

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

سارا ناناکناری^۱، حسن پهلوانزاده^{۱*}، لیلا امیدوار لنگرودی^۱

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

چکیده	مشخصات مقاله
<p>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 طراحی شده به روش سطح پاسخ پرداخته شده است. تأثیر چهار متغیر اصلی رطوبت مطلق و دمای هوا، غلظت دسیکنت و نسبت شدت جریان جرمی دسیکنت به هوا (L/G) بر دمای هوا و دسیکنت خروجی و سرعت رطوبتزدایی به‌عنوان پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفته است. معادلات درجه دو کاهش یافته به‌صورت تابعی از متغیرهای ورودی برای دمای هوا و دسیکنت خروجی و سرعت رطوبتزدایی ارائه شده است که تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است. شرایط عملیاتی بهینه نشان داد که در دمای هوای ورودی (۲۸/۸°C)، غلظت دسیکنت ورودی ۰/۵۰٪، رطوبت مطلق هوای ورودی (kg_w/kg_{da}) ۰/۰۱۹۰ و نسبت ۲/۴ L/G سرعت رطوبتزدایی هوا ماکسیمم و دمای هوا و دسیکنت خروجی مینیمم می‌شود.</p>	<p>تاریخچه مقاله: دریافت: ۱۷ آبان ۹۳ دریافت پس از اصلاح: ۸ اردیبهشت ۹۴ پذیرش نهایی: ۶ خرداد ۹۴</p> <p>کلمات کلیدی: دسیکنت، برمید لیتیم، رطوبتزدایی، طراحی آزمایش، سطح پاسخ.</p>
حقوق ناشر محفوظ است.	* عهده‌دار مکاتبات pahlavzh@modares.ac.ir

۱- مقدمه

فشار بخار آب بین هوا و سطح دسیکنت دارا می‌باشند. هنگامی که 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 جذب شده 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 هر کدام 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. از جمله 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 و ۱۰].

در پژوهش حاضر از بین انواع دسیکنت‌های مایع موجود، دسیکنت مایع برمید لیتیم انتخاب شده است و برخلاف پژوهش‌های موجود که تاکنون انجام شده 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 پرداخته شده است که تعداد آزمایش‌ها را به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

جاذب مایع مورد استفاده نمک برمید لیتیم است که از شرکت مرک و با خلوص ۹۹٪ تهیه شده است و به صورت محلول مورد استفاده قرار گرفته 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.

ایران کشوری است با آب‌وهوای گرم که در برخی از قسمت‌های آن در اکثر فصول سال از سیستم‌های سرمایش و تهویه 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 فناوری‌های نوین با کارایی بالا و مصرف انرژی پایین هستند. یکی از این فناوری‌های نو که در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات وسیعی بر روی آن در حال انجام است، سیستم سرمایش دسیکنت است [۲ و ۱]، 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 اثبات شده است. در سیستم‌های سرمایش جذبی از منابع گرمایی به‌جای الکتریسیته برای سردسازی استفاده می‌شود و در نتیجه 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 مورد توجه محققان واقع شده 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 مورد نظر 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 و ۱].

دسیکنت‌ها زیرمجموعه‌ای از جذب‌کننده‌ها هستند که توانایی بالایی برای جذب و دفع بخار آب به‌واسطه اختلاف

