

Dehumidification of Gas Stream Using Nanostructured Polyetherimide Hollow Fiber Membrane in Membrane Contactor

Abolghasem Mohamadpour Gorgi¹, and Gholamreza Bakeri Jafarkolaei^{1,2*}

1. Faculty of Chemical Engineering, 2. Advanced Membrane Technology Research Lab., Babol Noshirvani University of Technology, P.O. Box 484, Babol, Iran

Received: 25 October 2018, accepted: 5 December 2019

ABSTRACT

Hypothesis: Dehumidification of a gas stream was carried out by one of the newest separation techniques. Different processes have been proposed for gas humidification such as absorption process using an absorbent and adsorption process with higher capital and operating costs than the former. The former process is more common.

Methods: For humidification/dehumidification process two hollow fiber membrane contactor modules were made using polyetherimide hollow fiber membranes. At first, the dry inlet gas was humidified in the first contactor module and then, the dehumidification process was performed by the second module. In dehumidification process, monoethylene glycol (as the absorbent) was allowed to flow through the shell side of the contactor while the wet gas flowed through the fibers. The different operating parameters such as the pressure and flow rate of the wet gas were studied in relation to the performance of dehumidification system.

Findings: The results showed that by increasing the wet gas flow rate from 1 SLPM (standard liter per minute) to 3 SLPM, the water vapor absorption flux increased by 133%, indicating that the effect of decrease in gas phase mass transfer resistance in dehumidification process overcomes the effect of reduction in humidity content of the inlet gas to the dehumidification system. Furthermore, by increasing the gas pressure from 1 bar to 5 bar, the water vapor absorption flux decreased by 55% which showed that drop in humidity content of the inlet gas to dehumidification system (due to the pressure enhancement) affects the water vapor absorption process. Therefore, the operating conditions of the dehumidification process should be selected based on the effective parameters.

Keywords:

Hollow fiber membrane contactor, nano-structured polyetherimide membrane, contactor module, dehumidification, monoethylene glycol

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bakeri@nit.ac.ir

Please cite this article using:

Mohamadpour Gorgi A. and Bakeri Jafarkolaei G., Dehumidification of Gas Stream Using Nanostructured Polyetherimide Hollow Fiber Membrane in Membrane Contactor, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 373-384-, 2020.

رطوبت‌زدایی از جریان گاز با استفاده از غشای نانوساختار الیاف توخالی پلی‌اتر ایمید در تماس‌دهنده غشایی

ابوالقاسم محمدپور گرجی^۱، غلامرضا باکری جعفرکلای^{۲*}

بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، صندوق پستی ۴۸۴

۱- دانشکده مهندسی شیمی، ۲- آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری‌های نوین غشایی

دریافت: ۱۳۹۷/۸/۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۱۴

چکیده

فرضیه: هدف این پژوهش، رطوبت‌زدایی جریان گاز با یکی از جدیدترین روش‌های جداسازی است. فرایندهای مختلفی برای رطوبت‌زدایی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از مایع جاذب و فرایند جذب سطحی اشاره کرد که فرایند اول به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی کمتر، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

روش‌ها: دو عدد ماژول تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی برای رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی جریان گاز با استفاده از غشاهای الیاف توخالی پلی‌اتر ایمید ساخته شد. ابتدا گاز خشک ورودی، در ماژول تماس‌دهنده اول مرطوب شده و سپس فرایند رطوبت‌زدایی در ماژول دوم انجام شد. در فرایند رطوبت‌زدایی، جاذب مونواتیلن گلیکول، خارج از الیاف و گاز مرطوب داخل الیاف جریان داشتند و اثر عوامل مختلف عملیاتی مانند سرعت جریان و فشار گاز مرطوب ورودی بر عملکرد سامانه رطوبت‌زدا بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، با افزایش سرعت جریان گاز مرطوب از SLPM (standard liter per minute) برابر ۱ به ۳، شار جذب بخار آب ۱۳۳٪ افزایش یافت که بیانگر غلبه اثر کاهش مقاومت انتقال جرم فاز گاز در فرایند رطوبت‌زدایی بر کاهش مقدار رطوبت گاز ورودی به سامانه رطوبت‌زداست. همچنین، با افزایش فشار گاز مرطوب از ۱ bar به ۵ bar، شار جذب بخار آب ۵۵٪ کاهش یافت که نشان داد، کاهش مقدار رطوبت گاز ورودی به سامانه رطوبت‌زدا به دلیل افزایش فشار گاز بر فرایند جذب بخار آب اثر گذاشته است. بنابراین شرایط عملیاتی در فرایند رطوبت‌زدا باید براساس پارامترهای مؤثر انتخاب شود.

