نشریه علوم و مهندسی جداسازی
دوره هفتم، شماره دوم، سال ۱۳۹٤، صفحه ۲۱-۳۱

Journal of Separation Science and Engineering
Vol. 7, No. 2, pp. 21-31

بررسی آزمایشگاهی عملکرد جاذب مایع برمید لیتیم در فرایند رطوبت‌زدایی هوای مرطوب با نرم‌افزار طراحی آزمایش

سارا نانواکناری [۱]، حسن پهلوانزاده [۱،*]، لیلا امیدوار لنگرودی [۱]

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۱۷ آبان ۹۳
دریافت پس از اصلاح: ۸ اردیبهشت ۹۴
پذیرش نهایی: ۶ خرداد ۹۴

کلمات کلیدی:
دسیکنت،
برمید لیتیم،
رطوبت‌زدایی،
طراحی آزمایش،
سطح پاسخ .

چکیده

امروزه با استفاده از دسیکنت‌ها به‌عنوان جاذب رطوبت در سیستم‌های تهویه مطبوع و سرمایش می‌توان بار نهان سیستم را کاهش داد. در این تحقیق به بررسی عملکرد جاذب برمید لیتیم بر فرایند رطوبت‌زدایی هوا با استفاده از آزمایش‌های طراحی‌شده به روش سطح پاسخ پرداخته‌شده است. تأثیر چهار متغیر اصلی رطوبت مطلق و دمای هوا، غلظت دسیکنت و نسبت شدت‌جریان جرمی دسیکنت به هوا (L/G) بر دمای هوا و دسیکنت خروجی و سرعت رطوبت‌زدایی به‌عنوان پاسخ مورد ارزیابی قرارگرفته است. معادلات درجه‌دو کاهش‌یافته به‌صورت تابعی از متغیرهای ورودی برای دمای هوا و دسیکنت خروجی و سرعت رطوبت‌زدایی ارائه‌شده است که تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است. شرایط عملیاتی بهینه نشان داد که در دمای هوای ورودی (°C)۲۸/۸، غلظت دسیکنت ورودی۵۰٪، رطوبت مطلق هوای ورودی (kg_w/kg_{da}) ۰/۰۱۹۰ و نسبت ۲/۴L/G سرعت رطوبت‌زدایی هوا ماکسیمم و دمای هوا و دسیکنت خروجی مینیمم می‌شود.

* عهده‌دار مکاتبات
pahlavzh@modares.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

۱-مقدمه

ایران کشوری است با آب‌وهوای گرم که در برخی از قسمت‌های آن در اکثر فصول سال از سیستم‌های سرمایش و تهویه‌ی مطبوع استفاده می‌گردد. از طرفی مقایسه سرانه مصرف انرژی در ایران با استانداردهای جهانی نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب مصرف انرژی در ایران است. بنابراین این صنایع در پی استفاده از فنّاوری‌های نوین با کارایی بالا و مصرف انرژی پایین هستند. یکی از این فنّاوری‌های نو که در سراسر جهان موردتوجه قرارگرفته است و تحقیقات وسیعی بر روی آن در حال انجام است، سیستم سرمایش دسیکنت است [۲ و۱]، زیرا سیستم‌های سرمایش رایج مانند سیستم‌های تراکم بخار با الکتریسیته کار می‌کنند که تولید آن بیشتر از سوخت‌های فسیلی بوده و دی‌اکسید کربن فراوانی در محیط منتشر می‌کند. همچنین در سیستم‌های تراکم بخار سنتی از مبردهایی بر پایه کلروفلوروکربن‌ها استفاده می‌شود که اثرات منفی آن بر محیط‌زیست اثبات‌شده است. در سیستم‌های سرمایش جذبی از منابع گرمایی به‌جای الکتریسیته برای سردسازی استفاده می‌شود و درنتیجه مصرف انرژی آن کمتر از سیستم‌های تراکم بخار است. سیستم‌های سرمایش جذبی راندمان بالاتری نسبت به سیستم‌های تراکم بخار دارند. با به‌کارگیری دسیکنت در این سیستم‌ها می‌توان راندمان را افزایش داد و میزان آلودگی محیط‌زیست را کم نمود [۴-۱].

سرمایش دسیکنتی یکی از روش‌های نوین تولید سرمایش و تهویه مطبوع است که در سال‌های اخیر موردتوجه محققان واقع‌شده است. به‌عنوان یک توضیح ساده در مورد این سیستم‌ها می‌توان گفت در سرمایش دسیکنتی، رطوبت هوا توسط دسیکنت حذف می‌شود و سپس به کمک روش‌های مختلف سردسازی، شرایط دمایی هوا به مقدار موردنظر رسانده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از دسیکنت همراه با سیستم تراکم بخار در شرایط هوای گرم و مرطوب و شرایط هوای گرم و خشک می‌تواند عملکرد سیستم را به ترتیب تا ۳۶٪ و ۲۸٪ در مقایسه با سیستم تراکم بخار بهبود بخشد [۵] و میزان مصرف انرژی را تا ۴۰٪ کاهش دهد. همچنین با به‌کارگیری دسیکنت امکان استفاده از سیستم سرمایش تبخیری در شرایط آب‌وهوای گرم و مرطوب وجود دارد که این سیستم ساده بوده و دوستدار محیط‌زیست نیز است [۶ و۱].

دسیکنت‌ها زیرمجموعه‌ای از جذب‌کننده‌ها هستند که توانایی بالایی برای جذب و دفع بخارآب به‌واسطه اختلاف فشار بخارآب بین هوا و سطح دسیکنت دارا می‌باشند. هنگامی‌که فشار جزئی بخار سطح دسیکنت پایین‌تر از فشار جزئی بخار هوای عبوری از آن باشد، برای برقراری تعادل فشار بین این دو سطح، رطوبت موجود در هوا توسط دسیکنت جذب می‌شود تا آنجا که فشار بخار جزئی سطح دسیکنت و هوا باهم برابر شود. مقدار رطوبت تعادلی جذب‌شده بستگی به پارامترهای مختلفی همچون نوع دسیکنت و دمای آن، میزان رطوبت و همچنین دمای محیط دارد [۹-۷].