۲-۲- دستگاه

شمایی از دستگاه مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. این سامانه، مطابق شکل (۱)، بخشی برای شبیه سازی هوا با دما، رطوبت و شدت جریان های مختلف دارد. در این بخش، جریان هوا که با خطوط پررنگ مشکی نشان داده شده است از هیتری که دارای المنت های مختلفی است عبور می کند. با توجه به دمای مورد نظر، تعداد المنت های روشن تنظیم می گردد. هوا پس از عبور از هیتز از یک سامانه رطوبت زن می گذرد. در این سامانه آب از قسمت بالای آن روی الیاف داخل سامانه ریخته می شود. آب از یک مخزن که در شکل (۱) نشان داده شده است روی سامانه رطوبت زن پمپ می گردد. مقدار آب ریخته شده روی الیاف توسط یک شیر کنترل می گردد. آب پس از عبور از سامانه رطوبت زن از قسمت پایین دستگاه خارج می شود و دوباره به مخزن آب برگشت داده می شود. هوا پس از عبور از این مرحله دارای رطوبت و دمای مورد نظر خواهد بود. هوای فرایندی از قسمت تحتانی ستون پر شده به قطر ۸ سانتی متر و ارتفاع ۳۵ سانتی متر که شامل پرکن هایی با سطح ویژه $264/56 \text{ m}^2/\text{m}^3$ است عبور می کند که در این ستون از برمیدلیتیم به عنوان دسیکنت جهت رطوبت زدایی استفاده شده است. این ترکیب از بخش بالایی ستون پر شده بر روی پرکن ها ریخته می شود. هوا در تماس با این ترکیب رطوبت خود را از دست می دهد و ترکیب در اثر تماس با هوا به علت آزاد شدن گرمای ناشی از میعان آب مقداری گرم و رقیق می گردد. این فرایند در شکل توسط خطوط خط چین قرمز تیره نشان داده شده است. ترکیب پس از عبور از ستون وارد مخزن (۱) می شود و سپس توسط پمپ به مخزن (۲) منتقل می گردد. در مخزن دوم

دمای ترکیب توسط کویل های سردکننده سرد می گردد تا دمای آن کاهش یافته و مناسب عمل جذب رطوبت گردد. دبی ترکیب ورودی به ستون رطوبت زدا توسط یک شیر قابل تنظیم است. پس از عبور از این ستون، رطوبت هوای فرایندی کاهش می یابد [۱۱].

۲-۳- وسایل اندازه گیری

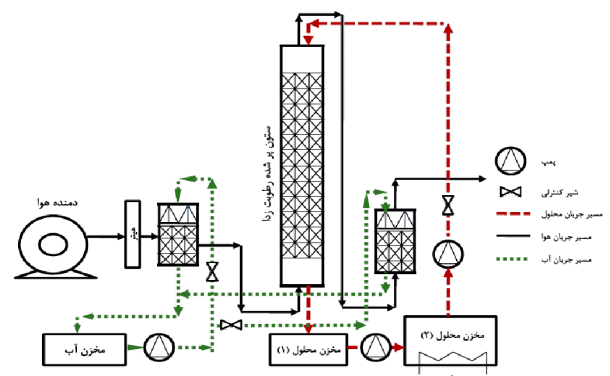
دستگاه ساخته شده به وسایل اندازه گیری مناسبی برای اندازه گیری متغیرها مجهز شده است. دمای هوا و جاذب مایع به وسیله ترموکوپل با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ که قبل و بعد از ستون رطوبت زدا و در تانک نگهداری جاذب نصب شده است اندازه گیری می شود. میزان دبی هوای مرطوب و جاذب مایع به ترتیب به وسیله جریان سنج و روتامتری که بعد از پمپ نصب شده است، اندازه گیری می شود. چگالی جاذب به وسیله ی هیدرومتر اندازه گیری می شود. رطوبت هوای ورودی و خروجی با رطوبت سنج (دقت $\pm 0.1\%$) اندازه گیری می شود که قبل و بعد از ستون رطوبت زدا نصب شده است. وسایل اندازه گیری و دقت آن ها 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 درعین حال اقتصادی متغیرها و پاسخ های یک فرایند است. علاوه بر این در طراحی به مدل سازی فرایند و همچنین بهینه سازی آن پرداخته می شود [۱۲]. نرم افزار مورد استفاده در این طراحی Design-Expert 7.0 است.

