

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

مقدمه

محلولی را در نظر بگیرید که شامل حلال و یک جزء حل شونده غیر فرار است. تبخیر مهمترین راه برای افزایش غلظت این محلول است. افزایش غلظت از طریق خارج کردن بخشی از حلال صورت می گیرد و انرژی لازم جهت تبخیر حلال به بخار توسط حرارت تامین می شود. بنابراین تبخیر یک فرآیند گاز - مایع است و یک روش جداسازی مستقیم محسوب می شود. در اکثر سیستمها حلال آب است و هدف بدست آوردن یک محلول غلیظ از محلول رقیق (آبکی) می باشد. از نمونه های متداول تبخیر می توان به افزایش غلظت محلولهای رقیق شکر، نمک طعام، H_2SO_4 ، $NaOH$ ، گلیسرول، چسب، شیر، آب میوه ها و ... نام برد.

در این نمونه ها محلول غلیظ، محصول مطلوب و باارزش محسوب می شود و آب (حلال) تبخیر شده، بی ارزش است و تنها در موردی که از آب دریا، آب آشامیدنی تولید می شود (تقطیر)، آب محصول با ارزش است.

😊 نکته: تغلیظ محلولها در کاهش هزینه های حمل و نقل (به علت کاهش حجم محصول) و زیاد شدن طول عمر محصول، بهبود نگهداری و ... موثر است.

😊 نکته: برای جداسازی کامل تنها تبخیر کافی نیست (تبخیر یکی از مراحل جداسازی است) و به فرآیندهای دیگر نظیر کریستالیزاسیون، فیلتراسیون و خشک کردن نیازمندیم.

محلولی از نمک $MgCl_2$ را در نظر بگیرید. ابتدا توسط فرآیند تبخیر محلول غلیظ می شود و در ناحیه فوق اشباع قرار می گیرد سپس با استفاده از فرآیند کریستالیزاسیون جامد و مایع دو فاز مجزا تشکیل می دهند و در نهایت به کمک فیلتراسیون این دوفاز از هم جدا شده و با خشک کردن ذرات نمک بطور کامل جدا می شود

☹ سوال: تفاوت تبخیر با خشک کردن، کریستالیزاسون و تقطیر در چیست؟

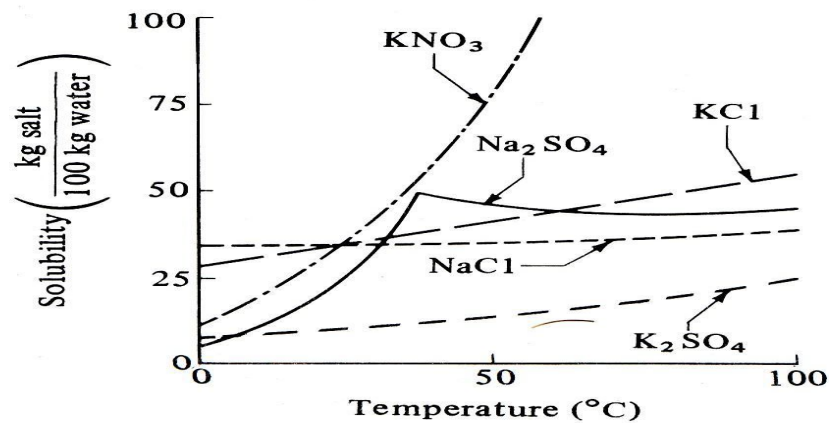
😊 نکته: اگر بخار تولید شده دوجزیی یا بیشتر باشد، امکان جداسازی از روش تبخیر وجود ندارد.

پارامترهای موثر در فرآیند تبخیر

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محلول غلیظ شده و بخار خارج شده تاثیر بسزایی در نوع تبخیر کننده بکار برده شده و فشار و دمای فرآیند دارد. بعضی از این پارامترها در زیر آورده شده است.

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

- ۱- غلظت مایع (*Concentration*): محلولی که به تبخیر کننده وارد می شود بسیار رقیق است، ویسکوزیته کمی دارد (بسیار شبیه به آب است) و ضریب انتقال حرارت بالایی دارد. با شروع تبخیر غلظت محلول افزایش می یابد. تبخیر تا جایی ادامه می یابد که یا به نقطه اشباع برسیم، یا ویسکوزیته محلول برای انتقال حرارت مناسب نباشد.
- ۲- حلالیت (*Solubility*): حلالیت نمکها در آب تابع دما است و برای بعضی از نمکها در شکل (۱) آورده شده است. چون حلالیت اغلب نمکها با افزایش دما، افزایش می یابد، اگر محلول غلیظ خروجی از تبخیر کننده تا دمای اتاق سرد شود، کریستالیزاسیون رخ می دهد.



شکل (۱) حلالیت نمکهای مختلف با دما

- ۳- حساسیت به دما (*Temperature sensitivity of materials*): بسیاری از مواد شیمیایی مانند محصولات دارویی غذایی و بیوشیمی (شیر، ویتامینها، مواد آلی، آنتی بیوتیکها و...) در بازه دمایی کمی پایدارند و با گرم شدن از بین می روند. تغلیظ این مواد نیازمند تکنیکهای خاصی است تا دمای مایع و زمان گرم کردن کاهش یابد.
- ۴- کف کردن (*Foaming / Frothing*): برخی از مواد آلی مانند محلول اسیدهای چرب و محلولهای غذایی مانند سرشیر و محلولهای قندی در هنگام جوشیدن، کف یا سربراه تولید می کنند. این کف ها بر اثر خروج بخار از تبخیر کننده ایجاد می شوند و ایجاد ماندگی می کنند.
- ۵- جرم گرفتگی (*Scale deposition*): با افزایش دما قابلیت رسوب گذاری افزایش می یابد و محلولها غالباً موجب جرم گرفتگی و نشست رسوب در سطح لوله ها می شوند که در این صورت ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد و لوله

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

ها باید جرم گیری شوند. برای شستشوی تبخیر کننده می توان از روشهای مکانیکی (*mechanical washing* /)

(*Cold washing*) یا شیمیایی (*Chemical washing / On operation*) استفاده کرد.

۶- مصالح ساخت (*Materials of Construction*): جنس تبخیر کننده باید در برابر محلول مقاوم باشد (دچار

خوردگی نشود) در اغلب موارد تبخیر کننده ها از جنس فولاد ساخته می شوند ولی برای جلوگیری از خوردگی

می توان از مس، نیکل، فولاد ضد زنگ، آلومینیوم، سرب و ... استفاده کرد.

😊 نکته: خصوصیت‌های مهم دیگر محلول مانند گرمای ویژه، نقطه انجماد، گاز آزاد شده در برابر جوشش، سمیت،

خطر انفجار، رادیواکتیویته، نیاز به استریل کردن و... در طراحی و ساخت تبخیر کننده باید مد نظر قرار گیرند. شکل (۲)

انتخاب تبخیر کننده: در تبخیر حرارت سبب تغلیظ خوراک می شود بنابراین نوع حرارت دادن و میزان هم خوردگی

سیستم تاثیر زیادی در نوع تبخیر کننده مورد استفاده دارد. حرارت می تواند بصورت مستقیم و غیر مستقیم به سیال

داده شود. حرارت مستقیم در سیستمهایی مانند تبخیر خورشیدی و احتراق سوختها مشاهده می شود و در سیستم

گرما دادن غیر مستقیم عموماً از میعان بخار آب (که درون لوله هایی در تبخیر کننده جریان دارد) استفاده

می شود. بطور کلی بر اساس نحوه تامین حرارت لازم جهت تبخیر، تبخیر کننده ها بصورت زیر تقسیم بندی می شوند:

الف) استفاده از سطوح حرارتی لوله ای جهت تبخیر مایع.

ب) استفاده از کویل، ژاکت حرارتی، دیواره دو جداره و صفحه های صاف جهت تبخیر مایع.

ج) استفاده از تماس مستقیم جهت تبخیر مایع.

د) استفاده از تشعشع خورشیدی جهت تبخیر مایع.

برخی از مشکلات مهم که در طول تبخیر رخ می دهد عبارت است از:

الف) ویسکوزیته بالای محلول (ب) حساسیت دمای محلول (ج) تشکیل رسوب و نشست آن

این پارامترها و پارامترهایی که پیشتر ذکر شد، در طراحی تبخیر کننده مورد توجه قرار می گیرند. در انتخاب یک

تبخیر کننده علاوه بر خصوصیات محلول، هزینه ساخت، هزینه عملیاتی، ظرفیت و زمان اقامت نقش تعیین کننده دارد.

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

انواع تبخیر کننده ها و کاربردهای آنها (Evaporator type and applications)

۱- تبخیر کننده از نوع کتری درباز (Open Kettle or Pan)

ساده ترین نوع تبخیر کننده است و بصورت یک کتری درباز است که مایع در آن می جوشد. گرمای لازم از طریق میعان بخار موجود در یک ژاکت یا کویل غوطه ور در کتری تامین می شود. در برخی حالتها نیز گرمایش بصورت مستقیم صورت می گیرد. این تبخیر کننده ها بسیار ارزان قیمت هستند و از لحاظ عملیاتی بسیار ساده می باشند اما اقتصاد حرارتی آنها پایین است و در بعضی مواقع نیاز به همزدن دارند.

۲- تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله افقی (Horizontal Tube Natural Circulation Evaporator)

این تبخیر کننده ها در شکل (۳) نشان داده شده است. در لوله های این تبخیر کننده همیشه بخار وجود دارد و عمل جوشش در خارج لوله ها انجام می شود و عمل کندانس (برای بخار) در داخل لوله ها صورت می گیرد. این تبخیر کننده ها معمولاً از 0.9 m تا $3/6\text{ m}$ قطر و بین $2/4\text{ m}$ تا $3/9\text{ m}$ ارتفاع دارند و قطر لوله ها بین 22 mm تا 32 mm بکار رفته است. این تبخیر کننده ها برای سیالاتی که ویسکوزیته پایین دارند استفاده می شود و معمولاً کاربرد صنعتی ندارد و برای سیالاتی که فولینگ فاکتور دارند، مناسب نیست. ضریب کلی انتقال حرارت از دیگر انواع

$$U = 200 - 400 \frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \quad ; \quad 1100 - 2300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

😊 نکته : بخار خروجی از این تبخیر کننده حاوی قطرات مایع است. به این پدیده *Entrainment* یا *Carry over* گویند. با استفاده از صفحاتی به نام *Demister Pad* می توان از خروج قطرات مایع جلوگیری کرد.

😊 نکته : از مزایای این تبخیر کننده قیمت ارزان و حجم کم آن است.

۳- تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله عمودی (Vertical Tube Natural Circulation Evaporator)

در این نوع تبخیر کننده ها عمل کندانس بخار در خارج لوله و عمل جوشش مایع در داخل لوله ها انجام می گیرد و خوراک می تواند از بالا یا از پایین وارد شود. این نوع تبخیر کننده برای سیالات رسوب زا مناسب است و چون گردش طبیعی است برای سیالات ویسکوز مناسب نیست. از این تبخیر کننده در صنعت قند استفاده می شود. ضریب کلی

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

انتقال حرارت در این تبخیر کننده ها بیش از تبخیر کننده های با گردش طبیعی با لوله های افقی است و در حدود

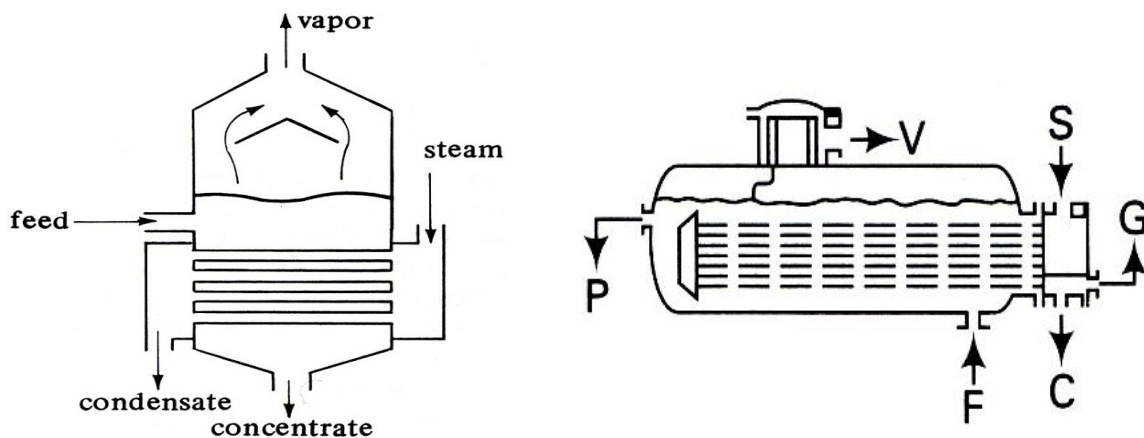
$$U = 200 - 500 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} ; 1100 - 2800 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

کوتاه نیز موسوم است. طول لوله ها از ۴ تا ۶ فوت و قطر لوله ها بین ۲ تا ۴ اینچ است.

😊 نکته: این تبخیر کننده برای سیالات با ویسکوزیته بین cp تا $1/5 cp$ مناسب است.

😊 نکته: جنس بدنه این نوع تبخیر کننده از نوع استیل یا کربن استیل است و برای تغلیظ محلولهایی که به

درجه حرارت حساس هستند - صنایع غذایی و دارویی - مناسب نیست.



شکل (۳) تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله افقی

۴- تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله عمودی بلند (Long Tube Vertical Type Evaporator)

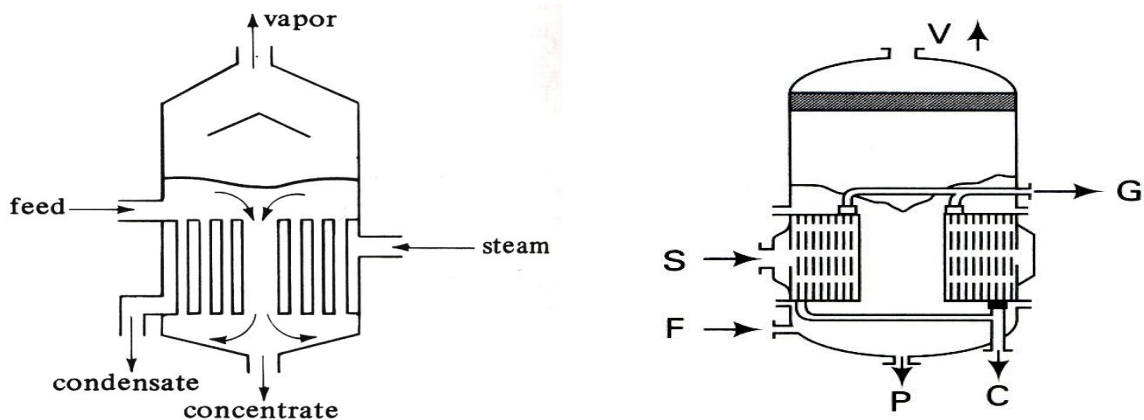
در این تبخیر کننده طول لوله ها از ۱۲ تا ۳۶ فوت و قطر لوله ها بین 0.75 تا ۲ اینچ است. جوشش خوراک در داخل

لوله ها و میعان بخار در خارج لوله ها صورت می گیرد. زمان اقامت سیال از حالت قبلی کمتر است. ضریب کلی انتقال

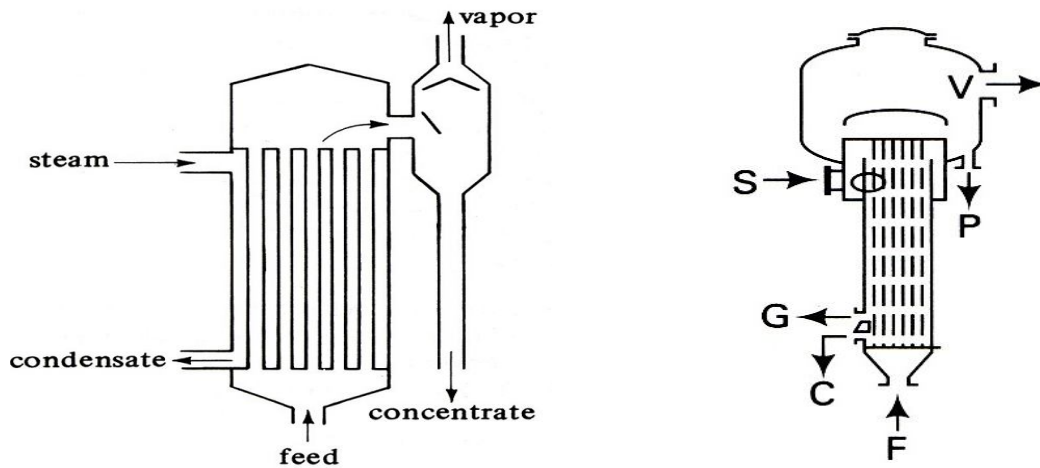
$$U = 200 - 700 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} ; 1100 - 4000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

استفاده می شود. از این مبدل ها برای گردش بیشتر استفاده می شود و سطح انتقال حرارت آن بیشتر است.

😊 نکته: این تبخیر کننده ارزان ترین تبخیر کننده در واحد ظرفیت بخار است.