واژه‌های کلیدی

تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی،
غشای نانوساختار پلی‌اتر ایمید،
ماژول تماس‌دهنده،
رطوبت‌زدایی،
مونواتیلن گلیکول

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

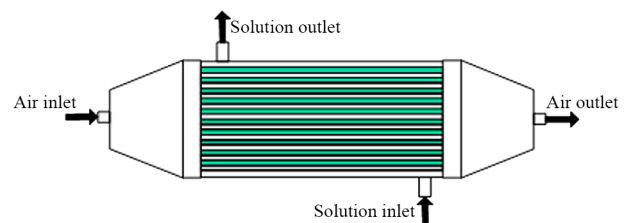
bakeri@nit.ac.ir

مقدمه

عملیات تماسی گاز-مایع یا مایع-مایع به‌طور سنتی در برج‌ها، ستون‌ها یا مخزن اختلاط انجام می‌شود. این سامانه‌های تماس‌دهنده سنتی معایب زیادی دارند که مهم‌ترین آن، نحوه تماس دو فاز سیال است که به مشکلاتی از قبیل ماندگی، طغیان، انسداد و ریزش منجر می‌شود. فناوری مهمی که می‌تواند این عیب‌ها را برطرف کند و در سال‌های اخیر نیز مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از تماس‌دهنده‌های غشایی است. در این فناوری، دو سیال در دو سمت غشایی متخلخل حرکت می‌کند و [۱،۲] فرایند انتقال جرم از فاز گاز به فاز مایع از راه حفره‌های غشا انجام می‌شود.

اخیراً تماس‌دهنده‌های غشایی الیاف توخالی در رطوبت‌زدایی از هوا به‌وسیله جاذب مایع به‌کار گرفته شدند. بر اساس این مفهوم تعدادی از غشاهای الیاف توخالی در مازول قرار می‌گیرند و جریان مایع (جاذب) در خارج از الیاف و جریان گاز در داخل الیاف (یا بر عکس) حرکت می‌کنند. تماس‌دهنده‌های غشایی الیاف توخالی از نظر ساختار و الگوی جریان بسیار شبیه به مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله هستند [۳-۶]. جریان ناهمسو رایج‌ترین الگوی جریان برای تماس‌دهنده‌های غشایی الیاف توخالی است که در شکل ۱ نشان داده شده است. اما، نقص این ساختار، کاهش فشار گاز به‌ویژه در سرعت‌های زیاد گاز است. برای رفع این مشکل از الگوی جریان متقاطع استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

مایعات زیادی قابلیت جذب بخار آب از جریان گاز را دارند که فقط تعداد محدودی از این مایعات دارای ویژگی‌های مناسب برای کاربردهای تجاری هستند. جاذب باید جذب رطوبت زیادی داشته باشد، به‌آسانی و با بیشترین غلظت برای استفاده مجدد احیا شود. فشار بخار بسیار کمی داشته باشد که باعث کاهش هدررفت جاذب می‌شود. پایدار گرمایی باشد. به‌ویژه در محدوده دمایی زیاد که در دیگ بخار (reboiler) استفاده می‌شود. هیدروکربن‌های موجود در گاز باید حل‌پذیری کمی در جاذب داشته باشند تا از اتلاف محصول مطلوب که گاز خشک است، جلوگیری شود. جاذب نباید



شکل ۱- الگوی جریان ناهمسو [۷].

Fig. 1. The countercurrent flow regime [7].

شکل ۲- الگوی جریان متقاطع [۷].

Fig. 2. The cross flow regime [7].

