنیادی و معادلات اساسی جریانهای دوفازی، خواص سیالات دوفازی، الگوهای جریان دوفازی و روشهای محاسبه افت فشار و انتقال حرارت در جریان دوفازی آمده است. در فصل چهارم الگوریتمی برای طراحی جوش آور ترموسیفون عمودی ارائه شده است، در این الگوریتم الگوی جریان دوفازی تشخیص داده می‌شود و با توجه به آن افت فشار محاسبه می‌گردد همچنین متوسط ضریب انتقال حرارت در طول لوله جوش آور محاسبه می‌گردد. در نهایت با استفاده از چند مثال طراحی، دقت روش پیشنهاد شده با روشهای دیگر مقایسه می‌گردد.

^۱. Overdesign

فصل اول: جوش آورها

یک جوش آور تبخیر کننده‌ای است که گرمای نهان تبخیر را (معمولا) برای جریان خروجی از انتهای برج تفکیک کننده^۲ فراهم می‌سازد.

از نقطه نظر نوع سیال خروجی از جوش آور، می‌توان گفت که به طور عمده دو دسته جوش آور وجود دارد؛ دسته‌ای که هر دو فاز را به برج می‌فرستند تا در آنجا بخار از مایع جدا شود، و دسته‌ای که فقط بخار را به برج می‌فرستند.

جوش آورهای دسته اول هم با گردش طبیعی و هم با گردش اجباری کار می‌کنند. جوش آورهای گردش طبیعی را اصطلاحا ترموسیفون^۳ گویند. جوش آورهایی که فقط بخار را به برج برمی‌گردانند، جوش آورهای کتل^۴ نامیده می‌شوند. عملکرد جوش آورهای کتل با جوشش ظرفی^۵ توضیح داده می‌شود.

جوش آورهای ترموسیفونی تا کنون رایجترین گونه مورد استفاده در صنعت بوده‌اند. ترموسیفونهای افقی که در آنها تبخیر در سمت پوسته انجام می‌شود، معمولا در صنایع پتروشیمی به کار می‌روند. از واحدهای عمودی که در آنها تبخیر در لوله انجام می‌شود، بیشتر در صنایع شیمیایی استفاده می‌شود. در یک جوش آور ترموسیفون، بایستی هد کافی مایع فراهم باشد تا گردش طبیعی سیال در حال جوشش، برقرار باشد.

جوش آورهای گردش اجباری به پمپ نیاز دارند تا سیال در حال جوشش، در مبدل وادار به حرکت شود. این نوع جوش آورها به دلیل هزینه اضافی پمپ کردن خوراک جوش آور، به ندرت مورد استفاده

^۱. Fractionator

^۳. Thermosyphon

^۴. Kettel

^۵. Pool Boiling

قرار می‌گیرند، اما در مواردی که برای غلبه بر هد هیدرواستاتیکی محدودیتهایی وجود دارد و یا مشکلاتی در گردش سیال ایجاد می‌گردد، به ناچار از آنها استفاده می‌شود. از آنچه تا کنون گفته شد، مشخص است که نوع گردش سیال یک پارامتر بسیار مهم در جوش آور است، به طوری که در یک تقسیم بندی اساسی، جوش آورها به دو نوع اصلی طبقه بندی می‌شوند: جوش آورهای با گردش طبیعی و جوش آورهای با گردش اجباری. در ادامه در مورد این دو نوع اصلی جوش آورها توضیحات بیشتری داده می‌شود.

۱-۱) جوش آورهای گردش طبیعی

۱-۱-۱) ترموسیفون عمودی

ترموسیفون عمودی تشکیل شده است از یک مبدل پوسته و لوله معمولی که عموماً به طور مستقیم روی برج نصب می‌شود.

از آنجا که معمولاً در بخش زیرین برج فضای مورد نیاز برای جداسدن مخلوط بخار - مایع و تجمع محصول انتهایی وجود دارد، استفاده از ترموسیفون عمودی موجب می‌شود که مساحت کمی اشغال شود.