شکل (۴) تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله عمودی



شکل (۵) تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله عمودی بلند

۵- تبخیر کننده با جریان رو به پایین (Falling Film Evaporator)

یک تبخیر کننده از نوع لوله بلند است که خوراک از بالا وارد آن می شود و بصورت فیلم نازک روی دیواره لوله ها جریان می یابد. برای تغلیظ مایعاتی که نسبت به درجه حرارت حساس هستند (انواع آب میوه، پلاسمای خون، ویتامینها و...) و همچنین سیالات ویسکوز از این مبدل استفاده می شود. قطر لوله ها بین ۲ تا ۴ اینچ است. ضریب کلی

$$\text{انتقال حرارت } U = 800 - 1500 \frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} ; 4500 - 8500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ است.}$$

نکته: ☺ مدت زمان اقامت مایعات در تبخیر کننده هایی که تا اینجا مورد بحث قرار گرفتند، برای عملیات

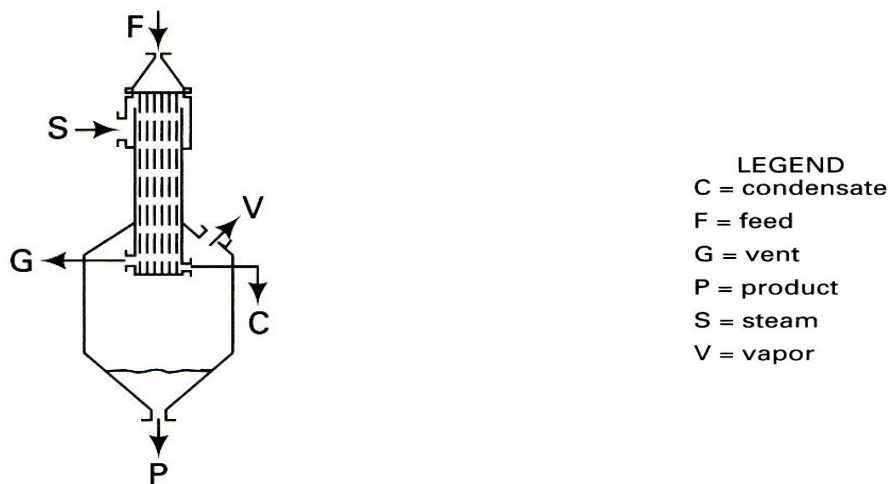
ناپیوسته چند ساعت و برای عملیات پیوسته حدوداً یک ساعت است. پس مایعات باید برای مدت زمان طولانی در نقطه

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

جوش خود باقی بمانند ولی در این تبخیر کننده (*Falling Film*) زمان اقامت مایع بسیار کم و در حدود ۵ تا ۱۰ ثانیه است. به همین دلیل برای تبخیر مایعات حساس به درجه حرارت مناسب است.

😊 نکته: مشکل عمده این تبخیر کننده ها این است که مایع باید بطور یکنواخت مانند فیلم روی سطح لوله ها جریان یابد و این مشکل را می توان با قرار دادن صفحه فلزی سوراخ دار (مشبک) یا توزیع کننده عنکبوتی حل نمود همچنین می توان سیال را بصورت مستقیم به دیواره لوله ها اسپری کرد.

😊 نکته: هزینه ساخت و هزینه عملیاتی این تبخیر کننده ها زیاد است.



شکل (۶) تبخیر کننده با جریان رو به پایین

۶- تبخیر کننده از نوع گردش اجباری (*Forced Circulation Type Evaporator*)

در تبخیر کننده های با گردش طبیعی، مایع با سرعت $0.3 \frac{m}{s}$ تا $1.2 \frac{m}{s}$ وارد لوله ها می شود و با افزایش بخار تولید شده، سرعت خطی افزایش می یابد. ولی برای مایعات ویسکوز ضریب کلی انتقال کوچک است و این نوع تبخیر کننده ها غیر اقتصادی هستند. (به عنوان مثال محلول غلیظ شکر می تواند ویسکوزیته ای 10^6 بار بزرگتر از آب داشته باشد و اگر محلول ویسکوز باشد، سرعت بالا رفتن حباب بسیار کم است بنابراین ضریب انتقال حرارت به شدت کاهش می یابد). در تبخیر کننده های با گردش اجباری برای خوراک دهی از پمپ استفاده می شود و مایع با سرعت $2 \frac{m}{s}$ تا

$5/5 \frac{m}{s}$ وارد لوله ها می شود. با افزایش اغتشاش ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

ضریب کلی انتقال حرارت برای لوله های عمودی $U = 500 - 1000 \frac{Btu}{hr.ft^2.^{\circ}F}$; $2800 - 5700 \frac{W}{m^2.K}$

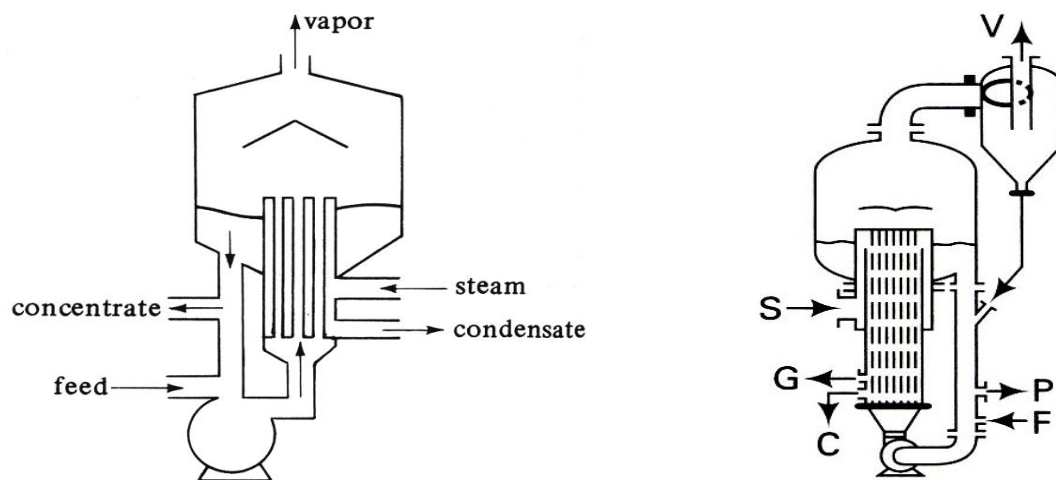
و برای لوله های عمودی بلند $U = 400 - 2000 \frac{Btu}{hr.ft^2.^{\circ}F}$; $2300 - 11000 \frac{W}{m^2.K}$

تبخیر کننده در فرآیند کریستالیزاسیون استفاده می شود.

😊 نکته: این تبخیر کننده برای سیالات ویسکوز، رسوب زا، محلولهای دارای نمک، محلولهای خورنده، محلولهایی

که تمایل به تشکیل کف دارند و همچنین محلولهایی که حساسیت دمایی بالایی دارند، مناسب است.

😊 نکته: هزینه ساخت و هزینه عملیاتی این تبخیر کننده ها بسیار بالا است.



شکل (۷) تبخیر کننده از نوع گردش اجباری

۷- تبخیر کننده همزن دار (Agitated Film Evaporator)

در تبخیر کننده ها مقاومت اصلی در برابر انتقال حرارت در فاز مایع قرار دارد. یکی از راههای افزایش اغتشاش (افزایش

ضریب انتقال حرارت) استفاده از همزنهای مکانیکی درون فاز مایع است. بنابراین این تبخیر کننده مانند یک تبخیر

کننده *Falling Film* اصلاح شده عمل می کند. مایعات بسیار ویسکوز (ویسکوزیته بالاتر از 1000 cp) و حساس به

دما مانند ژلاتین، ماده خام پلاستیک، آنتی بیوتیکها و آب میوه ها را می توان در این تبخیر کننده تغلیظ نمود.

😊 نکته: این تبخیر کننده برای انتقال سریع گرما به مایعات بسیار ویسکوز مناسب است.

😊 نکته: در تبخیر کننده های دیگر با افزایش ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد اما در این نوع

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	مدرس: علیرضا عظیمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	

تبخیر کننده کاهش ضریب انتقال حرارت کمتر است.

۸- تبخیر کننده با یک مسیر عبوری

در تبخیر کننده هایی که تنها یک مسیر عبوری دارند، خوراک مایع تنها یکبار از داخل لوله ها عبور می کند و با آزاد کردن بخار بصورت محلول غلیظ از تبخیر کننده خارج می شود بنابراین تمام تبخیر در یک مسیر صورت می گیرد. برای این دستگاهها، نسبت تبخیر به خوراک محدود است ولی برای تبخیر کننده چند مرحله ای - که عمل تغلیظ در آنها طی چند مرحله صورت می گیرد - بسیار مناسب است. این تبخیر کننده برای مایعات حساس به دما مناسب است. اگر تحت شرایط خلاء کار کنیم، دمای مایع پایین نگه داشته می شود و با یک بار عبور سریع از داخل لوله ها، محلول غلیظ به مدت کوتاهی در دمای تبخیر می ماند و پس از خروج از تبخیر کننده به سرعت سرد می شود.

🌞 نکته: تبخیر کننده های همزن دار، تبخیر کننده های یک مسیره هستند.

۸- تبخیر کننده گردشی

در این تبخیر کننده ها حوضچه ای از مایع تعبیه شده است و خوراک ورودی با مایع درون حوضچه مخلوط می شود و مخلوط حاصل از داخل لوله ها می گذرد. و مایع تبخیر نشده به درون حوضچه بر می گردد. بنابراین تنها بخشی از کل تبخیر در یک مسیر انجام می شود. همه تبخیر کننده های گردشی اجباری به همین صورت کار می کنند.

🌞 نکته: این تبخیر کننده ها بصورت گردش طبیعی (اختلاف چگالی) و گردش اجباری (پمپ) کار می کنند.

🌞 نکته: تبخیر کننده های جریان رو به بالا و جریان رو به پایین معمولاً گردشی هستند.

🌞 نکته: تبخیر کننده های گردشی در محدوده وسیعی از غلظت-بین غلظت خوراک و محلول غلیظ- کاربرد دارند

🌞 نکته: تبخیر کننده های گردشی برای افزایش غلظت مایعات حساس به دما مناسب نیستند.

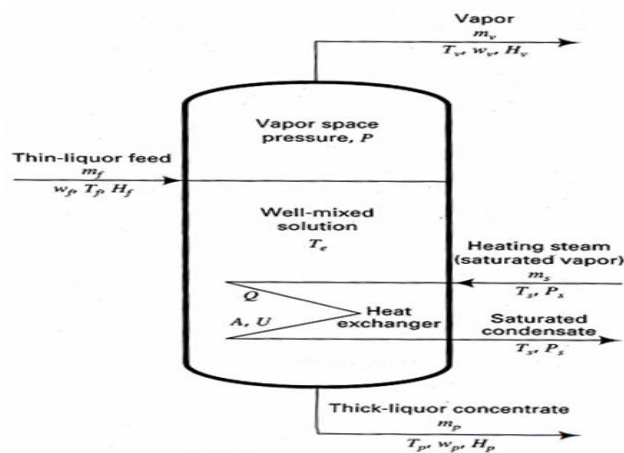
🌞 نکته: تبخیر کننده ها می توانند بصورت یک مرحله ای یا چند مرحله ای باشند. در شکل زیر شمای کلی یک

تبخیر کننده یک مرحله ای آمده است. در اکثر تبخیر کننده های یک مرحله ای از بخار آب تحت فشار پایینتر از ۳

اتموسفیر به عنوان منبع تامین حرارت استفاده می شود و در تبخیر کننده های چند مرحله ای بخار خروجی از هر

مرحله به عنوان منبع تامین انرژی در مرحله بعدی مورد استفاده قرار می گیرد.

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی



شکل (۸) شمای یک تبخیر کننده یک مرحله ای (Single effect) ساده

جدول (۱-۱) محدوده ضریب کلی انتقال حرارت برای تبخیر کننده های مختلف

محدوده ضریب کلی انتقال حرارت		نوع تبخیر کننده
$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\frac{Btu}{ft^2 \cdot hr \cdot F}$	
۱۱۰۰-۲۸۰۰	۲۰۰-۵۰۰	تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله های عمودی
۱۱۰۰-۲۳۰۰	۲۰۰-۴۰۰	تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله های افقی
۱۱۰۰-۴۰۰۰	۲۰۰-۷۰۰	تبخیر کننده با گردش طبیعی و لوله های عمودی بلند
۲۸۰۰-۵۷۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	تبخیر کننده با گردش اجباری و لوله های عمودی
۲۳۰۰-۱۱۰۰۰	۴۰۰-۲۰۰۰	تبخیر کننده با گردش اجباری و لوله های عمودی بلند
۴۵۰۰-۸۵۰۰	۸۰۰-۱۵۰۰	تبخیر کننده با جریان رو به پایین
-	-	تبخیر کننده با فیلم بهم خورده و مایع نیوتنی با ویسکوزیته
۲۰۰۰	۴۰۰	۱ cp
۱۵۰۰	۳۰۰	۱ P
۶۰۰	۱۲۰	۱۰۰ P

عملکرد تبخیر کننده ها :

معیارهای اصلی عملکرد تبخیر کننده لوله ای که با بخار آب گرم می شود ظرفیت دستگاه و فاکتور اقتصادی است.

ظرفیت (Capacity): میزان بخار حاصل از عمل تبخیر است که بر حسب $\frac{kg}{hr}$ بیان می شود.

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

فاکتور اقتصادی (*Economy*): نسبت ظرفیت تبخیر کننده به میزان بخار مصرفی را گویند. به عبارت دیگر اقتصاد

$$E = \frac{V}{S} \quad (1-1) \quad \text{همان میزان تبخیر به ازای انرژی مصرفی است.}$$

😊 نکته: برای یک تبخیر کننده یک مرحله ای همیشه $\frac{V}{S} < 1$ است و در حالت ایده آل می تواند برابر یک شود.

😊 نکته: برای افزایش اقتصاد تبخیر کننده، آنها را چند مرحله ای می سازند. تعداد مراحل بین ۳ تا ۵ متغیر است.

😊 نکته: اقتصاد یک تبخیر کننده به دمای خوراک و تعداد مراحل بستگی دارد.

$$S = \frac{V}{E} \quad \text{نکته: میزان بخار مصرفی برای یک تبخیر کننده را از رابطه مقابل می توان بدست آورد:}$$

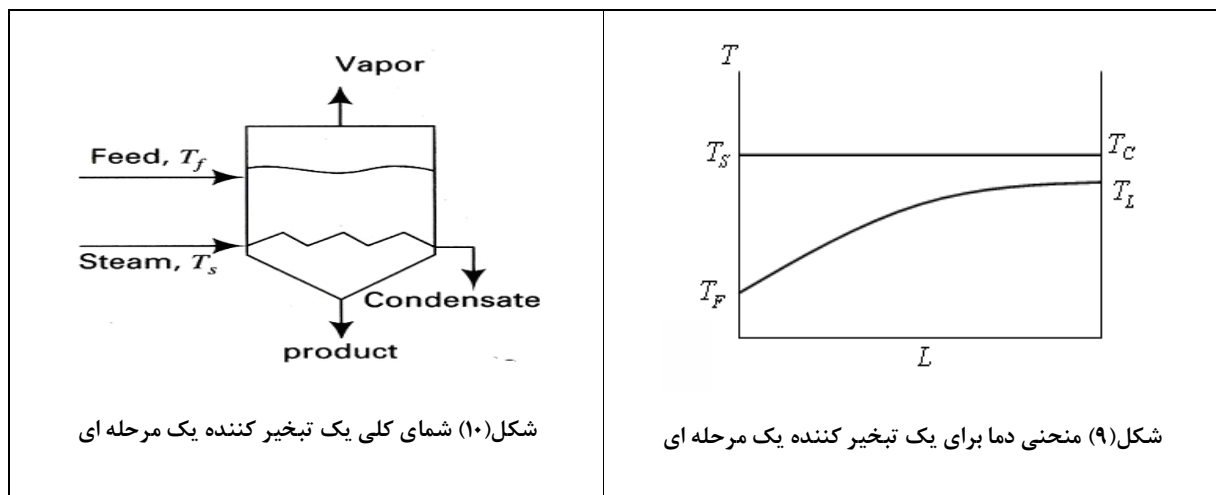
محاسبات تبخیر کننده یک مرحله ای

شدت انتقال گرما برای یک تبخیر کننده از رابطه اساسی زیر بدست می آید:

$$Q = U.A.\Delta T = U.A.(T_s - T_L) \quad (1-2)$$

U : ضریب کلی انتقال حرارت (*Overall Heat Transfer Coefficient*) است.

