



شرکت

پژواک پژوه صنعت

دستگاه تبخیر کننده دو مرحله ای

وب سایت:

<http://www.ppsedu.com>

آدرس

تهران - شهرک صنعتی خاوران-سایت آهنکاران- خیابان چهارم غربی - پلاک آبی ۳۳۱۷

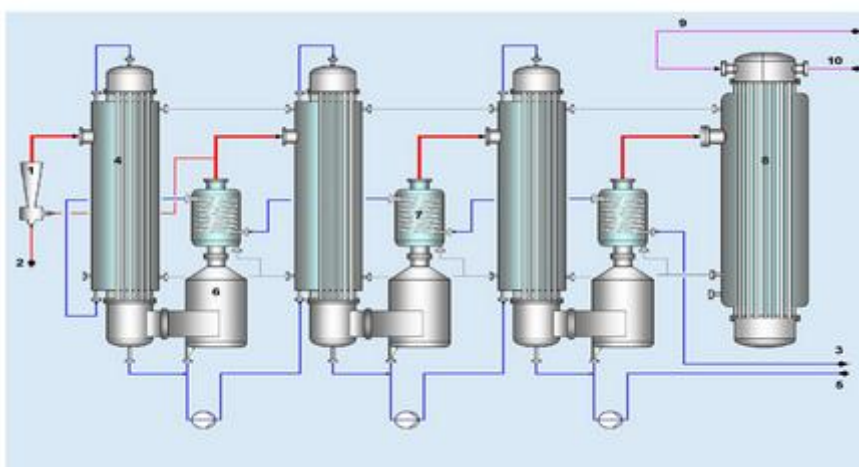
شماره تماس

021-33286250

بسمه تعالی

مقدمه

اهمیت تبخیرکننده‌ها در صنایع گوناگون برای کسانی که با آنها سروکار دارند پوشیده نیست، مخصوصاً در پالایشگاه‌های نفت و گاز برای استفاده از آب‌های نامرغوب و جلوگیری از ورود آنها به محیط زیست. آنها را بازیافت می‌کنند و به صورت آب مقطر یا آب‌های سرویس در می‌آورند که آب‌های سرویس برای شستشو استفاده می‌شود. اما آب مقطر می‌تواند استفاده‌های گوناگون داشته باشد که از جمله می‌تواند در دیگ‌های بخار برای تهیه بخار استفاده شود، لذا برای تهیه آب مقطر روش‌های گوناگونی وجود دارد که یکی از آنها روش تبخیر است که در تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای صورت می‌گیرد.



شمای کلی یک تبخیر کننده سه مرحله ای

در این جا خواص مایع تبخیر شونده و انواع تبخیرکننده‌ها و مشکلات حاکم بر آنها شرح داده می‌شود.

تبخیر

محلول موجود برای تبخیر (یا غلیظ کردن محلول)، شامل یک ماده حل شونده غیرفرار و یک حلال فرار است. در اکثریت تبخیرها، حلال آب است. در تبخیر، بخشی از حلال بخار می‌شود و یک محلول غلیظ تولید می‌شود. تبخیر کردن با خشک کردن فرق می‌کند، زیرا در تبخیر کردن، آن چه باقی می‌ماند مایع است (بعضی اوقات مایعی با لزجت سطح بالا) نه یک جامد. همین طور تبخیر با تقطیر نیز فرق دارد، زیرا در تبخیر معمولاً بخار آب، خالص است و حتی هنگامی که بخار آب مخلوط است، هیچ کوششی در مرحله تبخیر برای جداسازی بخار آب در قسمت‌های مختلف صورت نمی‌گیرد. تبخیر با بلورسازی نیز تفاوت دارد، زیرا در تبخیر تأکید بر غلیظ کردن محلول است نه بر شکل دادن و ساختن بلورها در وضعیت معین. مثلاً در تبخیر آب نمک برای تولید نمک معمولی، خط بین تبخیر و بلورسازی خیلی دور از نوک تیز بودن است. معمولاً، در تبخیر، مایع غلیظ، محصول با ارزشی است و بخار آب بعد از چگال شدن دور ریخته می‌شود، اما در یک وضعیت ویژه، عکس این مطلب صادق است. آب حاوی مواد معدنی اغلب برای مصرف در بویلرها، فرایندهای ویژه و مصرف انسان، تبخیر می‌شود و محصول عاری از مواد جامد است. این روش اغلب، تقطیر آب نامیده می‌شود، اما از دید فنی، تبخیر می‌باشد. فرآیندهای تبخیر در مقیاس بزرگ

توسعه یافته است و برای تهیه آب شیرین از آب دریا به کار می رود. فقط مقدار کمی از کل آب تغذیه بازیافت و شیرین می شود و باقی مانده به دریا برمی گردد.