دسیکنت به دو صورت جامد و مایع است که هرکدام ویژگی‌های خاص خود را دارا می‌باشند. دسیکنت‌های جامد موادی با مساحت داخلی خیلی زیاد هستند که ساختاری متخلخل شبیه اسفنج دارند که باعث می‌شود که مولکول‌های آب بتوانند درون حفره‌ها نفوذ کنند و در آنجا باقی بمانند. انتخاب دسیکنت‌های مایع با کارایی بالا بستگی به پارامترهایی نظیر فشار بخار، دانسیته ذخیره انرژی، دمای احیا، خواص ترموفیزیکی، در دسترس بودن و قیمت دارد. از بین این پارامترها فشار بخار سطحی یک مسئله مهم است. ازجمله دسیکنت‌های مایع می‌توان کلرید لیتیم، برمید لیتیم، تری اتیلن گلیکول، کلرید کلسیم، برمید کلسیم، فرمات پتاسیم را نام برد که کلرید لیتیم، برمید لیتیم و تری اتیلن گلیکول به دلیل کمتر بودن فشار بخار آن‌ها در دمای پایین و غلظت بالا نسبت به فشار بخار هوای فرایندی مرطوب به‌طور گسترده بکار می‌روند [۳ و۱۰].

در پژوهش حاضر از بین انواع دسیکنت‌های مایع موجود، دسیکنت مایع برمید لیتیم انتخاب‌شده است و برخلاف پژوهش‌های موجود که تاکنون انجام‌شده است، برای اولین بار به بررسی عوامل مؤثر و نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر سرعت رطوبت‌زدایی هوا، دمای هوا و دسیکنت خروجی با استفاده از روش طراحی آزمایش پرداخته‌شده است که تعداد آزمایش‌ها را به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد.

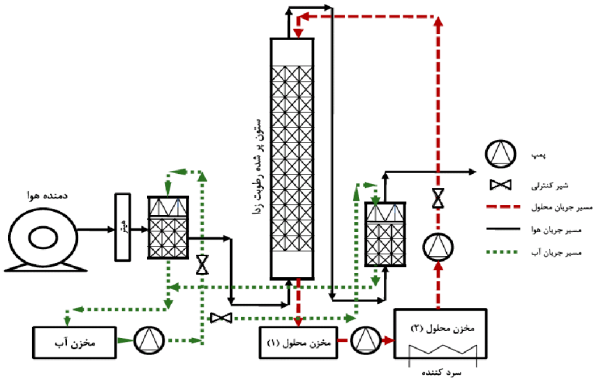
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

جاذب مایع مورداستفاده نمک برمید لیتیم است که از شرکت مرک و با خلوص ۹۹٪ تهیه‌شده است و به‌صورت محلول مورداستفاده قرارگرفته است. محلول برمید لیتیم در غلظت‌های مختلف نیز از حل کردن نمک در آب دیونیزه شده برحسب کیلوگرم نمک در کیلوگرم آب به دست آمد.

۲-۲- دستگاه

شمایی از دستگاه مورداستفاده در شکل (۱) نشان داده‌شده است. این سامانه، مطابق شکل (۱)، بخشی برای شبیه‌سازی هوا با دما، رطوبت و شدت‌جریان‌های مختلف دارد. در این بخش، جریان هوا که با خطوط پررنگ مشکی نشان داده‌شده است از هیتری که دارای المنت‌های مختلفی است عبور می‌کند. با توجه به دمای موردنظر، تعداد المنت‌های روشن تنظیم می‌گردد. هوا پس از عبور از هیتر از یک سامانه رطوبت زن می‌گذرد. در این سامانه آب از قسمت بالای آن روی الیاف داخل سامانه ریخته می‌شود. آب از یک مخزن که در شکل (۱) نشان داده‌شده است روی سامانه رطوبت زن پمپ می‌گردد. مقدار آب ریخته شده روی الیاف توسط یک شیر کنترل می‌گردد. آب پس از عبور از سامانه رطوبت زن از قسمت پایین دستگاه خارج می‌شود و دوباره به مخزن آب برگشت داده می‌شود. هوا پس از عبور از این مرحله دارای رطوبت و دمای موردنظر خواهد بود. هوای فرایندی از قسمت تحتانی ستون پرشده به قطر ۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر که شامل پرکن‌هایی با سطح ویژه $۲۶۴/۵۶ m^2/m^3$ است عبور می‌کند که در این ستون از برمید لیتیم به‌عنوان دسیکنت جهت رطوبت‌زدایی استفاده شده است. این ترکیب از بخش بالایی ستون پرشده بر روی پرکن‌ها ریخته می‌شود. هوا در تماس با این ترکیب رطوبت خود را از دست می‌دهد و ترکیب در اثر تماس با هوا به علت آزاد شدن گرمای ناشی از میعان آب مقداری گرم و رقیق می‌گردد. این فرایند در شکل توسط خطوط خط‌چین قرمز تیره نشان داده شده است. ترکیب پس از عبور از ستون وارد مخزن (۱) می‌شود و سپس توسط پمپ به مخزن (۲) منتقل می‌گردد. در مخزن دوم دمای ترکیب توسط کویل‌های سردکننده سرد می‌گردد تا دمای آن کاهش یافته و مناسب عمل جذب رطوبت گردد. دبی ترکیب ورودی به ستون رطوبت‌زدا توسط یک شیر قابل تنظیم است. پس از عبور از این ستون، رطوبت هوای فرایندی کاهش می‌یابد [۱۱].



شکل(۱) نمایی از سامانه سرمایش دسیکنت مایع ساخته شده

۲-۳- وسایل اندازه‌گیری

دستگاه ساخته‌شده به وسایل اندازه‌گیری مناسبی برای اندازه‌گیری متغیرها مجهز شده‌است. دمای هوا و جاذب مایع به‌وسیله‌ی ترموکوپل با دقت $\pm ۰/۱^0C$ که قبل و بعد از ستون رطوبت‌زدا و در تانک نگهداری جاذب نصب شده است اندازه‌گیری می‌شود. میزان دبی هوای مرطوب و جاذب مایع به ترتیب به‌وسیله جریان‌سنج و روتامتری که بعد از پمپ نصب شده است، اندازه‌گیری می‌شود. چگالی جاذب به‌وسیله‌ی هیدرومتر اندازه‌گیری می‌شود. رطوبت هوای ورودی و خروجی با رطوبت‌سنج (دقت ٪۰/۱±) اندازه گیری می‌شود که قبل و بعد از ستون رطوبت‌زدا نصب شده‌است. وسایل اندازه‌گیری و دقت آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

۲-۴- طراحی آزمایش

بررسی اثر متغیرهای متعدد موثر بر فرایند نیازمند انجام تعداد زیادی آزمایش و صرف وقت و هزینه زیاد است. طراحی آزمایش روش آماری بسیار قوی، کارآمد و عملی برای بررسی هدفمند و درعین‌حال اقتصادی متغیرها و پاسخ‌های یک فرایند است. علاوه بر این در طراحی به مدل‌سازی فرایند و همچنین بهینه‌سازی آن پرداخته می‌شود [۱۲]. نرم‌افزار مورداستفاده در این طراحی Design-Expert 7.0 است.