ترموسیفونهای عمودی معمولاً ارزانترین نوع جوش آورها هستند که اگر مستقیماً روی برج نصب شوند، نیاز به پی‌ریزی و زیرسازی کاهش می‌یابد، همچنین در این حالت خط تخلیه سیال فرایندی بسیار کوتاه می‌شود که باعث کاهش افت فشار بخار می‌گردد و در مجموع باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. سیال فرایندی (معمولاً سیالی که بیشترین رسوبدهی را دارد) داخل لوله‌ها فرستاده می‌شود، بنابراین تمیز کردن و نگهداری و تعمیرات آسان خواهد بود. اگر سیال گرم کننده تمیز باشد (مثل بخار) می‌توان با طراحی صفحه لوله ثابت هزینه را باز هم کاهش داد. ترموسیفون عمودی را بهتر است حداکثر تا ۵۰

درصد تبخیر (بر اساس خوراک) محدود کرد تا از عملیات نامنظم به دلیل تشکیل لخته و غیره جلوگیری شود. در هر حال آنچه در صنعت رایج است، محدود کردن تبخیر تا ۳۰ درصد است به منظور اینکه از عملیات پایدار و منظم واحد اطمینان حاصل شود. ترموسیفون‌ها را نباید برای سیالات ویسکوز و نیز در سرویس‌هایی که هد مایع خوراک متغیر است، به کار برد [1].

همان طور که پیشتر نیز اشاره شد، در صنایع شیمیایی از بین تمام انواع جوش آورها، جوش آورهای ترموسیفونی عمودی بیش از بقیه و به طور گسترده استفاده می‌شوند.

جوش آورهای ترموسیفونی در گستره وسیعی از دماها و فشارها قابل استفاده‌اند و برای حدود ۷۰٪ از عملیات تبخیر در صنایع شیمیایی به کار می‌روند.

هزینه های عملیاتی کم، نصب آسان، ابعاد کوچک، نرخ انتقال حرارت بالا و تمایل به جرم‌گیری کم، از ویژگی های قابل توجه آنها است. چنانچه این نوع جوش آورها به درستی طراحی شوند و خوب عمل کنند مایعات زمان اقامت کمی در آنها دارند که ریسک تجزیه گرمایی را حداقل می‌کند. تمام این ویژگی ها باعث شده است که این نوع جوش آورها بسیار قابل اعتماد و کار آمد باشند [2].

در شکل ۱-۱ چند نوع جوش آور ترموسیفون عمودی در اتصال با برج تقطیر نشان داده شده است. نوع A نوع استاندارد است. ترموسیفون عمودی توسط یک خط خوراک مایع به برج متصل است. معمولاً یک شیر کنترل، برای کنترل دبی مایع در لوله ورودی نصب می‌شود. مایع از پایین وارد مبدل می‌شود و پس از گرم شدن، به طور جزئی درون لوله‌ها تبخیر می‌شود. مخلوط بخار - مایع از طریق خط خروجی جوش آور را ترک می‌کند. گردش مایع با اختلاف در فشار استاتیکی بین مایع در خط ورودی و سیال به طور جزئی تبخیر شده در جوش آور، صورت می‌گیرد. برای گردش، نیازی به استفاده از پمپ نمی‌باشد بنابراین در طراحی جوش آور ترموسیفون باید دقت کافی را جهت افت فشار پایین مبذول داشت.

در عمل معمولاً فقط ۵ (مایعات غیر آلی) تا ۲۰ (مایعات آلی) درصد وزنی از مایعات تبخیر می‌شوند، بنابراین مایع قبل از تبخیر کامل چندین بار گردش می‌کند. این امر باعث جرم‌گیری کمتر می‌شود ضمن اینکه سرعت زیاد جریان و نرخ انتقال حرارت بالا را موجب می‌شود.

نصب یک پمپ در خط ورودی منجر به گردش اجباری در جوش آور می‌شود که در قسمت B شکل ۱-۱ نشان داده شده است. این امر منجر به نرخهای انتقال حرارت بالاتر به دلیل نرخ زیادتر گردش مایع می‌شود. این نوع جوش آور به خصوص در عملیات تحت خلا پیشرفته هنگامی که افت فشار داخل جوش آور یا ویسکوزیته سیال بسیار زیاد است، هدهای پایین مایع یا وقتی که اختلافات دمایی کم بین محیط گرم‌کننده و مایع در جوش آور وجود دارد کاربرد دارد.

طراحی خاصی که برای زیر برج در قسمت C شکل ۱-۱ نشان داده شده است، سطح ثابت مایع خوراک به جوش آور را حتی اگر دبی جریان خروجی از برج تغییر کند، تضمین می‌کند.