خواص ویژه مایع:

مشکل اساسی تبخیر کاملاً به وسیله خاصیت مایعی که باید غلیظ شود تحت تأثیر قرار می گیرد. تغییرات وسیعی در خواص مایع وجود دارد (که تشخیص و تجربه را در طراحی و عملیاتی کردن تبخیرکننده‌ها طلب می کند)، که این عملیات را از انتقال حرارت ساده به یک هنر مجزا مبدل می کند. بعضی از مهمترین خواص مایع در حال تبخیر به شرح زیر است:

۱. **غلظت:** مایع رقیق ورودی به تبخیرکننده، ممکن است به اندازه کافی رقیق باشد. اما هم چنان که غلظت افزایش می یابد، محلول بیشتر و بیشتر حالت خاص به خود می گیرد. چگالی و لزجت با حجم مواد جامد افزایش می یابد تا این که محلول اشباع شود یا این که به خاطر خود مایع، انتقال حرارتی صورت نگیرد. با جوش دادن بیشتر مایع اشباع شده، کریستال تشکیل می شود که باعث انسداد لوله ها می شود.
۲. **کف کردن:** بعضی مواد، مخصوصاً مواد آلی، در مدت تبخیر کف تشکیل می دهند. کف پایدار، با بخار آب خروجی بیرون می رود و باعث کاهش بخار خروجی می شود. در بسیاری از حالت ها، ممکن است کل مایع در جوشش زیاد به همراه بخار آب خارج شود.
۳. **حساسیت دما:** بعضی از مواد شیمیایی ظریف، محصولات دارویی و غذاها، در حین حرارت دیدن متوسط در زمان نسبتاً کوتاه، صدمه می بینند. در تغلیظ چنین موادی، تکنیک های ویژه ای هم برای کاهش دمای مایع و هم برای مدت حرارت دادن، لازم است.
۴. **رسوب:** بعضی محلول ها روی سطح حرارتی، جرم تشکیل می دهند که باعث کاهش شدید ضریب انتقال حرارت می شود. در چنین حالتی باید تبخیر کننده را از کار انداخت و جرم ها را از بین برد.
۵. **مواد ساختمانی تبخیرکننده:** معمولاً از بعضی انواع فولاد ساخته می شوند، اما بعضی از محلول ها، فلزات آهنی را مورد حمله قرار می دهند یا آنها را آلوده می کنند. بعضی مواد گران قیمت ممکن است در ساختمان تبخیر کننده برای جلوگیری از خوردگی به کار رود که باید نرخ انتقال حرارت بالایی داشته باشند تا گرانی را توجیه کند. بعضی خواص مایع هم باید توسط طراح در نظر گرفته شود، مثل: حرارت ویژه، غلظت، نقطه انجماد، سمی بودن، خطرات انفجار، رادیو اکتیویته و عملیات استریل.

عملیات یک مرحله ای و چند مرحله ای

بیشتر تبخیرکننده‌ها به وسیله بخار چگال شونده بر روی لوله های فلزی، حرارت داده می شوند. تقریباً همیشه موادی که تبخیر می شوند، درون لوله ها جریان دارند. معمولاً بخار، در فشار پایین یعنی زیر ۳ بار می باشد. کاهش دمای جوش مایع، اختلاف دمای بین بخار و مایع جوشنده را افزایش می دهد که موجب افزایش نرخ انتقال حرارت در تبخیر کننده می شود. در تبخیر کننده های یک مرحله ای، بخار به صورت غیر مؤثر (با کارایی پایین) استفاده می شود. در تبخیر کننده یک مرحله ای برای

تبخیر یک پوند آب حدود یک تا یک و سه دهم پوند بخار مصرف می شود. در تبخیر کننده دو مرحله ای، بخار آب تولید شده با بخار ورودی به سیستم، ترکیب می شود و در مرحله دوم مورد استفاده قرار می گیرد. در این مرحله بخار آب تولید شده به وسیله واحد جرم بخار ورودی به سیستم تقریباً دوبرابر است. به طور کلی، روش عمومی افزایش تبخیر در واحد جرم بخار ورودی به سیستم، با استفاده از سری های تبخیر کننده ها، بین منبع بخار و چگالنده، تبخیر چند مرحله ای نامیده می شود.

انواع تبخیر کننده ها

۱. تبخیر کننده های عمودی با لوله دراز

• جریان صعودی یا Climbing film

• جریان نزولی یا Falling film

• چرخش وادار شده یا Forced circulation

۲. تبخیر کننده های مغشوش یا Agitated-film

تبخیر کننده های یک بار گذر و تبخیر کننده های چرخشی

در تبخیر کننده های یک بار گذر، مایع تغذیه فقط یک بار از میان لوله ها عبور می کند، بخارهایش را آزاد می کند و به صورت مایع غلیظ از واحد بیرون می رود. همه تبخیر در یک بار گذر از لوله ها، انجام می شود.

نسبت تبخیر به تغذیه (خوراک ورودی) در واحد یک بار گذر محدود است. بنابراین، این تبخیر کننده ها خیلی خوب با عملیات چند مرحله ای سازگار هستند، طوری که کل مقدار غلظت، می تواند روی چند مرحله پخش شود. تبخیر کننده های مغشوش همیشه به صورت یک بار گذری کار می کنند، تبخیر کننده های صعودی و نزولی نیز می توانند به این روش به کار گرفته شوند. تبخیر کننده های یک بار گذر، مخصوصاً برای مواد حساس به حرارت مفید هستند. در خلأ خیلی بالا، دمای مایع می تواند پایین نگه داشته شود. با یک بار عبور سریع از میان لوله ها، مایع غلیظ در زمانی کوتاه در دمای تبخیر است و به محض این که تبخیر کننده را ترک کرد می تواند سریعاً سرد شود.