در محدوده‌های دمایی فرایند رطوبت‌زدایی، جامد شود و همچنین نسبت به تجهیزاتی که در فرایند رطوبت‌زدایی استفاده می‌شوند، خاصیت خوردگی نداشته باشد. گلیکول‌ها از جمله مایعاتی هستند که نسبتاً این خواص را دارند. گلیکول‌ها دارای دمای جوش بیشتر و فشار بخار کمتری از آب هستند. تعدادی از گلیکول‌هایی که در صنعت برای کاربردهای رطوبت‌زدایی بسیار رایج هستند، مونواتیلن گلیکول معروف به اتیلن گلیکول، دی‌اتیلن گلیکول، تری‌اتیلن گلیکول و تترااتیلن گلیکول هستند. برتری نسبی که تری‌اتیلن گلیکول در برابر سایر گلیکول‌ها دارد، سبب شده تا در رطوبت‌زدایی از گاز بیشتر استفاده شود. برای مثال دی‌اتیلن گلیکول ارزان‌تر از تری‌اتیلن گلیکول است. اما، چون فشار بخار بیشتری دارد، باعث اتلاف بیشتر و ناخالص شدن جریان گاز خروجی می‌شود. همچنین، تترااتیلن گلیکول گران‌تر و گران‌رتر از تری‌اتیلن گلیکول است که گرانبوی زیاد سبب افزایش هزینه پمپ‌کردن و مشکل شدن جریان سیال در مسیرهای فرایندی می‌شود [۳-۵]. مایعات دیگری که قابلیت جذب بخار آب دارند، محلول‌های کلسیم کلرید و لیتیم کلرید هستند که به‌مراتب کاربرد کمتری نسبت به گلیکول‌ها دارند. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی این ترکیبات آمده است.

Esato و Eiseman [۹] اولین پژوهشگرانی بودند که از تماس‌دهنده غشایی برای اکسیژن‌دار کردن خون استفاده کردند. پس از آن تماس‌دهنده‌های غشایی در بسیاری از کاربردها مانند حذف گازهای اسیدی، تصفیه آب، حذف بخارات آلی و کنترل رطوبت هوا استفاده شدند. Isetti و همکاران [۱۰] از تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی به‌عنوان روشی نوین در رطوبت‌زدایی هوا به‌کمک دو محلول آبی لیتیم کلرید و کلسیم نترات به‌عنوان جاذب استفاده کردند.

جدول ۱- خواص فیزیکی برخی محلول‌های جاذب رطوبت [۸].

Table 1. The physical properties of some humidity absorbents [8].

Absorbent	Boiling point at 760 mmHg (°C)	Freezing point (°C)	Vapor pressure at 20°C (mmHg)	Viscosity at 20°C (cP)
MEG	197.2	-13	0.1	20.9
DEG	244.8	-10.5	0.01	35.7
TEG	287.4	-7.2	0.01	47.8
LiCl (40%)	133	-3	3.3	12.87
CaCl ₂ (40%)	120	16	6.8	8.5

با دو عامل تفسیر شد تا درک روشن‌تری از این فرایند حاصل شود. عامل‌ها شامل شار بخار آب جذب‌شده به‌وسیله جاذب و درصد کاهش رطوبت نسبی بود که با انجام محاسبات مقدار آن‌ها تعیین شد. هنگامی که شار جذب بخار آب افزایش می‌یابد بدین معناست که سامانه در واحد سطح و زمان، مقدار بخار آب بیشتری را از گاز خارج کرده است و هنگامی که درصد کاهش رطوبت نسبی افزایش می‌یابد، بدین معناست که اختلاف رطوبت نسبی گاز خروجی و ورودی، افزایش یافته است. اکثر پژوهش‌های انجام‌شده طی سالیان اخیر در زمینه رطوبت‌زدایی از گاز با غشاهای الیاف توخالی، با استفاده از غشاهای غیرمتخلخل یا غشاهای آب‌گریز بوده است. اما، در این پژوهش از غشای آب‌دوست و متخلخل پلی‌اتر ایمید استفاده شد. همچنین، عمر غشاهای آب‌دوست در کاربردهای رطوبت‌زدایی به‌دلیل پدیده ترشوندگی غشا می‌تواند کوتاه شود که در این پژوهش با تغییر در ساختار و اندازه حفره‌های غشا این پدیده دیده نشد و غشای استفاده‌شده عمر مفید مطلوبی را در تماس با جاذب نشان داد. در پژوهش‌های پیشین، بیشتر از محلول‌های آبی مانند محلول لیتیم کلرید به‌عنوان جاذب استفاده شده بود که خاصیت جذب رطوبت کمتری نسبت به محلول‌های گلیکول (استفاده‌شده در این پژوهش) داشتند. نتایج حاصل از پژوهش‌های سایر پژوهشگران با نتایج پژوهش حاضر در بخش نتایج و بحث مقایسه شدند.