در قسمت D جوش آوری که در آن مایع خروجی از برج فقط یک بار گرم می‌شود نشان داده شده است. این جوش آور را اصطلاحاً ترموسیفون عمودی یک بار گذر گویند. در این نوع جوش آور زمان اقامت مایع بسیار کوتاه است و تنها کسر کوچکی از مایع تبخیر می‌شود.

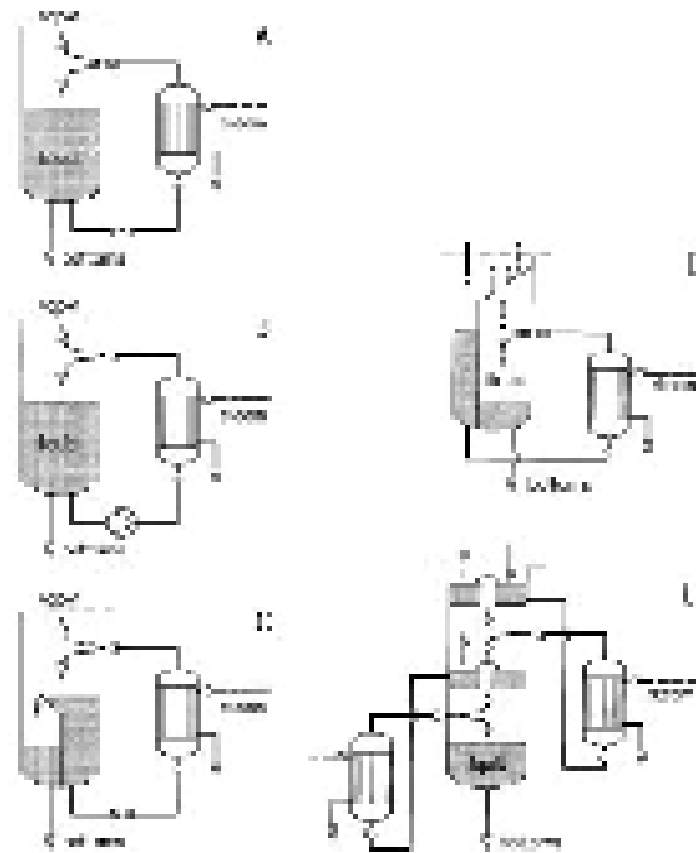
یک طرح بسیار ماهرانه که مزیت‌های گردش اجباری را دارد ولی معایب نصب پمپ را ندارد در قسمت E نشان داده شده است. این ترموسیفون جوش آور عمودی یک بار گذر با جریان آزاد-اجباری در برج‌های تقطیری نصب می‌شود که در آنها یک ماده زود جوش باید از یک مخلوط دیر جوش جدا شود [2].

در یک جوش آور ترموسیفون عمودی، یک برهم کنش چند جانبه و پیچیده بین جریان دو فاز و انتقال حرارت وجود دارد. انتقال حرارت به فشار، تعادل بخار-مایع، دبی‌ها و خواص سیستم بستگی دارد، در حالی که جریان دو فاز تحت تاثیر نرخ انتقال حرارت و افت فشار است. در [2] تاثیر این پارامترها روی عملکرد جوش آورهای ترموسیفون مطالعه شده است. در این بررسی جوش آور به دو

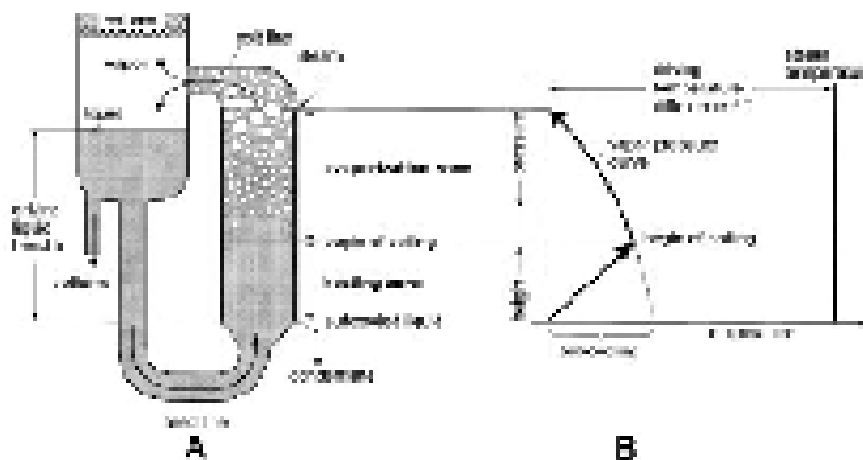
قسمت تقسیم شده است: ناحیه گرم کننده که مایع را تا دمای جوش گرم می‌کند و ناحیه تبخیر که مایع را بیشتر گرم می‌کند تا به طور جزئی تبخیر شود البته تبخیر تحت تاثیر افت فشار هم هست (flash) به شکل ۱-۲ قسمت A توجه شود. ضریب انتقال گرما در ناحیه تبخیر بسیار بالاتر از ناحیه گرم کننده است بنابراین تغییرات در طول این دو ناحیه اثر زیادی بر نرخ انتقال گرما دارد.