در تبخیر کننده های چرخشی یک حوض مایع درون تجهیزات است. خوراک ورودی با مایع درون حوض مخلوط می شود و هر دو از لوله ها عبور می کنند. مایع تبخیر نشده از لوله ها تخلیه می شود و به حوض بر می گردد. به طوری که فقط بخشی از کل تبخیر در یک گذر رخ می دهد. همه تبخیر کننده های چرخشی وادار شده، از این نوع هستند. تبخیر کننده های جریان بالا نیز معمولاً از این نوع هستند. مایع غلیظ شده، از حوض بیرون کشیده می شود، در غیر این صورت به علت بالابودن غلظت، چگالی، لزجت و نقطه ی جوش، ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد. این نوع تبخیر کننده ها، برای غلیظ کردن مایعات حساس به دما، مناسب نیستند. اگر چه با بالا بردن خلأ، دمای کل مایع پایین می آید و در ظاهر این دما برای این نوع مواد غیرمخرب است، اما به دلیل تماس مکرر مایع با لوله های داغ، مقداری از مایع به دمای خیلی بالایی می رسد که مطلوب نیست. اگر چه زمان متوسط ماندگاری مایع در ناحیه حرارتی ممکن است کوتاه باشد، ولی بخشی از مایع برای زمان قابل ملاحظه ای در تبخیر

کننده باقی می ماند که همین زمان حتی برای مقدار کمی از مواد حساس به حرارت، مثل غذاها، باعث فساد کل محصول می شود. اما تبخیرکننده های چرخشی می توانند در دامنه وسیعی از غلظت، بین خوراک ورودی و مایع غلیظ، در یک واحد یک مرحله ای عمل کنند و خیلی خوب با تبخیر یک مرحله ای سازگار می شوند. آنها می توانند یا با چرخش طبیعی که جریان درون لوله ها به وسیله اختلاف چگالی تأمین می شود، کار کنند یا با چرخش وادار شده که جریان درون لوله به وسیله پمپ تأمین می شود، کار کنند.

تبخیرکننده های با گردش وادار شده (Forced circulation evaporators)

در تبخیرکننده های با گردش طبیعی، مایع وارد لوله ها می شود. هم چنان که بخار آب در لوله ها شکل می گیرد سرعت خطی تا اندازه ای افزایش می یابد به طوری که نرخ انتقال حرارت در حد کلی رضایت بخش است. اما وقتی مایعات لزج در واحد گردش طبیعی در جریان باشد، ضریب کلی به طور غیراقتصادی پایین است. ضرایب بالاتر در تبخیرکننده های گردش وادار شده، به دست می آید. در اینجا پمپ گریز از مرکز، مایع را به لوله ها پمپ می کند. لوله ها تحت ارتفاع استاتیکی کافی برای جلوگیری از جوشیدن مایع در لوله ها هستند. هم چنان که ارتفاع استاتیکی جریان مایع از گرم کننده تا فضای بخار آب کاهش می یابد، مایع، حرارت فوق العاده زیادی می بیند (superheat) و به یک مخلوط بخار آب ارسال می شود و درست قبل از ورود به بدنه تبخیرکننده، به خط خروجی مبدل حرارتی، افشانده می شود. مخلوط بخار آب و مایع به یک صفحه منعکس کننده در فضای بخار آب، برخورد می کند. مایع به ورودی پمپ برمی گردد و با خوراک ورودی مخلوط می شود، و بخار آب نیز بالای بدنه تبخیر کننده را به سمت چگالنده یا مرحله بعدی، ترک می کند. بخشی از مایع هم که جداکننده را ترک می کند به طور دائم بیرون کشیده می شود. در موارد دیگر از مبدل های عمودی یک بارگذر استفاده می شود. در هر دو نوع، انتقال حرارت مخصوصا هنگامی که دارای مایعات رقیق باشند، بالا است. اما بزرگترین بهبود در تبخیر گردش طبیعی زمانی است که دارای مایع لزج باشند. برای مایعات رقیق، بهبود به وسیله گردش وادار شده، هزینه های افزوده شده پمپاژ را نسبت به گردش طبیعی توجیه نمی کند، اما برای مواد چسبنده، مخصوصا زمانی که فلزات گران قیمت باید استفاده شوند، هزینه های افزون توجیه پذیرند.

مثال این کار تغلیظ سود سوزآور است که در تجهیزات نیکی انجام می شود. در تبخیرکننده های چند مرحله ای که مایع غلیظ لزج تولید می کنند، ممکن است مراحل اولیه از نوع گردش طبیعی باشند و بقیه که دارای مایع لزج تر هستند از نوع گردش وادار شده باشند. به علت سرعت بالا در تبخیر کننده های با گردش وادار شده، زمان قرارگیری مایعات درون لوله در برابر حرارت پایین است (۱ تا ۳ ثانیه)، به طوری که مایعات حساس به حرارت به خوبی در آنها تغلیظ می شوند. هم چنین در تبخیر مایعات نمکی یا آنهایی که تمایل به ایجاد کف دارند، مؤثر است.