جدول (۱) وسایل اندازه‌گیری و دقت آن‌ها

متغیرها	وسایل اندازه‌گیری	دقت	محدوده عملیاتی	مدل
سرعت هوا	سرعت‌سنج	±۲٪	۰-۲۰m/s	TESTO
دمای هوا و جاذب	ترموکوپل	±۰/۱ °C	۰-۱۵۰ °C	SU-105IP
رطوبت هوا	رطوبت‌سنج	±۱٪	۰-۱۰۰٪	SU-503B
دبی جاذب	روتامتر	±۰/۲۵٪	۰/۷۵-۷/۵ L/min	Z-3001
چگالی جاذب	هیدرومتر	±۱kg/m^3	۱۲۰۰-۱۳۰۰kg/m^3 ۱۳۰۰-۱۴۰۰kg/m^3 ۱۴۰۰-۱۵۰۰kg/m^3 ۱۵۰۰-۱۶۰۰kg/m^3 ۱۶۰۰-۱۷۰۰kg/m^3	-

بین روش‌های رایج طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ از رایج‌ترین و کارآمدترین روش‌هاست. این روش مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی برای تعیین اثر متقابل متغیرهای مؤثر بر فرایند و تعیین مقادیر بهینه این متغیرها جهت دستیابی به حداقل یا حداکثر پاسخ است. هدف این روش یافتن یک چندجمله‌ای است که داده‌های آزمایشگاهی را برازش کرده و بر اساس سطح فاکتورها و اثر آن‌ها بر هم، شرایط بهینه را مشخص کند [۱۳]. در اینجا از روش‌های سطح پاسخ و روش سنترال‌کامپوزیت[1] (به دلیل تعداد آزمایش کم و درعین‌حال خطای پایین) انتخاب شدند.

در این روش مدل درجه دو به دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری بالا به‌طور گسترده به کار می‌رود که مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$y=b_o+\sum b_i x_i+\sum b_{ii} x_i^2+\sum b_{ij} x_i x_j \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) y پاسخ پیش‌بینی‌شده، b_o ثابت مدل، b_i ثوابت خطی، b_{ij} ثوابت خطی در خطی[2]، b_{ii} ثوابت مرتبه دو[3] و x_i ها همان متغیرهای مستقل هستند [۱۷-۱۴].

در پژوهش پیش رو، چهار متغیر شامل دمای هوای ورودی (T_{ai}) برحسب درجه سلسیوس (^oC)، رطوبت مطلق هوای ورودی (Y_i) برحسب کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک (kg_w/kg_{da})، غلظت محلول دسیکنت ورودی (X_i) برحسب کیلوگرم دسیکنت بر کیلوگرم محلول (%وزنی) و نسبت شدت جریان جرمی محلول دسیکنت به هوا (L/G)، به‌عنوان متغیرهای مستقل فرایند برای طراحی آزمایش انتخاب شدند. دمای دسیکنت ورودی (T_{si}) نیز بیست درجه سلسیوس در نظر گرفته‌شده است. بعد از تعیین متغیرها و بازه‌ی آن‌ها، جهت بررسی اثر متقابل چهار متغیر انتخاب شده بر مقادیر پاسخ، ۳۰ آزمایش توسط روش سنترال کامپوزیت طراحی شد. آزمایش‌های طراحی‌شده و همچنین مقادیر پاسخ آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. سرعت رطوبت‌زدایی هوا (G_w) در جدول (۲) از رابطه (۲) محاسبه شده است:

$$Gw = G(Yi - Yo) \qquad (۲)$$

که در آن G نشان‌دهنده شدت جریان جرمی هوا برحسب کیلوگرم بر ثانیه و Y_i وY_o به ترتیب نشان‌دهنده رطوبت مطلق هوای ورودی و خروجی برحسب کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک می‌باشند.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل واریانس مربوط به دمای هوا خروجی، دمای دسیکنت خروجی و سرعت رطوبت‌زدایی هوا به‌عنوان پاسخ در جدول (۳) نشان داده‌شده است.

شاخص F value تأثیر متغیر بر پاسخ را نشان می‌دهد و هر چه مقدار آن بیشتر باشد یعنی تأثیر آن متغیر روی پاسخ بیشتر خواهد بود [۱۷ و۱۸]. درنتیجه بر اساس مقادیر F ارائه‌شده در جدول (۳) برای هر یک از متغیرها ترتیب اثرگذاری پارامترها بر دمای هوای خروجی به‌صورت دمای هوای ورودی، غلظت دسیکنت ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی و نسبت L/G است. ترتیب اثرگذاری پارامترها بر دمای دسیکنت خروجی به‌صورت دمای هوای ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی، نسبت L/G و غلظت دسیکنت ورودی است. ترتیب اثرگذاری پارامترها بر سرعت رطوبت‌زدایی هوا به‌صورت رطوبت مطلق هوای ورودی، غلظت دسیکنت ورودی، نسبت L/G و دمای هوای ورودی است.

شاخص P value در جدول (۳) برای تعیین آستانه‌ی معناداری متغیرها به کار می‌رود. P value<۰/۰۰۰۱ نشان‌دهنده متغیرهای بسیار معنادار، ۰/۰۵<P value<۰/۰۰۰۱ نشان‌دهنده متغیرهای معنادار و P value>۰/۰۵ نشان‌دهنده معنادار نبودن متغیرها می‌باشند. با بررسی مقدار p value متوجه می‌شویم که مدل درجه دو و تمامی متغیرهای مستقل در نظر گرفته‌شده با p value<۰/۰۰۰۱ بسیار معنادار هستند. در بین متغیرهای مستقل، متغیر A (T_{ai}) و در بین اثرات متقابل دوتایی، BC (X_i Y_i) با بیشترین مقدار F value بیشترین تأثیر را بر روی دمای هوای خروجی دارند. در بین متغیرهای مستقل، متغیر A (T_{ai}) و در بین اثرات متقابل دوتایی، AB (T_{ai} X_i) با بیشترین مقدار F value بیشترین تأثیر را بر روی دمای دسیکنت خروجی دارند. همچنین در بین متغیرهای مستقل، متغیر C (Y_i) و در بین اثرات متقابل دوتایی، BD (X_i L/G) با بیشترین مقدار F value بیشترین تأثیر را بر سرعت رطوبت‌زدایی دارند.