برای یک تبخیر کننده یک مرحله ای داریم:



$$\text{موازنه کلی جرم} \quad \begin{cases} F + S = V + L + C \\ S = C \end{cases} \Rightarrow F = L + V \quad (1-3)$$

$$\text{موازنه جزیبی جرم} \quad F.X_F = L.X_L + V.Y_V \quad (Y_V = 0) \Rightarrow F.X_F = L.X_L \quad (1-4)$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

X_F : درصد وزنی جزء مورد نظر در خوراک و X_L : درصد وزنی جزء مورد نظر در محصول (مایع خروجی) است.

$$F.h_F + S.h_S = C.h_C + V.h_V + L.h_L \Rightarrow F.h_F + S(h_S - h_C) = V.h_V + L.h_L$$

موازنه انرژی

$$\Rightarrow F.h_F + S.\lambda_S = V.h_V + L.h_L \quad (1-5)$$

اگر اتلاف حرارتی ناچیز باشد (ΔT : اختلاف دمای بخار و نقطه جوش محلول است) : $Q = S.\lambda_S = U.A.\Delta T$

مثال : یک تبخیر کننده یک مرحله ای بصورت پیوسته $\frac{9072}{hr} kg$ از محلول یک نمک با غلظت ۱ درصد وزنی را در

دمای $311 K$ به $1/5$ درصد وزنی تغلیظ می کند. فشار تبخیر کننده یک اتمسفر و فشار بخار مصرفی $143.3 kPa$

است. ظرفیت حرارتی ویژه محلول $C_p = 4.14 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$ می باشد. اگر ضریب کلی انتقال حرارت $U = 1704 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

باشد، مطلوب است : ظرفیت تبخیر کننده ، میزان محصول و سطح انتقال حرارت مورد نیاز

$$\lambda (143.3 kPa) = 2230 \frac{kJ}{kg}, T_S = 383.2 K$$

$$P_E = 1 atm, T_V = 373.2 K, \lambda_V = 2257 \frac{kJ}{kg}$$

$$\begin{cases} F = L + V \Rightarrow 9072 \frac{kg}{hr} = L + V \\ F.X_F = L.X_L \Rightarrow 0.01(9072) = 0.015L \end{cases} \Rightarrow L = 6084 \frac{kg}{hr}, V = 3024 \frac{kg}{hr}$$

$$F.h_F + S.\lambda_S = V.h_V + L.h_L \quad (T_0 = T_L \Rightarrow h_L = 0)$$

دمای مبنا را T_L می گیریم

$$F.C_p(T_F - T_L) + S.\lambda_S = V.h_V \quad (I)$$

λ_S : گرمای نهان بخار آب در شرایط ترمودینامیکی بخار ورودی

λ_V : گرمای نهان بخار آب در شرایط ترمودینامیکی تبخیر کننده

$$\begin{cases} P_S = 143.3 kPa, T_S = 383.2 K, \lambda_S = 3230 \frac{kJ}{kg} \\ P_E = 101.325 kPa, T_E = 373.2 K, \lambda_V = 2257 \frac{kJ}{kg} \end{cases}$$

از جدول بخار :

$$9072 \frac{kg}{hr} \times 4.14 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K} \times (311K - 373.2K) + S \times 2230 \frac{kJ}{kg} = 3024 \frac{kg}{hr} \times 2257 \frac{kJ}{kg} \quad (I)$$

جاگذاری در (I) :

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

$$S = 4108 \frac{kg}{hr}$$

$$\Delta T = T_s - T_L = 383.2 K - 373.2 K = 10 K$$

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = \frac{S \cdot \lambda_s}{U \cdot \Delta T} = \frac{4108 \frac{kg}{hr} \times 3230 \frac{kJ}{kg}}{1704 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 10 K} \times \frac{1000}{3600} = 149.3 m^2 \Rightarrow \boxed{A = 149.3 m^2}$$

بررسی اثر متغیرها بر روی کیفیت محصول و هزینه :

الف) اثر دمای خوراک : T_F : دمای خوراک ورودی تاثیر زیادی بر عملیات تبخیر کننده دارد. در مثال بالا خوراک در دمای پایین ۳۱۱ کلوین وارد و به دمای ۳۷۳/۲ کلوین می رسد. تقریباً ۲۵ درصد بخار برای گرم کردن خوراک سرد تا نقطه جوش مصرف می شود و اگر خوراک تحت فشار و در دمای بالاتر از نقطه جوش (در فشار تبخیر کننده) وارد تبخیر کننده شود، می تواند اندازه تبخیر کننده را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش دهد.

$$T_F = 400 K \Rightarrow S_{new} = 2609 \frac{kg}{hr}, A_{new} = 94.8 m^2$$

نکته: افزایش دمای خوراک سبب کاهش میزان بخار مصرفی و کاهش سطح انتقال حرارت می شود. 😊

ب) اثر فشار تبخیر کننده P_E : چنانچه در مثال دیده اید، فشار تبخیر کننده $1.01/32 kPa$ بوده است و دمای جوش محلول ۳۷۳/۲ کلوین می باشد. ΔT برای تبخیر $\Delta T = 383.2 K - 373.2 K = 10 K$ است. در اکثر موارد ΔT بزرگتر مطلوب است و با افزایش ΔT سطح انتقال حرارت مورد نیاز و متعاقب آن قیمت تبخیر کننده کاهش می یابد. به عنوان مثال اگر فشار تبخیر کننده به $41/4 kPa$ کاهش یابد، نقطه جوش محلول به $349.9/9$ کلوین کاهش یافته و $\Delta T = 383.2 K - 349.9 K = 133.3 K$ افزایش می یابد و این به کاهش زیادی در سطح انتقال حرارت منجر می شود. البته لازم به ذکر است که ایجاد فشار پایین (کمتر از ۱ اتمسفر) فرآیندی هزینه بر است.

$$P_E = 84.55 kPa \Rightarrow (T_L = 368 K, \lambda_v = 2270.2) \Rightarrow S_{new} = 4041 \frac{kg}{hr}, A_{new} \downarrow$$

نکته: کاهش فشار تبخیر کننده، سبب کاهش سطح انتقال حرارت و کاهش میزان بخار مصرفی می شود. 😊

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

ج) اثر فشار بخار P_S : با بکار بردن بخار پر فشار، بخار اشباع دمای بالاتری دارد و ΔT افزایش می یابد و اندازه و قیمت تبخیر کننده کاهش می یابد. به هر حال بخار پر فشار نیز گرانتر است. مطالب طرح شده، برای برآورد هزینه و بدست آوردن حالت ایتیمم اقتصادی باید در نظر گرفته شود.

ظرفیت تبخیر کننده

۱- اگر خوراک بصورت سرد وارد تبخیر کننده شود، بخشی از گرمای بخار صرف گرم کردن آن تا نقطه جوش می شود پس در این حالت ظرفیت کمتر از ظرفیت در حالت جوش است.

$$Q = U.A.\Delta T = S.\lambda_S = q_1 + q_2$$

q_1 : گرمای لازم جهت گرم کردن خوراک تا نقطه جوش و q_2 : گرمای لازم جهت تبخیر خوراک است.

۲- اگر خوراک در نقطه جوش وارد شود، تمام حرارت ناشی از گرمای بخار صرف تبخیر خوراک می شود.

۳- اگر دمای خوراک بالاتر از نقطه جوش باشد، ظرفیت تبخیر کننده بیش از ظرفیت حالت مایع در نقطه جوش است.


مثال : در یک تبخیر کننده عمودی با لوله بلند آب پرتقال با غلظت ۱۰ درصد وزنی از مواد جامد، به مایع غلیظ با

غلظت ۵۰ درصد وزنی تغلیظ می شود. ضریب کلی انتقال حرارت $U = 500 \frac{Btu}{hr.ft^2.^{\circ}F}$ است. برای اینکه دمای

جوش محلول پایین بیاید فشار تبخیر کننده به $P = 4 inHg$ کاهش می یابد. اگر خوراک با دبی $55000 \frac{lb}{hr}$ در

دمای $70^{\circ}F$ وارد شود : الف) میزان بخار مصرفی در فشار $15 Psig$ چقدر است ؟

ب) سطح مبدل حرارتی (HX) مورد نیاز چقدر است ؟

سوال مهم : چرا اقتصاد بخار کمتر از یک است ؟ 

مثال : در یک تبخیر کننده محلول آب پرتقال با غلظت ۱۲ درصد وزنی از مواد جامد، به غلظت ۴۸ درصد وزنی تغلیظ

می شود. فرض کنید آنتالپی مایع برابر با آنتالپی آب خالص است. دمای تبخیر کننده $104^{\circ}F$ است و خوراک با دمای

$86^{\circ}F$ وارد تبخیر کننده می شود. دمای بخار اشباع مورد نیاز $144^{\circ}F$ می باشد. ضریب کلی انتقال حرارت

$$U = 350 \frac{Btu}{hr.ft^2.^{\circ}F}$$

است. اگر دبی محصول خروجی (شربت پرتقال) $3000 \frac{lb}{hr}$ باشد :

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

الف) مساحت مورد نیاز برای انتقال حرارت را محاسبه کنید.
 $at 86^{\circ} F (30^{\circ} C) \quad h_F = 54 \frac{Btu}{lb_m}$

ب) دبی جرمی بخار مصرفی را محاسبه کنید.
 $at 104^{\circ} F (40^{\circ} C) : h_L = 71.969 \frac{Btu}{lb_m} \quad \& \quad h_V = 1106.9 \frac{Btu}{lb_m}$

خواص کولیگاتیو : در اثر حل شدن یک جزء غیر فرار در محلول بعضی از خواص محلول تغییر می کند که به نوع حلال بستگی دارد. این تغییرات عبارتند از :

۱- صعود نقطه جوش ۲- کاهش نقطه انجماد ۳- فشار بخار ۴- فشار اسمزی

زمانی که جزء حل شونده به مایع اضافه می شود، فشار جزیبی مایع کاهش می یابد. پس اگر یک جزء غیر فرار در آب حل شود، فشار بخار محلول از فشار بخار آب خالص در همان دما کمتر است با استفاده از قانون راولت در

ترمودینامیک داریم : $Raoult's Law : P_i(x_i, T) = x_i \cdot P_i^0(T)$

$P_i(x_i, T)$: فشار جزیبی ماده i ، x_i : کسر مولی جزء i و $P_i^0(T)$: فشار بخار جزء خالص i در دمای T است.

با افزودن یک ماده حل شونده به آب $x_W < 1$ می شود بنابراین $P_W < P_W^0$. بنابراین نقطه جوش محلول افزایش می یابد اختلاف نقطه جوش محلول و حلال خالص را BPR (Boiling Point Rise) یا BPE (Boiling Point Elevation) گویند.

😊 نکته : افزایش نقطه جوش برای محلولهای رقیق و محلولهای کلوییدی کم است و برای محلولهای غلیظ

نمکهای غیرآلی این مقدار حتی به $80^{\circ} C$ ($144^{\circ} F$) نیز می رسد.

به عنوان نمونه در فشار ۱ اتمسفر نقطه جوش آب خالص $212^{\circ} F$ و در همین فشار نقطه جوش محلول ۵۰ درصد وزنی $NaOH$ برابر با $283^{\circ} F$ خواهد بود. پس تفاوت نقطه جوش این محلول نسبت به آب خالص عدد معناداری است

😊 نکته مهم : BPR به غلظت مولی وابسته است نه غلظت جرمی.

مثال : با استفاده از قانون راولت فشار جزیبی آب در دمای $100^{\circ} C$ و فشار جزیبی محلول ۵۰ درصد وزنی $NaOH$ و همچنین محلول ۵۰ درصد وزنی ماده آلی با $MW = 1000$ را تعیین کنید. BPR را نیز برای هر محلول تخمین بزنید.

برای تعیین کسر مولی آب در هر محلول یک گرم از محلول را بصورت پایه در نظر می گیریم. بنابراین محلول از ۰/۵

گرم آب و ۰/۵ گرم $NaOH$ تشکیل شده است : $MW_{NaOH} = 40$ ، $MW_{H_2O} = 18$

کسر مولی آب برای هر محلول اینگونه بدست می آید:

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

کسر مولی	$NaOH(MW = 40)$	$OrganicColloids(MW = 1000)$
x_w	$\frac{\frac{0.5g}{18 \frac{g}{mol}}}{\frac{0.5g}{18 \frac{g}{mol}} + \frac{0.5g}{40 \frac{g}{mol}}} = 0.690$	$\frac{\frac{0.5g}{18 \frac{g}{mol}}}{\frac{0.5g}{18 \frac{g}{mol}} + \frac{0.5g}{1000 \frac{g}{mol}}} = 0.982$
در دمای $100^\circ C$ درجه فشار بخار آب خالص (P_w^0) برابر با یک اتمسفر است. با بکار بردن قانون راولت:		
P_w	$0.69(1atm) = 0.69atm$	$0.982(1atm) = 0.982atm$
برای جوشش محلول های بالا، فشار جزیی باید تا $1atm$ افزایش یابد.		
P_w^0	$\frac{1atm}{0.69} = 1.45 atm$	$\frac{1atm}{0.982} = 1.018 atm$
T	$110.0^\circ C$	$100.8^\circ C$
BPR	$110.0^\circ C - 100^\circ C = 10^\circ C$	$100.8^\circ C - 100^\circ C = 0.8^\circ C$

ولی این تنها یک تخمین است و قانون راولت برای زمانی که $x_w \rightarrow 1$ صادق است و BPR واقعی $39^\circ C$ می باشد.

$$BPR(BPE) = \Delta T_b = T_s - T^\circ = K_b m$$

T_s : نقطه جوش محلول، T° : نقطه جوش حلال خالص، K_b : ثابت نقطه جوش و m : غلظت جزء حل شونده است.

K_f	K_b	حلال
-۱/۸۶	۰/۱۵۲	آب
-۶/۱۲	۲/۵۳	بنزن
-۳/۱	۳/۰۲	اسید استیک

روشهای تعیین BPR

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

الف) با استفاده از داده های شیمی فیزیکی

$$BPR = K_b \cdot m \quad , \quad K_b = \frac{R \cdot T^2 \cdot M_s}{1000 \Delta \bar{H}_{vap}}$$

M_s : جرم مولکولی حلال ، $\Delta \bar{H}_{vap}$: گرمای تبخیر حلال ، T^0 : نقطه جوش حلال خالص

ب) استفاده از نمودارهای دورینگ

قاعده دورینگ : نقطه جوش محلول یک نمک تابع خطی از نقطه جوش آب خالص در همان فشار است پس اگر نمودار نقطه جوش محلول بر حسب نقطه جوش در همان فشار رسم شود، خط راستی بدست می آید. برای غلظتهای مختلف خطوط مختلفی حاصل می شود. در محدوده فشار بالا این قاعده دقیق نیست.

😊 نکته مهم : BPR تابع غلظت است و تابع فشار نیست.

☹ سوال : یک محلول آبی $NaOH$ در فشار 6 Psi تغلیظ می شود. اگر غلظت وزنی $NaOH$ ۳۵ درصد باشد، دمای

$$T_b = 207^\circ F \quad , \quad BPR = 207^\circ F - 170^\circ F = 37^\circ F$$

جوش محلول و BPR را تعیین کنید.

🕒 (مهندسی شیمی) : بعضی از ترکیبات مانند سود سوزآور وقتی به آب اضافه می شوند، بسته به مقداری

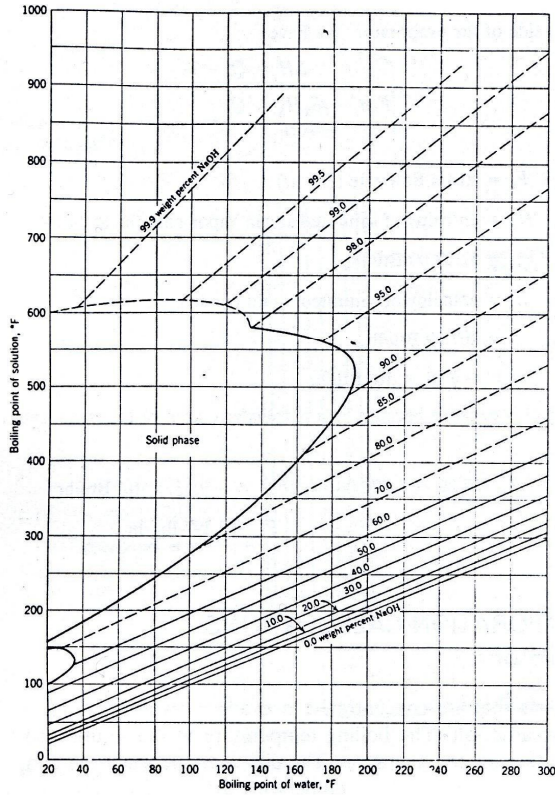
که افزوده شده اند، نقطه جوش آب را بالاتر می برند (BPE). در صورتیکه فشار سیستم تغییر کند نقطه جوش اینگونه محلولها تغییر می کند. با تغییرات فشار در غلظت ثابت افزایش نقطه جوش محلول (BPR) :

الف) تقریباً ثابت می ماند.

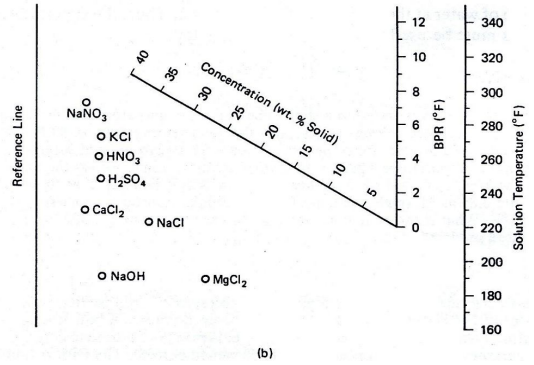
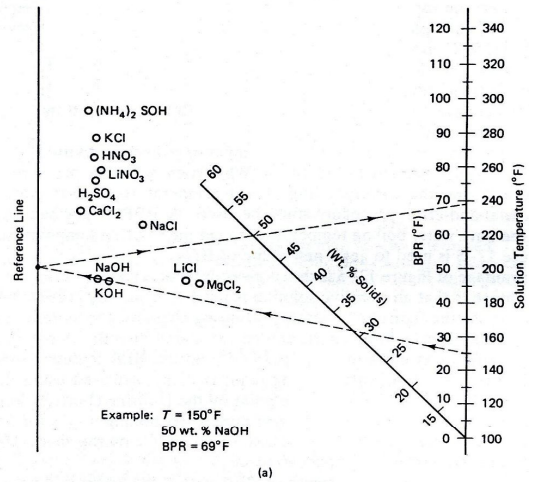
ب) در فشار معینی به حداکثر خود می رسد.