تبخیرکننده های مغشوش Agitated-film evaporators

مقاومت اصلی در برابر انتقال حرارت کلی از بخار به مایع در حال جوش در یک تبخیرکننده، ناشی از جدار مایع است. برداشتن این مقاومت به هر طریق، باعث بهبودی قابل ملاحظه ای در ضریب انتقال حرارت می شود. در تبخیرکننده های لوله ای دراز مخصوصا دارای گردش وادار شده، سرعت مایع بالاست. مایع تا حد زیادی مغشوش و نرخ انتقال حرارت بزرگ است. یکی از راه

ها، استفاده از همزن مکانیکی است. این، نوعی تبخیرکننده ی جریان اصلاحی است که دارای لوله پوشش دار و حاوی همزن داخلی است. خوراک ورودی از بالای بخش پوشش دار وارد می شود و به وسیله تیغه های عمودی یک همزن، درون یک ورقه نازک بسیار مغشوش، پخش می شود. مایع غلیظ از انتهای بخش پوشش دار بیرون می رود و بخار آب تولیدی از ناحیه در حال تبخیر بالا می رود و درون جدا کننده ی بدون پوشش می ریزد که از لوله های تبخیرکننده گشادتر است. در جدا کننده، تیغه های همزن مایع ورودی همراه بخار آب را به سمت صفحات عمودی ساکن پرتاب می کند. قطرات، روی این صفحات به هم می پیوندند و به تبخیر کننده برمی گردند. بخار آب بدون مایع از بالای واحد و از میان خروجی ها بیرون می رود. مزیت عمده یک تبخیر کننده مغشوش، دادن نرخ بالای انتقال حرارت به مایعات لزج است. محصول ممکن است مایع لزجی در دمای تبخیر، داشته باشد. هم چنان که ضریب کلی انتقال حرارت با افزایش لزج بودن در دیگر تبخیر کننده ها افت می کند، اما در این نوع، افت، کم است. برای مواد بسیار لزج، ضریب انتقال حرارت تا حد قابل ملاحظه ای در تبخیرکننده های گردش وادار شده، بزرگتر است و در واحدهای گردش طبیعی، خیلی بزرگتر. تبخیرکننده های نوع مغشوش، مخصوصا برای محصولات لزج حساس به حرارت نظیر ژلاتین، لاستیک، آنتی بیوتیک و آب میوه ها مؤثر است. از عیب هایش، قیمت بالا، قطعات متحرک داخلی، که به نگه داری قابل توجهی نیاز دارند، و ظرفیت کم واحدهای انفرادی است که خیلی زیر ظرفیت تبخیرکننده های چند لوله ای است.

کارایی تبخیرکننده های لوله ای

مقیاس اصلی کارایی تبخیرکننده های لوله ای گرم شونده به وسیله بخار، ظرفیت و مزیت اقتصادی است. ظرفیت به عنوان مقدار آب بخار شده برحسب پوند، در ساعت است. مزیت اقتصادی، مقدار بخار آب ایجاد شده برحسب پوند به یک پوند بخار تزریق شده به واحد است. در تبخیرکننده های یک مرحله ای، عدد مزیت اقتصادی، تقریبا همیشه زیر یک است. اما در تجهیزات چند مرحله ای تا حدقابل ملاحظه ای بالا است. مقدار مصرف بخار برحسب پوند در ساعت نیز مهم است و مساوی است با ظرفیت تقسیم بر مزیت اقتصادی.

ظرفیت تبخیرکننده

نرخ انتقال حرارت در سطوح حرارت دهنده ی تبخیرکننده چنین است:

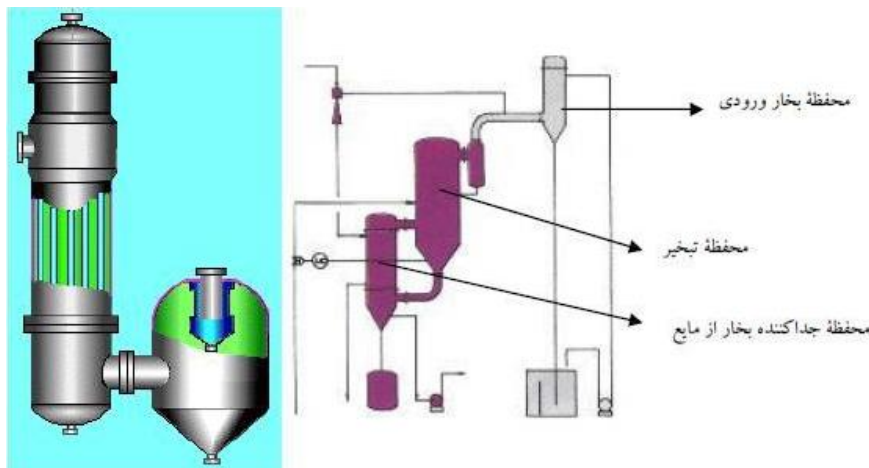
U : ضریب انتقال حرارت، A : مساحت سطح انتقال حرارت، ΔT : افت دمای کلی است.