[1] Central Composite
[2] Linear-by-Linear
[3] Quadratic

جدول (۲) جدول کامل طراحی آزمایش به همراه چهار پاسخ برای دسیکنت برمید لیتیم

شماره آزمایش	دمای هوای ورودی (°C)	غلظت دسیکنت ورودی (٪ وزنی)	رطوبت مطلق هوا ورودی (kg_w/Kg_{da})	نسبت L/G	دمای هوای خروجی (°C)	دمای دسیکنت خروجی (°C)	سرعت رطوبت‌زدایی هوا (g/s)
۱	۲۸/۸	۴۴	۰/۰۱۴۵	۲/۴	۲۲/۹	۲۳/۷	۰/۰۷۸۹
۲	۲۸/۸	۴۴	۰/۰۱۴۵	۱/۱	۲۲/۶	۲۵/۰	۰/۰۶۷۲
۳	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۳/۶	۲۶/۵	۰/۱۱۱۰
۴	۳۲/۵	۵۵	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۰/۹	۲۸/۹	۰/۱۲۲۰
۵	۳۶/۳	۵۱	۰/۰۱۹۵	۲/۴	۲۴/۹	۲۸/۲	۰/۱۵۱۰
۶	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۳/۶	۲۶/۵	۰/۱۱۱۰
۷	۴۰/۰	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۷/۶	۲۹/۰	۰/۱۰۷۰
۸	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۲۰	۱/۸	۲۳/۶	۲۵/۲	۰/۰۶۳۸
۹	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۳/۵	۲۶/۴	۰/۱۱۱۰
۱۰	۲۸/۸	۵۱	۰/۰۱۴۵	۲/۴	۲۱/۰	۲۵/۹	۰/۱۰۴۰
۱۱	۲۵/۰	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۰/۲	۲۴/۰	۰/۱۰۴۰
۱۲	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۳/۰	۲۴/۳	۲۵/۸	۰/۱۲۷۰
۱۳	۲۸/۸	۵۱	۰/۰۱۴۵	۱/۱	۲۰/۶	۲۶/۸	۰/۰۸۵۶
۱۴	۲۸/۸	۴۴	۰/۰۱۹۵	۲/۴	۲۳/۴	۲۵/۶	۰/۱۲۹۰
۱۵	۲۸/۸	۵۱	۰/۰۱۹۵	۱/۱	۲۰/۳	۲۷/۸	۰/۱۲۷۰
۱۶	۳۲/۵	۴۰	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۵/۳	۲۶/۰	۰/۰۷۵۶
۱۷	۳۶/۳	۵۱	۰/۰۱۴۵	۲/۴	۲۴/۶	۲۵/۷	۰/۱۰۲۰
۱۸	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۲۲۰	۱/۸	۲۴/۱	۲۸/۱	۰/۱۵۸۰
۱۹	۲۸/۸	۴۴	۰/۰۱۹۵	۱/۱	۲۲/۹	۲۶/۰	۰/۱۱۱۰
۲۰	۲۸/۸	۵۱	۰/۰۱۹۵	۲/۴	۲۰/۹	۲۶/۸	۰/۱۵۴۰
۲۱	۳۶/۳	۴۴	۰/۰۱۹۵	۲/۴	۲۷/۲	۲۷/۸	۰/۱۲۶۰
۲۲	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۳/۶	۲۶/۸	۰/۱۱۲۰
۲۳	۳۶/۳	۵۱	۰/۰۱۴۵	۱/۱	۲۴/۷	۲۸/۸	۰/۰۸۲۳
۲۴	۳۶/۳	۵۱	۰/۰۱۹۵	۱/۱	۲۴/۸	۲۹/۵	۰/۱۲۲۰
۲۵	۳۶/۳	۴۴	۰/۰۱۴۵	۱/۱	۲۶/۵	۲۷/۵	۰/۰۶۳۸
۲۶	۳۶/۳	۴۴	۰/۰۱۹۵	۱/۱	۲۷/۲	۲۷/۶	۰/۱۰۶۰
۲۷	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۰/۵	۲۳/۹	۲۸/۷	۰/۰۸۷۳
۲۸	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۳/۶	۲۶/۷	۰/۱۱۱۰
۲۹	۳۲/۵	۴۸	۰/۰۱۷۰	۱/۸	۲۳/۵	۲۶/۵	۰/۱۱۱۰
۳۰	۳۶/۳	۴۴	۰/۰۱۴۵	۲/۴	۲۶/۴	۲۶/۵	۰/۰۷۶۳

با توجه به متغیرهایی که در آستانه‌ی معناداری قرار دارند مدل درجه‌دو کاهش‌یافته‌ای توسط رابطه (۱) برای محاسبه‌ی دمای هوای خروجی، دمای دسیکنت خروجی و سرعت رطوبت‌زدایی هوا در جدول (۴) ارائه‌شده است. R^2 ارائه‌شده در جدول (۴) تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل را نشان می‌دهد.

جدول (۳) نتایج تحلیل واریانس

متغیرها	درجه آزادی	دمای هوای خروجی (°C)		دمای دسیکنت خروجی (°C)		سرعت رطوبت‌زدایی هوا (g/s)	
		F value	P value	F value	P value	F value	P value
A:T_{ai}(°C)	۱	۹۸۲۸/۴۱	<۰/۰۰۰۱	۱۲۰/۷۷	<۰/۰۰۰۱	۴۹/۹۰	<۰/۰۰۰۱
B:X_i(٪ وزنی)	۱	۳۰۹۶/۴۱	<۰/۰۰۰۱	۵۱/۰۳	<۰/۰۰۰۱	۲۰۱۵/۸۲	<۰/۰۰۰۱
C:Y_i(kg_w/kg_{da})	۱	۴۹/۵۰	<۰/۰۰۰۱	۴۸/۴۴	<۰/۰۰۰۱	۸۹۸۸/۴۳	<۰/۰۰۰۱
D:L/G	۱	۲۸/۴۱	<۰/۰۰۰۱	۴۴/۶۹	<۰/۰۰۰۱	۱۶۲۵/۲۲	<۰/۰۰۰۱
AB	۱	۳/۳۴	۰/۰۸۷۵	۵/۵۵	۰/۰۳۲۵	۰/۰۲۲	۰/۸۸۵۴
AC	۱	۱۵/۳۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۹۱۲۲	۰/۹۷	۰/۳۴۰۵
AD	۱	۲۴/۶۱	۰/۰۰۰۲	۰/۸۱	۰/۳۸۳۷	۱/۶۳	۰/۲۲۰۷
BC	۱	۳۶/۰۷	<۰/۰۰۰۱	۰/۲۰	۰/۶۶۰۱	۱/۴۳	۰/۲۵۱۰
BD	۱	۰/۶۱	۰/۴۴۵۶	۴/۵۴	۰/۰۵۰۰	۴۴/۶۵	<۰/۰۰۰۱
CD	۱	۳/۳۴	۰/۰۸۷۵	۴/۵۴	۰/۵۰۰	۴۴/۱۰	<۰/۰۰۰۱
A^2	۱	۲۶/۸۹	۰/۰۰۰۱	۰/۲۲	۰/۶۴۸۶	۳/۲۳	۰/۹۲۶
B^2	۱	۳۳/۱۲	<۰/۰۰۰۱	۵/۴۱	۰/۰۳۴۵	۲۱۴/۱۱	<۰/۰۰۰۱
C^2	۱	۲۰/۲۶	۰/۰۰۰۴	$۵/۹۹۱*۱۰^{-۴}$	۰/۹۸۰۸	۱/۸۴	۰/۱۹۴۶
D^2	۱	۶۲/۷۳	<۰/۰۰۰۱	۳/۰۲	۰/۱۰۲۷	۲۹/۹۴	<۰/۰۰۰۱
مدل	۱۴	۹۴۵/۴۶	<۰/۰۰۰۱	۲۰/۶۶	<۰/۰۰۰۱	۹۲۸/۵۵	<۰/۰۰۰۱
خطا	۱۵	-	-	-	-	-	-