ج) با بالا رفتن فشار، کاهش می یابد و با پایین آمدن فشار، افزایش می یابد.

د) با بالا رفتن فشار، افزایش می یابد و با پایین آمدن فشار، کاهش می یابد.

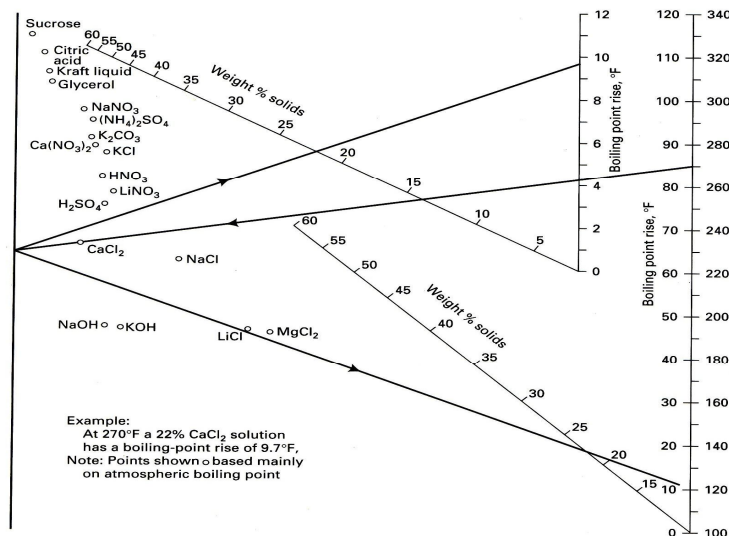


شکل (۱۲) نمودار دورینگ برای سیستم آب و NaOH




شکل (۱۱) نمودار برای محاسبه BPR، (a): برای غلظتهای بالا

و (b): برای غلظتهای پایین



شکل (۱۳) نمودار برای محاسبه BPR برای محلولهای آبی مختلف


تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

(مهندسی شیمی ۱۳۸۲) : در یک تبخیر کننده تک مرحله ای باید محلول ۲۰ درصد هیدروکسید سدیم 

با دبی جرمی $10000 \frac{lb}{hr}$ تا غلظت ۵۰ درصد تغلیظ گردد. اگر مقدار بخار مصرف شده، $7700 \frac{lb}{hr}$ باشد،

اقتصاد تبخیر کننده کدام است ؟


- الف) ۰/۷۸ (ب) ۱ (ج) ۱/۲۸ (د) ۰/۳۹

(مهندسی شیمی ۱۳۸۲) : در صورتیکه محلول تغلیظ شونده در یک سیستم تبخیر کننده ضمن حساس 

بودن به درجه حرارت افزایش ویسکوزیته آن با تغلیظ نیز قابل توجه باشد، کدامیک از سیستم‌های زیر برای تغلیظ این محلول مناسبتر میباشد

الف) تبخیر کننده یک مرحله ای فیلم نزولی (ب) تبخیر کننده یک مرحله ای فیلم صعودی


ج) تبخیر کننده یک مرحله ای با گردش اجباری (د) تبخیر کننده چندمرحله ای با گردش اجباری *Backward*

(مهندسی فرآوری و انتقال گاز ۱۳۸۵) : برای تغلیظ مایعاتی که تمایل به کف کردن زیاد دارند، کدام 

تبخیر کننده مناسب ترین است ؟

الف) تبخیر کننده لوله بلند قائم (ب) تبخیر کننده لوله کوتاه قائم

ج) تبخیر کننده افقی لوله کوتاه (د) تبخیر کننده مجهز به همزن (*Agitated film evaporator*)

(مهندسی شیمی) : یک تبخیر کننده سه مرحله ای مایعی را بدون افزایش نقطه جوش (*BPR*) تغلیظ 

می کند. دمای بخار ورودی به مبدل حرارتی مرحله اول $105^{\circ}C$ و نقطه جوش محلول در مرحله آخر $50^{\circ}C$

است. ضریب کلی انتقال حرارت در مرحله اول $3000 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ و در مرحله دوم $2000 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ و در مرحله

سوم $1000 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ است. نقطه جوش محلول در مرحله اول تقریباً چند درجه سانتیگراد است ؟

- الف) $95^{\circ}C$ (ب) $90^{\circ}C$ (ج) $100^{\circ}C$ (د) $85^{\circ}C$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

(مهندسی فرآوری و انتقال گاز ۱۳۸۳) : در یک تبخیر کننده سه مرحله ای با لوله قائم و بلند، خوراک بصورت مستقیم وارد تبخیر کننده می شود. دمای خوراک ورودی به مرحله اول برابر $90^{\circ}C$ ، دمای بخار مصرفی برابر $120^{\circ}C$ و نقطه جوش مرحله سوم برابر $40^{\circ}C$ می باشد. صعود نقطه جوش در هر سه مرحله ناچیز و ضرایب انتقال حرارت $U_1 = 2950 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ و $U_2 = 2670 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ و $U_3 = 1360 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ است. نقطه جوش محلول غلیظ شده در مراحل اول و دوم بطور تقریبی بر حسب $^{\circ}C$ برابر است با :

الف) $101/3$ و $80/6$ (ب) 105 و $84/3$ (ج) $102/7$ و 82 (د) $99/7$ و 79

(مهندسی شیمی) : - اگر در یک تبخیر کننده سه مرحله ای افت دمای کل برابر با $75^{\circ}C$ و مجموع BPR ها برابر با $30^{\circ}C$ باشد ، اختلاف بین دمای بخار ورودی و دمای اشباع بخار در مرحله سوم برابر است با :

الف) $105^{\circ}C$ (ب) $85^{\circ}C$ (ج) $65^{\circ}C$ (د) $45^{\circ}C$

(مهندسی شیمی) : با افزایش تعداد مرحله ها ($Effects$) در یک دستگاه تبخیر کننده ($Evaporator$)

کدامیک از تغییرات زیر اتفاق می افتد ؟

الف) ضریب کلی انتقال حرارت کم می شود.

ب) ظرفیت تخیر دستگاه ($Capacity$) افزایش می یابد.

ج) وزن بخار تولید شده برای واحد وزن بخار مصرفی ($Economy$) افزایش می یابد.

د) هر سه مورد فوق

(مهندسی شیمی ۱۳۷۴) : جهت تغلیظ محلول هایی که در اثر تبخیر متبلور می شوند، کدامیک از روش

های زیر در خوراک دهی به یک تبخیر کننده چند مرحله ای ($Multiple Effect$) ترجیح داده می شود ؟

الف) $Parallel Feed$ (ب) $Forward Feed$ (ج) $Mixed Feed$ (د) $Backward Feed$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

اثر فشار مایع و اصطکاک بر افت دما

اگر عمق مایع در تبخیر کننده زیاد باشد، نقطه جوش آن در فشار بخار روی سطح مایع، برابر با نقطه جوش لایه سطحی مایع است. ولی فشار وارد بر نقطه ای در فاصله z متر از سطح مایع برابر است با فشار فضای بخار به علاوه فشار ناشی از اختلاف ارتفاع z می باشد. در ضمن وقتی سرعت مایع زیاد باشد، تلفات اصطکاک در لوله ها، فشار متوسط مایع را زیاد می کند و در نتیجه در تبخیر کننده های واقعی نقطه جوش مایع در لوله ها بالاتر از نقطه جوش سطح مایع است (که در آنجا فقط بخار فشار وارد می کند). چنین افزایشی در نقطه جوش، افت میانگین دما را بین بخار آب و مایع کم می کند و بنابراین ظرفیت کاهش می یابد. در سرعت های پایین افت فشار کمتر و در نتیجه فشار و نقطه جوش محلول بیشتر است. بنابراین نقطه جوش در این حالت بیشتر و افت دما کمتر از حالت سرعت بالا است. در این حالت چون زمان اقامت مایع بیشتر است، در نتیجه مایع زودتر و در نزدیکی مرکز لوله به بخار تبدیل می شود. در مورد افت فشار در لوله، تغییر فشار در نیمه اول لوله که مایع در حال جوش نیست و سرعت آن پایین است بسیار کم و در بخش دوم افت فشار به دلیل افزایش سرعت مایع افزایش می یابد.

😊 نکته: هر چه دبی جرمی بیشتر باشد، افت فشار بیشتر است.

مثال: $\frac{kg}{hr}$ ۴۵۳۶ از یک محلول ۲۰ درصد وزنی $NaOH$ در دمای $60^\circ C$ ($140^\circ F$) وارد یک تبخیر کننده می شود. غلظت محصول خروجی ۵۰ درصد وزنی است. فشار بخار اشباع مصرفی $172/4 kPa$ و فشار تبخیر کننده

۱۱/۷ کیلو پاسکال گزارش شده است. ضریب کلی انتقال حرارت $U = 1560 \frac{W}{m^2.K}$ است. مطلوب است محاسبه:

الف) مقدار بخار مصرفی ب) اقتصاد تبخیر کننده ج) مساحت مورد نیاز برای انتقال حرارت

☹️ تمرین: مثال بالا را برای حالت های $BPR = 0$ و دو برابر شدن $Rate$ خوراک حل کنید.

☹️ تمرین: برای تولید ۱۰۰۰۰ پوند بر ساعت محلول ۵۰ درصد وزنی $NaOH$ از محلول ۱۰ درصد وزنی آن از

تبخیر کننده ای در دمای خوراک $100^\circ F$ استفاده می شود. ضریب کلی انتقال حرارت $U = 500 \frac{Btu}{ft^2.hr.^{\circ}F}$ است

و فشار بخار مصرفی $50 Psi$ می باشد. اگر تبخیر کننده در $10 Psi$ خلاء نسبت به فشار اتمسفریک کار کند، سطح

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان
	مدرس: علیرضا عظیمی

مورد نیاز برای این تبخیر کننده را محاسبه کنید و فرضیات مورد نیاز برای حل مساله را بنویسید.

تعمیرین: ☹️ برای تغلیظ محلول $MgCl_2$ از تبخیرکننده عمودی با لوله کوتاه استفاده شده است. غلظت خوراک ۱۰

درصد و دمای آن $80^\circ F$ بوده است. غلظت محصول (مایع تغلیظ شده) ۳۰ درصد وزنی می باشد. فشار تبخیر کننده

۵ Psi و فشار بخار مصرفی ۳۰ Psi است. ظرفیت گرمای محلول ۱۰ درصد وزنی $MgCl_2$ برابر با $0.95 \frac{Btu}{lb_m \cdot ^\circ F}$ و

ظرفیت گرمایی محلول ۳۰ درصد وزنی $MgCl_2$ برابر با $0.85 \frac{Btu}{lb_m \cdot ^\circ F}$ گزارش شده است. اگر ضریب کلی انتقال حرارت

$$U = 400 \frac{Btu}{ft^2 \cdot hr \cdot ^\circ F}$$

باشد، سطح انتقال حرارت مورد نیاز برای تولید $2500 \frac{lb_m}{hr}$ از محصول چقدر است.

گرمای رقیق شدن (Heat of Dilution)

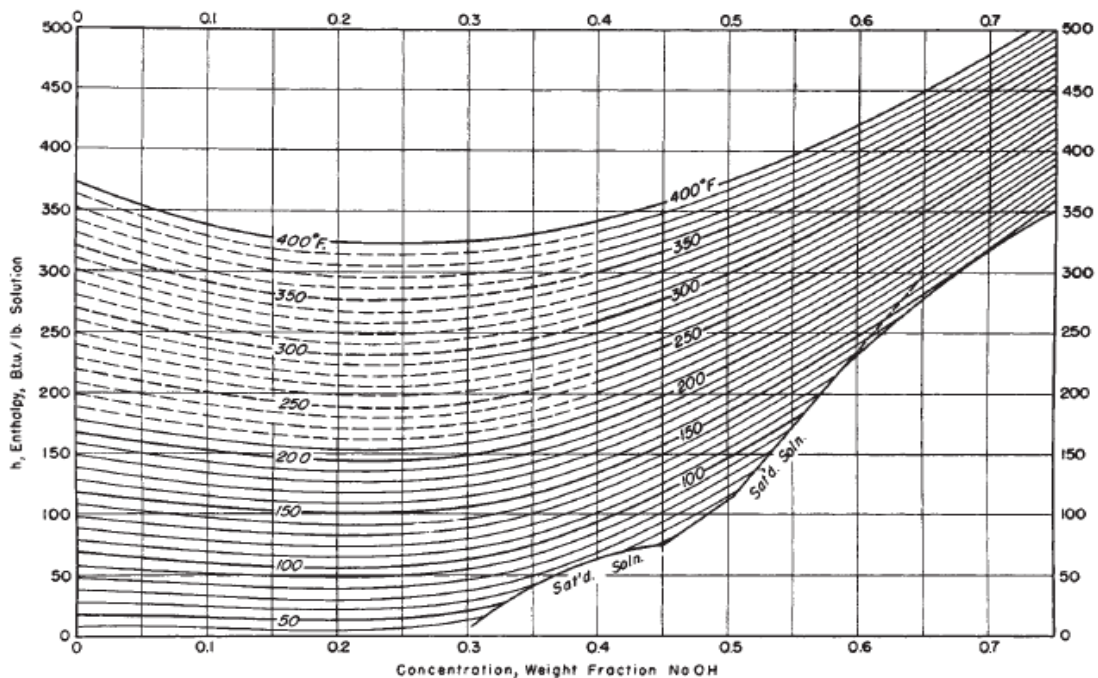
اگر اسید استیک با افزودن آب رقیق شود، گرمای زیادی آزاد می شود. اگر این اختلاط آدیاباتیک و هر دو مایع در

دمای اتاق باشند، دمای نهایی پس از اختلاط آنقدر زیاد است که سبب جوشش می شود. نتیجه این است که آنتالپی

$$H = H(T, C)$$

محلول تنها به دما وابسته نیست و به غلظت نیز وابسته است:

در شکل (۱۴) دیاگرام تغییرات آنتالپی با غلظت برای محلول $NaOH$ ارائه شده است.



شکل (۱۴) دیاگرام تغییرات آنتالپی با غلظت برای محلول $NaOH$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی


مثال : یک پوند از محلول ۵۰٪ وزنی از $NaOH$ موجود است. جهت رقیق شدن به این محلول یک پوند آب خالص اضافه می شود. اختلاط دردمای $70^{\circ}F$ صورت می گیرد. اگر اختلاط آدیاباتیک باشد دمای نهایی محلول چقدر است؟
با استفاده از نمودار آنتالپی - غلظت :

$$H(50\% , 70^{\circ}F) = 123 \frac{btu}{lb} , H(0\% , 70^{\circ}F) = 40 \frac{btu}{lb}$$

$$123 \frac{Btu}{lb} \times 1lb + 40 \frac{Btu}{lb} \times 1lb = 163 \frac{Btu}{lb} \Rightarrow$$


$$\frac{163Btu}{2lb} = 81.5 \frac{Btu}{lb} = H(25\% , T = ?)$$

با استفاده از نمودار آنتالپی - غلظت درمی یابیم که این آنتالپی مربوط به دمای $123^{\circ}F$ است.

سوال : برای رقیق کردن محلول اسید استیک (با توجه به اینکه گرمای رقیق شدن بالایی دارد) چرا عاقلانه تر آن است که اسید به آب اضافه شود تا اینکه آب به اسید اضافه شود ؟ 

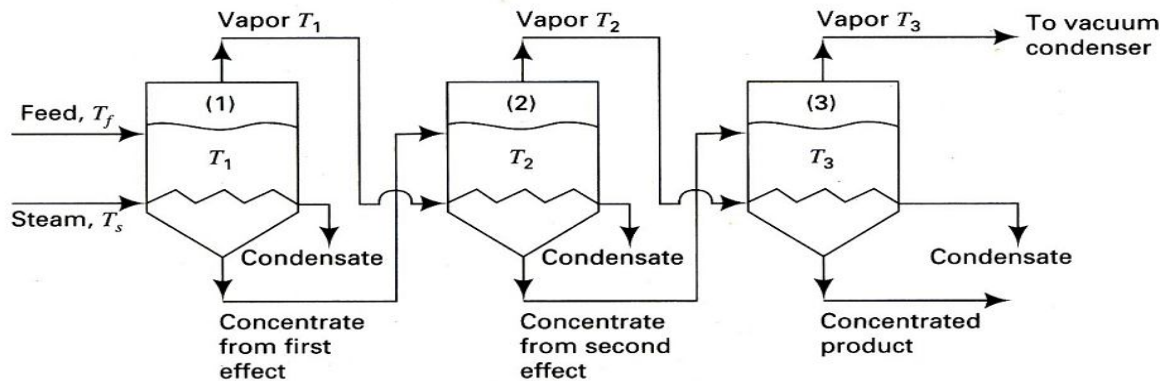
تبخیر کننده های چند مرحله ای

در عملیات تبخیر کردن اصلی ترین هزینه فرآیند، مربوط به تامین بخار آب است. بنابراین باید روشهایی برای کاهش مصرف بخار (یا افزایش اقتصاد تبخیر کننده) به کار گرفته شود. متداولترین روش برای افزایش اقتصاد استفاده از تبخیر کننده چند مرحله ای است. در این روش از بخار آب تولید شده در مرحله اول برای تبخیر سیال در مراحل بعدی استفاده می شود بنابراین فشار مرحله دوم باید کمتر از مرحله اول باشد تا ΔT مورد نیاز (اختلاف دمای بخار و نقطه جوش سیال موجود در مرحله دوم) حفظ شود. پرواضح است که این فرآیند بصورت سری برای چند مرحله قابل تعمیم است. روش تبخیر کردن بصورت سری بنام تبخیر کردن چند مرحله ای نامیده می شود و به هر مرحله $Effect$ گویند.
در تبخیر کننده های چند مرحله ای تعداد مراحل بین ۳ تا ۵ مرحله متغیر است که ما در اینجا یک تبخیر کننده سه مرحله ای را در نظر می گیریم. شمای کلی این تبخیر کننده در (شکل ۱۵) آمده است. بخار آب وارد اولین مرحله شده و فشار بخار بیشترین مقدار خود را دارد و مرحله آخر کمترین فشار را دارا است.

