

مطالعه تئوری و آزمایشگاهی سیستم رطوبت‌زدای دسیکنت مایع

حسن پهلوانزاده^{۱*}، پریسا نوری اصل^۲

۱. استاد مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (pahlavzh@modares.ac.ir)

۲. دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۵ اسفند ۱۳۸۹
دریافت پس از اصلاح ۱ خرداد ۱۳۹۰
پذیرش نهایی ۱۷ خرداد ۱۳۹۰

کلمات کلیدی:

دسیکنت مایع
رطوبت‌زدایی
تعداد واحدهای انتقال جرم

چکیده

سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری دسیکنت سازگار با محیط زیست می‌باشد و به عنوان سیستمی جهت تهویه محیط داخل ساختمان‌ها استفاده می‌شوند. در این مقاله ویژگی‌های سیستم رطوبت‌زدای دسیکنت مایع مورد استفاده در خنک‌کننده‌های تبخیری معرفی می‌شود. این سیستم جهت مطالعه به صورت آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. محلول کلریدلیتیم به عنوان دسیکنت مایع و ستون پر شده جهت رطوبت‌زدایی از هوا مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم دارای بخشی برای شبیه‌سازی هوای فرآیندی با دما، رطوبت و شدت جریان‌های مختلف می‌باشد. مدل «اثربخشی - Effectiveness») برای پیش‌بینی عملکرد سیستم رطوبت‌زدای کلریدلیتیم در نظر گرفته شد. جهت معبرسازی این مدل، مقایسه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی خروجی از سیستم رطوبت‌زدای کلریدلیتیم با نتایج حل مدل «اثربخشی») انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حل مدل همسویی مطلوبی وجود دارد و افزایش تعداد واحدهای انتقال جرم باعث بهبود در عملکرد سیستم رطوبت‌زدایی می‌گردد. همچنین عوامل موثر در افزایش تعداد واحدهای انتقال جرم مورد مطالعه قرار گرفت.

۱- مقدمه

کلروفلوروکربن‌ها (CFC) که در سیستم‌های سنتی مثل تراکم بخار و صنایع تهویه هوا استفاده می‌شود، آثار زیانبار اثبات شده‌ای بر محیط زیست دارند. در بسیاری از کشورهای دنیا در اکثر ماه‌های سال از منابع مختلف انرژی به خصوص انرژی الکتریسیته، جهت تهویه مطبوع و تبرید استفاده می‌شود. بنابراین این صنایع در پی استفاده از تکنولوژی‌های نوین جهت کاهش مصرف انرژی هستند. یکی از این تکنولوژی‌های نو که در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات وسیعی بر روی آن در حال انجام است، سیستم‌های سرمایش دسیکنت^۱ می‌باشد. در این سیستم به جای مصرف انرژی الکتریسیته، برای سردسازی از منبع گرمایی استفاده می‌شود. سیستم‌های جذبی راندمان بالاتری نسبت به سیستم‌های تراکم بخار دارا می‌باشد و موجب کاهش مصرف انرژی می‌گردند. استفاده از دسیکنت در سیستم‌های سرمایش، موجب حذف رطوبت از هوای ورودی به سیستم سرمایش می‌شود و در نتیجه این سیستم با راندمان بالاتری عمل می‌کند.

دسیکنت‌ها مواد جاذبی هستند که قابلیت جذب و دفع بخار را دارا می‌باشند. جذب و دفع بخار آب براساس تفاوت فشار بخار آب در هوا و در سطح جاذب صورت می‌گیرد [۲،۱]. دسیکنت رطوبت را از محیط جذب می‌کند و تا رسیدن به حالت تعادل با محیط این امر ادامه می‌یابد. این رطوبت جذب شده باید از دسیکنت خارج شود تا مجدداً برای جذب رطوبت آماده گردد. برای خارج کردن رطوبت، دسیکنت در معرض هوای داغ قرار می‌گیرد [۱]. دسیکنت‌ها به دو صورت جامد و مایع وجود دارند. جاذب‌های مایع، دمای کمتری برای احیاء نسبت به جاذب‌های جامد نیاز دارند و در طراحی، از قابلیت انعطاف بیشتری برخوردار می‌باشند و همچنین موجب افت فشار کمتری در هوا می‌شوند. از سوی دیگر، جاذب‌های جامد فشرده هستند و کمتر موجب خوردگی می‌شوند [۳،۱]. از جمله دسیکنت‌های جامد متداول سیلیکاژل، سیلیکات آلومینیوم، زئولیت، غربال مولکولی و اکسید آلومینیوم را می‌توان نام برد. تری‌اتیلن‌گلیکول، دی‌اتیلن‌گلیکول، اتیلن‌گلیکول، محلول برمیدلیتیم، محلول کلرید کلسیم، محلول برمید کلسیم، محلول کلرید لیتیم، محلول

برمیدسدیم به عنوان دسیکنت‌های مایع در صنعت استفاده می‌گردند [۴].

دسیکنت‌ها می‌توانند به عنوان مکملی برای سیستم تراکم بخار مورد استفاده قرار گیرند تا کاستی‌های این نوع سیستم‌ها مرتفع گردد و بتوانند به عنوان یک سیستم تهویه کارآمد به لحاظ اقتصادی مورد توجه قرار گیرند. در این روش اگر از منابع طبیعی انرژی و گرمای تلف شده برای احیاء استفاده شود، هزینه‌های عملکرد به طور مشخص کاهش می‌یابد [۵، ۳، ۱].

بیشترین استفاده از دسیکنت‌ها، در سیستم‌های تبخیری است. روش سردسازی تبخیری یکی از بهترین روش‌های سردسازی به جهت مصرف انرژی و مسائل زیست محیطی می‌باشد. اما این سیستم در شرایط مرطوب و در فصل‌هایی از سال که رطوبت بالا باشد، کارایی ندارد. یکی از راه‌حل‌های این مشکل حذف رطوبت هوای ورودی توسط مواد دسیکنت می‌باشد [۳]. اصول سرمایش تبخیری بر این اصل استوار است که هرگاه عمل تبخیر آب در مسیر جریان هوا صورت گیرد دمای هوا کاهش یافته و رطوبت‌نسبی آن افزایش می‌یابد. علت کاهش دمای هوا در این فرآیند به دلیل جذب انرژی لازم برای تبخیر آب از هوا است. اگر این فرآیند به صورت معکوس انجام گیرد یعنی رطوبت هوا با استفاده از مواد جاذب رطوبت کاهش داده شود، انرژی آزاد شده در نتیجه عمل تقطیر، به هوا منتقل می‌شود و بنابراین دمای هوا افزایش خواهد یافت. هوای خروجی از جاذب را می‌توان با هوای محیط و یا هوای باز یافتی از محیط سرد شده مجدداً خنک نمود و هوای خشک‌تری با دمای محیط و یا کمتر از آن بدست آورد [۶، ۵].

دسیکنت‌ها به شکل‌های مختلف در صنعت و فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک نمونه استفاده از آن، چرخ دسیکنت می‌باشد. چرخ دسیکنت یک چرخ دوار فلزی است که روی آن با دسیکنت جامد پوشیده شده است. این چرخ توسط یک موتور الکتریکی می‌چرخد. برای انجام یک عملیات پیوسته، باید جذب و احیاء به صورت دوره‌ای صورت گیرد. بدین صورت که قسمتی از چرخ که در مسیر هوای ورودی قرار دارد، رطوبت هوا را جذب می‌کند در حالی که قسمت دیگر توسط یک هوای گرم در حال احیاء می‌باشد و با چرخش چرخ، جای این دو قسمت عوض می‌شود. قطاعی از چرخ که احیاء شده است در مسیر جذب رطوبت هوا قرار می‌گیرد [۶، ۷].

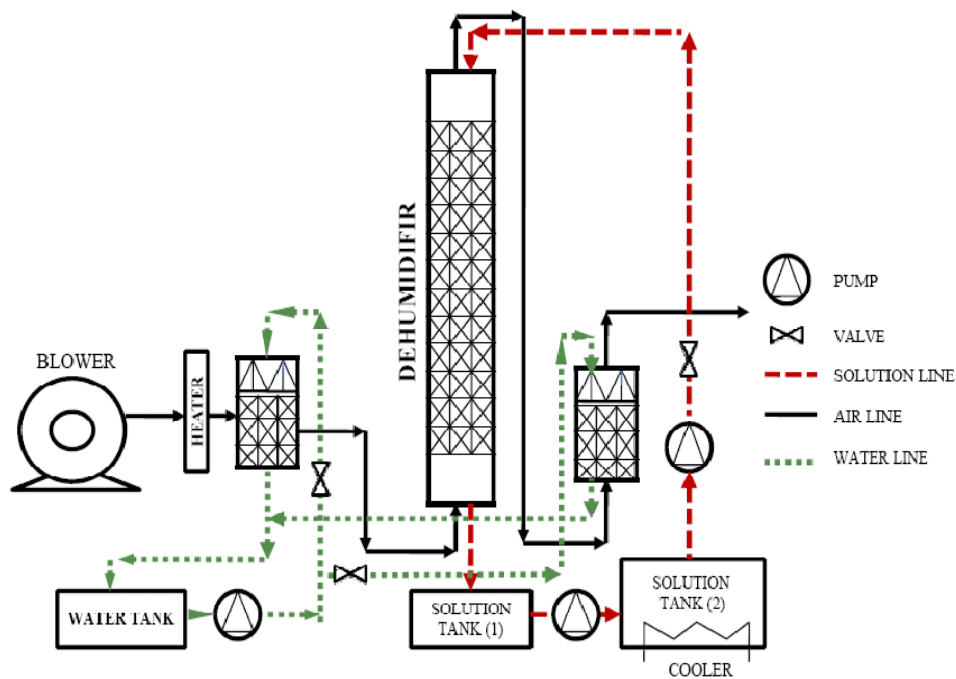
۲- روش آزمایش

جهت این مطالعه، سیستم سرمایش دسیکنت مایع به صورت آزمایشگاهی ساخته شد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است این سیستم دارای بخشی برای شبیه‌سازی هوا با دماها و رطوبت‌های مختلف می‌باشد. در این بخش جریان هوا که توسط خطوط پررنگ مشکی نشان داده شده است از هیتری که شامل المنتهای متعددی می‌باشد عبور می‌کند. با توجه به دمای موردنظر برای آزمایش، تعداد المنتهای روشن تنظیم می‌گردد. هوا پس از عبور از هیتز از یک سیستم رطوبت‌زن می‌گذرد. در این سیستم، آب از قسمت بالای آن روی الیاف داخل سیستم ریخته می‌شود. آب از یک مخزن که در شکل ۱ نشان داده شده است روی سیستم رطوبت‌زن پمپ می‌گردد. مقدار آب ریخته شده روی الیاف توسط یک شیر کنترل می‌گردد. آب پس از عبور از سیستم رطوبت‌زن از قسمت پایین دستگاه خارج شده و دوباره به مخزن آب برگشت داده می‌شود. هوا پس از عبور از این مرحله دارای رطوبت و دمای مورد نظر برای آزمایش خواهد بود.