$$Q=U.A.\Delta T$$

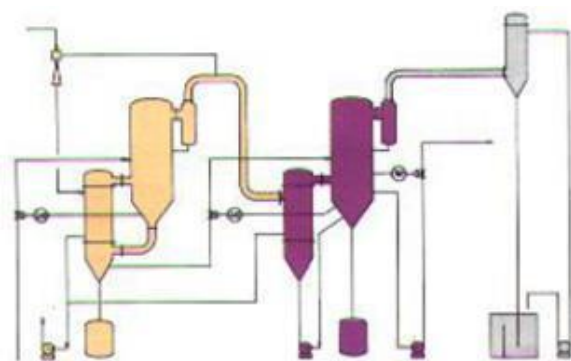
اگر دمای خوراک ورودی به تبخیرکننده در دمای جوش باشد، متناسب با فشار مطلق آن در فضای بخار آب، همه حرارت های منتقل شده از طریق سطح حرارت دهنده، برای تبخیر به کار می رود و ظرفیت متناسب با Q است. اگر خوراک ورودی سرد باشد، گرمای زیادی باید انتقال یابد تا به دمای جوش برسد و متناسب با آن ظرفیت برای مقدار داده شده Q ، کاهش می یابد زیرا گرمای استفاده شده برای گرم کردن خوراک ورودی برای تبخیر به کار نمی رود. برعکس اگر دمای نقطه ی جوش در فضای بخار آب بالا باشد، بخشی از خوراک ورودی به صورت تعادل آدیابانیک سریع در فشار فضای بخار آب تبخیر می شود و ظرفیت بزرگتر از ظرفیت مترادف با Q است. این فرآیند تبخیر آبی نامیده می شود. افت واقعی دما در سراسر سطح حرارت

دهنده به محلول در حال تبخیر، اختلاف فشار بین بخار و فضای تبخیر در بالای مایع در حال جوش و عمق مایع بر روی سطح حرارت دهنده، بستگی دارد. در بعضی تبخیرکننده ها سرعت مایع درون لوله ها نیز اختلاف دما را تحت تأثیر قرار می دهد، زیرا افت اصطکاک در لوله ها، فشار مؤثر مایع را افزایش می دهد. اما در تبخیرکننده های واقعی نقطه جوش یک محلول به وسیله دو عامل افزایش نقطه جوش و ارتفاع مایع، تحت تأثیر قرار می گیرد.

بسیاری از تبخیرکننده ها با حرارت ناشی از میعان بخار آب در لوله های فلزی، گرم می شوند. در اکثر مواقع ماده ای که گرم می شود در لوله قرار می گیرد. علت این موضوع سادگی شستشوی لوله ها می باشد زیرا مایع غلیظ رسوب بیشتری می دهد.



وقتی از یک تبخیر کننده استفاده شود، بخار حاصل از مایع در حال جوش به مایع تبدیل می شود و دور ریخته می شود. به این روش، تبخیر یک مرحله ای گویند که روش ساده و با هزینه ساخت پایین می باشد. اگر بخار خروجی از یک تبخیر کننده وارد محفظه بخار تبخیرکننده دیگری شود و بخار حاصل از این تبخیرکننده وارد مبرد گردد، در این عمل از دو دستگاه تبخیرکننده استفاده کرده ایم، اما بخار حاصل از مرحله اول به جای دور ریخته شدن وارد یک تبخیرکننده دیگر می شود و در آنجا صرف تبخیر محلول می شود. در این حالت اقتصاد بخار را بهبود داده ایم. یعنی با همان میزان بخار ورودی از **utility** تقریباً دو برابر قبل تبخیر انجام داده ایم. با این کار هزینه عملیاتی کاهش می یابد، یعنی انرژی کمتری نیاز است، حال آنکه هزینه ساخت دستگاه افزایش یافته است.



عملکرد تبخیر کننده های چند لوله ای

معیارهای اصلی عملکرد تبخیرکننده لوله‌ای که با بخار آب گرم می‌شود ظرفیت دستگاه و فاکتورهای اقتصادی است. ظرفیت طبق تعریف برابر تعداد کیلوگرم های آبی است که در هر ساعت تبخیر می‌شود. منظور از فاکتور اقتصادی تعداد کیلوگرم‌های بخار ایجاد شده به ازای هر کیلوگرم بخار آب است. در تبخیر کننده یک مرحله‌ای فاکتور اقتصادی همیشه کمتر از ۱ است ولی در دستگاه چند مرحله‌ای این مقدار خیلی بزرگ است. مصرف بخار آب بر حسب کیلوگرم در هر ساعت نیز اهمیت دارد که برابر ظرفیت تقسیم بر ضریب اقتصادی می‌باشد.