نکته : در شرایط پایا، شدت جریانها و سرعت تبخیر آن، به گونه ای است که هیچ حلال یا حل شونده ای در 

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان
	مدرس: علیرضا عظیمی

هیچکدام از مراحل انباشته یا تخلیه نمی‌شود. غلظت محلول غلیظ تنها با تغییر شدت جریان تغییر می‌کند. اگر محلول رقیق باشد، سرعت تغذیه در مرحله اول کاهش و اگر محلول خیلی غلیظ باشد، سرعت تغذیه در مرحله اول افزایش می‌یابد



شکل (۱۵) شمای کلی یک تبخیر کننده سه مرحله ای

☺ نکته: برای آنکه بخار خروجی از هر مرحله بتواند محلول غلیظ در مرحله بعدی را به جوش آورد، فشار محلول در تبخیر کننده بعدی را باید کاهش داد. به علت کاهش فشار، دما نیز کاهش می‌یابد در نتیجه بخار خروجی از هر مرحله چون در فشار بالاتری است، می‌تواند محلول مرحله بعدی را به جوش آورد.

ظرفیت و فاکتور اقتصادی در تبخیر کننده چند مرحله ای


در تبخیر کننده چند مرحله‌ای با افزایش فاکتور اقتصادی، ظرفیت کاهش می‌یابد. شاید در نگاه اول اینگونه به نظر برسد که با چند برابر کردن سطوح انتقال حرارت، ظرفیت تبخیر افزایش می‌یابد ولی این چنین نیست. در شرایط نهایی یکسان و در حالیکه سطح انتقال حرارت در نوع یک مرحله ای برابر سطح یکی از مراحل تبخیر کننده چند مرحله ای است، ولی ظرفیت کل تبخیر کننده چند مرحله ای، بزرگتر از ظرفیت تبخیر کننده یک مرحله ای نیست.


☺ نکته: اگر صعود نقطه جوش زیاد باشد، تبخیر کننده چند مرحله ای ظرفیت کمتری دارد و اگر صعود نقطه جوش ناچیز باشد، مقدار ΔT کل مراحل برابر با مجموع ΔT هر یک از مراحل می‌شود و مقدار بخار آب تولید شده به ازای واحد سطح برای تبخیر کننده N مرحله ای تقریباً $\frac{1}{N}$ تبخیر کننده یک مرحله ای است.


در یک واحد یک مرحله ای که بعنوان مثال محلول ۵۰ درصد وزنی $NaOH$ تولید می‌کند، ضریب کلی انتقال حرارت U برای این مایع غلیظ کوچک است. در تبخیر کننده سه مرحله ای، ضریب کلی انتقال حرارت U برای مرحله آخر


تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی


مشابه ضریب کلی انتقال حرارت یک واحد یک مرحله ای است اما در بقیه مراحل چون غلظت $NaOH$ خیلی کمتر از ۵۰ درصد است، ضرایب بزرگترند. بنابراین میانگین U برای تبخیر کننده سه مرحله ای بزرگتر از یک مرحله ای است.

سوال : آیا ممکن است ظرفیت تبخیر کننده چند مرحله ای بزرگتر از نوع یک مرحله ای شود ؟ 

نگته : فشار مایع مانند صعود نقطه جوش ، موجب کاهش ظرفیت می شود. 

نگته : فاکتور اقتصادی یک تبخیر کننده چند مرحله ای بزرگتر از یک است. 

نگته : اگر از عوامل جزیی مانند دمای خوراک و تغییر گرمای تبخیر آن صرفنظر شود، فاکتور اقتصادی تبخیر کننده چند مرحله ای با صعود نقطه جوش تغییر نمی کند. 

نگته : اگر تعداد مراحل بسیار زیاد و یا صعود نقطه جوش بسیار بالا باشد، مجموع صعود نقطه جوش $(\sum BPR)$ بزرگتر از افت دمای کل موجود می شود و کار در چنین شرایطی غیر ممکن است. 

تعداد مراحل بهینه

برای ساخت یک تبخیر کننده N مرحله ای تقریباً N برابر یک تبخیر کننده یک مرحله ای با همان ظرفیت باید هزینه کرد. تعداد مراحل بهینه از موازنه اقتصادی بین مقدار صرفه جویی در مصرف بخار آب و مقدار سرمایه اضافی در ساخت تبخیر کننده بدست می آید. بنابراین تعداد مراحل بهینه بین ۳ تا ۵ مرحله متغیر است. در جدول (۳) هزینه های مربوط به تبخیر کننده های مختلف برای سیستم یکسان با هم مقایسه شده است.

جدول (۳-۱) مقایسه هزینه تبخیر کننده های مختلف برای تغلیظ پروتئین مایع

نوع تبخیر کننده	هزینه ساخت دستگاه	هزینه بخار در سال	میزان صرفه جویی در سال نسبت به تبخیر کننده یک مرحله ای
یک مرحله ای	۵۰۰۰۰ £	۴۰۳۰۰۰ £	-
دو مرحله ای	۷۰۰۰۰ £	۲۱۴۰۰۰ £	۱۸۹۰۰۰ £
دو مرحله ای با تراکم مجدد	۹۰۰۰۰ £	۱۳۷۰۰۰ £	۲۶۶۰۰۰ £
سه مرحله ای	۱۰۰۰۰۰ £	۱۴۳۰۰۰ £	۲۶۰۰۰۰ £

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

لازم به ذکر است که این تبخیر کننده ها برای تغلیظ محلول حساس به دمای پروتئین به کار رفته اند. محلول پروتئین

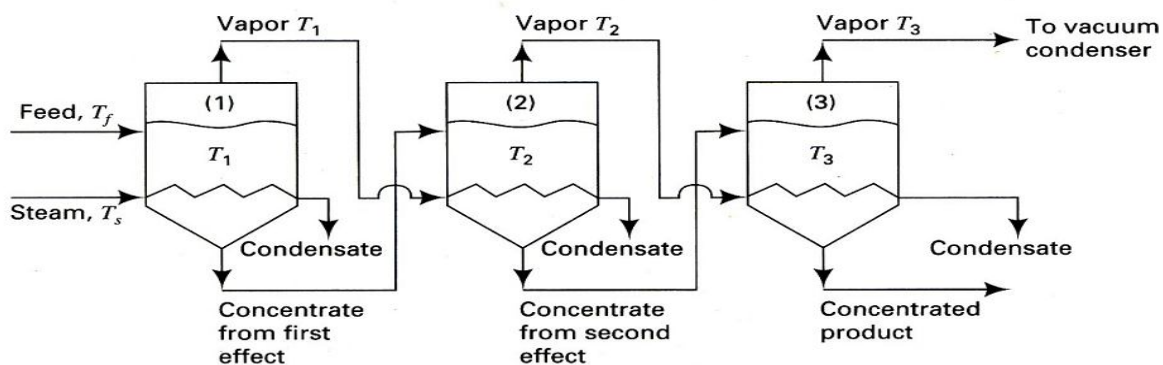
مایع با دبی $\frac{kg}{s}$ ۱/۷ از غلظت ۱۰ درصد وزنی به غلظت ۵۰ درصد وزنی رسیده است.

روشهای خوراک دهی یا ورود خوراک به تبخیر کننده (Feeding)

برای تماس مراحل تبخیر کننده، آرایشهای متفاوتی وجود دارد که بر اساس جهت جریان خوراک به صورت زیر تقسیم بندی می شوند.

۱- روش مستقیم یا تغذیه از جلو (Forward Feeding)

در این روش خوراک وارد مرحله اول می شود و مرحله اول دارای بالاترین دما و فشار است. شمای ساده این روش در شکل (۱۶) آمده است. در این روش برای انتقال از یک مرحله به مرحله دیگر نیازی به پمپ نیست چون انتقال از فشار بالا به پایین صورت می گیرد. این روش برای تغذیه مواد حساس به گرما و سیالات با ویسکوزیته پایین مناسب است چون با افزایش غلظت محلول، ویسکوزیته افزایش می یابد و ضریب انتقال حرارت و مقدار انتقال حرارت کاهش می یابد.



شکل (۱۶) شمای کلی یک تبخیر کننده سه مرحله ای با تغذیه از جلو

نکته: اگر دمای خوراک پایین باشد، این روش مناسب نیست زیرا باید مقدار زیادی بخار مصرف شود. 😊

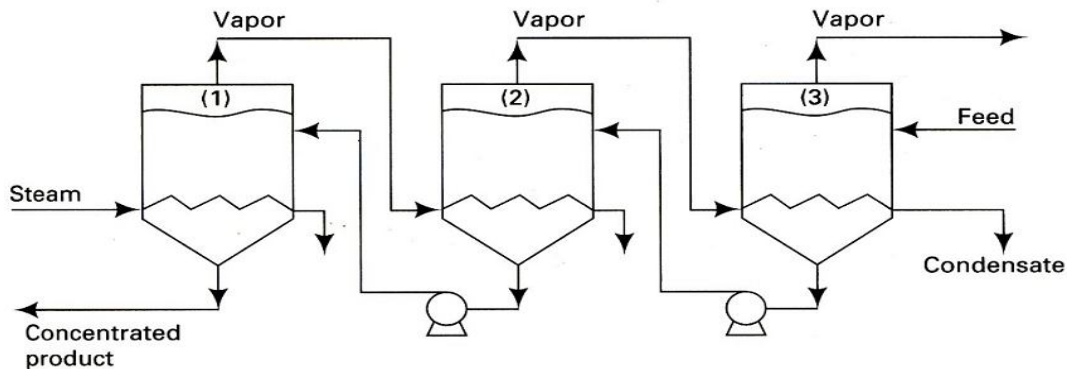
نکته: این روش تنها برای ورود خوراک به مرحله اول و خروج مایع غلیظ از مرحله آخره پمپ نیاز دارد. 😊

۲- روش معکوس یا تغذیه از پشت (Backward Feeding)

در این سیستم، خوراک و بخار در جهت مخالف هم وارد تبخیر کننده می شوند. خوراک (مایع رقیق) از مرحله آخر (سردترین مرحله) وارد شده و به مراحل دیگر پمپ می شود تا به مرحله اول برسد. این روش مشکل افزایش

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

ویسکوزیته را در اثر تغلیظ را حل می کند یعنی محلول غلیظ در اثر تماس با بخار داغ ویسکوزیته اش کمتر می شود و متعاقباً ضریب انتقال حرارت آن افزایش می یابد بنابراین این روش برای محلولهای ویسکوز مناسب است.



شکل (۱۷) شمای کلی یک تبخیر کننده سه مرحله ای با تغذیه از پشت

نکته : در این روش انتقال خوراک به مراحل بعدی در جهت افزایش فشار و به کمک پمپ صورت می گیرد. 😊

نکته : برای حالتی که خوراک ویسکوز باشد، این روش مناسب ترین روش است ولی این روش برای محلول سرد مقرون به صرفه نیست. 😊

۳- روش تغذیه مخلوط یا مختلط (Mixed Feeding)

در این روش خوراک در مراحل میانی وارد می شود و به مراحل بعدی (در جهت کاهش فشار و بدون استفاده از پمپ) جریان می یابد تا به مرحله آخر وارد شود و در ادامه به مرحله اول پمپ می شود تا تغلیظ نهایی روی آن صورت پذیرد.

نکته : در این روش تعدادی از پمپها که در روش تغذیه از پشت، استفاده می شد، حذف گردیده است و تبخیر نهایی در بالاترین دما انجام می شود. 😊

نکته : نوع خوراک دهی مختلط ترکیبی از روش مستقیم و غیر مستقیم است و به پمپاژ کمتری نیاز دارد. 😊

۳- روش تغذیه موازی (Parallel Feeding)

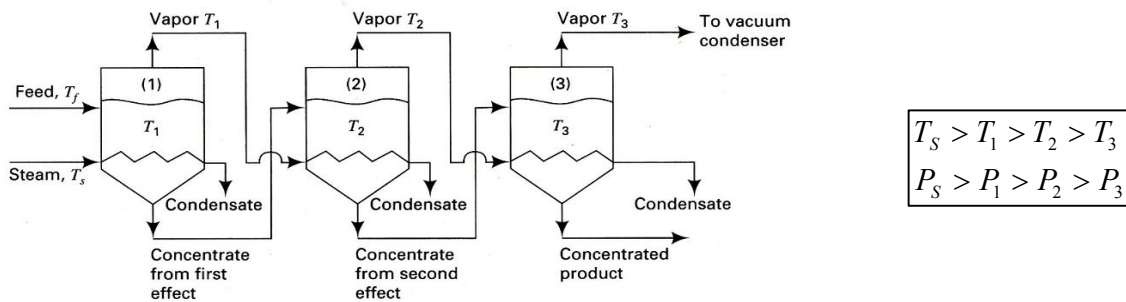
در این سیستم به هر تبخیر کننده، خوراک جداگانه ای وارد می شود و ارتباط تبخیر کننده ها فقط از طریق بخار است که از بخار هر مرحله برای گرم کردن مرحله بعدی استفاده می شود و در هر تبخیر کننده محصول جداگانه ای بدست

می آید. از این روش تنها زمانی استفاده می شود که خوراک مورد نظر تا غلظت اشباع یا نزدیک به اشباع تغلیظ می شود و در این حالت احتمال تشکیل بلورهای نمک وجود دارد که موجب رسوب و کاهش راندمان می گردد.

سوال : مهمترین عامل در انتخاب روش تغذیه (خوراک دهی) چیست ؟ ☹️

محاسبات تبخیر کننده چند مرحله ای

یک تبخیر کننده سه مرحله ای که بصورت تغذیه از جلو خوراک دهی شده است را در نظر بگیرید:



اگر $\Delta H_{mix} = 0$ باشد و $\lambda_S = \lambda_V$ باشد و $BPR = 0$ باشد :

$$q_1 = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_1 = S \cdot \lambda_S$$

$$q_2 = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_2 = V \cdot \lambda_V \quad (E=1 \Rightarrow S \cdot \lambda_S = V \cdot \lambda_V) \quad , \quad q_1 = q_2 = q_3$$

$$q_3 = U_3 \cdot A_3 \cdot \Delta T_3 = V \cdot \lambda_V$$

بنابراین گرمایی که بخار تولید شده در مرحله اول می گیرد آن را در مرحله بعدی پس می دهد

$$q_1 = q_2 = q_3 \Rightarrow U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_1 = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_2 = U_3 \cdot A_3 \cdot \Delta T_3$$

$$A_1 = A_2 = A_3 \Rightarrow U_1 \cdot \Delta T_1 = U_2 \cdot \Delta T_2 = U_3 \cdot \Delta T_3 = \frac{q}{A}$$

اگر سطوح تمام مراحل یکسان باشد :

$$\Rightarrow \frac{\Delta T_1}{U_1} = \frac{\Delta T_2}{U_2} = \frac{\Delta T_3}{U_3} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3}{U_1 + U_2 + U_3}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} = \frac{1}{U} \\ \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = \sum \Delta T \end{array} \right. \Rightarrow \frac{\Delta T_i}{U_i} = \frac{\sum \Delta T}{U} \Rightarrow \Delta T_i = \sum \Delta T \cdot \frac{U_i}{U} \quad (1-6)$$

$$V = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{\lambda_i}$$

نکته : مجموع بخار تولید شده در مراحل مختلف : ☺️

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

$$S = \frac{q_1}{\lambda_s}$$

😊 نکته: بخار ورودی تنها در مرحله اول مصرف می شود و مقدار آن :

$$\frac{V}{S} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{q_i}{\lambda_i}}{\frac{q_1}{\lambda_s}} = \lambda_s \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{\lambda_i} \cong N$$

اقتصاد بخار با فرض $(q_1 = q_2 = \dots = q_N)$:

😊 نکته: اگر از تغییرات گرمای نهان با دما و فشار صرف نظر کنیم، تمام λ ها با هم برابر می شوند و اقتصاد بخار برابر با N می شود. اگر گرمای نهان با دما تغییر کند، اقتصاد بخار کمتر از N می شود.

☹ سوال: اگر در سیستمی $BPR \neq 0$ باشد، ثابت کنید :

$$(\Delta T) \text{ ظاهری} = \sum \Delta T_i = T_s - T_3'$$

$$(\Delta T) \text{ واقعی} = (\Delta T) \text{ ظاهری} - \sum BPR$$

در مسایل تبخیر کننده های چند مرحله ای، داده های مساله به شرح زیر است :

T_F, P_{E_N}, P_S ، جریان مایع، C_P, F, x_F, x_{L_N} ، اطلاعات مربوط به BPR_i ها و U_i ها.

و خواسته های مساله عموماً A : سطح انتقال حرارت، E : اقتصاد و q_i ها هستند.

الگوریتم حل مسایل تبخیر کننده های چند مرحله ای

۱- تعیین T_{bN} یا نقطه جوش محلول در $effect$ آخر.

۲- تعیین میزان کل تبخیر: $\sum V_i$.