نمونه دیگر کاربرد دسیکنت، استفاده از آن به صورت بستر می‌باشد. در این روش از دو یا سه بستر دسیکنتی مجزا استفاده می‌شود و این بسترها در مسیر هوا قرار داده می‌شوند. هنگامی که یکی از بسترها در حال جذب می‌باشد، بستر دیگر توسط هوای داغ احیاء می‌شود تا برای جذب رطوبت آماده گردد [۳].

دسیکنت مایع داخل جریان هوا اسپری می‌شود یا به صورت دیواره مرطوب در تماس با هوای ورودی قرار می‌گیرند. از برج‌های پر شده جهت افزایش سطح تماس دسیکنت مایع و هوا و افزایش راندمان رطوبت‌زدایی استفاده می‌گردد [۸]. دسیکنت‌های مایع همچون انواع جامد هنگامی که در معرض گرما قرار گیرند، رطوبت جذب شده را آزاد می‌کنند و مجدداً برای استفاده آماده می‌گردند [۹].

در این مقاله نمونه‌ای از سیستم سرمایش تبخیری با رطوبت‌زدای دسیکنت به صورت آزمایشگاهی ساخته شده و عملکرد آن مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل (۱): نمایی از سیستم سرمایش دسیکنت مایع ساخته شده برای انجام آزمایش

دمای مخزن‌های (۱) و (۲) محلول دسیکنت توسط دماسنج دیجیتال ثبت می‌گردد. میزان سرعت هوای فرآیند هم توسط یک اینورتور با تغییر دور قابل تنظیم می‌باشد.

۳- مدل‌سازی ستون پرشده رطوبت‌زدای محلول

دسیکنت مایع

جهت مدل‌سازی ستون رطوبت‌زدای دسیکنت مدل اثربخشی مورد استفاده قرار گرفت. این مدل توسط براون^۲ [۱۰] برای برج‌های خنک‌کننده توسعه پیدا کرده است. از نظر فرآیندی اختلاف زیادی بین برج‌های خنک‌کننده و سیستم رطوبت‌زدای کلریدلیتیم وجود ندارد. هر دو سیستم، تجمعی از فرآیندهای انتقال جرم و حرارت می‌باشد. انتقال جرم به علت اختلاف فشار جزئی بخار آب بین هوا و سطح مایع می‌باشد. در یک برج خنک‌کننده آب به عنوان مایع فرآیندی به هوا رطوبت‌دهی می‌کند، اما در محفظه رطوبت‌زدای دسیکنت، محلول آب-نمک کلریدلیتیم می‌تواند رطوبت‌زدایی از هوا را انجام دهد. به همین دلیل جهت استفاده از مدل اثربخشی برای مدل‌سازی فرآیند جرمی و حرارتی ستون رطوبت‌زدای دسیکنت مایع، انجام تغییرات ضروری می‌باشد. این تغییرات شامل اضافه نمودن معادلات قانون بقای جرم برای نمک کلریدلیتیم محلول در آب می‌باشد، اما بسیاری از معادلات دیگر مشابه هستند.

در سیستم سرمایش جذبی محلول کلریدلیتیم داخل برج پرشده در تماس مستقیم با جریان هوا قرار می‌گیرد. لایه ایجاد شده توسط محلول دسیکنت مایع، رطوبت را از هوای ورودی جذب می‌کند. دمای محلول به علت آزاد شدن گرمای میعان افزایش می‌یابد. شکل ۳ که نمایی از محفظه رطوبت‌زدای جریان موازی غیر هم‌سو را نشان می‌دهد، جهت مطالعه رفتار رطوبت‌زدایی دسیکنت مایع در نظر گرفته می‌شود.

هوای فرآیندی از قسمت تحتانی یک ستون پرشده به ابعاد $80 \times 20 \times 20$ سانتی‌متر که شامل پرکن‌هایی با سطح ویژه $240 \text{ m}^2/\text{m}^3$ عبور می‌کند. نمایی از این پرکن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این ستون از محلول کلریدلیتیم با غلظتی مشخص به عنوان دسیکنت مایع جهت رطوبت‌زدایی استفاده می‌گردد. این محلول از بخش بالایی ستون پرشده بر روی پرکن‌ها ریخته می‌شود. هوا در تماس با این محلول رطوبت خود را از دست می‌دهد و محلول نیز در اثر تماس با هوا به علت آزاد شدن گرمای ناشی از میعان آب مقداری گرم و رقیق می‌گردد. فرآیند جریان محلول در شکل توسط خطوط خط‌چین نشان داده شده است. محلول پس از عبور از ستون وارد مخزن شماره ۱ به ابعاد $40 \times 40 \times 10$ سانتی‌متر می‌شود و سپس توسط پمپ به مخزن استوانه‌ای شکل ۲ به قطر ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر منتقل می‌گردد. در مخزن دوم محلول توسط کویل‌های سردکننده سرد می‌گردد تا دمای آن کاهش یافته و مناسب عمل جذب رطوبت گردد. دبی محلول ورودی کلریدلیتیم به ستون رطوبت‌زدا توسط یک شیر قابل تنظیم، کنترل می‌شود.



شکل (۲): نمایی از پرکن استفاده شده در ستون رطوبت‌زدای دسیکنت مایع

رطوبت هوای فرآیندی پس از عبور از این ستون کاهش می‌یابد. برای تنظیم و مناسب شدن دمای هوا جهت استفاده برای فضای اتاق از یک دستگاه سردکننده تبخیری یا رطوبت‌زن مشابه همان دستگاهی که برای شبیه‌سازی هوا در ابتدا توضیح داده شد، استفاده می‌گردد. آب مورد نیاز برای این دستگاه نیز از همان مخزن آب تامین می‌گردد و پس از عبور از دستگاه دوباره به همان مخزن برگردانده می‌شود.

محل اندازه‌گیری دما و رطوبت در این سیستم قبل و بعد از ستون رطوبت‌زدا و پس از سیستم سردکننده تبخیری یا رطوبت‌زن دوم می‌باشد. غلظت محلول توسط اندازه‌گیری دانسیته آن محاسبه می‌گردد و تغییرات آن ثبت می‌شود.

$$G_s = G_{s,i} - G_a (\omega_{a,o} - \omega_a) \quad (4)$$

در این روابط زیرنویس‌های i و o به ترتیب نشان‌دهنده حالت ورودی و خروجی می‌باشد. ضریب انتقال گرما h_C توسط نوشتن رابطه انتقال حرارت در سمت هوا تعریف می‌شود:

$$G_a dh_a = h_C a_w dV (T_a - T_s) + h_{v,T_s} G_a d\omega_a \quad (5)$$

در این رابطه a_w مساحت سطح خیس‌شده ستون پرشده بر حسب m^2/m^3 و T نشان‌دهنده دما برحسب سانتی‌گراد می‌باشد. آنتالپی بخار آب در دمای محلول (h_{v,T_s}) به صورت جمع آنتالپی بخار در صفر درجه سانتی‌گراد ($h_{v,0}$) و حاصل‌ضرب گرمای ویژه بخار (Cp_v) و دمای محلول می‌باشد:

$$h_{v,T_s} = h_{v,0} + Cp_v T_s \quad (6)$$

ضریب انتقال جرم h_D توسط رابطه انتقال جرم سمت هوا تعریف می‌شود:

$$G_a d\omega_a = h_D a_w dV (\omega_{T_s, sat} - \omega_a) \quad (7)$$

تعریف آنتالپی محلول دسیکنت به صورت جمع آنتالپی محلول در غلظت X و صفر درجه سانتی‌گراد ($h_{0,X}$) و حاصل‌ضرب گرمای ویژه محلول (Cp_s) و دما می‌باشد:

$$h_s = Cp_s T_s + h_{0,X} \quad (8)$$

$$dh_s = Cp_s dT_s \quad (9)$$

آنتالپی هوای مرطوب به صورت جمع دو عبارت تعریف می‌شود: گرمای ویژه هوا مرطوب ضرب در دمای هوا و رطوبت‌نسبی ضرب در آنتالپی بخار آب در صفر درجه سانتی‌گراد ($h_{v,0}$).

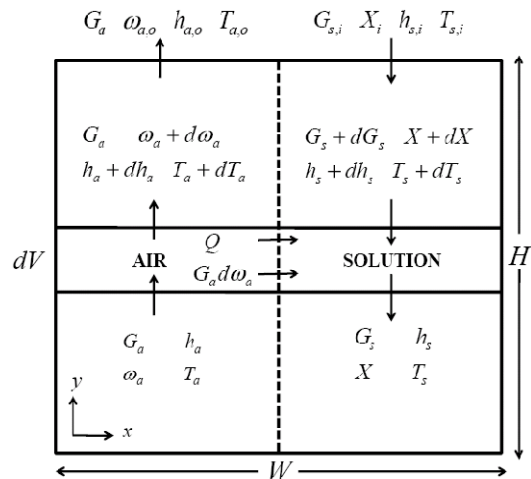
$$h_a = Cp_a T_a + \omega_a h_{v,0} \quad (10)$$

عدد لوئیس، Le ، تعداد واحدهای انتقال جرم، NTU ، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Le = \frac{h_c}{h_D Cp_a} \quad (11)$$

$$NTU = \frac{h_D a_w HWL}{G_a} \quad (12)$$

L ، H و W به ترتیب طول، ارتفاع و عرض ستون پرشده برحسب متر می‌باشد. برای مدل‌سازی سیستم از عبارت‌های تجربی زیر استفاده می‌شود:



شکل (۳): المان در نظر گرفته شده برای فرآیند رطوبت‌زدایی جریان موازی غیر هم سو در ستون رطوبت‌زدا

برای ساده‌سازی فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است.