در قسمت B شکل پروفایل دما در طول لوله نشان داده شده است. دمای مایع ورودی به جوش آور تقریباً مشابه مایع ته برج است. به خاطر هد مایع در خط ورودی عمودی، سیال ورودی به جوش آور زیر سرد است. در ناحیه گرم کننده دما تا دمای جوش بالا می‌رود که به هد محلی مایع بستگی دارد. جوشش هنگامی آغاز می‌شود که مایع به دمای جوش محلی برسد، در اینجا ناحیه گرم کننده تمام می‌شود و ناحیه تبخیر آغاز می‌شود در ناحیه تبخیر حالت مایع چنانچه یک جزئی باشد، از منحنی فشار بخار پیروی می‌کند.

در فشار اتمسفریک طول ناحیه گرم کننده 50-20% از طول کل لوله است که با کاهش فشار افزایش می‌یابد. در سرویسهای تحت خلا پیشرفته طول ناحیه گرم کننده 90% طول کل یا حتی بیشتر است. از آنجا که فقط ناحیه تبخیر باعث گردش مایع می‌شود نرخ گردش با کاهش فشار به طور موثری کاهش می‌یابد تا جایی که گردش مایع ممکن است متوقف شود [2].



شکل ۱-۱. چند نوع جوش آور ترموسیفون: (A) جوش آور ترموسیفون عمودی، (B) جوش آور ترموسیفون عمودی با جابجایی اجباری، (C) جوش آور ترموسیفون عمودی با هد مایع ثابت، (D) جوش آور ترموسیفون عمودی یکبار گذر، (E) جوش آور ترموسیفون عمودی یکبار گذر با جابجایی آزاد-اجباری [2].



شکل ۲-۱. (A) نمای شماتیک یک ترموسیفون جوش آور عمودی (B) پروفایل دمایی.

۲-۱-۱ ترموسیفون افقی

ترموسیفون افقی 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 فرایندی در پوسته تبخیر می‌شود، بنابراین این نوع تجهیز باید در سرویسهایی به کار رود که رسوب دهی نداشته یا رسوب دهی آنها در حد متوسط باشد. در هر حال قرار دادن سیال سرویس در سمت لوله اجازه استفاده از جریانهای رسوب ده را در لوله ها می‌دهد. نصب ترموسیفونهای افقی به پیریزی جداگانه نیاز دارد، همچنین این ترموسیفونها نسبت به نوع عمودی مساحت بیشتری را اشغال می‌کنند ضمن اینکه لوله‌کشی خارجی آنها پیچیده تر و پر هزینه تر است. در نرخهای بالای گردش و برای یک ارتفاع معلوم برج، طراحی هیدرولیکی آنها چندان دشوار نیست. به طور معکوس ارتفاع برج برای یک نرخ گردش داده شده، می‌تواند تا حدی کمتر باشد. برای اطمینان از انجام عملیات رضایت بخش، تبخیر باید تا ۵۰ درصد محدود شود، همچنین این تجهیز برای خوراکهای ویسکوز و خوراکهایی که سطح آنها نوسان دارد، نباید به کار رود.