۳- تعیین L_i ها با فرض یکسان بودن V_i ها.

۴- محاسبه x_i ها.

۵- محاسبه $(\Delta T)_i = (\Delta T) \text{ ظاهری}$.

۶- محاسبه BPR_i ها

$$(\Delta T) \text{ واقعی} = (\Delta T) \text{ ظاهری} - \sum BPR$$

۷- محاسبه $(\Delta T) \text{ واقعی}$ از رابطه (۷-۱)

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

۸- محاسبه T_i ها

۹- محاسبه V_i ها و L_i های جدید با استفاده از موازنه انرژی .

۱۰- تعیین A_i ها با استفاده از مقادیر مربوط به q_i ها :

$$q_i = S \cdot \lambda_{S_i} \quad , \quad A_i = \frac{q_i}{U \cdot A_i \cdot \Delta T_i}$$

۱۱- محاسبه سطح انتقال حرارت متوسط :

$$A_m = \frac{\sum A_i}{m} \quad (m: \text{تعداد مراحل})$$

۱۲- مرحله Cross check

اگر $A_i \approx A_m$ باشد ، محاسبات کامل است و اگر اختلاف بیش از ۱ درصد باشد ، باید از V_i ها و L_i های جدید که در مرحله ۹ محاسبه شد، برای تعیین x_{Li} ها استفاده شود. به همین ترتیب مقادیر جدید $\Delta T'_1$ ، $\Delta T'_2$ و $\Delta T'_3$ توسط

روابط زیر اصلاح می شوند : (۸-۱)

$$\Delta T'_1 = \frac{A_1}{A_m} \cdot \Delta T_1 \quad , \quad \Delta T'_2 = \frac{A_2}{A_m} \cdot \Delta T_2 \quad , \quad \Delta T'_3 = \frac{A_3}{A_m} \cdot \Delta T_3$$

و این کار آنقدر ادامه می یابد تا A_i ها به اندازه کافی به A_m نزدیک شوند.

مثال : یک تبخیر کننده سه مرحله ای - که به روش مستقیم (Forward Feeding) تغذیه می شود- جهت تغلیظ

محلول شکر با غلظت اولیه ۱۰ درصد تا غلظت محلول نهایی ۵۰ درصد بکار می رود. افزایش در نقطه جوش بر اساس رابطه $BPR = 1.78x + 6.22x^2$ بیان شده است که x درصد وزنی شکر است. فشار تبخیر کننده در مرحله سوم

$13/4 \text{ kPa}$ و دبی خوراک $2268 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$ می باشد. خوراک در دمای $26/7^\circ \text{C}$ وارد تبخیر کننده اول می شود. ظرفیت

حرارتی محصول مورد نظر با درصد وزنی شکر در محلول بر اساس رابطه زیر بیان می شود : $C_p = -2.35x + 4.19$

حرارت انحلال ناچیز و ضرایب انتقال حرارت برای هر مرحله : $U_1 = 3122$ ، $U_2 = 1987$ ، $U_3 = 1136 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

مطلوب است محاسبه سطح انتقال حرارت در هر مرحله و میزان بخار مصرفی و اقتصاد بخار در صورتیکه فشار بخار مصرفی $205/5 \text{ kPa}$ و دمای بخار مصرفی $121/1^\circ \text{C}$ گزارش شده است.

۱- برای فشار $13/4 \text{ kPa}$ ، با استفاده از جدول بخار دمای اشباع، $51/67^\circ \text{C}$ است : $T_{b3} = 51.67^\circ \text{C}$ حلال

$T_{b3} = \text{حلال } T_{b3} + (BPR)_3$ ، $x_3 = 0.5 \Rightarrow BPR = 2.45^\circ \text{C}$

محلول $T_{b3} = 51.67^\circ \text{C} + 2.45^\circ \text{C} = 54.12^\circ \text{C}$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

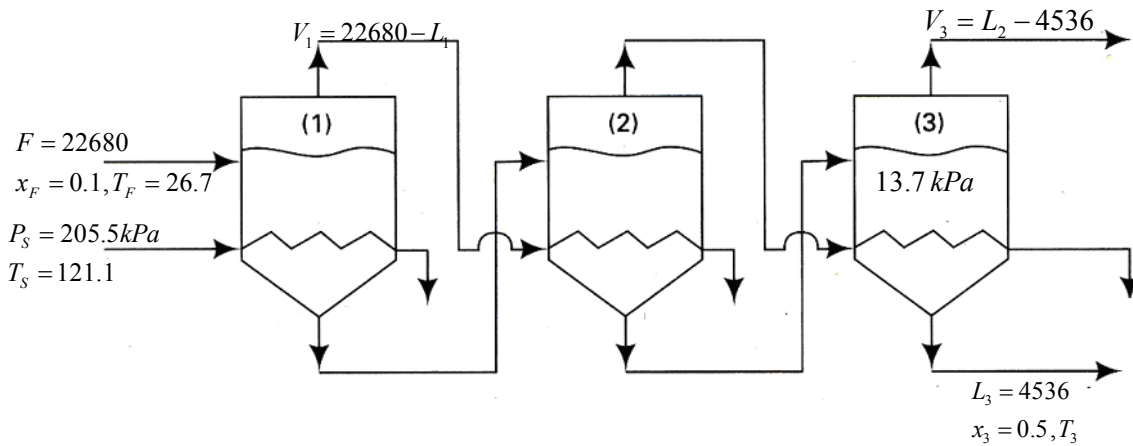
$$\begin{cases} F = L_3 + V_1 + V_2 + V_3 = 22680 \frac{kg}{hr} \Rightarrow \sum V_i = F - L_3 = 18144 \frac{kg}{hr} \\ F \cdot x_F = L_3 \cdot x_3 + (V_1 + V_2 + V_3) y_V \Rightarrow L_3 = \frac{F \cdot x_F}{x_3} = \frac{22680(0.1)}{0.5} = 4536 \frac{kg}{hr} \end{cases} \quad -2$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = \frac{\sum V_i}{3} = 6048 \frac{kg}{hr} \quad -3 \text{ فرض می کنیم:}$$

$$F = L_1 + V_1 \Rightarrow 22680 \frac{kg}{hr} = L_1 + 6048 \frac{kg}{hr} \Rightarrow L_1 = 16632 \frac{kg}{hr}$$

$$L_1 = L_2 + V_2 \Rightarrow L_2 = 10584 \frac{kg}{hr}, L_3 = 4539 \frac{kg}{hr}$$

$$\begin{cases} F \cdot x_F = L_1 \cdot x_1 \Rightarrow 22680(0.1) = 16632x_1 \Rightarrow x_1 = 0.136 \\ L_1 \cdot x_1 = L_2 \cdot x_2 \Rightarrow 16632(0.136) = 10584x_2 \Rightarrow x_2 = 0.214 \\ L_2 \cdot x_2 = L_3 \cdot x_3 \Rightarrow 10584(0.214) = 4536x_3 \Rightarrow x_3 = 0.500 \end{cases} \quad -4$$



$$\Delta T_{\text{ظاهری}} = T_S - T'_3 = 121.1^\circ\text{C} - 51.67^\circ\text{C} = 69.43^\circ\text{C} \quad -5$$

$$\begin{cases} (BPR)_1 = 1.78x_1 + 6.22x_1^2, (x_1 = 0.136) \Rightarrow 1.78(0.136) + 6.22(0.136)^2 = 0.36^\circ\text{C} \\ (BPR)_2 = 1.78x_2 + 6.22x_2^2, (x_2 = 0.214) \Rightarrow 1.78(0.214) + 6.22(0.214)^2 = 0.65^\circ\text{C} \\ (BPR)_3 = 1.78x_3 + 6.22x_3^2, (x_3 = 0.500) \Rightarrow 1.78(0.500) + 6.22(0.500)^2 = 2.45^\circ\text{C} \end{cases} \quad -6$$

$$(\Delta T)_{\text{واقعی}} = (\Delta T)_{\text{ظاهری}} - \sum BPR = 69.43^\circ\text{C} - (0.36 + 0.65 + 2.45^\circ\text{C}) = 65.97^\circ\text{C} \quad -7$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

$$\Delta T_1 = \sum \Delta T \cdot \frac{\frac{1}{U_1}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} = (65.97^\circ C) \times \frac{\frac{1}{3123}}{\frac{1}{3123} + \frac{1}{1987} + \frac{1}{1136}} \Rightarrow \begin{cases} \Delta T_1 = 12.40^\circ C \\ \Delta T_2 = 19.50^\circ C \\ \Delta T_3 = 34.07^\circ C \end{cases} \quad -8$$

چون خوراک سرد وارد مرحله اول می شود، این *effect* به گرمای بیشتری نیاز دارد. با افزایش ΔT_1 و کاهش ΔT_2 و

$$\Delta T_3 \text{ می توان بصورت زیر تخمین مناسبی برای این کار زد: } \Delta T_1 = 15.56, \Delta T_2 = 18.34, \Delta T_3 = 32.07$$

محاسبه نقطه جوش حقیقی محلول در هر مرحله :

$$T_1 = T_{S_1} - \Delta T_1 = 121.1^\circ C - 15.56^\circ C = 105.54^\circ C$$

$$\begin{cases} T_2 = T_1 - (BPR)_1 - \Delta T_2 = 105.54^\circ C - 0.36^\circ C - 18.34^\circ C = 86.84^\circ C \\ T_{S_2} = T_1 - (BPR)_1 = 105.54^\circ C - 0.36^\circ C = 105.18^\circ C \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_3 = T_2 - (BPR)_2 - \Delta T_3 = 86.84^\circ C - 0.65^\circ C - 32.07^\circ C = 54.12^\circ C \\ T_{S_3} = T_2 - (BPR)_2 = 86.84^\circ C - 0.65^\circ C = 86.19^\circ C \end{cases}$$

دماها در هر مرحله بصورت زیر است :

$$\begin{array}{ccccccc} T_{S_1} = 121.1^\circ C & \longrightarrow & T_{S_2} = 105.18^\circ C & \longrightarrow & T_{S_3} = 86.19^\circ C & \longrightarrow & T_{S_4} = 51.67^\circ C \\ T_1 = 105.54^\circ C & \longrightarrow & T_2 = 86.84^\circ C & \longrightarrow & T_3 = 54.12^\circ C & \longrightarrow & \end{array}$$

۹- چون غلظت جریانها متفاوت است، C_p نیز برای جریانهای مختلف، متفاوت است.

$$\begin{cases} F: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.1) = 3.955 \frac{kJ}{kg.K} \\ L_1: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.136) = 3.869 \frac{kJ}{kg.K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_2: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.214) = 3.684 \frac{kJ}{kg.K} \\ L_3: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.5) = 3.015 \frac{kJ}{kg.K} \end{cases}$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

موازنه انرژی برای هر مرحله : آنتالپی ها نسبت به دمای صفر درجه محاسبه می شوند.

$$\text{مرحله اول : } F.C_{P(F)}(T_F - 0) + S.\lambda_{S_1} = L_1.C_{P(L_1)}(T_1 - 0) + V_1.H_{V_1} \quad (۱)$$

$$\text{مرحله دوم : } L_1.C_{P(L_1)}(T_1 - 0) + V_1.\lambda_{S_2} = L_2.C_{P(L_2)}(T_2 - 0) + V_2.H_{V_2} \quad (۲)$$

$$\text{مرحله سوم : } L_2.C_{P(L_2)}(T_2 - 0) + V_2.\lambda_{S_3} = L_3.C_{P(L_3)}(T_3 - 0) + V_3.H_{V_3} \quad (۳)$$

$$T_1 = 105.54^\circ C, \quad T_{S_1} = 121.1^\circ C, \quad T_{S_2} = 105.18^\circ C, \quad (BPR)_1 = 0.36^\circ C \quad \text{مرحله اول :}$$

$$H_{V_1} = H_{S_2} + C_p(vapor) \times (BPR)_1 = 2684 \frac{kJ}{kg} + 1.884 \frac{kJ}{kg.K} \times 0.36K = 2685 \frac{kJ}{kg}$$

H_{V_1} : آنتالپی بخار سوپرهیت خروجی از مرحله اول و H_{S_2} : آنتالپی بخار اشباع در دمای T_{S_2}

$$\lambda_{S_1} = H_{S_1} - h_{C_1} = 2708 \frac{kJ}{kg} - 508 \frac{kJ}{kg} = 2200 \frac{kJ}{kg} \quad H_{S_1}: \text{آنتالپی بخار اشباع در دمای } T_{S_1}$$

$$T_2 = 86.84^\circ C, \quad T_{S_3} = 86.19^\circ C, \quad (BPR)_2 = 0.65^\circ C \quad \text{مرحله دوم :}$$

$$H_{V_2} = H_{S_3} + C_p(vapor) \times (BPR)_2 = 2654 \frac{kJ}{kg} + 1.884 \frac{kJ}{kg.K} \times 0.65K = 2655 \frac{kJ}{kg}$$

H_{V_2} : آنتالپی بخار سوپرهیت خروجی از مرحله دوم و H_{S_3} : آنتالپی بخار اشباع در دمای T_{S_3}

$$\lambda_{S_2} = H_{V_1} - h_{S_2} = 2685 \frac{kJ}{kg} - 441 \frac{kJ}{kg} = 2244 \frac{kJ}{kg} \quad h_{S_2}: \text{آنتالپی مایع در دمای } T_{S_2}$$

$$T_3 = 54.12^\circ C, \quad T_{S_4} = 51.67^\circ C, \quad (BPR)_3 = 2.45^\circ C \quad \text{مرحله سوم :}$$

$$H_{V_3} = H_{S_4} + C_p(vapor) \times (BPR)_3 = 2595 \frac{kJ}{kg} + 1.884 \frac{kJ}{kg.K} \times 2.45K = 2600 \frac{kJ}{kg}$$

H_{V_3} : آنتالپی بخار سوپرهیت خروجی از مرحله اول و H_{S_2} : آنتالپی بخار اشباع در دمای T_{S_2}

$$\lambda_{S_3} = H_{V_2} - h_{S_3} = 2655 \frac{kJ}{kg} - 361 \frac{kJ}{kg} = 2294 \frac{kJ}{kg} \quad h_{S_3}: \text{آنتالپی مایع در دمای } T_{S_3}$$

با نوشتن معادلات موازنه جرم برای هر مرحله ، تا اینجا ۶ معادله و ۶ مجهول داریم :

$$V_1 = F - L_1 = 22680 - L_1 \quad (۴)$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

$$V_2 = L_1 - L_2 \quad (5)$$

$$V_3 = L_2 - L_3 = L_2 - 4536 \quad (6)$$

مجهولات ما $S, L_2, L_1, V_3, V_2, V_1$ هستند. با جایگذاری مقادیر آنتالپی که در بالا برای هر مرحله محاسبه شده

است و مقادیر V_i بر حسب L_i ، تعداد معادلات ما و مجهولات به سه عدد تقلیل می یابد:

$$F.C_{P(F)}(T_F - 0) + S.\lambda_{S_1} = L_1.C_{P(L_1)}(T_1 - 0) + V_1.H_{V_1} \Rightarrow$$

$$22680 \times 3.955 \times (26.7 - 0) + S \times (2200) = L_1 \times (3.389) \times (105.54 - 0) + (22680 - L_1) \times (2685) \quad (I)$$

$$L_1.C_{P(L_1)}(T_1 - 0) + V_1.\lambda_{S_2} = L_2.C_{P(L_2)}(T_2 - 0) + V_2.H_{V_2} \Rightarrow$$

$$L_1(3.684)(105.54 - 0) + (22680 - L_1)(2244) = L_2(3.684)(86.84 - 0) + (L_1 - L_2)(2655) \quad (II)$$

$$L_2.C_{P(L_2)}(T_2 - 0) + V_2.\lambda_{S_3} = L_3.C_{P(L_3)}(T_3 - 0) + V_3.H_{V_3} \Rightarrow$$

$$L_2(3.684) \times (86.84 - 0) + (L_1 - L_2)(2294) = 4536 \times 3.015 \times (54.12 - 0) + (L_2 - 4536) \times (2600) \quad (III)$$

با حل سه معادله بالا، مجهولات بصورت زیر بدست می آیند:

$$\Rightarrow L_1 = 17078 \frac{kg}{hr}, L_2 = 11068 \frac{kg}{hr}, V_1 = 5602 \frac{kg}{hr}, V_2 = 6010 \frac{kg}{hr}, V_3 = 6532 \frac{kg}{hr}, S = 8936 \frac{kg}{hr}$$

حال این مقادیر را با مقادیر فرض شده در ابتدای حل مساله مقایسه می کنیم و این Loop را اینقدر تکرار می شود تا

این دو دسته به هم نزدیک شوند.

$$q_1 = S.\lambda_{S_1} = \left(\frac{8936 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) \left(2200 \times 1000 \frac{J}{kg} \right) = 5.46 \times 10^6 W \quad \text{1- محاسبه سطوح انتقال حرارت در هر مرحله:}$$

$$q_2 = V_1.\lambda_{S_2} = \left(\frac{5602 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) \left(2244 \times 1000 \frac{J}{kg} \right) = 3.492 \times 10^6 W$$

$$q_3 = V_2.\lambda_{S_3} = \left(\frac{6010 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) \left(2294 \times 1000 \frac{J}{kg} \right) = 3.830 \times 10^6 W$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

$$A_1 = \frac{q_1}{U_1 \cdot \Delta T_1} = \frac{5.46 \times 10^6 W}{3123 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 15.56 K} = 112.4 m^2$$

$$A_2 = \frac{q_2}{U_2 \cdot \Delta T_2} = \frac{3.492 \times 10^6 W}{1987 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 18.34 K} = 95.8 m^2$$

$$A_3 = \frac{q_3}{U_3 \cdot \Delta T_3} = \frac{3.83 \times 10^6 W}{1136 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 32.07 K} = 105.1 m^2$$

$$A_m = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} = \frac{112.4 m^2 + 95.8 m^2 + 105.1 m^2}{3} = 104.4 m^2 \quad -11$$