تجربی

مواد

گاز حامل استفاده‌شده در فرایند رطوبت‌زدایی نیتروژن خالص بود. از آب مقطر با رسانندگی الکتریکی $2/9 \mu S$ برای مرطوب‌سازی گاز و از محلول جاذب مونواتیلن گلیکول (تأمین شده از شرکت گاز استان مازندران) به‌عنوان جاذب رطوبت استفاده شد. شایان ذکر

Chiari و همکاران [۱۱] با استفاده از ماژول غشایی الیاف توخالی از جنس پلی‌پروپیلن نشان دادند، با افزایش سرعت خوراک گازی، شار جذب بخار آب افزایش می‌یابد. در این پژوهش از هوای محیط به‌عنوان خوراک گازی و محلول لیتیم کلرید اشباع به‌عنوان جاذب رطوبت استفاده شد. پس از آن، پژوهش‌هایی در زمینه رطوبت‌زدایی گاز با استفاده از تماس‌دهنده غشایی الیاف توخالی انجام شد [۱۴-۱۲]. Zhang و همکاران فعالیت‌های مشابه و متنوعی در این زمینه انجام دادند [۷، ۱۵، ۱۶]. آن‌ها در پژوهشی [۳] از ماژول غشایی الیاف توخالی با الگوی جریان متقاطع برای رطوبت‌زدایی جریان گاز استفاده کردند. در این سامانه، هوای محیط با رطوبت ثابت به‌عنوان گاز ورودی (در خارج از الیاف) و محلول لیتیم کلرید با غلظت ثابت به‌عنوان جاذب رطوبت (داخل الیاف) استفاده شد. غشای استفاده‌شده از جنس پلی‌وینیلیدن فلورئورید پوشیده‌شده با لایه‌ای غیرمتخلخل از سیلیکون بود. عملکرد سامانه در اثر تغییرات چهار عامل عملیاتی بررسی شد. نتایج گزارش‌شده نشان داد، با افزایش سرعت جریان گاز ورودی، شار جذب بخار آب کاهش یافت. این نتیجه نادرست است. زیرا با افزایش سرعت گاز، مقاومت فاز گاز کاهش یافته و نیز جاذب همواره در تماس با گاز تازه‌تری قرار می‌گیرد بنابراین، شار جذب باید افزایش یابد. سرعت جاذب، دما و رطوبت گاز ورودی از سایر پارامترهای بررسی‌شده بود که با افزایش آن‌ها شار جذب بخار آب افزایش یافت. Zhang و همکاران [۶] در پژوهشی نشان دادند، با افزایش سرعت جریان گاز و جاذب، شار جذب بخار آب افزایش می‌یابد. در این آزمون‌ها از ماژول غشایی الیاف توخالی از جنس پلی‌وینیلیدن فلورئورید استفاده شد. همچنین، خوراک ورودی هوای محیط با رطوبت ثابت و جاذب استفاده‌شده لیتیم کلرید با غلظت معین بود.

هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر عامل‌های عملیاتی بر عملکرد سامانه رطوبت‌زدا و در نهایت تعیین عامل‌هایی با بیشترین اثر در فرایند رطوبت‌زدایی بود. در این پژوهش، عملکرد سامانه رطوبت‌زدا

است، جاذب استفاده‌شده دارای برخی افزودنی‌ها بود.

دستگاه‌ها و روش‌ها

ساخت غشا

غشای استفاده‌شده در آزمون‌ها، غشای الیاف توخالی نانوساختار پلی‌اتر ایمید بود که با روش وارونگی فاز مرطوب-خشک به وسیله رشته‌ساز مدرن ساخته شد. به دلیل اینکه پلی‌اتر ایمید استحکام مکانیکی بیشتر و نیز خاصیت ترشوندگی کمتری نسبت به پلیمرهایی نظیر پلی‌اتر سولفون دارد، از آن به‌عنوان ماده اصلی غشا استفاده شد. به‌طور خلاصه برای تهیه الیاف توخالی ابتدا محلول پلیمری با درصد وزنی معین (۱۲٪ در حلال NMP) تهیه و زیر فشار گاز نیتروژن به سمت پمپ دهنده‌ای هدایت شد تا با سرعت ثابت وارد قطعه رشته‌ساز شود. سیال درونی (آب) نیز با سرعت ثابت به رشته‌ساز پمپ می‌شد. الیاف خروجی از رشته‌ساز پس از طی مسافت لازم وارد حمام انعقاد (دارای آب در دمای محیط) شدند تا فرایند وارونگی فاز کامل شود. سپس الیاف به‌دست آمده برای چند روز درون آب شناور باقی ماندند تا خروج حلال از بافت غشا کامل شود. سپس به مدت ۳ تا ۴ روز به‌طور عمودی آویزان شدند تا به‌طور طبیعی و در دمای محیط خشک شوند [۱۷]. نمایی از سامانه ساخت غشاهای الیاف توخالی در شکل ۳ نشان داده شده است.