- ۱- محلول دسیکنت می‌تواند به طور یکنواخت روی پرکن‌ها توزیع شود و به طور کامل آنها را تر کند.
- ۲- به دلیل کم بودن ضخامت فیلم محلول دسیکنت، مقاومت فیلم مایع ناچیز می‌باشد.
- ۳- در حجم کنترل خواص فیزیکی مایع دسیکنت و هوا یکنواخت هستند.

رابطه بقای انرژی در المان دیفرانسیلی نشان داده شده در شکل ۳، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G_s dh_s + h_s dG_s = G_a dh_a \quad (1)$$

که در این رابطه h و G به ترتیب آنتالپی برحسب kJ/kg و شدت جریان جرمی برحسب kg/s در حجم کنترل و اندیس s و a نیز به ترتیب نشان‌دهنده جریان هوا و محلول می‌باشد. رابطه بقای جرم برای نمک کلریدلیم در المان نشان داده شده به صورت زیر می‌باشد که نشان‌دهنده این است که مقدار نمک در محلول ثابت است:

$$d(G_s X) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه X نشان‌دهنده غلظت جرمی محلول به صورت کسر جرمی ($kgLiCl/kgH_2O$) می‌باشد و اگر رطوبت‌نسبی هوا برحسب kg/kg باشد، رابطه بقای جرم المان در سمت محلول به صورت زیر خواهد بود:

$$dG_s = G_a d\omega_a \quad (3)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (۳) از پایین المان تا بالای محفظه خواهیم داشت:

لویس تقریباً برابر یک فرض باشد. بنابراین معادله (۱۷) و (۱۹) به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\frac{dT_s}{dV} = \frac{1}{Cp_s} \left(\frac{\left(\frac{dh_a}{dV} \right) G_a}{G_s} \right) \quad (21)$$

$$\frac{dh_a}{dV} = \frac{NTU}{V_T} (h_{T_s, sat} - h_a) \quad (22)$$

گرمای ویژه اشباع، مشتق آنتالپی هوا اشباع شده نسبت به دما می‌باشد:

$$C_{sat} = \frac{dh_{T_s, sat}}{dT_s} \quad (23)$$

نسبت ظرفیت m^* مانند نسبت ظرفیت‌های استفاده شده در مبدل گرمایی محسوس تعریف می‌شود:

$$m^* = \frac{G_a C_{sat}}{G_s Cp_s} \quad (24)$$

با استفاده از قانون زنجیره^۳، معادله (۲۱) خواهد بود:

$$\frac{dh_{T_s, sat}}{dV} = m^* \frac{dh_a}{dV} \quad (25)$$

اگر C_{sat} در شرایط عملیاتی محفظه ثابت باشد رابطه (۲۲) و (۲۵) مشابه روابط مبدل حرارتی محسوس می‌باشد. بنابراین در این سیستم نیز می‌تواند از رابطه کارایی مبدل حرارتی با جریان مخالف استفاده کرد و راندمان را برای آن به صورت رابطه (۲۶) تعریف نمود:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-m^*)}}{1 - m^* e^{-NTU(1-m^*)}} \quad (26)$$

حل رابطه (۲۲) و (۲۵) برای آنتالپی هوای خروجی به صورت زیر می‌باشد.

$$h_{a,o} = h_{a,i} + \varepsilon (h_{T_s, sat, i} - h_{a,i}) \quad (27)$$

برای بدست آوردن رطوبت‌نسبی خروجی، نیاز به محاسبه آنتالپی حالت موثر^۴ از آنتالپی هوای خروجی می‌باشد:

$$h_{T_s, sat, eff} = h_{a,i} + \frac{h_{a,o} - h_{a,i}}{1 - e^{-NTU}} \quad (28)$$

با استفاده از این آنتالپی و رطوبت‌نسبی موثر در شرایط اشباع از رابطه (۲۰) برای محاسبه رطوبت‌نسبی هوای خروجی انتگرال‌گیری می‌شود:

۱- جایگزین کردن رابطه (۳) در رابطه (۱):

$$dh_s = \frac{1}{G_s} (G_a dh_a - h_s G_a d\omega_a) \quad (13)$$

۲- ترکیب دو رابطه (۴) و (۱۳):

$$dh_s = \frac{G_a dh_a - h_s G_a d\omega_a}{G_{s,i} - G_a (\omega_{a,o} - \omega_a)} \quad (14)$$

۳- اگر رابطه (۱۴) بر سرعت جریان جرمی تقسیم شود حاصل آن خواهد شد:

$$dh_s = \frac{dh_a - h_s d\omega_a}{\frac{G_{s,i}}{G_a} - (\omega_{a,o} - \omega_a)} \quad (15)$$

۴- با ترکیب روابط (۵)، (۷) و (۱۱) و با ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$G_a dh_a = h_D a_w dV \times [Cp_a Le (T_s - T_a) + h_{v, T_s} (\omega_{T_s, sat} - \omega_a)] \quad (16)$$

۵- با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۱۵) خواهیم داشت:

$$dT_s = \frac{1}{Cp_s} \left(\frac{dh_a - Cp_s T_s d\omega_a}{\frac{G_s}{G_a} - (\omega_{a,o} - \omega_a)} \right) \quad (17)$$

۶- باز نویسی رابطه (۱۶) به صورت جبری در نهایت خواهیم داشت:

$$G_a dh_a = h_D a_w dV Le \times \left[(h_{T_s, sat} - h_a) + \left(\frac{1}{Le} - 1 \right) h_{v, s} (\omega_{T_s, sat} - \omega_a) \right] \quad (18)$$

۷- با ترکیب دو رابطه (۱۸) و (۷) و تعریف NTU خواهیم داشت:

$$\frac{dh_a}{dV} = \frac{NTU \cdot Le}{V_T} \times \left[(h_{T_s, sat} - h_a) + \left(\frac{1}{Le} - 1 \right) h_{v, s} (\omega_{T_s, sat} - \omega_a) \right] \quad (19)$$

$$\frac{d\omega_a}{dV} = \frac{NTU}{V_T} (\omega_{T_s, sat} - \omega_a) \quad (20)$$

۳-۱- فرض عدد لویس برابر یک در محاسبات مدل

پیشنهادی

جهت حل روابط نوشته شده می‌توان فرض کرد که تغییر در سرعت جریان جرمی مایع در محفظه ناچیز و عدد

3 -Chain rule

4 - Effective

بنابراین برای حل این مدل برای یک شرایط مشخص باید کمیت‌ها: گرمای ویژه محلول، گرمای ویژه اشباع هوا، آنتالپی هوای خروجی، آنتالپی هوای اشباع موثر، رطوبت‌نسبی هوای اشباع موثر، رطوبت‌نسبی هوای اشباع موثر، رطوبت‌نسبی هوای خروجی، سرعت جریان جرمی محلول، آنتالپی خروجی محلول، غلظت خروجی محلول، دمای خروجی محلول و دمای خروجی هوا محاسبه شود. از آنجایی که مقدار گرمای ویژه اشباع هوا به مقدار حدس دمای خروجی بستگی دارد بنابراین تکرار مورد نیاز می‌باشد. نتایج حل مدل اثربخشی با در نظر گرفتن عدد لوئیس و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی در بخش بعدی آورده شده است.

۴- نتایج و بحث

جهت مطالعه فرآیند انتقال جرم و حرارت به صورت همزمان در طی فرآیند رطوبت‌زدایی، تاثیر تعداد واحدهای انتقال جرم (NTU) و عدد لوئیس (Le) روی پارامترهای خروجی ستون رطوبت‌زدا مورد مطالعه قرار گرفت. اگر چه مدل "اثربخشی" در نگاه اول یک مدل جدیدی نمی‌باشد اما این مدل از محاسبات تکرار شونده مانند مدل اختلاف محدود که معمولاً برای فرآیند جرمی و حرارتی ستون پر شده محلول دسیکنت استفاده می‌شود، جلوگیری می‌کند و همچنین تطابق خوبی با دیگر مدل‌های موجود برای شبیه‌سازی سیستم‌های رطوبت‌زدا، از خود نشان می‌دهد. از خواص مطلوب این مدل سرعت، دقت و تطبیق‌پذیری بالای آن می‌باشد. همچنین این مدل مانند مدل‌های پایه‌ای از جمله مدل اختلاف محدود از نظر پارامتری دارای فهم آسان می‌باشد و انعطاف‌پذیری مناسبی نسبت به انجام تغییرات از خود نشان می‌دهد.