جدول (۱) وسایل اندازه گیری و دقت آن ها

متغیرها	وسایل اندازه گیری	دقت	محدوده عملیاتی	مدل
سرعت هوا	سرعت سنج	$\pm 2\%$	۰-۲۰ m/s	TESTO
دمای هوا و جاذب	ترموکوپل	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	۰-۱۵۰ $^\circ\text{C}$	SU-105IP
رطوبت هوا	رطوبت سنج	$\pm 1\%$	۰-۱۰۰%	SU-503B
دبی جاذب	روتامتر	$\pm 0.25\%$	۰/۷۵-۷/۵ L/min	Z-3001
چگالی جاذب	هیدرومتر	$\pm 1 \text{ kg/m}^3$	۱۲۰۰-۱۳۰۰ kg/m^3 ۱۳۰۰-۱۴۰۰ kg/m^3 ۱۴۰۰-۱۵۰۰ kg/m^3 ۱۵۰۰-۱۶۰۰ kg/m^3 ۱۶۰۰-۱۷۰۰ kg/m^3	-



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

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 داده شده 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 و ۱۸]. در نتیجه بر اساس مقادیر F ارائه شده در جدول (۳) برای هر یک از متغیرها ترتیب اثرگذاری پارامترها بر دمای هوای خروجی به‌صورت دمای هوای ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی و نسبت L/G دسیکنت ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی، 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 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. $P \text{ value} < 0.0001$ نشان‌دهنده متغیرهای بسیار معنادار، $0.05 < P \text{ value} < 0.0001$ نشان‌دهنده متغیرهای معنادار و $P \text{ value} > 0.05$ نشان‌دهنده معنادار نبودن متغیرها می‌باشند. با بررسی مقدار p value متوجه می‌شویم که مدل درجه دو و تمامی متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده با $p \text{ value} < 0.0001$ 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.

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 سنترال کامپوزیت^۱ (به دلیل تعداد آزمایش کم و درعین حال 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.

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 + \sum b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

در رابطه (۱) y پاسخ پیش‌بینی شده، b_0 ثابت مدل، b_i ثوابت خطی، b_{ij} ثوابت خطی در خطی^۲، b_{ii} ثوابت مرتبه دو^۳ 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 ($^{\circ}C$)، رطوبت مطلق هوای ورودی (Y_i) برحسب کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک (X_i)، 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 گرفته شده 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 طراحی شده 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:

$$G_w = G(Y_i - Y_0) \quad (2)$$

که در آن G نشان‌دهنده شدت جریان جرمی هوا برحسب کیلوگرم بر ثانیه و Y_i و Y_0 به ترتیب نشان‌دهنده

¹Central Composite

²Linear-by-Linear

³Quadratic

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

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

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

رطوبت‌زدایی هوا در جدول (۴) ارائه شده است. R^2 ارائه شده در جدول (۴) تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط مدل را نشان می‌دهد.