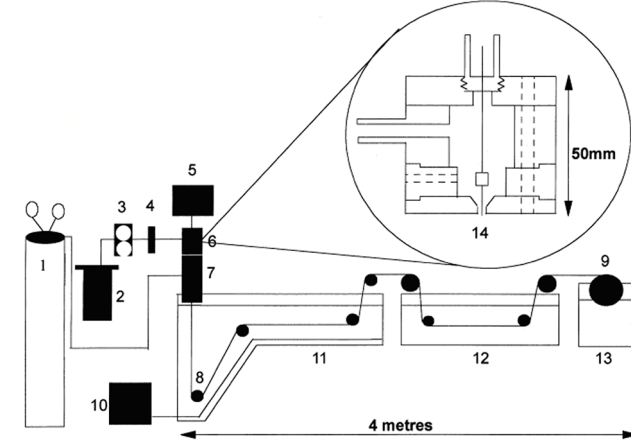
مشخصات غشا

مقدار تخلخل، اندازه متوسط حفره‌ها و قطرهای داخلی و خارجی غشای استفاده‌شده فرایند رطوبت‌زدایی در جدول ۲ آمده است. شعاع متوسط حفره‌های غشا با آزمون تراوش گاز و با استفاده از گاز هلیوم اندازه‌گیری شد که شرح روش آزمایش و معادله‌های استفاده‌شده در مرجع ۱۷ آمده است. برای تهیه تصاویر SEM از غشا، ابتدا غشا درون نیتروژن مایع به‌دقت شکسته شد تا سطحی صاف ایجاد کند و پیش از انجام آزمون با فیلم نازکی از پلاتین پوشش یافت. سپس، تصاویر SEM از سطح مقطع و ضخامت غشا تهیه شد. دستگاه SEM استفاده‌شده ساخت شرکت TESCAN بود.

جدول ۲- مشخصات غشای الیاف توخالی پلی‌اتر ایمید.

Table 2. The characteristics of polyetherimide hollow fiber membrane.

No. of fiber in the module	Fiber length (mm)	Mean pore size (nm)	Porosity (%)	Fiber inner diameter (mm)	Fiber outer diameter (mm)
21	180	7.1	84.9	0.405	0.715



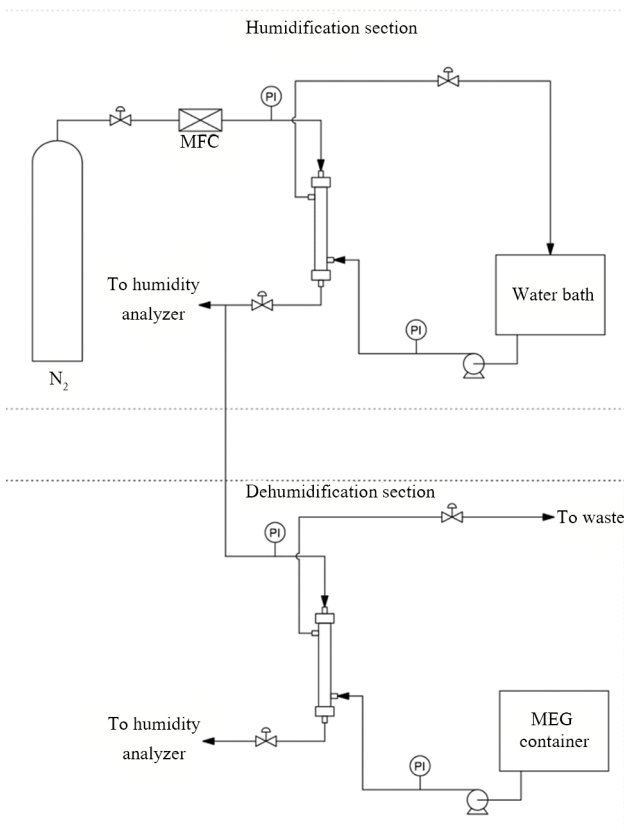
شکل ۳- طرحی از سامانه ریسندگی غشای الیاف توخالی [۱۸].

Fig. 3. The schematic of hollow fiber membrane spinning system [18].