۳-۱-۱ ترموسیفون یکبار گذر

در این نوع تجهیز خوراک جوش آور، فقط شامل مایعی است که از سینی انتهایی برج پایین می‌ریزد، بنابراین جوش آورهای یکبار گذر معادل یک مرحله تئوری هستند. سایر مزایای آنها مشابه با انواع گردش کننده است. اشکال اصلی نوع یکبار گذر این است که آنها نمی‌توانند surge کافی مایع را در drawoff خوراک ایجاد کنند تا از percolation در سیستم جلوگیری شود. این اشکال در نرخهای بالای تبخیر بسیار مشهودتر است. بنابراین برای سرویسهای یکبار گذر تا جایی که رسوب دهی یا سایر فاکتورها مانع استفاده از جوش آورهای کتل نشود، استفاده از آنها پیشنهاد می‌شود.

۴-۱-۱ جوش آورهای کتل

این جوش آورها معمولاً از یک دسته لوله U شکل که در یک پوسته قرار دارند، تشکیل شده‌اند. درون لوله ها سیال سرویس (که اکثراً تمیزاست) جریان دارد. پوسته به اندازه‌ای بزرگ است که فضای لازم برای تجمع مایع در زیر دسته لوله و جداسدن مخلوط بخار - مایع در بالای دسته لوله، وجود دارد. در شکل ۳-۱ یک جوش آور کتل نمایش داده شده است.

هنگامی که سیال سرویس رسوب ده است و برای تمیز کردن لوله ها باید عملیات مکانیکی صورت گیرد، به یک دسته با لوله های مستقیم و کنگی شناور pull-through نیاز است.

جوش آورهای کتل فقط در عملیات یکبار گذر به کار می‌روند. در هر حال آنها قادرند که بارهایی نزدیک ۱۰۰ درصد را از سیالات تمیزی مثل سرد کننده ها^۶ تبخیر کنند. اگر خوراک کثیف یا رسوب - ده باشد، که بسیاری از جریانهای فرایندی چنین هستند، بارهای تبخیر باید به ۸۰ درصد محدود شوند تا بتوان کمی purge در سیستم منظور کرد.

^۶. Refrigerants

با استفاده از جوش آورهای کتل بخش زیرین برج ساده می‌شود زیرا نه فضای جداکننده مایع - بخار و نه فضایی برای تجمع مایع لازم است، بافل گذاری داخلی نیز به حداقل می‌رسد.

باید توجه داشت که در این جوش آور، معمولاً هنگامی که مایع تجمع یافته بعد از بند، به بیش از ۱/۲ متر از طول پوسته نیاز داشته باشد، بهتر است از یک ترموسیفون به جای آن استفاده شود.

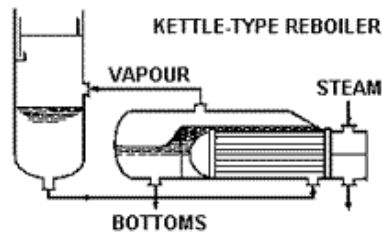
در بین انواع جوش آورها، جوش آورهای کتل کمترین ارتفاع برج از سطح^۷ را لازم دارند و بنابراین در مواردی که محصولات پایینی برج پمپ نمی‌شوند، کاربرد بسیار دارند زیرا پمپ همیشه به ارتفاع کافی برج نیاز دارد تا NPSH لازم تامین شود و گردش در جوش آور صورت بگیرد.

در مورد رابطه بین ارتفاع برج از سطح و محل جوش آور، باید گفت که انتهای پوسته یک جوش آور عموماً در حداقل فاصله ممکن بالای پایه (grade) قرار دارد. این فاصله با توجه به فضای مورد نیاز برای لوله کشی تعیین می‌شود و معمولاً حدود ۱ متر است. برای جوش آورهای گردش طبیعی یک موازنه فشاری در مدار جوش آور ارتفاع دقیق برج از سطح را تعیین می‌کند. نقاط مرجع معمول برای موازنه فشار خط مماس انتهایی برج^۸ و انتهای پوسته جوش آور است. برای جوش آورهای گردش اجباری برج معمولاً ۴/۵ متر بالای پایه قرار دارد تا NPSH مناسب برای پمپ فراهم شود. اگر لازم شود این ارتفاع از سطح می‌تواند با کاهش NPSH موردنیاز پمپ تا ۱/۵ متر کاهش یابد. اما در هر حال این امر معمولاً باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در هزینه پمپ می‌شود.