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

جدول (۳) نتایج تحلیل واریانس

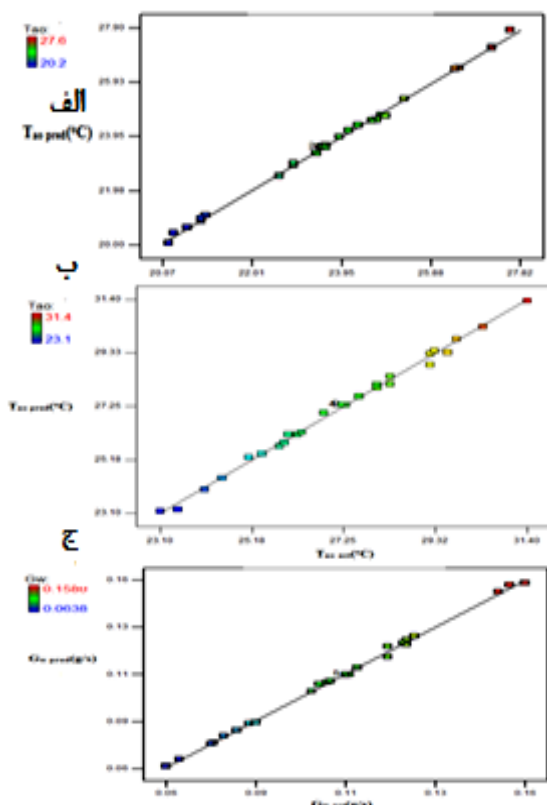
سرعت رطوبت‌زدایی هوا (g/s)		دمای دسیکنت خروجی (°C)		دمای هوای خروجی (°C)		درجه آزادی	متغیرها
P value	F value	P value	F value	P value	F value		
<0/0001	۴۹/۹۰	<0/0001	۱۲۰/۷۷	<0/0001	۹۸۲۸/۴۱	۱	A: T _{air} (°C)
<0/0001	۲۰۱۵/۸۲	<0/0001	۵۱/۰۳	<0/0001	۳۰۹۶/۴۱	۱	B: X _i (٪ وزنی)
<0/0001	۸۹۸۸/۴۳	<0/0001	۴۸/۴۴	<0/0001	۴۹/۵۰	۱	C: Y _i (kg _w /kg _{da})
<0/0001	۱۶۲۵/۲۲	<0/0001	۴۴/۶۹	<0/0001	۲۸/۴۱	۱	D: L/G
۰/۸۸۵۴	۰/۰۲۲	۰/۰۳۲۵	۵/۵۵	۰/۰۸۷۵	۳/۳۴	۱	AB
۰/۳۴۰۵	۰/۹۷	۰/۹۱۲۲	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱۴	۱۵/۳۴	۱	AC
۰/۲۲۰۷	۱/۶۳	۰/۳۸۳۷	۰/۸۱	۰/۰۰۰۲	۲۴/۶۱	۱	AD
۰/۲۵۱۰	۱/۴۳	۰/۶۶۰۱	۰/۲۰	<0/0001	۳۶/۰۷	۱	BC
<0/0001	۴۴/۶۵	۰/۰۵۰۰	۴/۵۴	۰/۴۴۵۶	۰/۶۱	۱	BD
<0/0001	۴۴/۱۰	۰/۵۰۰	۴/۵۴	۰/۰۸۷۵	۳/۳۴	۱	CD
۰/۹۲۶	۳/۲۳	۰/۶۴۸۶	۰/۲۲	۰/۰۰۰۱	۲۶/۸۹	۱	A ²
<0/0001	۲۱۴/۱۱	۰/۰۳۴۵	۵/۴۱	<0/0001	۳۳/۱۲	۱	B ²
۰/۱۹۴۶	۱/۸۴	۰/۹۸۰۸	۵/۹۹۱*۱۰ ^{-۴}	۰/۰۰۰۴	۲۰/۲۶	۱	C ²
<0/0001	۲۹/۹۴	۰/۱۰۲۷	۳/۰۲	<0/0001	۶۲/۷۳	۱	D ²
<0/0001	۹۲۸/۵۵	<0/0001	۲۰/۶۶	<0/0001	۹۴۵/۴۶	۱۴	مدل
-	-	-	-	-	-	۱۵	خطا

جدول (۴) روابط مدل کاهش‌یافته‌ی درجه دو به دست آمده

R ²	رابطه	پاسخ
۰/۹۹۸۲	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	دمای هوای خروجی
۰/۹۳۵۶	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	دمای دسیکنت خروجی
۰/۹۹۸۲	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	سرعت رطوبت‌زدایی هوا

چندانی بر دمای هوای خروجی نخواهد داشت.

شکل (۴)-الف تأثیر نسبت L/G و رطوبت مطلق هوای ورودی را بر دمای دسیکنت خروجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش ۵۰٪ 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 حال آنکه 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] در نتیجه دمای دسیکنت خروجی افزایش کمتری خواهد داشت. افزایش رطوبت مطلق هوای ورودی به دلیل افزایش فشار بخار هوا موجب افزایش رطوبت زدایی می‌گردد. در نتیجه گرمای نهان آزاد شده که توسط دسیکنت جذب می‌شود نیز افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش دمای دسیکنت خروجی می‌گردد.