جدول (۴) روابط مدل کاهش‌یافته‌ی درجه دو به‌دست‌آمده

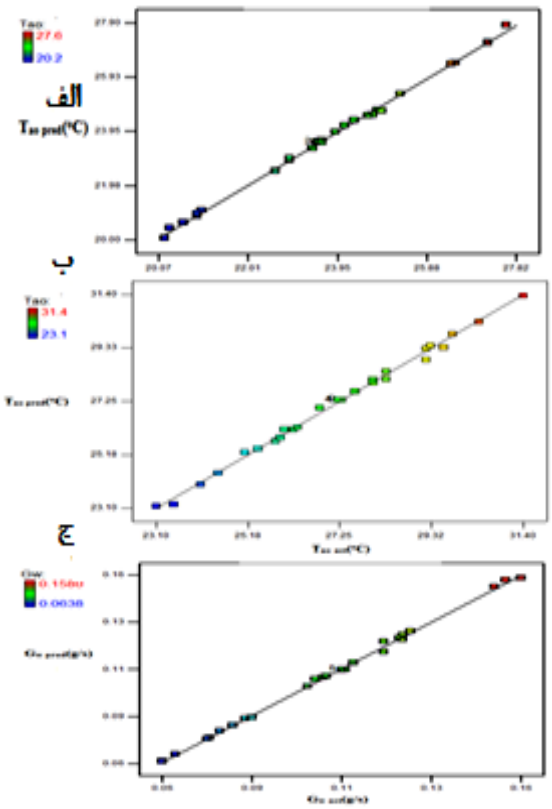
پاسخ	رابطه	R^2
دمای هوای خروجی	$Tao = +4.765 - 2.815E-003Tai + 0.681Xi + 10.667Yi + 0.516(L/G) + 10(Tai)(Yi) - 0.051(Tai)(L/G) - 15.333(Xi)(Yi) + 6.741E-003Tai^2 - 7.482E-003\,Xi^2 + 13166.667Yi^2 + 0.371(L/G)^2$	۰/۹۹۸۲
دمای دسیکنت خروجی	$Tso = +4.301 + 1.153Tai - 0.299Xi - 12.667Yi + 1.256(L/G) - 0.019(Tai)(Xi) - 0.101(Xi)(L/G) + 152(Yi)(L/G) + 0.013Xi^2$	۰/۹۳۵۶
سرعت رطوبت‌زدایی هوا	$Gw = -0.619 - 4.589E-004Tai + 0.023Xi + 7.019Yi - 0.036(L/G) + 8.507E-004(Xi)(L/G) + 1.268(Yi)(L/G) - 2.307E-004\,Xi^2 - 2.962E-003(L/G)^2$	۰/۹۹۸۲

شکل (۲) نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی‌شده پاسخ‌ها توسط مدل ارائه‌شده در رابطه (۱) در نقاط طراحی آزمایش برحسب مقادیر واقعی آن‌ها است. در شکل (۲) داده‌ها با پراکندگی خوبی از خط ۴۵ درجه قرارگرفته‌اند و این نشان‌دهنده توانایی مدل در پیش‌بینی مقادیر پاسخ است.

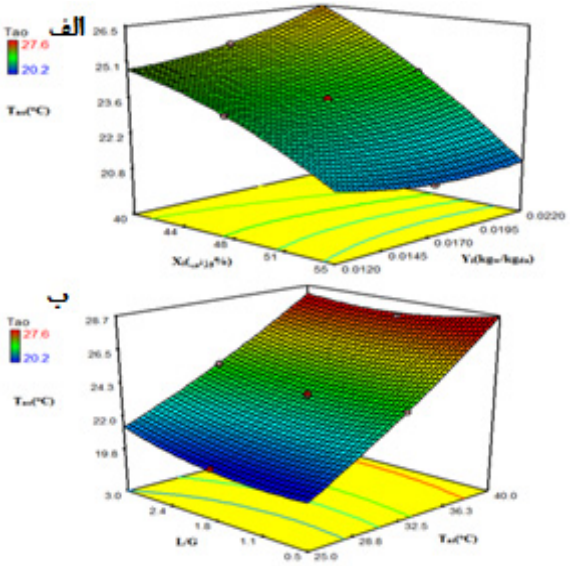
با توجه به مقادیر P value ارائه‌شده در جدول (۳)، شکل‌های (۳) تا (۵) برای بیان تأثیر متقابل متغیرها بر پاسخ‌ها در فرایند رطوبت‌زدایی هوا انتخاب و ارائه‌شده‌اند. لازم به ذکر است که در شکل‌های ارائه‌شده، سایر متغیرها در نقاط مرکزی می‌باشند که نقطه مرکزی دمای هوای ورودی ۳۲/۵°C، رطوبت مطلق هوای ورودی (۰/۰۱۷kg_w/kg_{da})، غلظت دسیکنت ورودی (٪ وزنی) ۴۸ و نسبت L/G، ۱/۸ است.