ظرفیت تبخیر کننده

سرعت انتقال گرما Q در سطح گرم‌کننده یک تبخیرکننده که طبق تعریف ظرفیت کل انتقال گرما است، به سه عامل بستگی دارد: مساحت سطح انتقال گرمای کل (A)، ضریب انتقال گرمای کل (U)، و افت دمای کل (ΔT). اگر خوراک تبخیر کننده در دمای جوش مطابق با فشار مطلق بخار باشد همه گرمای انتقال به سطح گرم‌کننده برای تبخیر در دسترس است و ظرفیت متناسب با Q است اگر خوراک سرد باشد گرمای مورد نیاز برای گرم کردن آن تا نقطه جوش بسیار زیاد است و ظرفیت برای یک Q معین کاهش می‌یابد چون گرمای صرف شده برای گرم کردن خوراک تا نقطه جوش، برای تبخیر در دسترس نیست. بر عکس اگر خوراک دمایی بالاتر از دمای نقطه جوش خود داشته باشد. بخشی از خوراک بطور خود به خود با تعادل آدیاباتیک با فشار فضای بخار تبخیر می‌شود و ظرفیت بیشتر از حالتی است که با Q متناسب بود. به این فرآیند تبخیر ناگهانی می‌گوئیم. مقدار واقعی افت دمای سطح گرم‌کننده به نوعی به محلولی که تبخیر می‌شود، به اختلاف فشار بین بخار آب و بخارهای بالای مایع در حال جوش و به عمق مایع در سطح گرم‌کننده بستگی دارد. در بعضی از تبخیر کننده ها سرعت مایع در لوله ها افت دما را زیاد می‌کند چون تلفات ناشی از اصطکاک در لوله ها فشار موثر مایع را افزایش می‌دهد. وقتی محلول خصوصیات آب خالص را دارد، اگر فشار و دمای بخار در حال میعان مشخص باشد، نقطه جوش محلول از جدول بخار آب حاصل می‌شود. در تبخیر کننده های واقعی نقطه جوش محلول با افزایش نقطه جوش و فشار مایع تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

صعود نقطه جوش و قاعده دورنیک: فشار بخار محلول آبی از فشار بخار آب خالص در همان دما کمتر است. در نتیجه در فشاری خاص نقطه جوش محلول بالاتر از نقطه جوش آب خالص می‌باشد. افزایش نقطه جوش آب در محلول را صعود نقطه جوش (BPE) می‌گوئیم. در محلول های رقیق و محلول های کلئیدی آلی مقدار افزایش کوچک است ولی برای محلول های غلیظ آلی این مقدار حتی به ۸۰ می‌رسد برای محلولهای غلیظ مقدار BPE از قاعده تجربی بنام قاعده دورنیک محاسبه می‌شود. این قاعده بدین صورت است که نقطه جوش محلولی معین، تابع خطی از نقطه جوش آب خالص در همان فشار است. در نتیجه اگر نمودار نقطه جوش محلول بر حسب نقطه جوش آب در همان فشار رسم شود خط راستی بدست می‌آید برای غلظت های مختلف خطوط مختلفی حاصل می‌شود. در تبخیر کننده های با لوله بلند و عمودی که جریان مایع رو به بالاست، بخار از قسمت فوقانی تبخیر کننده وارد جداره هایی که لوله ها را می‌پوشاند می‌شود و به طرف پایین جریان می‌یابد. بخار ورودی گرمای زیادی را دریافت می‌کند و درجه حرارت آن به T_b می‌رسد دمای بخار فوق گرم حاصل خیلی سریع کاهش یافته و به دمای نقطه اشباع یعنی T_s می‌رسد. در قسمتهای زیادی از سطح گرم‌کننده این دما بدون تغییر می‌ماند.

فاکتور اقتصادی تبخیر کننده‌ها

عامل اصلی موثر بر فاکتور اقتصادی یک سیستم تبخیر کننده، تعداد دستگاه‌های تبخیر (مراحل) است. در طراحی با توجه به تعداد مراحل، آنتالپی تبخیر بخار آب ممکن است یک یا چند بار استفاده می‌شود. فاکتور اقتصادی تبخیر کننده‌ها همچنین به دمای خوراک نیز بستگی دارد. در مرحله اول اگر دما پایین نقطه جوش باشد، مقداری از آنتالپی تبخیر بخار آب صرف گرم کردن خوراک می‌شود و فقط بخشی از آنتالپی برای تبخیر به کار می‌رود. اگر دمای خوراک بالای نقطه جوش باشد از آنجا که آنتالپی تبخیر بخار آب بیش از مقدار است، خوراک به طور ناگهانی تبخیر می‌شود. در نتیجه از لحاظ کمی فاکتور اقتصادی یک تبخیر کننده به موازنه آنتالپی ماده بستگی دارد. در تبخیر کننده یک مرحله ای گرمای نهان حاصل از میعان بخار آب به سطح گرم کننده منتقل شده تا آب را از محلول در حال جوش تبخیر کند. دو موازنه آنتالپی، اولی برای بخار آب و دومی برای بخش مایع یا بخار خوراک، نیاز است.