جهت حل روابط مدل اثربخشی از نرم‌افزار مطلب^۵ استفاده گردیده است. پارامترهای ورودی به مدل همان پارامترهای ورودی به ستون رطوبت‌زدای دسیکنت که از داده‌های آزمایشگاهی گرفته شده است، می‌باشد. بعد از حل این معادلات مشاهده گردید که این روابط بعد از ۲ یا ۳ مرحله تکرار همگرا می‌گردد. این مدل با حدود ۴۰ محاسبه اصلی، بسیار سریع‌تر از سایر مدل‌های مثل مدل اختلاف محدود به نتیجه می‌رسد.

$$\omega_{a,o} = \omega_{T_s, sat, eff} + (\omega_{a,i} - \omega_{T_s, sat, eff}) e^{-NTU} \quad (29)$$

بنابراین انجام مراحل ذیل برای بدست آوردن حالت‌های خروجی از محفظه رطوبت‌زدای دسیکنت مایع با توجه به مدل اثربخشی ضروری می‌باشد:

- ۱- بدست آوردن مقدار NTU برای سیستم و شرایط
- ۲- محاسبه گرمای ویژه اشباع برای محدوده شرایط مورد انتظار (رابطه (۲۳))
- ۳- محاسبه نسبت ظرفیت‌ها، m^* (رابطه (۲۴))
- ۴- محاسبه راندمان (رابطه (۲۶))
- ۵- محاسبه آنتالپی هوای خروجی (رابطه (۲۷))
- ۶- استفاده از معادله بقای انرژی برای بدست آوردن آنتالپی محلول خروجی
- ۷- محاسبه آنتالپی اشباع موثر (رابطه (۲۸))
- ۸- استفاده از این آنتالپی و شرایط اشباع برای محاسبه رطوبت نسبی موثر اشباع ($\omega_{T_s, sat, eff}$)
- ۹- بدست آوردن رطوبت هوای خروجی (رابطه (۲۹))
- ۱۰- استفاده از معادله بقای جرم و حالات شناخته شده برای محاسبه سرعت‌جریان، غلظت و دمای خروجی محلول و هوای خروجی

۳-۲- اضافه کردن عدد لوئیس به محاسبات مدل

پیشنهادی

در روابط بالا فرض گردید که عدد لوئیس در سیستم رطوبت‌زدا برابر یک باشد. زمانی که عدد لوئیس برابر مقدار یک فرض نشود باید رابطه (۱۹) برای حل مدل در نظر گرفته شود. اگر مقدار عدد لوئیس نزدیک یک باشد، بخش دوم این رابطه در سمت راست از لحاظ مقداری از بخش اول بسیار کمتر خواهد بود. تا اندازه‌ای که تاثیر آن را می‌تواند بصورت بخشی در NTU وارد کرد و یک مقدار جدید $NTU^* = Le \cdot NTU$ بوجود آورد. بنابراین روابط (۲۰)، (۲۶)، (۲۸) و (۲۹) خواهد شد:

$$\frac{d\omega_a}{dV} = \frac{NTU^* / Le}{V_T} (\omega_{T_s, sat} - \omega_a) \quad (30)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU^* (1-m^*)}}{1 - m^* e^{-NTU^* (1-m^*)}} \quad (31)$$

$$h_{T_s, sat, eff} = h_{a,i} + \frac{h_{a,o} - h_{a,i}}{1 - e^{-NTU^*}} \quad (32)$$

$$\omega_{a,o} = \omega_{T_s, sat, eff} + (\omega_{a,i} - \omega_{T_s, sat, eff}) e^{-NTU^* / Le} \quad (33)$$

گیرد. مقایسه پارامترهای خروجی محاسبه شده توسط مدل اثربخشی با پارامترهای خروجی حاصل از دستگاه آزمایشگاهی در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده وجود توافق خوب بین مقدارهای حاصل از حل مدل و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

جهت مقایسه ضروریست مقدار NTU هر دسته از داده‌ها آزمایشگاهی ستون رطوبت‌زدای دسیکنت محاسبه گردد. با توجه به رابطه (۱۲) برای محاسبه NTU نیاز است که ضریب انتقال جرم، h_D ، برای هر دسته از داده‌های آزمایشگاهی محاسبه گردد. مقدار ضریب انتقال جرم برای هر دسته از داده‌های آزمایشگاهی ستون رطوبت‌زدای دسیکنت مایع، مطابق روش "برآورد جداگانه h_D -Le" که مراحل حل آن به صورت کامل در مرجع [۱۱] توضیح داده شده است، محاسبه شد. با توجه به مشخص بودن سطح ویژه پرکن‌ها، ابعاد ستون رطوبت‌زدا، شدت جریان جرمی هوای فرآیندی و ضریب انتقال جرم، مقدار NTU به راحتی با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. در مرجع [۱۱] همچنین نشان داده شده است که ضریب انتقال جرم، h_D ، محاسبه شده تابعی از شرایط عملیاتی ورودی به ستون رطوبت‌زدا می‌باشد، بنابراین به طبع آن تعداد واحدهای انتقال جرم، NTU، نیز تابعی از شرایط عملیاتی ورودی به سیستم رطوبت‌زدایی می‌باشد و انتظار می‌رود مقدارهای NTU از یک مورد به مورد دیگر بر اساس شرایط عملیاتی تغییر کند. بنابراین پارامترهایی که روی مقدار NTU تاثیر می‌گذارد، ابعاد، تخلخل ستون پرشده رطوبت‌زدا و همچنین شرایط عملیاتی ورودی به این ستون است که در مقدار ضریب انتقال جرم بسیار موثر می‌باشند. مقدار NTU با افزایش ابعاد ستون و تخلخل مواد پرکننده آن افزایش می‌یابد، جهت مشخص شدن نحوه و میزان تاثیر پارامترهای عملیاتی ورودی به ستون رطوبت‌زدا بر مقدار NTU مطالعه آزمایشگاهی صورت‌گرفته است که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

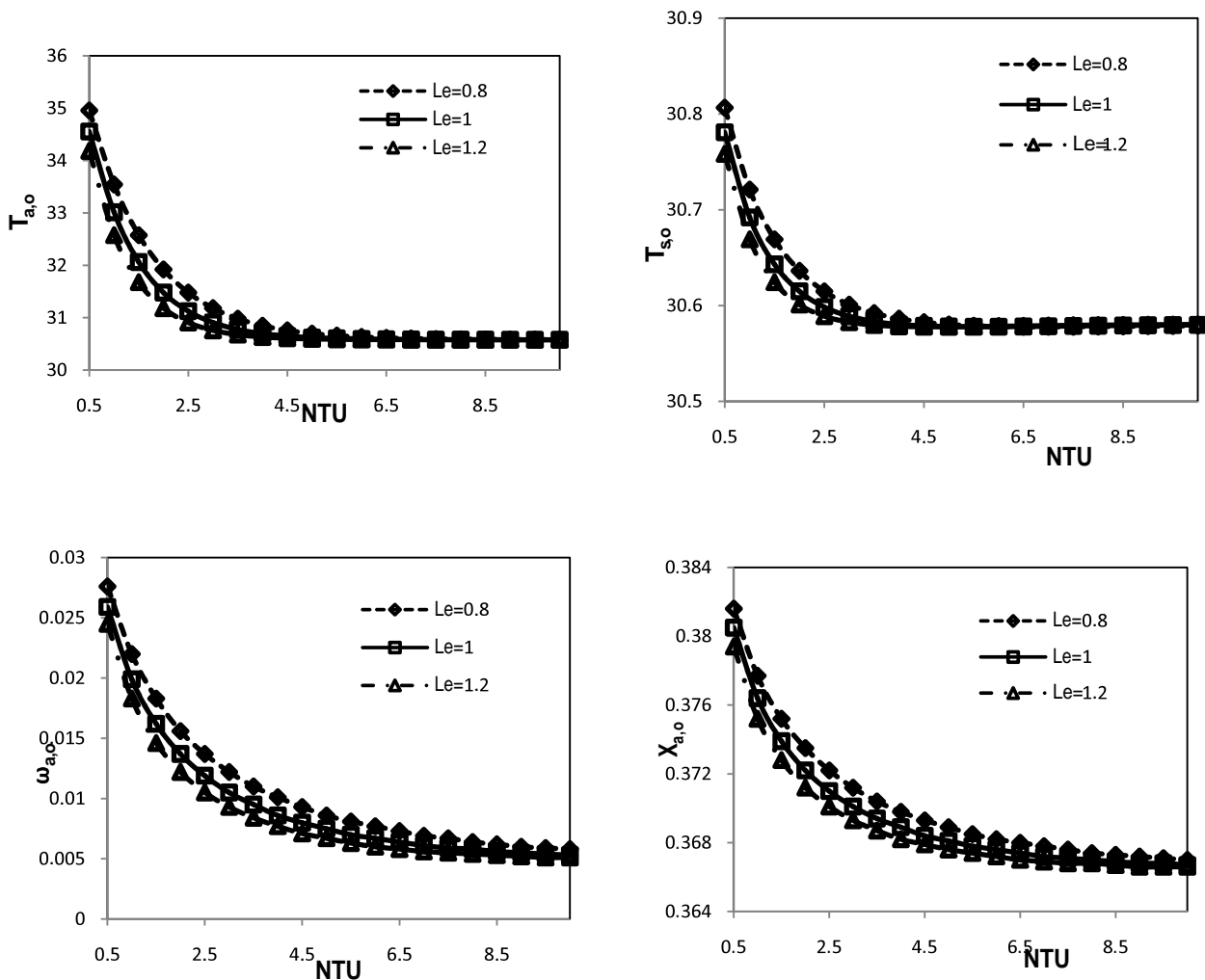
نتایج حل مدل مذکور در جدول ۱ براساس NTU های مختلف برای تعدادی از داده‌های آزمایشگاهی ورودی به ستون رطوبت‌زدای هوا که به صورت تصادفی انتخاب شده، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد دمای هوای خروجی نسبت به دمای هوای ورودی به ستون رطوبت‌زدا کاهش و دمای محلول خروجی نسبت به دمای محلول ورودی به تدریج افزایش می‌یابد. این کاهش دمای هوا در نتیجه تماس با محلول با دمای پایین‌تر که به ستون رطوبت‌زدا وارد می‌گردد، می‌باشد. از طرف دیگر دمای محلول به علت آزاد شدن گرمای میعان افزایش می‌یابد و رطوبت موجود در هوا توسط محلول جذب می‌شود. از نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد، افزایش NTU موجب کاهش بیشتر رطوبت نسبی هوا و رقیق‌تر شدن محلول می‌گردد. همچنین کاهش دمای محلول و هوای خروجی از ستون رطوبت‌زدا و نزدیک شدن این دو مقدار به هم با افزایش NTU قابل ملاحظه می‌باشد.