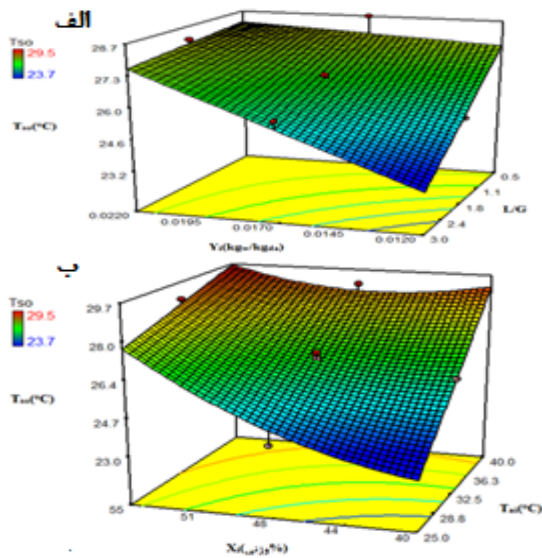


شکل (۲) مقادیر پیش‌بینی شده الف) دمای هوای خروجی ب) دمای دسیکنت خروجی ج) سرعت رطوبت زدایی هوا بر حسب مقادیر واقعی آن‌ها

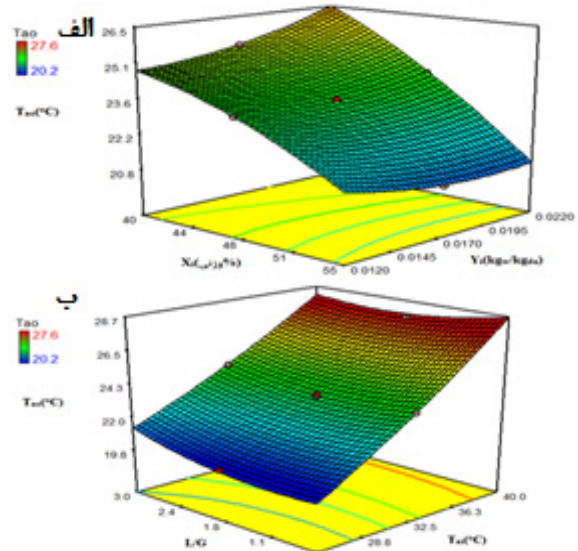
شکل (۲) نشان دهنده مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ‌ها توسط مدل ارائه شده در رابطه (۱) در نقاط طراحی آزمایش برحسب مقادیر واقعی آن‌ها است. در شکل (۲) داده‌ها با پراکندگی خوبی از خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند و این نشان دهنده توانایی مدل در پیش‌بینی مقادیر پاسخ است.