دمای بخار آب در حال میعان را T_s ، دمای جوش مایع در تبخیر کننده را T و دمای خوراک را T_f فرض کنید. در اینجا می‌توان فرض کرد که هیچ نشست و یا ماندگی نداریم، همچنین جریان گازهای غیر قابل میعان ناچیز است و تلفات گرمایی در تبخیر کننده قابل توجه نیست. بخار آبی که وارد محفظه بخار آب می‌شود باید گرمای فوق العاده‌ای داشته باشد و ماده حاصل از میعان که از محفظه بخار آب خارج می‌شود باید تا زیر نقطه جوش سرد شود گرمای لازم برای گرم کردن و سرد کردن ماده حاصل از میعان بسیار کوچک است. در نتیجه صرف نظر کردن از این گرما در موازنه آنتالپی قابل قبول است. خطای کمی که در این تقریب بیش می‌آید با نادیده گرفتن تلفات گرمایی که در محفظه بخار آب بوجود می‌آید یکدیگر را خنثی می‌کنند. با این فرض ها، اختلاف بین آنتالپی بخار آب و بخش حاصل از میعان برابر گرمای نهان میعان بخار آب λ_g می‌باشد.

شرح دستگاه تبخیر کننده دو مرحله‌ای

به طور کلی این دستگاه از دو قسمت مجزا تشکیل شده است.

۱- دیگ بخار

۲- ستون‌های تبخیر کننده و سرد کننده

دستگاه دیگ بخار: این دستگاه برای تولید بخار با فشار یک بار نسبی طراحی شده است. که شامل یک استوانه عایق بندی می‌باشد. در داخل دیگ بخار یک عدد هیتر نصب شده است. بر روی مخزن عایق بندی شده، یک دریچه قرار دارد که به وسیله آن می‌توان در مخزن را از آن جدا و آب مقطر به داخل آن تزریق نمود. دقت گردد که دریچه باید دقیق و محکم بسته شود. بر روی این مخزن یک عدد فشارسنج گیج نصب شده است که در هر لحظه فشار داخلی مخزن را نمایش می‌دهد. در کنار فشارسنج یک عدد کنترل کننده قرار دارد که فشار سیستم را کنترل می‌کند. در سمت راست دستگاه، تابلو فرمان نصب شده که بر روی این تابلو یک کلید سه فاز قرار دارد و این کلید هیتر داخل مخزن را روشن و خاموش می‌کند.

هشدار ۱: حتما حداقل ۷۵ درصد دیگ بخار را از آب مقطر پر نمایید.

هشدار ۲: در صورتی که سطح آب از سطح هیتر کمتر شود، دستگاه بصورت خودکار هیتر را خاموش می‌کند. در صورتی که کلید دستگاه را روشن نمایید و مشاهده کنید که مخزن گرم نمی‌شود و یا فشار از روی صفر بار افزایش نمی‌یابد، آب مخزن کمتر از سطح هیتر بوده و باید مخزن را تا ۷۵ درصد از آب پر نمایید.

هشدار ۳: برق ورودی به دستگاه ۳ فاز می‌باشد.

هشدار ۴: زمانی که مخزن از آب خالی شده، هرگز هیتر را روشن نکنید چون ممکن است باعث آسیب دیدن هیتر دیگ شود.

دستگاه تبخیرکننده دو مرحله ای

این دستگاه از دو ستون شفاف، یک عدد کندانسور، یک عدد فشارسنج، دو دماسنج و تعدادی شیر و مسیر لوله‌های متفاوت تشکیل شده است. در داخل هر ستون یک عدد کوئل حرارتی تعبیه شده است. کوئل مخزن اول (سمت راست) با بخار مستقیم از دیگ بخار تغذیه می‌شود و کوئل مخزن دوم با استفاده از بخار ستون اول گرم می‌شود. زیر هر دو ستون یک دماسنج نصب شده که مستقل از همدیگر، خاموش و روشن می‌شوند.

کندانسورها: در قسمت زیر ستون، یک عدد کندانسور نصب شده که خروجی های بخار و ته ماند تبخیرکننده‌ها، وارد این مبدل حرارتی (حمام آب) شده، سرد شده و سپس از دستگاه خارج می‌گردد.

دقت گردد که هرگز فشار مخزن شفاف اول از 0.3 بار تجاوز نکند. در صورتی که فشار از این مقدار بیشتر شود، باید مسیر بخار

کوئل مخزن شفاف دوم را باز نموده تا بخار بالای مخزن وارد کوئل شده و فشار مخزن کاهش یابد. به طور کلی اندازه‌های قطعات دستگاه به قرار زیر است:

110 mm	قطر مخزن شفاف سمت راست
114 mm	قطر مخزن شفاف سمت چپ
1 m	طول کوئل‌ها
8 mm	قطر کوئل‌ها

هدایت متر: این ابزار برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی محلول ارایه شده است. زمانی که غلظت املاح در محلول بیشتر باشد،

این ابزار هدایت بیشتری را نمایش می‌دهد.

به عنوان مثال با اندازه‌گیری هدایت آب مقطر، حدوداً عدد ۲۳ میکرو زیمنس بر روی نمایشگر ابزار مشاهده می‌شود.

شیرها:

V₁: شیر روی دیگ بخار. با باز کردن این شیر بخار از دیگ خارج می‌شود.