شکل ۴ علاوه بر اثر تغییر NTU نتایج حاصل از تغییر مقدار عدد لويس، Le ، را بر پارامترها خروجی از ستون رطوبت‌زدای دسیکنت (دما و رطوبت هوای فرآیندی و دما و غلظت محلول کلریدلیتیم) برای پارامترهای ورودی مشخص آزمایشگاهی زیر نشان می‌دهد:

$$(G_a=0.2241 \text{ kg/s}, T_{a,i}=37^\circ\text{C}, \omega_{a,i}=0.0372 \text{ kg/kg}, \\ X_{s,i}=0.3884) \text{ و } G_{s,i}=0.12089 \text{ kg/s}, T_{s,i}=29.4^\circ\text{C}$$

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش NTU رطوبت هوای خروجی ستون رطوبت‌زدایی دسیکنت مایع به مقدار تعادلی و دمای هوای خروجی و محلول خروجی به یک مقدار مشابه نزدیک می‌شوند که این نتیجه مشاهده شده از نظر تئوری منطقی به نظر می‌رسد. همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌گردد که افزایش NTU در مراحل اولیه تاثیر بسزایی روی مقدار پارامترهای خروجی از ستون رطوبت‌زدا و بر عملکرد آن دارد، ولی رفته‌رفته با افزایش بیشتر NTU این تاثیر بسیار کاهش می‌یابد و به راحتی قابل مشاهده است که بعد از یک مرحله مشخص افزایش NTU تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی عملکرد سیستم ندارد.

برای اطمینان از نتایج حل مدل اثربخشی که برای توصیف ستون پرشده رطوبت‌زدای دسیکنت مایع در سیستم خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است، نیاز به معتبرسازی وجود دارد. جهت معتبرسازی مدل ارائه شده، مقایسه‌ای بین نتایج حل مدل اثربخشی و مقدارهای آزمایشگاهی که از ستون رطوبت‌زدای دسیکنت آزمایشگاهی حاصل گردیده، باید انجام



شکل (۴): تاثیر افزایش عدد لویس و تعداد واحدهای انتقال جرم روی پارامترهای خروجی از ستون رطوبت‌زدای دسیکنت (دما و رطوبت هوای خروجی و دما و غلظت محلول کلریدلیمیم)

جدول (۳): شرایط آزمایشگاهی ورودی به ستون رطوبت‌زدا جهت بررسی تاثیر دما و رطوبت‌نسبی هوا بر تعداد واحدهای انتقال جرم

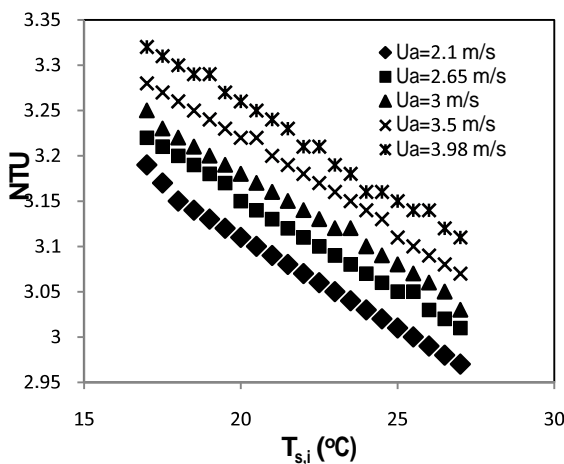
شرایط هوای ورودی			شرایط محلول دسیکنت ورودی		
U_a (m ² /s)	$T_{a,i}$ (°C)	$\omega_{a,i}$ (kg/kg)	$G_{s,i}$ (kg/s)	$T_{s,i}$ (°C)	$X_{s,i}$ (kg/kg)
۲/۱۰-۳/۸۹	۳۰-۵۰	۰/۰۱۸-۰/۰۷۳	۰/۱۲۴۰	۲۱/۰	۰/۳۷

۴-۱- تاثیر دما و رطوبت هوای ورودی بر تعداد واحدهای انتقال جرم

جهت بررسی تاثیر دما و رطوبت‌نسبی هوا بر روی پارامتر کلیدی تعداد واحدهای انتقال جرم آزمایش‌هایی در شرایطی که در جدول ۳ نشان داده شده، انجام گرفته است. تاثیر دما و رطوبت‌نسبی هوا ورودی بر تعداد واحدهای انتقال جرم در سرعت‌های مختلف جریان هوا (U_a)، در شکل ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش دما، رطوبت‌نسبی هوای ورودی، تعداد واحدهای انتقال جرم افزایش می‌یابد.

جدول (۴) : شرایط آزمایشگاهی ورودی به ستون رطوبت زدا جهت بررسی تاثیر دما محلول دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم

شرایط هوای ورودی			شرایط محلول ورودی		
U_a (m ² /s)	$T_{a,i}$ (°C)	$\omega_{a,i}$ (kg/kg)	$G_{s,i}$ (kg/s)	$T_{s,i}$ (°C)	$X_{s,i}$ (kg/kg)
۲/۱۰-۳/۸۹	۳۹	۰/۰۴۰	۰/۱۲۴۰	۱۷-۲۷	۰/۳۷



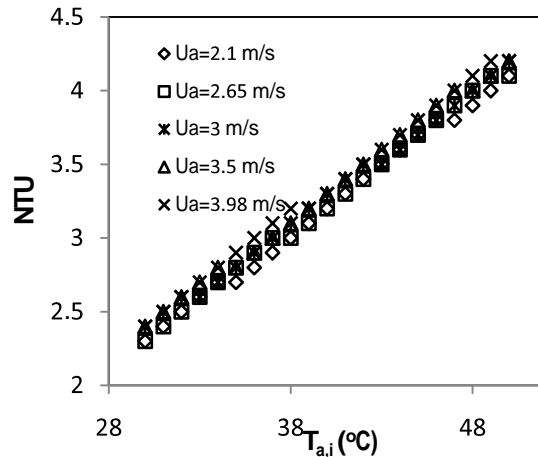
شکل (۶) : تاثیر دمای محلول ورودی دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم بدست آمده از داده های آزمایشگاهی

۴-۳- تاثیر غلظت محلول دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم

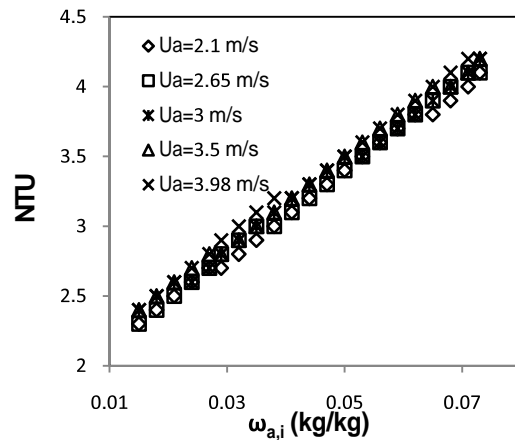
در شکل ۷ تاثیر غلظت محلول دسیکنت ورودی به ستون پر شده رطوبت زدا بر تعداد واحدهای انتقال جرم نشان داده شده است. این دسته از آزمایشها در شرایط آزمایشگاهی نشان داده شده در جدول ۵ انجام گرفته است. همانطور که در این شکل دیده می شود با افزایش غلظت محلول ورودی تعداد واحدهای انتقال جرم کاهش می یابد.

جدول (۵) : شرایط آزمایشگاهی ورودی به ستون رطوبت زدا جهت بررسی تاثیر غلظت محلول دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم

شرایط هوای ورودی			شرایط محلول ورودی		
U_a (m ² /s)	$T_{a,i}$ (°C)	$\omega_{a,i}$ (kg/kg)	$G_{s,i}$ (kg/s)	$T_{s,i}$ (°C)	$X_{s,i}$ (kg/kg)
۲/۱۰-۳/۸۹	۳۹/۰	۰/۰۴۰	۰/۱۲۴۰	۲۱/۰	۰/۳۰-۰/۴۰



شکل ۵-الف تاثیر دمای هوای ورودی بر NTU بدست آمده از داده های آزمایشگاهی

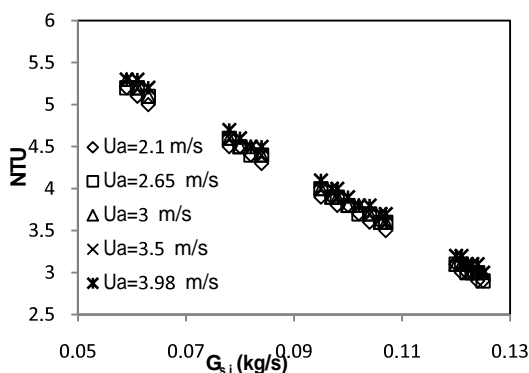


شکل ۵-ب تاثیر رطوبت هوای ورودی بر NTU بدست آمده از داده های آزمایشگاهی

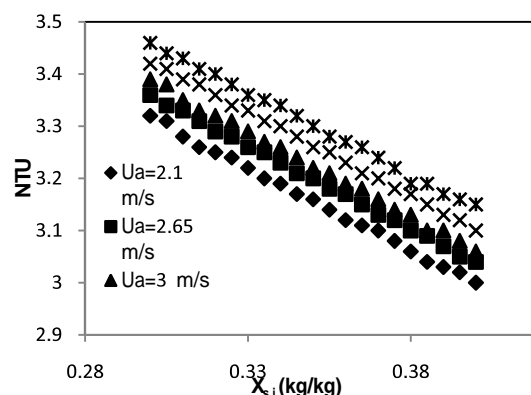
شکل (۵) : تاثیر دما و رطوبت نسبی هوای ورودی بر تعداد واحدهای انتقال جرم

۴-۲- تاثیر دمای محلول دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم

جدول ۴ شرایط آزمایشگاهی که برای بررسی تاثیر دمای محلول دسیکنت ورودی به ستون پر شده بر تعداد واحدهای انتقال جرم انجام گرفته است، را نشان می دهد. نتایج این گروه آزمایشها در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد با افزایش دمای محلول تعداد واحدهای انتقال جرم کاهش می یابد، همچنین در این شکل به صورت واضح تاثیر سرعت هوای فرآیندی بر تعداد واحدهای انتقال جرم دیده می شود. با افزایش سرعت هوا (U_a)، تعداد واحدهای انتقال جرم به مقدار کمی در حال افزایش می باشد.