شکل (۳)-الف تأثر غلظت دسیکنت ورودی و رطوبت مطلق هوای ورودی بر دمای هوای خروجی رانشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش ۳۸٪ غلظت دسیکنت ورودی، دمای هوای خروجی۱۷٪ کاهش می‌یابد و با افزایش ۸۳٪ رطوبت مطلق هوای ورودی، دمای هوای خروجی تغییر چندانی نمی‌کند. با افزایش غلظت دسیکنت ورودی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۱۱] درنتیجه موجب کاهش دمای هوای خروجی می‌شود. با افزایش رطوبت مطلق هوای ورودی رطوبت بیشتری در دسترس دسیکنت بوده و میزان جذب بالا می‌رود و گرمای نهان بیشتری آزاد می‌شود و این گرما به دسیکنت خنک منتقل و دمای آن را تغییر می‌دهد و تأثیر چندانی بر دمای هوای خروجی ندارد. شکل (۳)-ب تأثیر دمای هوای ورودی و نسبت L/G را بر دمای هوای خروجی نشان می‌دهد. با افزایش ۶۰٪ دمای هوای ورودی، دمای هوای خروجی ۴۰٪ افزایش می‌یابد درحالی‌که با افزایش ۵۰۰٪ نسبت L/G، دمای هوای خروجی تغییر چندانی ندارد. به‌طورکلی دمای هوای خروجی از دمای هوای ورودی کمتر و از دمای دسیکنت بیشتر است زیرا وقتی هوا در تماس با دسیکنت با دمای کمتر قرار می‌گیرد انتقال حرارت از هوا به دسیکنت صورت می‌گیرد و درنتیجه دمای هوا کاهش و دمای دسیکنت افزایش می‌یابد. حال هر چه هوا با دمای بالاتری وارد شود، در تماس با دسیکنت با دمای مشخص°C ۲۰، در دمای بالاتری نیز خارج می‌شود. تغییرات نسبت L/G بر انتقال جرم تأثیر دارد و تأثیر چندانی بر انتقال حرارت ندارد درنتیجه تغییرات آن تأثیر چندانی بر دمای هوای خروجی نخواهد داشت.

شکل (۴)-الف تأثر نسبت L/G و رطوبت مطلق هوای ورودی را بر دمای دسیکنت خروجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش ۵۰۰٪ نسبت L/G و ۸۳٪ رطوبت مطلق هوای ورودی، دمای دسیکنت خروجی به ترتیب ۱۰٪ کاهش و ۱۰٪ افزایش می‌یابد. در حالت کلی دمای دسیکنت خروجی از دمای دسیکنت ورودی بیشتر و از دمای هوای ورودی کمتر است حال‌آنکه دمای دسیکنت خروجی در L/G بالاتر کمتر از دمای دسیکنت خروجی در L/G کمتر است زیرا با افزایش L/G که می‌تواند ناشی از افزایش L یا کاهش G باشد، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد [۱۱] درنتیجه دمای دسیکنت خروجی افزایش کمتری خواهد داشت. افزایش رطوبت مطلق هوای ورودی به دلیل افزایش فشار بخار هوا موجب افزایش رطوبت‌زدایی می‌گردد. درنتیجه گرمای نهان آزادشده که توسط دسیکنت جذب می‌شود نیز افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش دمای دسیکنت خروجی می‌گردد.



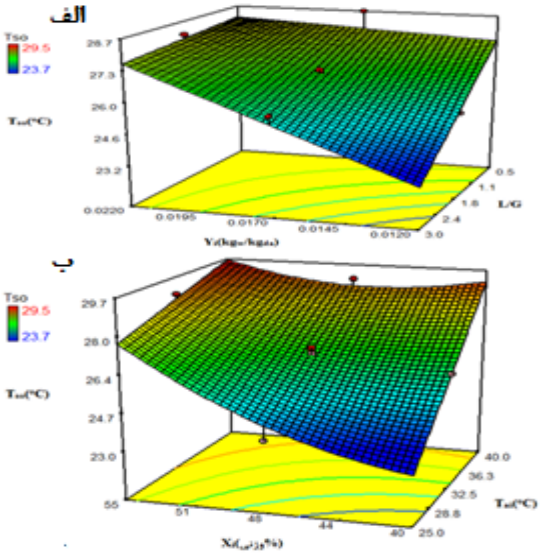
شکل (۲) مقادیر پیش‌بینی‌شده الف) دمای هوای خروجی ب) دمای دسیکنت خروجی ج) سرعت رطوبت‌زدایی هوا برحسب مقادیر واقعی آن‌ها



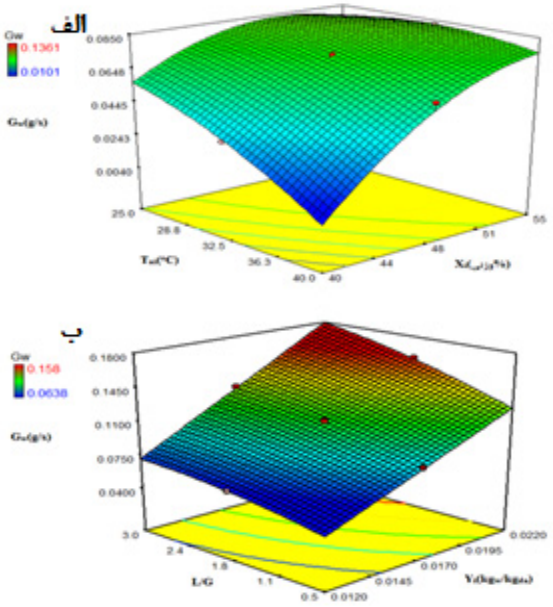
شکل (۳) نمودار سه‌بعدی تأثیر الف) رطوبت مطلق هوا ورودی و غلظت دسیکنت ورودی، ب) دمای هوای ورودی و نسبت L/G بر دمای هوای خروجی دسیکنت برمید لیتیم.

شکل (۴)-ب تأثیر دمای هوای ورودی و غلظت دسیکنت ورودی را بر دمای دسیکنت خروجی نشان می‌دهد. با افزایش ۶۰٪ دمای هوای ورودی و ۳۸٪ غلظت دسیکنت ورودی، دمای دسیکنت خروجی به ترتیب ۱۶٪ و ۱۰٪ افزایش می‌یابد؛ با افزایش دمای هوای ورودی، اختلاف دمای هوا و دسیکنت افزایش و درنتیجه انتقال حرارت از هوا به دسیکنت بیشتر می‌شود و لذا دمای دسیکنت افزایش می‌یابد. افزایش غلظت دسیکنت به دلیل کاهش فشار بخار دسیکنت، رطوبت‌زدایی را افزایش می‌دهد؛ درنتیجه گرمای نهان آزادشده که توسط دسیکنت جذب می‌شود نیز افزایش می‌یابد که خود موجب افزایش دمای دسیکنت خروجی می‌گردد.