شرح سامانه (رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا) و نحوه انجام محاسبات

در سامانه رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا، ابتدا گاز خشک وارد بخش رطوبت‌زنی می‌شود. در این بخش از ماژول غشای الیاف توخالی استفاده می‌شود. پیش از ورود گاز به‌داخل الیاف، دمای آن اندازه‌گیری و سرعت و فشار آن در ورودی به سامانه کنترل می‌شود. سرعت گاز به‌کمک کنترل‌کننده جریان جرمی ساخت شرکت Aalborg کنترل شد که محدوده اندازه‌گیری آن ۵-۰ SLPM (standard liter per minute) بود. یادآور می‌شود، ۱ SLPM معادل 0.04463 mol/min است. از سمت مقابل و به‌طور ناهمسو جریان آب در دمای محیط به‌وسیله پمپ از مخزن آب وارد بخش پوسته (خارج الیاف) می‌شود. سرعت جریان آب بیشترین مقدار در نظر گرفته می‌شود تا مقاومت انتقال جرم در بخش پوسته به‌حداقل برسد. دما و فشار جریان آب در ورودی به سامانه کنترل می‌شود. در خروجی بخش رطوبت‌زنی، گاز مرطوب با دما و رطوبت معین خارج شده و وارد بخش رطوبت‌زدایی می‌شود.

رطوبت نسبی و دمای گاز به‌طور هم‌زمان با دستگاه رطوبت‌سنج مدل Lutron LM-8000 ساخت شرکت Lutron Electronic Enterprise اندازه‌گیری شد. دقت اندازه‌گیری این دستگاه برای دما و رطوبت نسبی ۰/۱ بود. در این بخش نیز از ماژول غشایی الیاف توخالی



شکل ۵- طرحی از بخش‌های رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا.

Fig. 5. The schematic of the humidification and dehumidification sections.

در این معادله، Q مقدار مول گاز نیتروژن خشک (mol/min) و y_{in} و y_{out} به ترتیب جزء مولی بخار آب در جریان گاز ورودی و خروجی است و از معادله (۴) محاسبه شد:

$$y_{in} = \frac{\%RH_{in}}{100} \frac{10^{(A - \frac{B}{C + T_{in}})}}{P_t}, y_{out} = \frac{\%RH_{out}}{100} \frac{10^{(A - \frac{B}{C + T_{out}})}}{P_t} \quad (4)$$

در این معادله، RH_{out} و RH_{in} به ترتیب درصد رطوبت نسبی جریان گاز ورودی و خروجی، P_t فشار کل (mmHg)، T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای جریان ورودی و خروجی (K)، A ، B و C ثابت‌های رابطه Antovan برای آب و به ترتیب برابر $۸/۰۷۱۳۱$ و $۱۷۳۰/۶۳$ و $۲۳۳/۴۲۶$ هستند.

شرایط آزمون

آزمون‌های انجام‌شده برای بررسی عملکرد سامانه رطوبت‌زدا به دو دسته تقسیم شدند. در دسته اول، در فشار ثابت گاز، اثر سرعت جریان گاز و در دسته دوم، در سرعت ثابت جریان گاز، اثر فشار گاز

استفاده شد. گاز مرطوب وارد الیاف شده و از سمت مقابل، جریان جاذب در دمای محیط به‌طور ناهمسو وارد پوسته (خارج از الیاف) می‌شود. فشار جاذب به‌وسیله پمپ و سرعت آن با شیر خروجی کنترل می‌شود. ماژول‌های رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا، لوله‌های استوانه‌ای از جنس فولاد ضدزنگ با طول ۱۸ cm و قطر $۱/۵ \text{ cm}$ دارای دو ورودی و دو خروجی بودند که در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ طرحی از هر دو بخش رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا آمده است.

نکته شایان توجه اینکه فشار بخش‌های رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا به یکدیگر وابسته است. یعنی هنگامی که بخش رطوبت‌زن به بخش رطوبت‌زدا متصل می‌شود، فقط شیر گاز خروجی در بخش رطوبت‌زدا کنترل‌کننده فشار کل سامانه است. در این حالت، فشار گاز در سامانه رطوبت‌زدا اندکی کاهش می‌یابد ($۰/۱-۰/۲ \text{ bar}$) که اثر آن قابل چشم‌پوشی است. بنابراین هنگام انجام فرایند رطوبت‌زدایی در فشارهای مختلف، فشار بخش رطوبت‌زن نیز تغییر می‌کند که در ادامه بحث شدند. در هر آزمون، دما و رطوبت نسبی گاز در ورودی و خروجی ماژول رطوبت‌زدا ثبت شده و درصد کاهش رطوبت نسبی از معادله (۱) و سرعت بخار آب جذب‌شده از معادله (۲) محاسبه شد. که با تقسیم بر سطح تماس غشا، شار جذب بخار آب محاسبه شد. با تغییر عامل‌های عملیاتی مانند سرعت و فشار گاز مرطوب می‌توان حالت مطلوب را برای گاز خروجی از سامانه رطوبت‌زدا ایجاد کرد:

$$\text{درصد نسبی گاز خروجی - رطوبت نسبی گاز ورودی} = \frac{\text{کاهش رطوبت نسبی}}{\text{رطوبت نسبی گاز ورودی}} \times ۱۰۰ \quad (1)$$

$$\dot{n} = \dot{n}_{in} - \dot{n}_{out} \quad (2)$$

\dot{n} مقدار مول بخار آب جذب‌شده (mol/min) و \dot{n}_{in} و \dot{n}_{out} به ترتیب مقدار بخار آب موجود در گاز ورودی و خروجی (mol/min) است که برای هر حالت از معادله (۳) محاسبه شد:

$$\dot{n}_{in} = \frac{Q y_{in}}{1 - y_{in}}, \dot{n}_{out} = \frac{Q y_{out}}{1 - y_{out}} \quad (3)$$

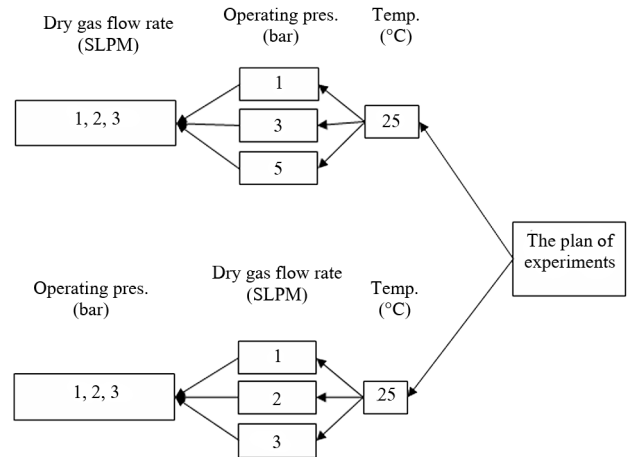


شکل ۴- طرحی از ماژول غشایی.

Fig. 4. The schematic of membrane module.

سرعت جریان گاز ورودی

در حالت کلی و در رطوبت ثابت گاز ورودی، با افزایش سرعت جریان گاز مرطوب در سامانه رطوبت‌زدا، شار جذب بخار آب افزایش یافته ولی درصد کاهش رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. یعنی بخار آب بیشتری در واحد زمان و واحد سطح جذب می‌شود، در حالی که رطوبت گاز خروجی افزایش می‌یابد. در این پژوهش، سامانه‌های رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا به‌طور متوالی به‌هم متصل بودند. بنابراین، تغییر در برخی شرایط عملیاتی، باعث تغییرات مختلف در هر دو سامانه می‌شد. هنگامی که سرعت جریان گاز افزایش یابد، گاز با سرعت بیشتری از سامانه رطوبت‌زن عبور می‌کند و به دلیل کاهش زمان ماند در رطوبت‌زن، رطوبت کمتری جذب گاز می‌شود. بدین معنا که اگر سرعت جریان گاز افزایش یابد، گاز با رطوبت کمتری وارد سامانه رطوبت‌زدا می‌شود. همچنین اگر رطوبت گاز ورودی به سامانه رطوبت‌زدا کاهش یابد، شار رطوبت جذب‌شده نیز کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش سرعت گاز مرطوب و به دلیل از بین رفتن مقاومت فاز گاز، شار جذب بخار آب افزایش و درصد کاهش رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. از این‌رو می‌توان گفت، کاهش رطوبت گاز ورودی به سامانه رطوبت‌زدا عامل منفی و افزایش سرعت جریان گاز ورودی به سامانه رطوبت‌زدا عامل مثبت بر شار جذب بخار آب است. بنابراین، در بررسی اثر افزایش سرعت جریان گاز بر عملکرد سامانه رطوبت‌زدا، رطوبت گاز ورودی ثابت نیست. نتایج حاصل از آزمون‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ حاکی از این است که با افزایش سرعت جریان گاز در این سامانه شار جذب بخار آب افزایش می‌یابد. همچنین، این موضوع نشان می‌دهد، اثر افزایش سرعت جریان گاز بر کاهش رطوبت گاز ورودی به ماژول رطوبت‌زدا، عامل غالب نیست. با افزایش سرعت جریان گاز، زمان ماند گاز در سامانه رطوبت‌زدا کمتر شده و در پی آن رطوبت نسبی گاز خروجی



