نحوه تعیین تعداد بهینهٔ مراحل تغلیظ در واحد تولید شیرخشک کارخانه شیر اصفهان

شعله فرشادفر*،پروین رنجبری، مهرداد نیاکوثری
۱. مرکز تحقیقات مهندسی فارس، صندوق پستی۴۱۴-۷۱۵۵۵
farshadfar@farsberc.ir

نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران

دانشگاه علم و صنعت ایران
۳-۵ آذر ماه ۱۳۸۳

چکیده

یکی از اصلی‌ترین واحدهای فرآیندی در کارخانه‌های تولید محصولات پودری نظیر شیرخشک، پودر آب پنیر وپودر آب میوه‌ها واحدهای تغلیظ هستند که با افزایش میزان مواد جامد خوراک سبب کاهش انرژی مصرفی در واحدهای خشک‌کن می‌شوند ودر مواردی هم محصول این واحد بشکل کنسانتره محصولات کاربرد داردکه از آن جمله می‌توان به شیر کندانسه شیرین وکنسانتره آب میوه‌جات اشاره کرد. توجه به نحوه عملکرد وهمچنین سعی در کاهش میزان انرژی مصرفی در این واحدها با اتخاذ روش‌های متفاوت از اهمیت ویژه برخوردار است. با توجه به تولید بخار در فرآیند تبخیر، ساخت تغلیظ کننده‌های چند مرحله‌ای واستفاده از بخار تولید شده در هر مرحله برای مراحل بعدی یکی از راه‌های افزایش راندمان این واحدهاست.

افزایش تعداد مراحل تغلیظ‌کننده منجر به افزایش هزینه اولیه سرمایه‌گذاری (هزینه ثابت) می‌شود لذا بهینه‌سازی تعداد مراحل بگونه‌ای که این افزایش هزینه ثابت سبب کاهش مناسب هزینه‌های جاری شود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله هزینه کل واحد در یک سال بشکل مجموع هزینه ساخت کالاندریا ونصب آنها(که مهمترین اجزاء هزینه ثابت واحد می‌باشند وخود تابعی از میزان سطح انتقال حرارت محاسبه شده در طراحی تبخیر کننده‌ها هستند) با احتساب ضریب مناسبی جهت تنزل دستگاه‌ها و هزینه بخار مصرفی(که مهمترین هزینه جاری واحدمی‌باشد) در یک سال به شکل تابعی از تعداد مراحل فرموله شده است. حل مشتق معادله هزینه کل بر حسب تعداد مراحل تعداد بهینه مراحل تغلیظ را بدست می‌هد. معادلات وروابط فوق با استفاده از یک صفحه گسترده جهت محاسبات، آماده استفاده می‌گردند و با اعمال تغییرات مناسب در هر بخش می‌توان به بهترین طراحی دست یافت.

کلمات کلیدی: تغلیظ کننده‌های چند مرحله‌ای، بهینه‌سازی، بخار، هزینه‌ثابت، هزینه‌جاری

مقدمه

مواد غذایی مایع از درصد مواد جامد کمی برخوردارند (حدود ۱۰ درصد) و خشک کردن آنها بطور مستقیم نیاز به صرف انرژی بالایی دارد، در صورتی‌که درصد مواد جامد با استفاده از یک روش مناسب تا حدود ۴۵ درصد افزایش یابد میزان مصرف انرژی در خشک‌کن تا حدود ۱۰ برابر کاهش می‌یابد، معمولا به ازاء هر کیلوگرم تبخیر در خشک‌کن حدود ۲/۵ کیلوگرم بخار لازم است و لی در تبخیرکننده‌ها به ازاء حذف هریک کیلوگرم آب حدود یک کیلوگرم بخار مصرف می‌شود ومعمولا" می‌توان طراحی این سیستم‌ها را بگونه‌ای انجام داد که این نسبت بسیار کاهش یابد وبه‌ازاء مصرف هر یک کیلوگرم بخار تا حدود پنج کیلوگرم تبخیر داشت یعنی رقمی حدود ۱۲۵۰ درصد صرفه جوئی در مصرف انرژی حاصل می‌شود. به منظور بهبود راندمان حرارتی تبخیرکننده‌ها در تناژ بالا آنها را بشکل چند مرحله‌ای می‌سازند. در تبخیرکننده‌های چند مرحله‌ای بخار حاصل از تبخیر خوراک در هر مرحله بعنوان گرم‌کننده در مرحله بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاکه تغلیظ خوراک تا اندازه دلخواه در چندین مرحله انجام می‌شود لذا مقدار بخار مصرفی لازم در مرحله اول بحد قابل توجهی کاهش می‌یابد وصرفه‌جوئی قابل ملاحظه‌ای در هزینه بخار مصرفی خواهیم داشت. با توجه به آنکه ساخت تغلیظ‌کننده چند مرحله‌ای هزینه‌های اولیه را افزایش می‌دهد بنابراین بایستی با یک موازنه اقتصادی تعداد مراحل را بهینه نمود وبطور کلی تعداد بهینه مراحل با افزایش قیمت بخار ویا سایز واحد افزایش می‌یابد. البته افزایش تعداد مراحل کل سطح لازم جهت تبخیر را افزایش نمی‌دهدو سطح لازم بین مراحل به نحو مناسب توزیع می‌شود. معمولا" کمترین هزینه وکمترین سطح حرارتی زمانی‌که $A/\Delta T$ در کلیه مراحل ثابت باشد، حاصل می‌شود.[۱]