به طور کلی مبدلهای کتل گرانتز از واحدهای پوسته و لوله در سرویسهای ترموسیفون هستند، هرچند این امر ممکن است با هزینه ارتفاع برج و غیره جبران شود. در جوش آورهای کتل زمان اقامت مایع در دمای جوش طولانی‌تر است و بنابراین برای مواد بسیار رسوب ده یا سرویسهای پلیمری توصیه نمی‌شوند.

^۷ . Tower Elevation

^۸ . Bottom Tangent Line of the Tower



شکل ۱-۳. جوش آور کتل

۵-۱-۱ جوش آورهای داخلی

یک جوش آور داخلی شامل یک دسته لوله است که از طریق فلنج در سمت برج، مستقیماً داخل برج قرار داده می‌شود. در شکل ۱-۴ یک جوش آور داخلی نشان داده شده است. از این نوع واحد گاهی برای سرویس‌هایی با بار گرمایی کم استفاده می‌شود، زیرا بر اساس هزینه نصب در فوت مربع، می‌توانند بسیار اقتصادی‌تر از انواع دیگر باشند.

مزایای یک جوش آور داخلی عبارتند از:

۱- در این جوش آور به پوسته نیازی نیست.

۲- لوله‌کشی گردشی حذف شده است.

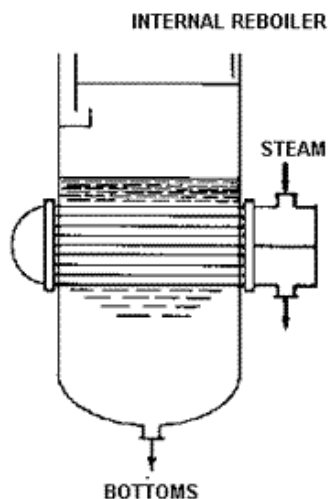
۳- به بافل گذاری در ته برج نیازی نیست.

معایب یک جوش آور داخلی عبارتند از:

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

۲- فلنج روی برج ممکن است نسبتاً گران باشد.

به دلیل محدودیت طول دسته لوله، قطر آن می‌تواند به نحو قابل توجهی بزرگ شود، تا جایی که استفاده از این جوش آور مقرون به صرفه نخواهد بود. عموماً اگر قطر مورد نیاز دسته لوله 914 mm یا بزرگتر باشد استفاده از یک جوش آور کتل بسیار اقتصادی تر خواهد بود.



شکل ۴-۱. جوش آور داخلی

۲-۱) جوش آورهای گردش اجباری

۱-۲-۱) جوش آورهای Pump-Through

جوش آورهای Pump-Through از مبدلهای حرارتی معمولی تشکیل شده‌اند که در آنها سیالی که باید تبخیر شود، از قسمت تخلیه پمپ به جوش آور ارسال می‌شود. تبخیر ممکن است در طرف پوسته یا لوله روی دهد. از آنجا که این نوع تجهیز گرانتز از جوش آورهای با گردش طبیعی است فقط در حالات خاص زیر از آن استفاده می‌شود:

(۱) گردش مثبت به دلیل سرویسهای بسیار ویسکوز یا رسوب ده مورد نیاز باشد.

۲) نرخ گردش بالا و یا یک افزایش کوچک در دما مورد نیاز باشد تا تجزیه حرارتی محصول پایینی حداقل شود.

۳) اندازه یک جوش آور با گردش طبیعی به طور نامعقولی بزرگ باشد، مثلاً به چندین پوسته و لوله-کشی پیچیده نیاز باشد.

۴) سیستمهایی که هد هیدرواستاتیکی آنها محدود باشد.

۱-۲-۲) جوش آورهای کوره‌ای

یک جوش آور کوره‌ای، همان طور که از نام آن هم مشخص است، تشکیل شده است از یک جوش آور که با آتش گرم می‌شود و خوراک مایع آن از قسمت تخلیه یک پمپ تامین می‌شود. جوش آورهای کوره‌ای گرانتترین نوع تجهیزات هستند، از آنها معمولاً فقط وقتی استفاده می‌شود که سطح دمایی مورد نیاز برای جوش آور آن قدر بالا باشد که نتوان از بخار یا یک جریان فرایندی استفاده کرد.

مراجع

[1] Cheremisinoff N. P., Cheremisinoff P. N., *Heat Transfer Equipment*, PTR Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.

[2] Arneth S., Stichlmair J., Characteristics of Thermosiphon Reboilers, *Int. J. Therm. Sci.* (2001) 40,385-391.