شکل (۵)-الف تأثیر دمای هوای ورودی و غلظت دسیکنت ورودی را بر سرعت رطوبت‌زدایی هوا نشان می‌دهد. با افزایش ۶۰٪ دمای هوای ورودی و ۳۸٪ غلظت دسیکنت ورودی، سرعت رطوبت‌زدایی هوا به ترتیب ۳۳٪ کاهش و ۵۸٪ افزایش می‌یابد. با افزایش دمای هوای ورودی، اختلاف دمای هوای ورودی و دسیکنت افزایش می‌یابد که موجب افزایش انتقال حرارت از فاز گاز به مایع و درنهایت افزایش مضاعف دمای دسیکنت می‌گردد؛ هر چه دمای دسیکنت بیشتر شود، رطوبت تعادلی محلول دسیکنت نیز افزایش می‌یابد. با افزایش رطوبت تعادلی محلول دسیکنت، فشار بخار دسیکنت افزایش یافته و درنتیجه اختلاف فشار بخار دسیکنت و هوا که نیروی محرکه انتقال جرم است کاهش می‌یابد درنتیجه رطوبت مطلق



شکل (۴) نمودار سه‌بعدی تأثیر الف) رطوبت مطلق هوای ورودی و نسبت L/G، ب) غلظت دسیکنت ورودی و دمای هوای ورودی بر دمای خروجی دسیکنت.



شکل (۵) نمودار سه‌بعدی تأثیر الف) دمای هوای ورودی و غلظت دسیکنت ورودی، ب) رطوبت مطلق هوا ورودی و نسبت L/G بر سرعت رطوبت‌زدایی هوا.

هوای خروجی بیش از حالتی است که هوا با دمای پایین وارد شود، درنتیجه سرعت رطوبت‌زدایی هوا کاهش می‌یابد. افزایش غلظت دسیکنت ورودی فشار بخار سطحی دسیکنت را کاهش می‌دهد؛ لذا نیروی محرکه انتقال جرم از فاز گاز به فاز مایع افزایش یافته و درنتیجه رطوبت مطلق هوای خروجی کاهش و سرعت رطوبت‌زدایی هوا افزایش می‌یابد. شکل (۵)-ب تأثیر

نسبت L/G و رطوبت مطلق هوای ورودی را بر سرعت رطوبت‌زدایی هوا نشان می‌دهد. با افزایش ۵۰۰٪ نسبت L/G و ۸۳٪ رطوبت مطلق هوای ورودی، سرعت رطوبت‌زدایی هوا به ترتیب ۴۶٪ و ۱۴۴٪ افزایش می‌یابد. افزایش L/G ناشی از افزایش L یا کاهش G است. با افزایش L زمان تماس هوا و دسیکنت کم می‌شود، لذا تغییرات غلظت و دمای دسیکنت کم می‌شودو درنتیجه تغییرات فشار بخار سطحی دسیکنت نیز کم می‌شود؛ ازاین‌رو، اختلاف فشار بخارآب بین دسیکنت و هوا افزایش می‌یابد که رطوبت مطلق هوای خروجی را کاهش و سرعت رطوبت‌زدایی هوا را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش L باعث افزایش تر شوندگی پرکن‌ها می‌شود، درنتیجه سطح انتقال جرم بین دو فاز افزایش و رطوبت مطلق هوای خروجی کاهش و سرعت رطوبت‌زدایی هوا افزایش می‌یابد. همچنین وقتی G کاهش می‌یابد، زمان اقامت افزایش و درنتیجه ضریب انتقال جرم نیز افزایش می‌یابد و منجر به کاهش رطوبت مطلق هوای خروجی و افزایش سرعت رطوبت‌زدایی هوا می‌گردد. با افزایش رطوبت مطلق هوای ورودی فشار بخار هوا افزایش و این باعث افزایش تفاوت فشار بخارآب بین دسیکنت و هوا می‌گردد و درنتیجه پتانسیل بالاتری برای انتقال جرم از فاز گاز به فاز مایع ایجاد می‌شود و سرعت رطوبت‌زدایی نیز افزایش می‌یابد.

بعد از بررسی نحوه تأثیر متغیرها بر فرایند رطوبت‌زدایی هوا برای دست‌یابی به بیشینه سرعت رطوبت‌زدایی هوا با دمای خروجی هوا و دسیکنت کمینه، فرایند بهینه‌سازی شد. نتایج بهینه‌سازی در شکل (۶) نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل (۶) قابل‌مشاهده است در دمای هوای ورودی ۲۸/۸ (°C)، غلظت دسیکنت ورودی ۵۰٪، رطوبت مطلق هوای ورودی ۰.۰۱۹۰(kg_w/kg_{da}) و نسبت L/G ۲/۴ سرعت رطوبت‌زدایی هوا ماکسیمم و دمای هوا و دسیکنت خروجی مینیمم می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

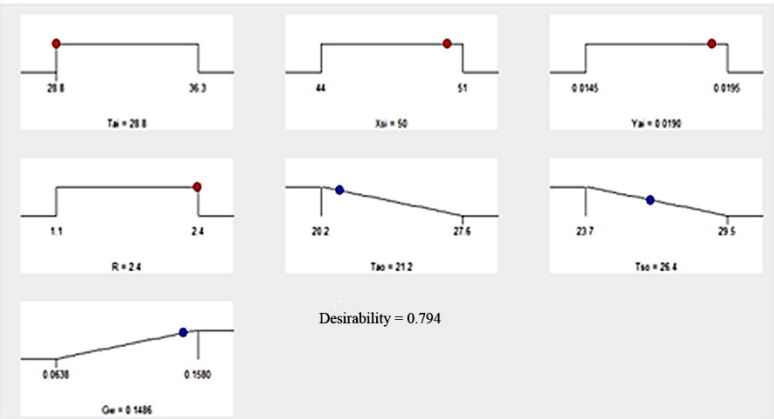
نتیجه حاصل از بررسی فرایند رطوبت‌زدایی هوا به‌وسیله دسیکنت برمید لیتیم، با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود.

۱- نتایج این بررسی‌ها نشان داد که، متغیرهای ورودی به ستون رطوبت‌زدای دسیکنت مایع از قبیل دمای هوای ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی، نسبت L/G و غلظت دسیکنت ورودی تأثیر فراوانی روی فرایند رطوبت‌زدایی هوا دارند.

۲- به ترتیب دمای هوای ورودی، غلظت دسیکنت ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی و نسبت L/G مؤثرترین عوامل در دمای هوای خروجی بوده‌اند. در حالت کلی با کاهش غلظت دسیکنت ورودی و افزایش دمای هوای ورودی، دمای هوای خروجی افزایش می‌یابد و تغییرات نسبت L/G و رطوبت مطلق هوای ورودی تأثیر چندانی بر دمای هوای خروجی ندارد.

۳- به ترتیب دمای هوای ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی، نسبت L/G و غلظت دسیکنت ورودی مؤثرترین عوامل در دمای دسیکنت خروجی بوده‌اند. در حالت کلی هر چه غلظت دسیکنت ورودی، دمای هوای ورودی و رطوبت مطلق هوای ورودی بیشتر و نسبت L/G کوچک‌تر باشد دمای دسیکنت خروجی افزایش می‌یابد.