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

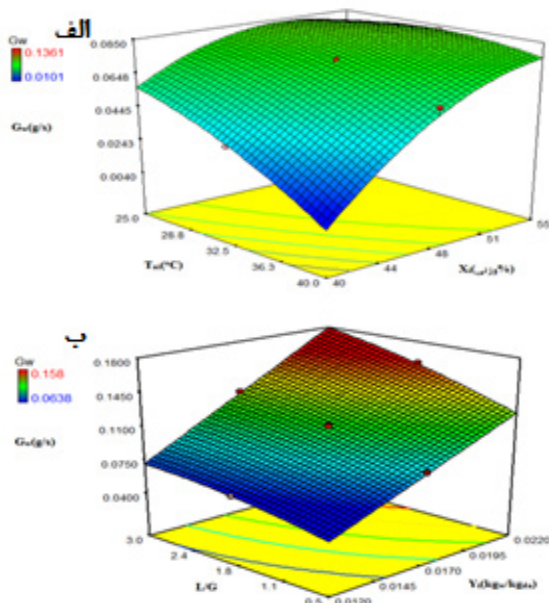
شکل (۳)-الف تأثیر غلظت دسیکنت ورودی و رطوبت مطلق هوای ورودی بر دمای هوای خروجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش ۳۸٪ غلظت دسیکنت ورودی، دمای هوای خروجی ۱۷٪ کاهش می‌یابد و با افزایش ۸۳٪ رطوبت مطلق هوای ورودی، دمای هوای خروجی تغییر چندانی نمی‌کند. با افزایش غلظت دسیکنت ورودی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۱۱] در نتیجه 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 در حالی که با افزایش ۵۰٪ نسبت L/G، دمای هوای خروجی تغییر چندانی ندارد. به‌طور کلی 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 در نتیجه دمای هوا کاهش و دمای دسیکنت افزایش می‌یابد. حال هر چه هوا با دمای بالاتری وارد شود، در تماس با دسیکنت با دمای مشخص ۲۰°C، در دمای بالاتری نیز خارج می‌شود. تغییرات نسبت L/G بر انتقال جرم تأثیر دارد و تأثیر چندانی بر انتقال حرارت ندارد در نتیجه تغییرات آن تأثیر



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



شکل (۳) نمودار سه بعدی 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 (۵) نمودار سه بعدی تأثیر الف) دمای هوای ورودی و غلظت دسیکنت ورودی، ب) رطوبت مطلق هوا ورودی و نسبت L/G بر سرعت رطوبت زدایی هوا.

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

شکل (۴) - ب تأثیر دمای هوای ورودی و غلظت دسیکنت ورودی را بر دمای دسیکنت خروجی نشان می دهد. با افزایش 60% دمای هوای ورودی و 38% غلظت دسیکنت ورودی، دمای دسیکنت خروجی به ترتیب 16% و 10% افزایش می یابد؛ با افزایش دمای هوای ورودی، اختلاف دمای هوا و دسیکنت افزایش و در نتیجه انتقال حرارت از هوا به دسیکنت بیشتر می شود و لذا دمای دسیکنت افزایش می یابد. افزایش غلظت دسیکنت به دلیل کاهش فشار بخار دسیکنت، رطوبت زدایی را افزایش می دهد؛ در نتیجه گرمای نهان آزاد شده که توسط دسیکنت جذب می شود نیز افزایش می یابد که خود موجب افزایش دمای دسیکنت خروجی می گردد.

شکل (۵) - الف تأثیر دمای هوای ورودی و غلظت دسیکنت ورودی را بر سرعت رطوبت زدایی هوا نشان می دهد. با افزایش 60% دمای هوای ورودی و 38% غلظت دسیکنت ورودی، سرعت رطوبت زدایی هوا به ترتیب 33% کاهش و 58% افزایش می یابد. با افزایش دمای هوای ورودی و دسیکنت افزایش می یابد که موجب افزایش انتقال حرارت از فاز گاز به مایع و در نهایت افزایش مضاعف دمای دسیکنت می گردد؛ هر چه دمای دسیکنت بیشتر شود، رطوبت تعادلی محلول دسیکنت نیز افزایش می یابد. با افزایش رطوبت تعادلی محلول دسیکنت، فشار بخار دسیکنت افزایش یافته و در نتیجه اختلاف فشار بخار دسیکنت و هوا که نیروی محرکه انتقال جرم است کاهش می یابد در نتیجه رطوبت مطلق

۴- نتیجه‌گیری

نتیجه حاصل از بررسی فرایند رطوبت‌زدایی هوا به وسیله دسیکنت برمیدلیتیم، با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش را می‌توان به صورت 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.