شکل (۸): تاثیر شدت جریان محلول ورودی دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم بدست آمده از داده های آزمایشگاهی



شکل (۷): تاثیر غلظت محلول ورودی دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم بدست آمده از داده های آزمایشگاهی

۵- نتیجه گیری

بررسی آزمایشگاهی و تئوری روی ستون رطوبت‌زدای هوا توسط دسیکنت مایع با معادلات انتقال جرم و حرارت انجام گرفت. دما و غلظت خروجی محلول و همچنین دما و رطوبت‌نسبی هوای فرآیندی با مدل اثربخشی پیش‌بینی شد و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتیجه این مقایسه رضایت بخش می‌باشد.

همچنین در این مقاله مشخص گردید که تعداد واحدهای انتقال جرم روی عملکرد ستون رطوبت‌زدا تاثیر بسزایی دارد و افزایش تعداد واحدهای انتقال جرم باعث بهبود عملکرد رطوبت‌زدایی می‌گردد، اما با افزایش تعداد واحدهای انتقال جرم، این روند افزایشی در بهبود عملکرد نامحسوس‌تر خواهد شد و بعد از یک مرحله مشخص عملکرد سیستم به مقدار بسیار کمی افزایش می‌یابد. با توجه به این نکته عوامل موثر در افزایش تعداد واحد انتقال جرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که شرایط عملیاتی در مقدار این پارامتر بسیار مهم می‌باشند. از سوی دیگر، یکی دیگر از روش‌های افزایش تعداد واحد انتقال جرم افزایش ابعاد ستون رطوبت‌زدا می‌باشد. اما افزایش ابعاد ستون رطوبت‌زدا باعث افزایش هزینه سرمایه‌گذاری جهت ساخت می‌گردد و انعطاف‌پذیری سیستم را نیز کاهش می‌دهد. پس نکته‌ای که می‌بایست در زمان طراحی سیستم در نظر گرفته شود این است که جهت افزایش عملکرد سیستم رطوبت‌زدای دسیکنت مایع، مقدار NTU بهینه از نظر اقتصادی و عملکردی محاسبه شود.

۴-۴- تاثیر سرعت جریان جرمی محلول دسیکنت بر

تعداد واحدهای انتقال جرم

تعدادی آزمایش جهت بررسی تاثیر سرعت جریان جرمی محلول دسیکنت ورودی به ستون پر شده بر تعداد واحدهای انتقال جرم انجام گرفت. در جدول ۶ شرایط این گروه از آزمایش‌ها آورده شده است. شکل ۸ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان جرمی محلول دسیکنت ضریب تعداد واحدهای انتقال جرم کاهش می‌یابد.

با توجه به اینکه افزایش NTU باعث بهبود در عملکرد ستون رطوبت‌زدا می‌شود، نتایج حاصله حاکی از آن است که علاوه بر افزایش ابعاد و تخلخل پرکن‌های ستون، افزایش جریان جرمی، دما و رطوبت‌نسبی هوای فرآیندی و کاهش شدت جریان جرمی، دما و غلظت محلول دسیکنت نیز باعث افزایش تعداد واحدهای انتقال جرم می‌گردند.

جدول (۶): شرایط آزمایشگاهی ورودی به ستون رطوبت‌زدا جهت

بررسی تاثیر سرعت جریان جرمی محلول دسیکنت بر تعداد واحدهای انتقال جرم

شرایط هوای ورودی			شرایط محلول دسیکنت ورودی		
U_a (m ² /s)	$T_{a,i}$ (°C)	$\omega_{a,i}$ (kg/kg)	$G_{s,i}$ (kg/s)	$T_{s,i}$ (°C)	$X_{s,i}$ (kg/kg)
۲/۱۰-۳/۸۹	۳۹/۰	۰/۰۴۰	۰/۱۲۴۰	۲۱/۰	۰/۳۰-۰/۴۰

جدول (۱) : نتایج حل مدل برای تعداد واحدهای انتقال جرم مختلف به ازای داده‌های ورودی مشخص به سیستم رطوبت‌زدای آزمایشگاهی

نمونه (۱)														
شرایط ورودی	$G_{a,i} = 0.1825 \text{ kg/s}$		$T_{a,i} = 40.5^\circ\text{C}$		$\omega_{a,i} = 0.375 \text{ kg/kg}$		$G_{s,i} = 0.1249 \text{ kg/s}$		$T_{s,i} = 29.3^\circ\text{C}$		$X_{s,i} = 0.3860$			
NTU	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$T_{a,o} [^\circ\text{C}]$	۳۶/۶۸۹۲	۳۴/۲۹۰۵	۳۲/۸۰۸۰	۳۱/۸۹۹۲	۳۱/۳۴۴۴	۳۱/۰۰۶۸	۳۰/۸۰۱۶	۳۰/۶۷۷۲	۳۰/۵۵۶۴	۳۰/۵۱۲۳	۳۰/۴۹۶۵	۳۰/۴۹۰۹	۳۰/۴۸۸۹	۳۰/۴۸۸۳
$\omega_{a,o} [\text{kg/kg}]$	۰/۰۲۵۹	۰/۰۱۹۶	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۱۰	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۱
$T_{s,o} [^\circ\text{C}]$	۳۰/۸۱۴۸	۳۰/۶۷۶۷	۳۰/۵۹۸۷	۳۰/۵۵۳۰	۳۰/۵۲۵۷	۳۰/۵۰۹۳	۳۰/۴۹۹۶	۳۰/۴۹۳۹	۳۰/۴۸۸۹	۳۰/۴۸۶۶	۳۰/۴۸۷۵	۳۰/۴۸۷۵	۳۰/۴۸۷۷	۳۰/۴۸۷۹
$X_{s,o}$	۰/۳۷۹۶	۰/۳۷۶۱	۰/۳۷۴۰	۰/۳۷۲۶	۰/۳۷۱۶	۰/۳۷۰۹	۰/۳۷۰۳	۰/۳۶۹۹	۰/۳۶۹۳	۰/۳۶۹۲	۰/۳۶۸۸	۰/۳۶۸۷	۰/۳۶۸۶	۰/۳۶۸۵
نمونه (۲)														
شرایط ورودی	$G_{a,i} = 0.1586 \text{ kg/s}$		$T_{a,i} = 44.9^\circ\text{C}$		$\omega_{a,i} = 0.507 \text{ kg/kg}$		$G_{s,i} = 0.1242 \text{ kg/s}$		$T_{s,i} = 30.5^\circ\text{C}$		$X_{s,i} = 0.3773$			
NTU	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$T_{a,o} [^\circ\text{C}]$	۳۹/۹۵۸۱	۳۶/۸۰۸۱	۳۴/۸۴۷۳	۳۳/۶۳۹۹	۳۲/۹۰۰۸	۳۲/۴۵۰۰	۳۲/۱۷۵۷	۳۲/۰۰۹۲	۳۱/۸۴۷۳	۳۱/۷۸۸۱	۳۱/۷۶۶۷	۳۱/۷۵۹۰	۳۱/۷۵۶۴	۳۱/۷۵۵۵
$\omega_{a,o} [\text{kg/kg}]$	۰/۰۲۴۵	۰/۰۲۵۵	۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۰۱	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۵۹
$T_{s,o} [^\circ\text{C}]$	۳۲/۳۴۰۲	۳۲/۰۹۸۸	۳۱/۹۶۰۰	۳۱/۸۷۷۵	۳۱/۸۲۷۷	۳۱/۷۹۷۷	۳۱/۷۷۹۵	۳۱/۷۶۸۷	۳۱/۷۵۸۷	۳۱/۷۵۵۵	۳۱/۷۵۴۷	۳۱/۷۵۴۶	۳۱/۷۵۴۷	۳۱/۷۵۴۹
$X_{s,o}$	۰/۳۶۹۶	۰/۳۶۵۵	۰/۳۶۳۰	۰/۳۶۱۳	۰/۳۶۰۱	۰/۳۵۹۳	۰/۳۵۸۷	۰/۳۵۸۲	۰/۳۵۷۶	۰/۳۵۷۳	۰/۳۵۷۱	۰/۳۵۷۰	۰/۳۵۶۹	۰/۳۵۶۹
نمونه (۳)														
شرایط ورودی	$G_{a,i} = 0.1189 \text{ kg/s}$		$T_{a,i} = 48.5^\circ\text{C}$		$\omega_{a,i} = 0.619 \text{ kg/kg}$		$G_{s,i} = 0.1234 \text{ kg/s}$		$T_{s,i} = 30.1^\circ\text{C}$		$X_{s,i} = 0.3672$			
NTU	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$T_{a,o} [^\circ\text{C}]$	۴۲/۱۲۶۲	۳۸/۰۱۹۴	۳۵/۴۴۴۷	۳۳/۸۵۱۷	۳۲/۸۷۳۶	۳۲/۲۷۵۶	۳۱/۹۱۱۳	۳۱/۶۸۹۷	۳۱/۴۷۳۶	۳۱/۳۹۴۴	۳۱/۳۶۵۴	۳۱/۳۵۴۹	۳۱/۳۵۱۱	۳۱/۳۴۹۷
$\omega_{a,o} [\text{kg/kg}]$	۰/۰۴۱۴	۰/۰۲۹۶	۰/۰۲۲۳	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۶۲
$T_{s,o} [^\circ\text{C}]$	۳۲/۳۰۱۱	۳۱/۹۲۰۰	۳۱/۶۹۴۹	۳۱/۵۵۹۰	۳۱/۴۷۶۲	۳۱/۴۲۵۵	۳۱/۳۹۴۷	۳۱/۳۷۶۰	۳۱/۳۵۸۱	۳۱/۳۵۱۹	۳۱/۳۴۹۸	۳۱/۳۴۹۱	۳۱/۳۴۹۰	۳۱/۳۴۹۰
$X_{s,o}$	۰/۳۶۰۱	۰/۳۵۶۱	۰/۳۵۳۷	۰/۳۵۲۱	۰/۳۵۱۱	۰/۳۵۰۳	۰/۳۴۹۸	۰/۳۴۹۴	۰/۳۴۹۰	۰/۳۴۸۷	۰/۳۴۸۶	۰/۳۴۸۶	۰/۳۴۸۵	۰/۳۴۸۵