۴- به ترتیب رطوبت مطلق هوای ورودی، غلظت دسیکنت ورودی، نسبت L/G و دمای هوای ورودی مؤثرترین عوامل در سرعت رطوبت‌زدایی هوا بوده‌اند. در حالت کلی با افزایش غلظت دسیکنت ورودی، نسبت L/G و رطوبت مطلق هوای ورودی و کاهش دمای هوای ورودی، سرعت رطوبت‌زدایی هوا افزایش می‌یابد.



شکل (۶) مقادیر بهینه متغیرهای فرایند برای رسیدن به بیشینه سرعت رطوبت‌زدایی هوا با کمینه دمای خروجی هوا و دسیکنت

۵- شرایط عملیاتی بهینه نشان که در دمای هوای ورودی (°C) ۲۸/۸، غلظت دسیکنت ورودی۵۰٪، رطوبت مطلق هوای ورودی ((۰.۰۱۹۰kg/kg و نسبت ۲/۴L/G سرعت رطوبت‌زدایی هوا ماکسیمم و دمای هوا و دسیکنت خروجی مینیمم می‌گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از سازمان بهره‌وری انرژی ایران، سابا، به جهت حمایت مالی از این تحقیق کمال تشکر را دارند.

علائم اختصاری و نمادها

شدت جریان جرمی محلول دسیکنت	L(kg/s)
شدت جریان جرمی هوا	G (kg/s)
سرعت رطوبت‌زدایی هوا	G_w (g/s)
دما	T(°C)
غلظت دسیکنت	X (٪ وزنی)
رطوبت مطلق هوا	$Y(kg_w/kg_{da})$

زیروندها

هوا	a
محلول دسیکنت	s
ورودی	i
خروجی	o
پیش‌بینی‌شده	pre
واقعی	act
آب	w
هوای خشک	da

مراجع

[1] K. Daou, R. Z. Wang, and Z. Z. Xia (2006) "Desiccant cooling air conditioning: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 55-77.

[2] H. Pahlavanzadeh, and P. Nooriasl (2012) "Experimental and theoretical study of liquid desiccant dehumidification system by using the effectiveness model", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 4, 011081-9.

[3] L. Mei, and Y. J. Dai (2008) "A technical review on use of liquid-desiccant dehumidification for air-conditioning application", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 662-689.

[4] Y. J. Dai, R. Z. Wang, H. F. Zhang, and J. D. Yu (2001) "Use of liquid desiccant cooling to improve the performance of vapor compression aircondithioning", *Applied Thermal Engineering*, 21, 1185-1202.

[5] M. A. Mandegari, and H. Pahlavanzadeh (2010) "Performance assessment of hybrid desiccant cooling system at various climates", *Energy Efficiency*, 3, 177-187.

[6] Y. H. Zurigat, M. K. Abu-Arabi, and S. A. Abdul-Wahab (2004) "Air dehumidification by triethylene glycol desiccant in a packed column", *Energy Conversion and Management*, 45, 141-155.

[7] H. Pahlevanzadeh, and A. H. Zamzamian (2005) "Two dimensional mathematical model for fixed desiccant wheel dehumidifier", *Iranian Journal of Science and Technology*, 30, 353-62.

[8] M. A. Mandegari, (and H. Pahlavanzadeh (2009) "Introduction of a new definition for effectiveness of desiccant wheels", *Energy*, 34, 797-803.

[9] F. EsfandiariNia, D. Paassen,and M. H. Saidi (2006) "Modeling and simulation of desiccant wheel for air conditioning", *Energy and Buildings*, 38, 1230-1239.

[10] S. Jain, and P. K. Bansal (2007) "Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems", *International Journal of Refrigeration*, 30, 861-872.

[۱۱] پریسا. نوری اصل (۱۳۹۰) "بهینه سازی سیستم سرمایش جذبی ستون پرشده با استفاده از جاذب مایع کلرید لیتیم"، پایان نامه دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس.

[12] Garcia, Dia, Alberto (1995) "*Principles of experimental design and analysis"*, London chapman and Hall.

[13] M. J. Anderson, and P. J. Whithcomb (2006) "*RSM Simplified: Optimizing processes using response surface methods for design of experiments*", Productivity Press INC, Portland, Oregon.

[14] M. J. Anderson, and P. J. Whitcomb (2000) "*DOE Simplified: Practical tools for effective experimentation*", Productivity INC, Portland, Oregon.

[15] R. MafiGholami, S. M. Mousavi, and S. M. Borghei (2012) "Process optimization and modeling of heavy metal extraction from a molybnum rich spent catalyst by Aspergillus higher using response surface methodology", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18,218-224.

[16] T. Amani, M. Nosrati, S. M. Mousavi, and R. K. Kermanshahi (2011) "Study of syntrophic anaerobic digestion of volatile fatty acids using enriched cultures at mesophilic conditions", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8,83-96.

[17] D. C. Montgomery (2002) "Design and Analysis of Experiments", John Whiley& Sons INC, New York.

[18] A. Jafari, T. Tynjala, S. M. Mousavi, and P. Sarkomaa (2008) "CFD simulation and evaluation of controllable parameters effect on thermomagnetic convection in fervofluids using taguchi technique", *Computers and Fluids*, 37, 1344-1353.

Experimental analysis of the performance of lithium bromide liquid desiccant in air dehumidification process with experimental design

Sara Nanvakenari[1], Hasan Pahlavanzadeh[1,*], Leila Omidvar Langeroudi[1]

1. Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering,
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Nowadays, we can reduce the latent load of the system with using desiccant as an absorbent in air conditioning and cooling systems. In this research the operation of lithium bromide liquid desiccant in air dehumidification process is investigated with using experimental design of a central composite design of response surface methodology. The effect of four input factors including air inlet humidity and temperature, desiccant concentration and mass flow rate ratio of desiccant solution to the air as a response is investigated. The air and desiccant outlet temperature and dehumidification mass rate is expressed as a function of input parameters with a reduced quadratic equation and the model has shown good agreement with experimental data. The optimum conditions showed that using a desiccant solution with concentration of 50%, mass flow rate ratio of 2.4, air inlet temperature of 28.8(^{o}C)and air inlet humidity of 0.0190 (kg_w/kg_{da}) maximize the dehumidification mass rate and minimize the air and desiccant outlet temperature.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:
Received in: Nov. 8, 2014
Revised from: April 28, 2015
Accepted: May 25, 2015

Key words:
Desiccant;
Lithium Bromide
Dehumidification
Experimental Design
Response Surface.

* Corresponding author
pahlavzh@modares.ac.ir