V₂: ورودی آب شهری به مخزن اول

V₃: ورودی آب شهری به کندانسور

V₄: خروجی مایع از زیر مخزن شفاف

V₅: خروجی محلول از مخزن شفاف دوم

V₆: ورودی بخار از مخزن اول به کوئل مخزن دوم

V₇: ورودی محلول از مخزن اول به مخزن دوم

V₈: خروجی بخار از مخزن اول به اتمسفر

V₉: خروجی بخار از مخزن دوم

V₁₀: خروجی بخار از مخزن اول و دوم به اتمسفر

روش انجام آزمایش

مرحله اول

- ۱- دیگ بخار را روشن کنید.
- ۲- شیر V₂ را باز کنید تا مخزن شفاف اول تا ارتفاع ۳۰ سانتیمتر از آب پر شود و سپس شیر را ببندید.
- ۳- یک نمونه از آب ورودی (آب شهری) را برداشته و هدایت آن را اندازه‌گیری نمایید. برای این کار شیر V₄ را باز کرده و یک نمونه از آب آن را بر دارید و با هدایت متر، هدایت الکتریکی آن را اندازه‌گیری نمایید.
- ۴- شیر V₃ را باز نمایید تا آب شهری وارد کندانسور شود. در این حالت پس از پر شدن کندانسور، آب از مسیر خروجی آن خارج می‌شود.
- ۵- شیر V₂ باید بسته و شیر V₃ باید باز باشد.
- ۶- شیرهای V₄، V₅، V₇ و V₉ و V₁₀ را ببندید و شیر V₈ را باز کنید.
- ۷- شیر V₁ که بر روی دیگ بخار نصب شده است را، پس از اتصال شلنگ آن به تبخیرکننده، باز و دیگ بخار را روشن کرده و اجازه دهید بخار از دیگ وارد دستگاه شود و آب در مخزن اول جوش آید.
- ۸- کروномتر را روشن کرده و زمان را ثبت نمایید. پس از مدت زمانی مشخص (مثلاً ۱۰ دقیقه) شیر V₁ را ببندید و پس از آرام شدن مایع، ارتفاع آن را اندازه گرفته و یادداشت کنید. (این زمان برای محاسبه ظرفیت تبخیر به کار می‌رود).

مرحله دوم

- ۹- مجدداً شیر V₁ را باز کنید.
- ۱۰- شیرهای V₈ و V₁₀ را ببندید و شیرهای V₇ و V₉ را باز کنید. منتظر بمانید تا آب در مخزن اول مجدداً به جوش بیاید.
- ۱۱- آب از مخزن اول به مخزن دوم جاری می‌شود. اجازه دهید کل آب مخزن اول به مخزن دوم منتقل شود. ارتفاع آب در مخزن ۲ را اندازه بگیرید (h₁).
- ۱۲- شیرهای V₂ و V₉ را باز کرده و شیرهای V₃ و V₇ را ببندید. اجازه دهید ارتفاع آب درون مخزن به ۳۰ سانتیمتر برسد. اگر آب به داخل مخزن وارد نشد، می‌توانید سریع شیرهای V₆ و V₉ را بسته و V₈ و V₁₀ را باز نمایید، تا آب وارد مخزن شود. پس از ارتفاع ۳۰ سانتیمتر، شیر V₆ را باز نمایید.
- ۱۳- اگر در حین آزمایش، آب مخزن سمت راست تمام شود، می‌توانید آب آن را اضافه کنید.
- ۱۴- پس از چند دقیقه (مثلاً ۱۵ دقیقه)، فشار مخزن اول و دمای هر دو مخزن را بخوانید و در جدول زیر یادداشت کنید.

T ₂	T ₁	P ₁

۱۵- دیگ بخار را خاموش کنید.

۱۶- ارتفاع مخزن ۲ را اندازه‌گیری نمایید و با استفاده از شیر V_5 یک نمونه از محلول را از ستون خارج نموده و هدایت آن را اندازه‌گیری کنید.

- در خروجی کویل بخار دو مخزن، هر کدام یک تله بخار نصب شده است که در صورت زیاد شدن فشار داخل این دو مخزن شیشه‌ای، سوپاپ عمل کرده و فشار مخزن شکسته می‌شود.

هشدار: پس از انجام آزمایش‌ها، حتماً دماسنج‌ها را خاموش و مخزن را تخلیه نمایید.

T_1 و T_2 به ترتیب دمای ستون اول و دوم، h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع آب قبل و بعد از تبخیر، K_1 و K_2 به ترتیب هدایت محلول خروجی از ستون شفاف اول و دوم می‌باشد.

اکنون با توجه به مراحل بیان شده جدول زیر را تکمیل نمایید.

$K_0 =$ (هدایت آب ورودی به ستون شفاف اول)								
ستون شفاف دوم				ستون شفاف اول				
K_2	h_2	h_1	T_2	P_1	K_1	h_2	h_1	T_1

پرسش‌ها:

- ۱- ظرفیت تبخیر کننده را محاسبه کنید.
- ۲- با استفاده از موازنه جرم ناخالصی‌ها، مقدار گرمای منتقل شده را محاسبه نمایید.
- ۳- در مورد فاکتور اقتصادی تبخیرکننده دو مرحله‌ای بحث نمایید.