مطالعه تئوری و آزمایشگاهی سیستم رطوبت‌زدای دسیکنت مایع

ادامه جدول (۱): نتایج حل مدل برای تعداد واحدهای انتقال جرم مختلف به ازای داده‌های ورودی مشخص به سیستم رطوبت‌زدای آزمایشگاهی

نمونه (۴)														
شرایط ورودی	$G_{a,i} = 0.0972 \text{ kg/s}$			$T_{a,i} = 35/1^\circ\text{C}$			$\omega_{a,i} = 0.0276 \text{ kg/kg}$		$G_{s,i} = 0.1212 \text{ kg/s}$		$T_{s,i} = 28/2^\circ\text{C}$		$X_{s,i} = 0.3389$	
NTU	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10
$T_{a,o} [^\circ\text{C}]$	32/8761	31/4935	30/6434	30/1238	29/8071	29/6146	29/4977	29/4267	29/3577	29/3224	29/3231	29/3197	29/3185	29/3181
$\omega_{a,o} [\text{kg/kg}]$	0/0199	0/0155	0/0127	0/0109	0/0097	0/0089	0/0083	0/0079	0/0075	0/0072	0/0071	0/0071	0/0070	0/0070
$T_{s,o} [^\circ\text{C}]$	29/4479	29/3946	29/3634	29/3449	29/3338	29/3272	29/3222	29/3209	29/3187	29/3180	29/3178	29/3178	29/3178	29/3178
$X_{s,o}$	0/3368	0/3356	0/3349	0/3344	0/3341	0/3339	0/3337	0/3336	0/3335	0/3335	0/3334	0/3334	0/3334	0/3334

نمونه (۵)														
شرایط ورودی	$G_{a,i} = 0.11856 \text{ kg/s}$			$T_{a,i} = 33/2^\circ\text{C}$			$\omega_{a,i} = 0.0250 \text{ kg/kg}$		$G_{s,i} = 0.1235 \text{ kg/s}$		$T_{s,i} = 26/6^\circ\text{C}$		$X_{s,i} = 0.3681$	
NTU	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10
$T_{a,o} [^\circ\text{C}]$	31/0607	29/7315	28/9155	28/4173	28/1141	27/9298	27/8180	27/7503	27/6846	27/6606	27/6520	27/6490	27/6480	27/6476
$\omega_{a,o} [\text{kg/kg}]$	0/0178	0/0139	0/0115	0/0098	0/0086	0/0078	0/0071	0/0066	0/0060	0/0055	0/0053	0/0051	0/0050	0/0050
$T_{s,o} [^\circ\text{C}]$	27/7629	27/7129	27/6850	27/6688	27/6592	27/6537	27/6504	27/6486	27/6471	27/6469	27/6470	27/6471	27/6473	27/6474
$X_{s,o}$	0/3642	0/3621	0/3608	0/3599	0/3593	0/3588	0/3585	0/3582	0/3579	0/3576	0/3575	0/3574	0/3574	0/3573

جدول (۲): مقایسه نتایج حاصل از حل مدل و داده‌های آزمایشگاهی ستون رطوبت‌زدای دسیکنت مایع

خطای نسبی این مدل (%)				نتایج حاصل از مدل				داده‌های آزمایشگاهی (خروجی)				داده‌های آزمایشگاهی (ورودی)							
$e_{X_{s,o}}$	$e_{T_{s,o}}$	$e_{\omega_{a,o}}$	$e_{T_{a,o}}$	$X_{s,o}$	$T_{s,o}$	$\omega_{a,o}$	$T_{a,o}$	$X_{s,o}$	$T_{s,o}$	$\omega_{a,o}$	$T_{a,o}$	NTU*	$X_{s,i}$	$T_{s,i}$	$G_{s,i}$	$\omega_{a,i}$	$T_{a,i}$	$G_{a,i}$	
-/۰.۸۹۵	-/۰.۱۹۲	۶/۶۶۶۷	-/۰.۳۷۹۹	-/۰.۳۷۰۹	۳۰/۵۰۹۹	-/۰.۰۹۶	۳۱/۰.۱۷۴	-/۰.۳۷۰۶	۳۰/۷	-/۰.۰۹۰	۳۰/۹	۲/۹۷۹۸	-/۰.۳۸۶	۲۹/۳	-/۰.۱۲۴۹	-/۰.۳۷۵	۴۰/۵	-/۰.۱۸۲۵	نمونه (۱)
-/۰.۲۹۱	-/۰.۲۰۷	۱/۸۱۸۲	-/۰.۶۵۴۹	-/۰.۳۵۹۲	۳۱/۷۹۳۴	-/۰.۱۱۲	۳۲/۳۸۶۵	-/۰.۳۵۹۱	۳۱/۸	-/۰.۱۱۰	۳۲/۶	۳/۰.۹۵۷	-/۰.۳۷۷۳	۳۰/۵	-/۰.۱۲۴۲	-/۰.۵۰۷	۴۴/۹	-/۰.۱۵۸۶	نمونه (۲)
-/۰.۰۳۷	-/۰.۱۰۴۵	۱/۶۵۲۹	۱/۳۳۸۷	-/۰.۳۵۰۴	۳۱/۴۳۲۸	-/۰.۱۲۳	۳۲/۳۶۰۹	-/۰.۳۵۰۴	۳۱/۴	-/۰.۱۲۱	۳۲/۸	۲/۹۱۱۸	-/۰.۳۶۷۲	۳۰/۱	-/۰.۱۲۳۴	-/۰.۶۱۹	۴۸/۵	-/۰.۱۱۸۹	نمونه (۳)
-/۰.۷۶۱	-/۰.۱۱۶۷	۲/۴۰۰	۲/۶۷۳۶	-/۰.۳۳۵۱	۲۹/۳۶۵۷	-/۰.۱۲۸	۳۰/۶۹۹۴	-/۰.۳۳۴۸	۲۹/۴	-/۰.۱۲۵	۲۹/۹	۱/۴۵۸۶	-/۰.۳۳۸۹	۲۸/۲	-/۰.۱۲۱۲	-/۰.۲۷۶	۳۵/۱	-/۰.۹۷۲	نمونه (۴)
-/۰.۰۶۳	-/۰.۹۴۵۴	۱/۲۶۵۸	-/۰.۷۶۷۲	-/۰.۳۵۸۹	۲۷/۲۴۰۰	-/۰.۰۰۸	۲۷/۶۱۰۲	-/۰.۳۵۸۹	۲۷/۵	-/۰.۰۷۹	۲۷/۴	۲/۷۷۸۶	-/۰.۳۶۸۱	۲۶/۲	-/۰.۱۲۳۵	-/۰.۲۵۰	۳۳/۲	-/۰.۱۸۵۶	نمونه (۵)
-/۰.۲۰۸	۱/۰.۵۹۷	۱/۲۹۰۳	-/۰.۷۷۳۳	-/۰.۳۶۱۶	۳۵/۳۷۰۹	-/۰.۱۵۷	۳۶/۶۸۱۵	-/۰.۳۶۱۵	۳۵/۰	-/۰.۱۵۵	۳۶/۴	۲/۴۸۵۳	-/۰.۳۷۷۳	۳۳/۸	-/۰.۱۲۴۲	-/۰.۷۳۴	۵۱/۱	-/۰.۹۳۶	نمونه (۶)
-/۰.۰۳۹	-/۰.۴۴۰۹	-/۰.۸۴۷۵	۱/۳۱۰۹	-/۰.۳۵۹۱	۲۹/۴۶۹۵	-/۰.۱۱۷	۳۰/۶۹۷۲	-/۰.۳۵۹۱	۲۹/۶	-/۰.۱۱۸	۳۰/۳	۲/۷۰۸۷	-/۰.۳۷۴۸	۲۸/۲	-/۰.۱۲۴۰	-/۰.۵۷۴	۴۷/۹	-/۰.۱۱۹	نمونه (۷)
-/۰.۵۰۷	-/۰.۹۰۸۲	۳/۷۹۷۵	۱/۲۱۲۳	-/۰.۳۶۸۳	۲۷/۵۴۷۵	-/۰.۰۷۶	۲۷/۸۳۳۴	-/۰.۳۶۸۵	۲۷/۸	-/۰.۰۷۹	۲۷/۵	۲/۸۵۱۹	-/۰.۳۷۸	۲۶/۵	-/۰.۱۲۴۳	-/۰.۲۳۷	۳۲/۵	-/۰.۲۰۳۱	نمونه (۸)
-/۰.۶۹۷	-/۰.۸۲۱۶	۵/۵۵۵۶	-/۰.۵۸۷۸	-/۰.۲۹۵۷	۲۴/۷۹۴۶	-/۰.۱۰۲	۲۵/۲۵۰۷	-/۰.۲۹۵۹	۲۵/۰	-/۰.۱۰۸	۲۵/۴	۳/۸۷۱۵	-/۰.۳۱۱۹	۲۳/۸	-/۰.۱۱۹۲	-/۰.۵۱۵	۴۶/۷	-/۰.۱۵۸۳	نمونه (۹)
-/۰.۲۳۹	-/۰.۹۱۵۶	۱/۱۴۹۴	-/۰.۱۲۸۷	-/۰.۳۷۶۲	۲۸/۶۳۵۴	-/۰.۰۸۸	۲۹/۲۶۲۳	-/۰.۳۷۶۱	۲۸/۹	-/۰.۰۸۷	۲۹/۳	۲/۸۹۷۴	-/۰.۳۹۰۲	۲۷/۵	-/۰.۱۲۵۲	-/۰.۳۴۴	۴۰/۰	-/۰.۱۸۲۵	نمونه (۱۰)
-/۰.۲۹۷	-/۰.۹۰۸۳	۲/۷۰۲۷	۱/۲۱۱۳	-/۰.۳۶۸۳	۲۷/۵۴۷۵	-/۰.۰۷۶	۲۷/۸۳۳۱	-/۰.۳۶۸۲	۲۷/۸	-/۰.۰۷۴	۲۷/۵	۲/۸۵۳۱	-/۰.۳۷۸	۲۶/۵	-/۰.۱۲۴۳	-/۰.۲۳۷	۳۲/۵	-/۰.۲۰۳۱	نمونه (۱۱)
-/۰.۴۹۴	-/۰.۸۹۳۹	۳/۸۴۶۲	۱/۵۷۳۸	-/۰.۳۵۹۰	۲۷/۶۵۰۶	-/۰.۰۸۱	۲۷/۹۳۲۸	-/۰.۳۵۸۸	۲۷/۹	-/۰.۰۷۸	۲۷/۵	۲/۷۸۰۳	-/۰.۳۶۸۱	۲۶/۶	-/۰.۱۲۳۵	-/۰.۲۵۰	۳۳/۲	-/۰.۱۸۵۶	نمونه (۱۲)
-/۰.۱۵۰	۱/۱۰۰۰	۱/۱۲۳۶	۲/۹۰۱۱	-/۰.۳۷۴۱	۲۸/۱۸۶۵	-/۰.۰۸۸	۲۸/۵۰۳۶	-/۰.۳۷۴۲	۲۸/۵	-/۰.۰۸۹	۲۷/۷	۳/۱۵۱۶	-/۰.۳۹۰۴	۲۷/۱	-/۰.۱۲۵۲	-/۰.۳۳۱	۳۵/۶	-/۰.۲۲۴۷	نمونه (۱۳)
-/۰.۱۳۰	-/۰.۹۴۴۷	۱/۰.۷۵۳	-/۰.۴۳۹۷	-/۰.۳۷۲۳	۲۹/۰.۲۳۲	-/۰.۰۹۲	۲۹/۳۲۸۴	-/۰.۳۷۲۳	۲۹/۳	-/۰.۰۹۳	۲۹/۲	۳/۱۹۹۰	-/۰.۳۸۹۷	۲۷/۹	-/۰.۱۲۵۲	-/۰.۳۵۳	۳۶/۵	-/۰.۲۲۴۴	نمونه (۱۴)
-/۰.۰۰۸	۱/۱۶۹۷	۱/۰.۴۱۷	۱/۳۴۸۱	-/۰.۳۰۳۵	۲۳/۵۲۱۶	-/۰.۰۹۷	۲۳/۹۷۲۴	-/۰.۳۰۳۵	۲۳/۸	-/۰.۰۹۶	۲۴/۳	۳/۶۵۷۷	-/۰.۳۱۸۷	۲۲/۶	-/۰.۱۱۹۷	-/۰.۴۲۴	۴۱/۰	-/۰.۱۸۲۸	نمونه (۱۵)
-/۰.۲۲۱	۱/۰.۸۲۲	۱/۰.۲۰۴	-/۰.۹۷۱	-/۰.۳۰۳۳	۲۳/۹۳۸۱	-/۰.۰۹۹	۲۴/۳۷۶۳	-/۰.۳۰۳۲	۲۴/۲	-/۰.۰۹۸	۲۴/۴	۳/۶۶۸۰	-/۰.۳۱۸۷	۲۳/۰	-/۰.۱۱۹۷	-/۰.۴۳۲	۴۱/۱	-/۰.۱۸۲۸	نمونه (۱۶)
-/۰.۷۷۵	-/۰.۹۹۷۹	۴/۱۶۶۷	۱/۱۴۸۶	-/۰.۳۰۳۳	۲۴/۳۵۴۵	-/۰.۱۰۰	۲۴/۷۸۱۴	-/۰.۳۰۳۱	۲۴/۶	-/۰.۰۹۶	۲۴/۵	۳/۶۷۵۲	-/۰.۳۱۸۷	۲۳/۴	-/۰.۱۱۹۷	-/۰.۴۳۴	۴۱/۲	-/۰.۱۸۲۷	نمونه (۱۷)
-/۰.۰۳۳	۲/۰.۳۹۱	۱/۱۳۶۴	۱/۰.۳۶۴	-/۰.۲۹۷۱	۲۱/۰.۶۱۶	-/۰.۰۸۹	۲۱/۹۲۴۹	-/۰.۲۹۷۱	۲۱/۵	-/۰.۰۸۸	۲۱/۷	۳/۲۹۲۹	-/۰.۳۰۷۸	۲۰/۲	-/۰.۱۱۸۹	-/۰.۴۴۴	۴۴/۳	-/۰.۱۲۰۴	نمونه (۱۸)
-/۰.۲۵۴	۱/۱۶۹۲	۲/۰.۸۳۳	-/۰.۷۷۴۹	-/۰.۳۰۵۴	۲۳/۷۱۹۴	-/۰.۰۹۸	۲۴/۰.۸۵۲	-/۰.۳۰۵۳	۲۴/۰	-/۰.۰۹۶	۲۳/۹	۳/۸۰۱۹	-/۰.۳۲۱۴	۲۲/۸	-/۰.۱۱۹۹	-/۰.۳۹۲	۴۰/۱	-/۰.۲۱۳۳	نمونه (۱۹)
-/۰.۰۳۴	۱/۵۹۷۹	۱/۰.۴۱۷	-/۰.۵۵۲۹	-/۰.۳۰۴۱	۲۳/۵۱۸۱	-/۰.۰۹۵	۲۳/۹۳۱۶	-/۰.۳۰۴۱	۲۳/۹	-/۰.۰۹۶	۲۳/۸	۳/۷۸۳۷	-/۰.۳۱۸۷	۲۲/۶	-/۰.۱۱۹۷	-/۰.۳۸۵	۴۱/۷	-/۰.۱۹۹	نمونه (۲۰)