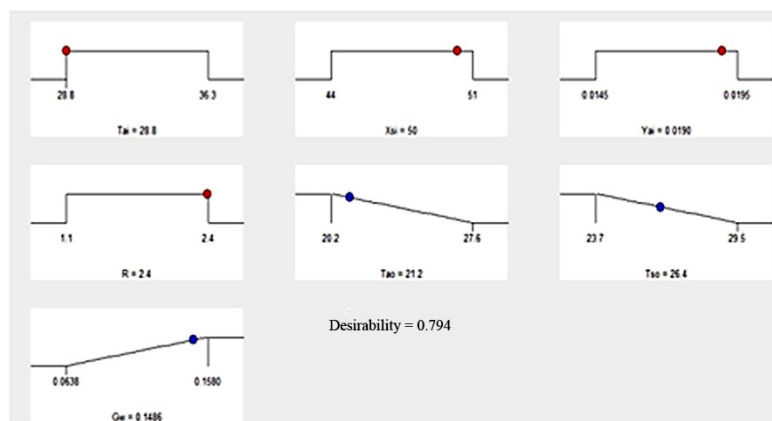
۲- به ترتیب دمای هوای ورودی، غلظت دسیکنت ورودی، رطوبت مطلق هوای ورودی و نسبت L/G مؤثرترین عوامل در دمای هوای خروجی بوده‌اند. در حالت کلی با کاهش غلظت دسیکنت ورودی و افزایش دمای هوای ورودی، دمای هوای خروجی افزایش می‌یابد و تغییرات نسبت L/G و رطوبت مطلق هوای ورودی تأثیر چندانی بر دمای هوای خروجی ندارد.

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.

نسبت L/G و رطوبت مطلق هوای ورودی را بر سرعت رطوبت‌زدایی هوا نشان می‌دهد. با افزایش L/G نسبت ۵۰٪ 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 می‌شود و در نتیجه تغییرات فشار بخار سطحی دسیکنت نیز کم می‌شود؛ از این رو، اختلاف فشار بخار آب 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 ترشوندگی پرکن‌ها می‌شود، در نتیجه 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 در نتیجه 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 بخار آب بین دسیکنت و هوا می‌گردد و در نتیجه 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 داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) قابل مشاهده است در دمای هوای ورودی $(28/8^{\circ}\text{C})$ ، غلظت دسیکنت ورودی 0.50 ، رطوبت مطلق هوای ورودی $(0.0196 \text{ kg}_w/\text{kg}_{da})$ و نسبت L/G $2/4$ سرعت رطوبت‌زدایی هوا ماکسیمم و دمای هوا و دسیکنت خروجی مینیمم می‌گردد.



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

performance of vapor compression airconditioning", *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. Pahlavanzadeh, and A. H. Zamzamin (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. Borghai (2012) "Process optimization and modeling of heavy metal extraction from a molybdenum 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 Wiley & 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 ferrofluids using taguchi technique", *Computers and Fluids*, 37, 1344-1353.

۵- شرایط عملیاتی بهینه نشان که در دمای هوای ورودی (°C) ۲۸/۸، غلظت دسیکانت ورودی ۵۰٪، رطوبت مطلق هوای ورودی (۰۰۰۱۹۰ kg/kg) و نسبت ۲/۴ L/G سرعت رطوبت زدایی هوا ماکسیمم و دمای هوا و دسیکانت خروجی مینیمم می گردد.

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

L(kg/s)	شدت جریان جرمی محلول دسیکانت
G (kg/s)	شدت جریان جرمی هوا
G _w (g/s)	سرعت رطوبت زدایی هوا
T(°C)	دما
X (٪ وزنی)	غلظت دسیکانت
Y(kg _w /kg _{da})	رطوبت مطلق هوا

زیروندها

a	هوا
s	محلول دسیکانت
i	ورودی
o	خروجی
pre	پیش بینی شده
act	واقعی
w	آب
da	هوای خشک

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

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

Sara Nanvakenari¹, Hasan Pahlavanzadeh^{1,*}, Leila Omidvar Langeroudi¹

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(°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.

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.

All right reserved.

* Corresponding author

pahlavzh@modares.ac.ir