۱۲- اختلاف مساحت از میانگین کمتر از ۱۰ درصد است و قابل قبول است و تکرار مراحل بالا ضروری نمی باشد ولی

در مبحث جهت افزایش دقت محاسبات و آشنایی با نحوه حل صحیح، این مراحل تکرار می شود:

مقادیر جدید L_1 , L_2 , L_3 را در گام (Step) چهارم قرار می دهیم تا غلظت‌های هر مرحله را بدست آوریم:

$$L_1 = 17078 \frac{kg}{hr}, \quad L_2 = 11068 \frac{kg}{hr}, \quad L_3 = 4536 \frac{kg}{hr}$$

$$\begin{cases} F \cdot x_F = L_1 \cdot x_1 & \Rightarrow 22680 \times (0.100) = 17078 \times (x_1) & \Rightarrow x_1 = 0.133 \\ L_1 \cdot x_1 = L_2 \cdot x_2 & \Rightarrow 17078 \times (0.133) = 11068 \times (x_2) & \Rightarrow x_2 = 0.205 \\ L_2 \cdot x_2 = L_3 \cdot x_3 & \Rightarrow 11068 \times (0.205) = 4536 \times (x_3) & \Rightarrow x_3 = 0.5 \end{cases}$$

$$\begin{cases} (BPR)_1 = 1.78x_1 + 6.22x_1^2, & (x_1 = 0.133) \Rightarrow 1.78(0.133) + 6.22(0.133)^2 = 0.35^\circ C \\ (BPR)_2 = 1.78x_2 + 6.22x_2^2, & (x_2 = 0.205) \Rightarrow 1.78(0.205) + 6.22(0.205)^2 = 0.63^\circ C \\ (BPR)_3 = 1.78x_3 + 6.22x_3^2, & (x_3 = 0.500) \Rightarrow 1.78(0.500) + 6.22(0.500)^2 = 2.45^\circ C \end{cases}$$

$$\sum \Delta T = T_{S_1} - T'_3 - \sum (BPR)_i = 121.1^\circ C - 51.67^\circ C - (0.35 + 0.63 + 2.45) = 66.00^\circ C$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

$$\Delta T'_1 = \frac{A_1}{A_m} \cdot \Delta T_1 = \frac{15.56^\circ C \times 112.4 m^2}{104.4 m^2} = 16.77 K = 16.77^\circ C$$

$$\Delta T'_2 = \frac{A_2}{A_m} \cdot \Delta T_2 = \frac{18.34^\circ C \times 95.8 m^2}{104.4 m^2} = 16.86 K = 16.86^\circ C$$

$$\Delta T'_3 = \frac{A_3}{A_m} \cdot \Delta T_3 = \frac{32.07^\circ C \times 105.1 m^2}{104.4 m^2} = 32.34 K = 32.34^\circ C$$

$$\sum \Delta T = 16.77^\circ C + 16.86^\circ C + 32.34^\circ C = 65.97^\circ C$$

مقادیر: $\Delta T'_1$, $\Delta T'_2$, $\Delta T'_3$ بصورت زیر اصلاح می شود تا $\sum \Delta T = 66.00^\circ C$ شود:

$$\Delta T'_1 = 16.77^\circ C, \quad \Delta T'_2 = 16.87^\circ C, \quad \Delta T'_3 = 32.36^\circ C \Rightarrow \sum \Delta T = 66.00^\circ C$$

$$T_1 = T_{S_1} - \Delta T'_1 = 121.1^\circ C - 16.77^\circ C = 104.33^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - (BPR)_1 - \Delta T'_2 = 104.33^\circ C - 0.35^\circ C - 16.87^\circ C = 87.11^\circ C$$

$$T_{S_2} = T_1 - (BPR)_1 = 104.33^\circ C - 0.35^\circ C = 103.98^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - (BPR)_2 - \Delta T'_3 = 87.11^\circ C - 0.63^\circ C - 32.36^\circ C = 54.12^\circ C$$

$$T_{S_3} = T_2 - (BPR)_2 = 87.11^\circ C - 0.63^\circ C = 86.48^\circ C$$

C_p جدید برای جریانهای مختلف:

$$\left\{ \begin{array}{l} F: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.1) = 3.955 \frac{kJ}{kg.K} \\ L_1: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.133) = 3.877 \frac{kJ}{kg.K} \\ L_2: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.205) = 3.708 \frac{kJ}{kg.K} \\ L_3: C_p = 4.19 - 2.35x \Rightarrow C_p = 4.19 - 2.35(0.5) = 3.015 \frac{kJ}{kg.K} \end{array} \right.$$

مقادیر جدید آنتالپی برای هر مرحله به شرح زیر است:

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

$$H_{V_1} = H_{S_2} + 1.884(^{\circ}C \text{ superheat}) = 2682 \frac{kJ}{kg} + 1.884 \frac{kJ}{kg.K} (0.35K) = 2683 \frac{kJ}{kg}$$

$$\lambda_{S_1} = H_{S_1} - h_{S_1} = 2708 \frac{kJ}{kg} - 508 \frac{kJ}{kg} = 2200 \frac{kJ}{kg}$$

$$H_{V_2} = H_{S_3} + 1.884(^{\circ}C \text{ superheat}) = 2654 \frac{kJ}{kg} + 1.884 \frac{kJ}{kg.K} (0.63K) = 2655 \frac{kJ}{kg}$$

$$\lambda_{S_2} = H_{V_1} - h_{S_2} = 2683 \frac{kJ}{kg} - 440 \frac{kJ}{kg} = 2243 \frac{kJ}{kg}$$

$$H_{V_3} = H_{S_4} + 1.884(^{\circ}C \text{ superheat}) = 2595 \frac{kJ}{kg} + 1.884 \frac{kJ}{kg.K} (2.45K) = 2600 \frac{kJ}{kg}$$

$$\lambda_{S_3} = H_{V_2} - h_{S_3} = 2655 \frac{kJ}{kg} - 362 \frac{kJ}{kg} = 2293 \frac{kJ}{kg}$$

اگر موازنه انرژی را برای هر مرحله بنویسیم :

$$22680(3.995)(26.7 - 0) + S(2200) = L_1(3.708)(104.33 - 0) + (22680 - L_1)(2683) \quad \text{مرحله اول :}$$

$$L_1(3.877)(104.33 - 0) + (22680 - L_1)(2243) = L_2(3.708)(87.11 - 0) + (L_1 - L_2)(2655) \quad \text{مرحله دوم :}$$

$$L_2(3.708)(87.11 - 0) + (L_1 - L_2)(2293) = 4536(3.015)(54.12 - 0) + (L_2 - 4536)(2600) \quad \text{مرحله سوم :}$$

با حل سه معادله بالا ، مجهولات بصورت زیر بدست می آیند :

$$\Rightarrow L_1 = 17005 \frac{kg}{hr}, L_2 = 10952 \frac{kg}{hr}, V_1 = 5675 \frac{kg}{hr}, V_2 = 6053 \frac{kg}{hr}, V_3 = 6416 \frac{kg}{hr}, S = 8960 \frac{kg}{hr}$$

$$q_1 = S \cdot \lambda_{S_1} = \left(\frac{8960 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) \left(2200 \times 1000 \frac{J}{kg} \right) = 5.476 \times 10^6 W \quad \text{محاسبه سطوح انتقال حرارت در هر مرحله :}$$

$$q_2 = V_1 \cdot \lambda_{S_2} = \left(\frac{5675 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) \left(2243 \times 1000 \frac{J}{kg} \right) = 3.539 \times 10^6 W$$

$$q_3 = V_2 \cdot \lambda_{S_3} = \left(\frac{6053 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \right) \left(2293 \times 1000 \frac{J}{kg} \right) = 3.855 \times 10^6 W$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

$$A_1 = \frac{q_1}{U_1 \cdot \Delta T_1} = \frac{5.476 \times 10^6 W}{3123 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 16.77 K} = 104.6 m^2$$

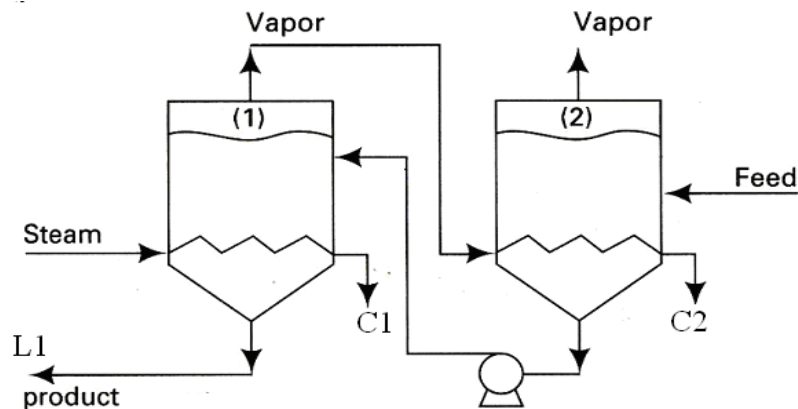
$$A_2 = \frac{q_2}{U_2 \cdot \Delta T_2} = \frac{3.539 \times 10^6 W}{1987 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 16.87 K} = 105.6 m^2$$

$$A_3 = \frac{q_3}{U_3 \cdot \Delta T_3} = \frac{3.855 \times 10^6 W}{1136 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 32.36 K} = 104.9 m^2$$

$$A_m = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} = \frac{104.6 m^2 + 105.6 m^2 + 104.9 m^2}{3} = 105.0 m^2$$

$$Economy = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{S} = \frac{5675 \frac{kg}{hr} + 6053 \frac{kg}{hr} + 6416 \frac{kg}{hr}}{8960 \frac{kg}{hr}} = 2.025$$

در شکل زیر یک تبخیر کننده دو مرحله ای که بصورت معکوس خوراک دهی شده است ، نشان داده می شود.



شکل (۱۹) شمایی از یک تبخیر کننده دومرحله ای با خوراک دهی معکوس

معادلات برای این سیستم :

$$L_2 = V_1 + L_1$$

$$L_2 \cdot x_2 = L_1 \cdot x_1$$

$$L_1 \cdot h_{L_1} + V_1 \cdot H_1 = S \cdot \lambda_{S_1} + L_2 \cdot h_{L_2}$$

مرحله اول :

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

$$q_1 = S \cdot \lambda_{S_1} = S(H_{S_1} - h_{C_1}) = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_1 = U_1 \cdot A_1 (T_{C_1} - T_1)$$

$$F = V_2 + L_2$$

$$F \cdot x_f = L_2 \cdot x_2$$

مرحله دوم :

$$L_2 \cdot h_{L_2} + V_2 \cdot H_2 = F \cdot h_F + V_1 \cdot \lambda_{V_1}$$

$$q_2 = V_1 (H_{V_1} - h_{C_2}) = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_2 = U_2 \cdot A_2 (T_{C_2} - T_2)$$

برای تبخیر کننده دو مرحله ای با جریان معکوس باید اطلاعات زیر موجود باشد :

۱- دبی جرمی خوراک ، غلظت خوراک و دمای خوراک (F, x_F, T_F)

۲- فشار بخار مصرفی

۳- دمای بخار کندانس شده در مرحله آخر T_{C_2}

۴- غلظت مایع خروجی از مرحله اول x_1

۵- ضرایب کلی انتقال حرارت برای هر دو مرحله

با فرض یکسان بودن سطح انتقال حرارت در هر مرحله پارامترهای زیر را می توان تعیین و محاسبه کرد :

۱- سطح انتقال حرارت برای هر مرحله

۲- دما و فشار در هر دو مرحله

۳- غلظت محلول در مرحله دوم

۴- دبی جرمی مایع و بخار (L_1, L_2, V_1, V_2)

۵- شدت انتقال حرارت در هر مرحله (q_1, q_2)

۶- دبی جرمی بخار مصرفی

$$A = \frac{q_2}{U_2 \cdot (T_{C_1} - T_2)} \quad , \quad q_1 = \frac{U_1 \cdot q_2}{U_2} \times \frac{T_S - T_1}{T_1 - (BPR)_1 - T_2}$$

$$T_1 = \frac{T_S + C((BPR)_1 + T_2)}{1 + C} \quad , \quad C = \frac{U_2 \cdot q_1}{U_1 \cdot q_2}$$

الگوریتم حل مساله :

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II	
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	مدرس: علیرضا عظیمی

۱- محاسبه L_1 :
$$L_1 = \frac{F \cdot x_F}{x_1}$$

۲- محاسبه P_2 با استفاده از دمای T_{C_2} و جدول بخار

۳- محاسبه $V_1 + V_2$

۴- فرض یکسان بودن دبی بخار خروجی
$$V_1 = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

۵-
$$V_2 = F - L_1 - V_1$$

۶- محاسبه L_2
$$L_2 = F - V_2$$

۷- محاسبه غلظت محلول در مرحله دوم x_2
$$x_2 = \frac{F \cdot x_F}{L_2}$$

۸- محاسبه T_2 با استفاده از دیاگرام دورینگ و غلظت x_2 و دمای T_{C_2}

۹- محاسبه $(BPR)_2$
$$(BPR)_2 = T_2 - T_{C_2}$$

۱۰- تعیین h_F ، h_{L_2} ، H_{V_2} با استفاده از نمودارها یا محاسبه توسط ظرفیت گرمایی ویژه

۱۱- محاسبه q_2
$$q_2 = V_2 H_{V_2} + L_2 \cdot h_{L_2} - F \cdot h_F$$

۱۲- محاسبه T_1 با حل معادله :
$$T_1 = \frac{T_S + C((BPR)_1 + T_2)}{1 + C}$$

الف) ابتدا یک مقدار برای T_1^{Guess} حدس می زنیم.

ب) x_1 و $(BPR)_1$ را برای محلول بدست می آوریم :
$$(BPR)_1 = T_1^{Guess} - T_{C_1}$$

ج) h_{L_1} محلول را بر اساس غلظت و T_1^{Guess} محاسبه می کنیم یا از نمودار می خوانیم.

د) با استفاده از جدول بخار P_1 و h_{C_1} را در دمای T_{C_1} را تعیین می کنیم.

ه) با استفاده از جدول بخار H_{V_1} را در فشار P_1 و دمای T_1^{Guess} تعیین می کنیم.

و) محاسبه q_1
$$q_1 = V_1 H_{V_1} + L_1 \cdot h_{L_1} - L_2 \cdot h_{L_2}$$

ز) پارامتر C را از رابطه زیر بدست می آوریم :
$$C = \frac{U_2 \cdot q_1}{U_1 \cdot q_2}$$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

$$T_1^{Cal} = \frac{T_S + C \times ((BPR)_1 + T_2)}{1 + C} \quad \text{ح) محاسبه } T_1^{Cal}$$

ط) اگر مقدار T_1^{Cal} با مقدار T_1^{Guess} برابر (نزدیک) نباشد، به قسمت (الف) برمی گردیم.

$$A_1 = \frac{q_1}{U_1 \times (T_S - T_1)} \quad , \quad A_2 = \frac{q_2}{U_2 \times (T_{C_1} - T_2)} \quad \text{۱۳- محاسبه سطح انتقال حرارت :}$$


$$V_1 = V^{Old} \frac{A_2}{A_1} \quad \text{۱۴- اگر مساحتها برابر نباشند } V_1 \text{ جدیدی حدس زده و به مرحله (د) می رویم :}$$

مثال : محلول سود سوز آور در یک تبخیر کننده دو مرحله ای با جریان معکوس تغلیظ شده و به غلظت ۵۰ درصد

وزنی می رسد. دبی جرمی خوراک $10000 \frac{lb}{hr}$ و غلظت خوراک ۱۰ درصد وزنی و دمای خوراک $100^\circ F$ است. دمای

کندانسور در مرحله دوم $110^\circ F$ و ضرایب کلی انتقال حرارت $U_1 = 300 \frac{Btu}{ft^2 \cdot ^\circ F \cdot hr}$ ، $U_2 = 400 \frac{Btu}{ft^2 \cdot ^\circ F \cdot hr}$

می باشد. بخار اشباع مصرفی در مرحله اول در فشار 25 Psi وارد می شود. سطح انتقال حرارت در دو مرحله یکسان است. مطلوب است محاسبه سطح انتقال حرارت و شرایط تمامی جریانها در سیستم


تمرین : خوراکی با غلظت ۲ درصد وزنی به یک تبخیر کننده دو مرحله ای که خوراک بصورت *Backward* 

وارد آن می شود، تا غلظت ۲۵ درصد وزنی تغلیظ می شود. دمای خوراک $100^\circ F$ و BPR در هر مرحله ناچیز فرض می شود. با صرفنظر کردن از حرارت انحلال در هر مرحله و مقادیر مربوط به ضرایب انتقال حرارت که به ترتیب


$U_1 = 500 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$ و $U_2 = 700 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$ می باشد. فشار مرحله آخر 0.98 psi و فشار بخار مصرفی

100 psi می باشد. اگر سطح انتقال حرارت در هر مرحله 100 ft^2 باشد، مطلوب است محاسبه شدت خوراک ورودی و میزان محصول نهایی در صورتیکه C_p محلول با C_p آب برابر فرض شود.


تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	مدرس: علیرضا عظیمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	

(مهندسی شیمی ۱۳۸۵): در نوع تغذیه (*Feeding*) تبخیر کننده ها، اهمیت کدام عامل بیشتر است؟ 


- الف) ویسکوزیته
 ب) تمایل به ایجاد رسوب در بدنه تبخیر کننده
 ج) حساسیت به دما
 د) دانسیته محلول

(مهندسی شیمی ۱۳۸۵): در تغذیه مجموعه تبخیر کننده های موازی (*Parallel*) کدام صحیح است؟ 

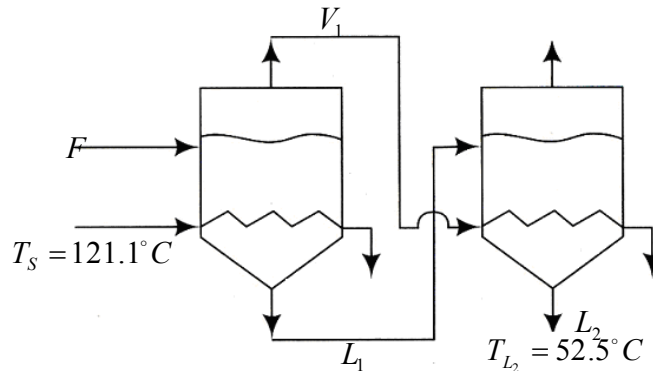
- الف) خوراک به چند قسمت تقسیم شده و وارد هر مرحله گردیده محصول از همان مرحله خارج می شود
 ب) خوراک وارد یک مرحله میانی شده و بخار وارد تک تک مراحل می شود.
 ج) خوراک وارد مرحله اول شده و بخار موازی با آن وارد همان مرحله می شود.
 د) خوراک تقسیم شده و وارد مراحل می گردد ولی محصول از مرحله آخر خارج می گردد.

(مهندسی شیمی ۱۳۸۴): در عملیات تغلیظ متشکل از چند تبخیر کننده در صورتیکه محصول نهایی 

- غیر ویسکوز بوده و خوراک مصرفی سرد باشد، بهترین روش خوراک دهی کدام روش زیر است؟
 الف) مستقیم
 ب) مختلط
 ج) موازی
 د) معکوس

(مهندسی شیمی ۱۳۸۳): در صورتیکه افت درجه حرارت کل برای یک مجموعه تبخیر کننده ۶۵/۹۷ 

درجه سانتیگراد باشد، با توجه به مقادیر داده شده در شکل، میزان *BPR* در مرحله اول برابر است با:

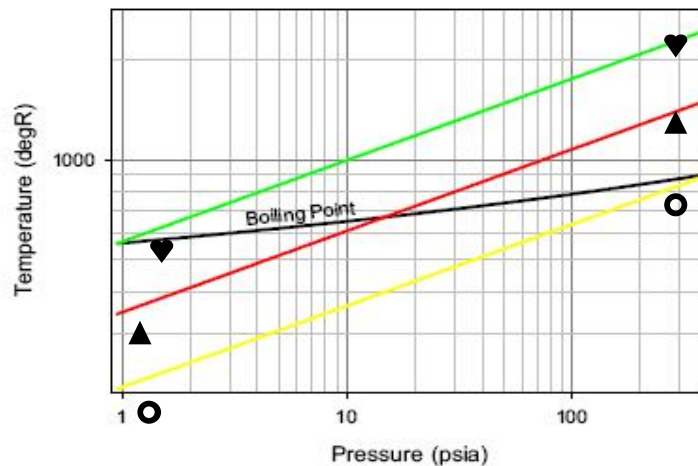


- الف) $2/63^{\circ}C$ ب) $3/52^{\circ}C$ ج) $2/25^{\circ}C$ د) $1/5^{\circ}C$

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان مدرس: علیرضا عظیمی

تبخیر کننده با تراکم مجدد بخار (Vapor Recompression Evaporator)

در تبخیر کننده های چند مرحله ای حرارت مورد نیاز برای تغلیظ مراحل بعدی توسط بخار تولید شده در مراحل قبلی تامین می شود. آیا راه حل دیگری وجود دارد که با استفاده از آن بتوان اقتصاد بخار را افزایش داد؟
بخار خروجی از مرحله اول همدمما با مایع موجود در آن است بنابراین برای انتقال حرارت نیروی محرکه ای وجود ندارد. یکی از راههای افزایش دمای بخار متراکم کردن آن است. شکل زیر تغییرات دما را با تراکم بخار اشباع نشان می دهد.



شکل (۲۰) تغییرات دما با تراکم آدیاباتیک بخار اشباع

در شکل بالا خط \heartsuit بیانگر فشار ۱ Psi و خط \blacktriangle بیانگر فشار ۱۴/۷ Psi و خط \circ بیانگر فشار ۴۰۰ Psi است و محل تلاقی این خطوط با خط *Boiling Point* دمای بخار را می دهد.

تراکم آدیاباتیک بخار اشباع همیشه بخار سوپرهیت تولید می کند و در این صورت نیروی محرکه ایجاد می شود.

متاسفانه با بالا رفتن دما و فشار، گرمای نهان بخار کوچکتر می شود:

$$T_S < T \Rightarrow \lambda_S < \lambda$$

در تبخیر کننده با تراکم مجدد بخار، بخار خروجی تا فشارهای بالا متراکم می شود و دمای اشباع آن افزایش می یابد

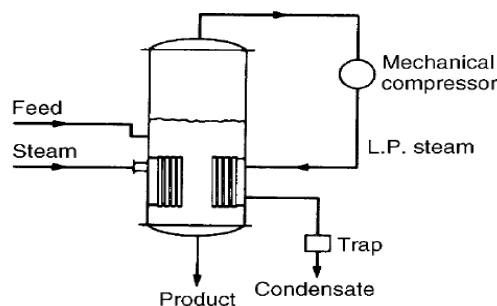
تا به عنوان سیال گرم کننده مورد استفاده قرار گیرد. دما و فشار بخار مصرفی از بخار خروجی بیشتر است. این تبدیل

بدون هزینه نیست و برای افزایش فشار بخار خروجی از دو روش مکانیکی و حرارتی استفاده می شود.

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان
	مدرس: علیرضا عظیمی

الف) تبخیر کننده با تراکم مجدد مکانیکی (*Mechanical Recompression Evaporator*)

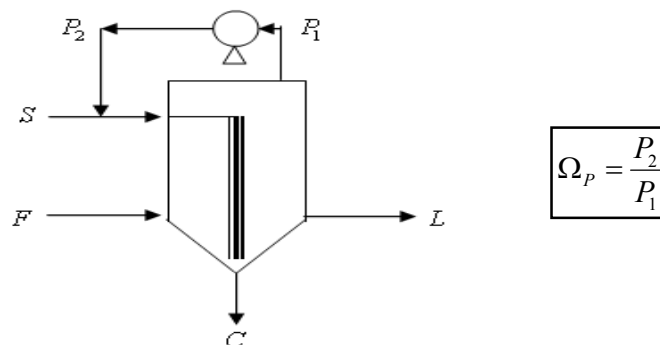
در این روش برای افزایش فشار بخار خروجی از کمپرسور استفاده می شود. علت افزایش فشار بخار این است که بخار خروجی نمی تواند مایع را به غلظت نهایی برساند. از مزایای این تبخیر کننده این است که اقتصاد آن از یک تبخیر کننده یک مرحله ای خیلی بیشتر است و معادل یک تبخیر کننده ۱۰ تا ۱۵ مرحله ای است. بنابراین هدف از استفاده از این تبخیر کننده ها کم کردن *Rate* بخار مصرفی است. از معایب عمده این تبخیر کننده ها هزینه سنگین کمپرسور و هزینه نگهداری آن و مصرف برق زیاد است.



شکل (۲۰) شمایی از یک تبخیر کننده با تراکم مجدد مکانیکی

😊 نکته : تبخیر کننده با تراکم مجدد مکانیکی در تغلیظ محلولهای بسیار رقیق رادیواکتیو و تولید آب مقطر به کار

می رود.



$$\Omega_p = \frac{P_2}{P_1}$$

در شرایط عادی یک تبخیر کننده ، بخار آب مانند گاز ایده آل رفتار می کند و کار مورد نیاز برای تراکم آدیاباتیک از

$$W = \frac{P_{in} \cdot \gamma}{(\gamma - 1) \rho_{in}} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \frac{Btu}{lb}$$

رابطه زیر بدست می آید : (۸-۱)

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	مدرس: علیرضا عظیمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - \frac{R}{M}} = 1.324, \quad C_p = 0.45 \frac{Btu}{lb \cdot F}, \quad R = 1.986 \frac{Btu}{lb_m \cdot R}, \quad M = 18 \frac{lb}{mol}$$

$$P = \frac{V.W}{\eta} \frac{Btu}{hr}$$

برای بدست آوردن توان کمپرسور:

V : میزان بخار تولید شده و η : بازده کمپرسور است.

با تراکم فشار دما افزایش می یابد و با افزایش دما λ کاهش می یابد. این تفاوت باید با بخار اضافی (make up steam)

جبران شود. برای تخمین مقدار بخار اضافی مورد نیاز از موازنه انرژی کمک می گیریم:

$$q = V.H_v - F.h_f + L.h_L$$

برای سیستم هایی که $BPR = 0$ باشد h_L و h_f تنها در *Sensible Heat* تفاوت دارند.

$$q = V.H_v - F.h_f + L.h_L = V.H_v - (F - L)h_L = V.H_v - V.h_L = V.\lambda$$

$$\boxed{q \cong V.\lambda}$$

$$q = V.\lambda_s + S.\lambda_s \Rightarrow S \cong V \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} - 1 \right) \Rightarrow \text{صورت گرفته است.}$$

$$\boxed{\frac{V}{S} \cong \frac{\lambda_s}{\lambda - \lambda_s} \gg 1}$$

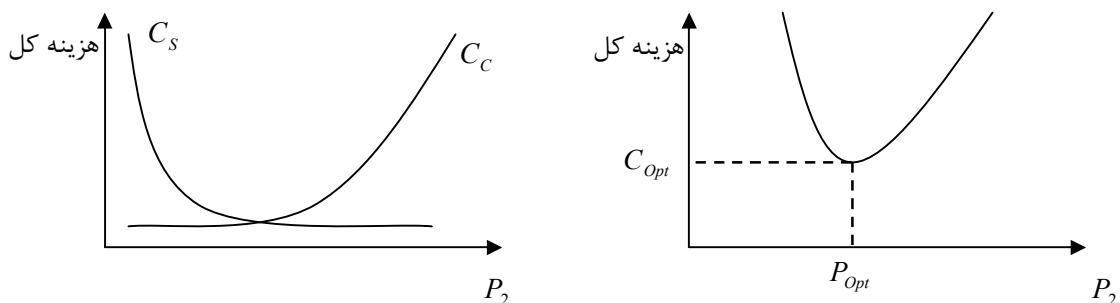
این میزان خیلی بیشتر از واحد است. البته این روش محاسبه اقتصاد غیر منصفانه است زیرا کاهش مصرف بخار بر اثر

تحمیل هزینه کمپرسور صورت گرفته است. (هزینه ساخت و برق و نگهداری کمپرسور).

😊 نکته: در تراکم مجدد بخار، عامل اصلی در هزینه، فشار خروجی از کمپرسور است.

😊 نکته: افزایش P_2 سبب کاهش سطح انتقال حرارت و کاهش میزان بخار آب مصرفی می شود از طرف دیگر

برای افزایش P_2 به کمپرسور قویتر نیاز دارد و مصرف انرژی و هزینه بیشتری را موجب می شود (شکل ۲۱).



شکل (۲۱) تغییرات هزینه کل بر حسب فشار خروجی کمپرسور

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۸-۸۹	مدرس: علیرضا عظیمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	

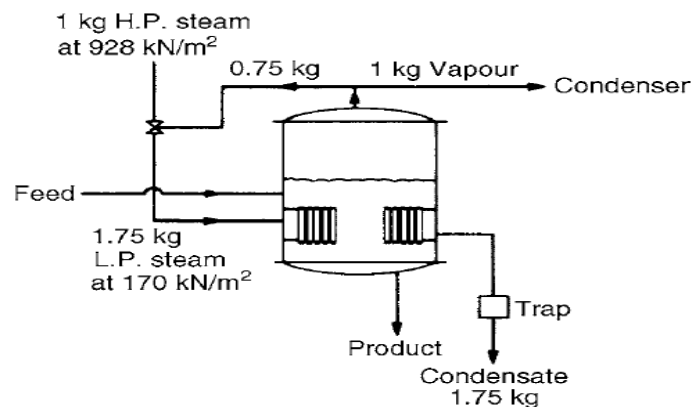
$$Optimom: \frac{dC_{total}}{dP_2} = 0$$

C_S : هزینه بخار مصرفی، C_C : هزینه عملیات و نگهداری کمپرسور و C_{total} : هزینه کل می باشد.

تعمیرین: برای تامین آب آشامیدنی در یک ناوگان دریایی از تبخیر کننده با تراکم مجدد بخار استفاده می شود. روزانه ۶۰۰۰۰ گالن آب مورد نیاز است. آب دریا با غلظت ۳/۵ درصد وزنی $NaCl$ در دسترس است. محصول تبخیر کننده آب با غلظت وزنی ۱۰ درصد وزنی نمک می باشد. آب دریا تا دمای $164^\circ F$ گرم می شود و تبخیر کننده در فشار 8 Psi کار می کند. بخار خروجی از کمپرسور دارای فشار 15 Psi و دمای $300^\circ F$ است. ضریب کلی انتقال حرارت برابر $600 \frac{Btu}{ft^2 \cdot F \cdot hr}$ می باشد. مطلوب است سطح انتقال حرارت مورد نیاز و مقدار کاری که توسط کمپرسور انجام می شود. (هر گالن برابر با ۸/۳۳ پوند است)

ب) تبخیر کننده با تراکم مجدد حرارتی (Thermal Recompression Evaporator)

ممکن است افزایش فشار توسط سیستم های *Steam ejector* یا *Steam jet* صورت گیرد که به این سیستم ها تراکم مجدد حرارتی گویند. در این سیستم ها بخار با فشاری که توسط بخارخروجی از یک فواره اعمال می شود، متراکم می شود. این سیستم ها برای تبخیر در شرایط خلاء مناسب تر از تبخیر کننده با تراکم مجدد مکانیکی است همچنین از لحاظ هزینه ارزاتر هستند ولی اشکال عمده این تبخیر کننده ها بازده پایین فواره ها و انعطاف ناپذیری سیستم نسبت به شرایط مختلف عملیاتی است. همچنین قابلیت آنها کمتر از نوع مکانیکی است.



شکل (۲۲) شمایی از یک تبخیر کننده با تراکم مجدد حرارتی

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	مدرس: علیرضا عظیمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	

قیمت کلی یک تبخیر کننده

$$Total\ Cost = C_{bc} + C_L + C_T + C_{tw} = C_E$$

C_{bc} : هزینه اساسی و ساخت تبخیر کننده است (Basic Cost) که مربوط به هزینه پوسته و هزینه لوله‌هاست و به

$$C_{bc} = 0.65C_{bs} + 0.35C_{bt}$$

فشارهای عملیاتی بستگی دارد.

C_{bs} : هزینه مربوط به پوسته (شل) و C_{bt} : هزینه مربوط به لوله‌ها است. این مقادیر از جداول مربوطه بدست می‌آید.

C_L : هزینه مربوط به طول لوله است و مطابق با استانداردها، متناسب با قطر پوسته، انتخاب می‌شود.

C_T : هزینه مربوط به نوع لوله‌ها و جنس آنها است. بر اساس سیال عبوری جنس و نوع لوله‌ها انتخاب می‌شود (لوله

عموماً از جنس آهن، چدن، فولاد ضد زنگ، آلیاژهای نیکل و کروم و ... می‌باشند).

C_{tw} : هزینه مربوط به اتصالات لوله‌ها است. اتصالات عموماً بصورت جوش (Welding) می‌باشد و جوشکاری در دو

نوع جوش برق و جوش گاز انجام می‌شود.


😊 نکته : یکی از مشکلات ایجاد شده در تبخیر کننده‌ها آلودگی است. آلودگی (Contamination) به معنای

اختلاط خوراک فرآیندی و مصرفی است و از جمله عوامل آن نشتی (Leakage) در محل اتصال لوله‌ها است. که این

عامل با *Pressure Test* بررسی می‌شود. در این روش آب با فشار زیاد وارد لوله‌ها می‌شود و پس از گذشت مدت

زمان معین (چند روز) فشار آب چک می‌شود. کاهش فشار آب به معنای وجود نشتی است.

تبخیر (Evaporation)	درس: عملیات واحد II
نیم سال اول ۸۹-۸۸	مدرس: علیرضا عظیمی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان	

(مهندسی شیمی ۱۳۸۵) : در تبخیر کننده های توام با تراکم مجدد بخار، عامل اساسی در کل هزینه 


سیستم C_r وابسته است به :

(ب) هزینه کار کمپرسور در سیستم

الف) فشار خروجی از کمپرسور

(د) سطح تبخیر کننده و فشار عملیاتی آن

ج) میزان *Steam* مصرفی سیستم

(مهندسی شیمی ۱۳۸۳) : در تبخیر کننده توام با تراکم مجدد بخار (*Vapor Recompression*) اقتصاد : 

(ب) اصلاً تغییری نمی کند

الف) به شدت افزایش می یابد

(د) تغییر جزئی می یابد

ج) به شدت کاهش می یابد