- [13] D. I. Stevens; (1988), "Analysis of liquid-desiccant systems and component modeling", Master of Science thesis in Mechanical Engineering, university of Wisconsin Madison.
- [14] D.I. Stevens, J.E. Braun, S.A. Klein; (1989), "An effectiveness model of liquid desiccant system heat/mass exchangers", *Solar Energy*, 42:449-455.

تشکر و قدردانی

این تحقیق تحت حمایت و پشتیبانی شرکت ملی گاز انجام گرفته است.

مراجع

- [1] L.Z. Zhang, J.L. Niu; (2003), "A pre-cooling Munters environmental control desiccant cooling cycle in combination with chilled-ceiling panels", *Energy*, 28:275-92.
- [2] H. PahlavanZadeh, A.H. Zamzamian; (2005), "Two dimensional mathematical model for fixed desiccant wheel dehumidifier", *Iranian Journal of Science and Technology*, 30:353-62.
- [3] K. Daou, R.Z. Wang, Z.Z. Xia; (2006), "Desiccant cooling air conditioning: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10:55-77.
- [4] A.A. Kinsara, M. Elsayed, O.M. Al-Rabghi; (1996), "Proposed energy efficient system using liquid desiccant", *Applied Thermal Engineering*, 16:791-896.
- [5] S. Jain, P.L. Dhar, S.C. Kaushik; (2000), "Experimental studies on the dehumidifier and regenerator of a liquid desiccant cooling system", *Applied Thermal Engineering*, 20: 253-267.
- [6] M. A. Mandegari, H. Pahlavanzadeh; (2010), "Performance assessment of hybrid desiccant cooling system at various climates", *Energy Efficiency*, 3:177-187.
- [7] M. A. Mandegari, H. Pahlavanzadeh; (2009), "Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels", *Energy*, 34:797-803.
- [8] K. Gomme, G. Grossman; (2007), "Experimental investigation of a liquid desiccant system for solar cooling and dehumidification", *Solar Energy*, 81:131-138
- [9] S. Jain, P.K. Bansal; (2007), "Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems", *International Journal of Refrigeration*, 30:861-872
- [10] J.E. Braun; (1988) "Methodologies for the Design and control of chilling water system", PhD thesis in Mechanical Engineering, university of Wisconsin Madison.
- [11] Y. Yin, X. Zhang; (2008), "A new method for determining coupled heat and mass transfer coefficients between air and liquid desiccant", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51: 3287-3297
- [12] X.Y. Chen, Z. Li, Y. Jiang, K.Y. Qu; (2006), "Analytical solution of adiabatic heat and mass transfer process in packed-type liquid desiccant equipment and its application", *Solar Energy*, 80:1509-1516.

Experimental and Theoretical Study of Liquid Desiccant Dehumidification System

Hassan Pahlavanzadeh¹, Parisa Nooriasl²

1. Professor of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University .

2. Ph.D Student of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 March 2011

Received in revised form 22 May 2011

Accepted 7 June 2011

Key words:

Pyrite

Bioreaching

Ferric Ion

Ferrous Ion

Iron Recovery

ABSTRACT

Desiccant evaporation cooling technology is compatible with the environment and can be used in air conditioners in the indoor environment of the building. The characteristics of dehumidification column of the liquid desiccant evaporation cooling air conditioning system are introduced in this paper. A system was designed and manufactured for this purpose. Lithium chloride (LiCl), as liquid desiccant, and a packed bed column were used for the dehumidification. The described system includes a part for processed air simulation with various temperatures, humidities and flow rates. The effectiveness model is considered for predicting performance of the lithium chloride dehumidification system. For validation purposes, a comparison was made between experimental outlet data of the system and corresponding results of the experimental model that showed a satisfactory correlation i.e. increase in the mass transfer unit number (NTU) leads to better performance of the dehumidification system. In addition, factors leading to increase in NTUs are also investigated.

All right reserved.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.