تعیین تعداد بهینه مراحل تغلیظ

تعداد بهینه مراحل با انجام یک موازنه اقتصادی تعیین می‌شودکه تعداد زیادی از پارامترها را در بر می‌گیرد که برخی از آنها عبارتند از[۲و۳]

- فشار اولیه بخار
- خلاء نهائی سیستم
- توزیع سطوح حرارتی بین مراحل
- نوع تبخیر کننده وپیوستگی عملیات
- مواد مورد استفاده در ساخت نسبت به کیفیت محصول و عمر تبخیر کننده
- خوردگی، سایش ومصرف نیرو
- زمان لازم جهت تعمیر
- تعدادکارگر لازم ونیازمندیهای تعمیر و نگهداری
- میزان بازیافت انرژی
- نحوه جداسازی مایع وبخار

مهمترین پارامترهای مؤثر بر موازنه اقتصادی، میزان مصرف بخار و میزان سطح انتقال حرارت وقیمت هریک می‌باشد. سایر پارامترهای مؤثر شامل هزینه خرید تجهیزات جانبی، هزینه نصب و عملیات هر مرحله می‌باشد.
در صورتی‌که عملیات تبخیردر یک تبخیر کننده n مرحله‌ای انجام شود موازنه کلی جرم وانرژی بصورت زیر خواهد بود:

$$(\dot{m}_{n-2}-\dot{m}_{n-1})\lambda_{n-1}=(\dot{m}_{n-1}-\dot{m}_{n})\lambda_{n}+\dot{m}_{n-1}cp_{n-1}(T_{n}-T_{n-1})$$

میزان سطح انتقال حرارت با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:
مرحله اول تبخیر:

$$\dot{m}_{s}\lambda_{s}=UA_{1}(T_{S}-T_{1})$$

سایر مراحل:

$$(\dot{m}_{n-1}-\dot{m}_{n})\lambda_{n}=UA_{n-1}(T_{n-1}-T_{n})$$

در روابط فوق پارامترها بصورت زیر تعریف شده‌اند:

$\dot{m}$: دبی جریان خوراک یا محصول

$\dot{m}_s$: دبی بخار

λ: گرمای نهان تبخیر

U : ضریب کلی انتقال حرارت

T_S: دمای بخار

T: دمای خوراک

n: تعداد مراحل

A: سطح انتقال حرارت

همانطور که گفته شد طراحی بهینه واقتصادی معمولا" هنگامی که سطح انتقال حرارت در کلیه مراحل مساوی باشد حاصل می‌شود. هنگام جمع کردن روابط محاسبه سطح انتقال حرارت هر مرحله با هم می‌توان رابطه زیر را نیز بکار برد:

$$(T_{S}-T_{1})+(T_{1}-T_{2})+.....+(T_{n-1}-T_{n})=(T_{S}-T_{n})$$

بنابراین سطح کل انتقال حرارت در یک تبخیر کننده چند مرحله‌ای برابر است با[۴]

$$\sum A=\frac{\dot{m}_{s}\lambda_{s}}{U(T_{S}-Tn)}\times n$$

در صورتیکه $\dot{m}_s$ میزان مصرف بخار در واحد زمان در حالت یک مرحله‌ای بودن تبخیرکننده باشد، مصرف بخار به ازاء n مرحله برابر خواهد بود با: $\frac{\dot{m}_s}{n\times 0.98}$

مهمترین پارامترها در محاسبه هزینه‌های ثابت هزینه مربوط به خرید مواد اولیه و هزینه ساخت و نصب هرمرحله از تبخیرکننده که اصطلاحا" کالاندریا گفته می‌شود می‌باشد. این هزینه‌ها بشکل توابعی از میزان

سطح انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شوند. معمولا هزینه نصب با توانی از میزان سطح انتقال حرارت که اغلب از یک کمتر است(معمولا" حدود ۰/۹) متناسب است.[۵]

بنابر این هزینه کل با در نظر داشتن هزینه استهلاک سالیانه عبارتست از :

هزینه کل سالیانه = هزینه بخار مصرفی + d_p(هزینه نصب + هزینه ساخت و مواداولیه)

$$C_T = t \times \frac{y\dot{m}_s}{n \times 0.98} + d_p\left(\frac{x\dot{m}_s\lambda}{U(T_S - T_N)} \times n + x\left(\frac{\dot{m}_s\lambda}{U(T_S - T_n)}\right)^m n\right)$$

t:تعدادساعات کاری در یک سال

y:هزینه هر کیلوگرم بخار

x:هزینه هر متر مربع از سطح انتقال حرارت

d_p ضریب استهلاک دستگاه‌ها:

C_T:هزینه کلی سالیانه

رابطه فوق را می‌توان بصورت زیر تغییر داد:

$$C_T = \frac{t\,y\dot{m}_s}{0.98\,n} + d_p\,n\,\frac{x\dot{m}_s\lambda}{(T_S - T_n)}\left[1 + \left(\frac{\dot{m}_s\lambda}{U(T_S - T_n)}\right)^{m-1}\right]$$

در صورتیکه $C_1 = \frac{t\,y\dot{m}_s}{0.98}$ و $C_2 = \frac{d_p\,x\dot{m}_s\lambda}{(T_S - T_n)}\left[1 + \left(\frac{\dot{m}_s\lambda}{U(T_S - T_n)}\right)^{m-1}\right]$ خواهیم داشت:

$$C_T = \frac{C_1}{n} + nC_2$$

$$\frac{dC_n}{dn} = C_2 - \frac{C_1}{n^2} \qquad \Rightarrow \qquad n = \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{1/2}$$

n تعداد بهینه مراحل به منظور داشتن حداقل هزینه سالیانه می‌باشد.

بحث ونتیجه‌گیری

بهینه سازی مصرف انرژی، جلوگیری از بهدر رفتن و همچنین استفاده از روشهای مناسب مناسب جهت بازیافت آن یکی از مهمترین فاکتورها در داشتن توجیه اقتصادی یک طرح محسوب می‌شود. با توجه به اینکه واحدهای تغلیظ یکی از اصلی‌ترین واحدهای فرآیند اغلب محصولات غذایی بشمار می‌روند بحث بهینه سازی این واحدها از نظر میزان مصرف انرژی وهمچنین نحوه انجام فرآیند بگونه‌ای که بهتر بتوان آن را تحت کنترل در آوردبسیار مهم است. چند مرحله ای کردن عملیات تغلیظ علاوه بر اینکه میزان بخار مصرفی که مهمترین فاکتور هزینه جاری محسوب می‌شود را کاهش می‌دهد، منجر به کاهش سایز مراحل تغلیظ شده که تحت کنترل در آوردن عملیات تغلیظ را سهل‌تر می‌سازد.

استفاده از رابطه ارائه شده در متن مقاله به منظور تعیین تعداد بهینه مراحل مستلزم داشتن ضریب انتقال حرارت کلی در تغلیظ کننده است که خود تابعی نسبتا" پیچیده از نوع تغلیظ کننده، میزان خوراک ومحصول، شرایط فرآیندی خصوصا" دما و فشارسیستم، وخواص فیزیکی خوراک می‌باشد. در مواردی در این مرحله از طراحی می‌توان با در نظر داشتن کلیه جوانب از مقادیرضرائب انتقال حرارتی که بطور تجربی ارائه شده‌اند استفاده نمود.

تعداد مراحل واحد تغلیظ‌کننده کارخانه شیر خشک اصفهان با استفاده از روابط مذکور تعیین شده است. این واحد تغلیظ به منظور افزایش غلظت شیر از حدود ۹ درصد به حدود ۴۵ درصد طراحی شده است و دارای ۳ مرحله تغلیظ کننده فیلم ریزشی می‌باشد. با توجه به کاهش دمای تغلیظ در مراحل تغلیظ بخار حاصل از تغلیظ هر مرحله به عنوان گرم کننده مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد ودر مواردی با استفاده از یک سیتم مناسب کمپرس کردن بخار به طریق حرارتی ویا مکانیکی میتوان ازبخار هر مرحله بعنوان بخار گرم‌کننده همان مرحله بهره جست.

یکی از پارامترهای سنجش میزان صرفه اقتصادی در تبخیر کننده‌ها پارامتری بنام اقتصاد تبخیرکننده (Economy)است که عبارتست از میزان بخار تولید شده یا تبخیر انجام شده به میزان بخار مصرف شده، تحقیقات نشان می‌دهد که در یک واحد تغلیظ‌کننده شیر این پارامتر با افزایش تعداد مراحل بصورت زیر افزایش می‌یابد:

تعداد مراحل	یک مرحله	دو مرحله	سه مرحله	چهار مرحله
Economy	0.8	1.7	2.5	3.3

منابع و مراجع

1. APV Publication,"Evaporator Handbook", Fourth edition
2. Robert H. Perry,"Chemical Engineering Hand book ", Sixth Edition, 1985
3. Minton,"Evaporation hand book"second edition
4. Coulson, J.M.& Richardson, J.F.,"Chemical Engineering", Vol.6, Robert Maxwell, M.C., 1986
5. C.J.King,"Separation process", Second edition