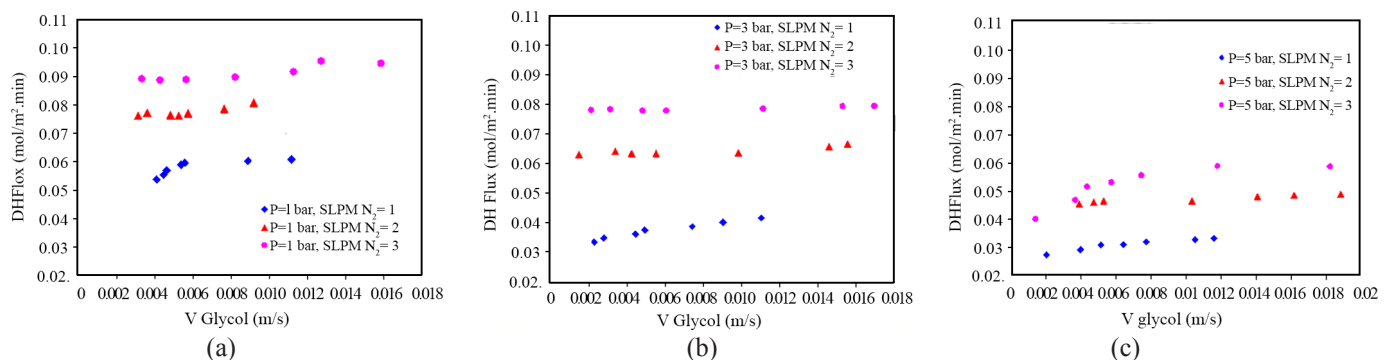
شکل ۶- مشخصات آزمایش‌ها و محدوده عامل‌های عملیاتی.

Fig. 6. The plan of experiments and range of the operating parameters.

بررسی شد (شکل ۶). برای هر یک از آزمون‌ها، دو عامل شار بخار آب جذب‌شده و درصد کاهش رطوبت نسبی محاسبه و نتایج ارائه شده است.

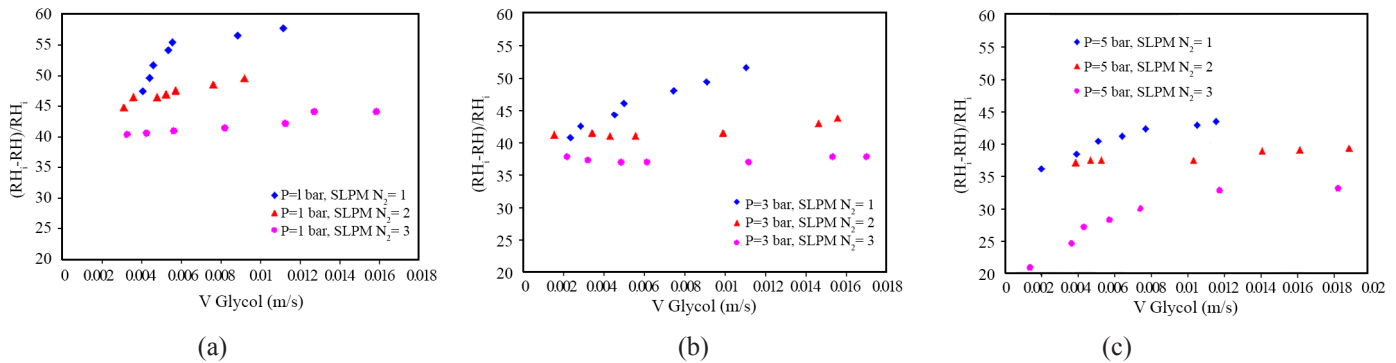
نتایج و بحث

در این پژوهش، سامانه‌های رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا به‌طور متوالی به‌هم متصل بودند. بنابراین تغییر در برخی شرایط عملیاتی، باعث تغییرات مختلف در هر دو سامانه می‌شد. عوامل عملیاتی شامل سرعت و فشار بررسی شدند. زیرا با بررسی‌های مختلف سایر عوامل عملیاتی مشخص شد، بیشترین تغییرات شار جذب بخار آب در اثر تغییر این دو عامل است. در ادامه، اثر این دو عامل در شرایط مختلف بررسی و تفسیر شد.



شکل ۷- اثر سرعت جریان گاز ورودی بر شار جذب بخار آب در فشارهای مختلف گاز.

Fig. 7. Effect of inlet gas flow rate on the water absorption flux at different gas pressures.



شکل ۸- اثر سرعت گاز ورودی بر کاهش رطوبت نسبی در فشارهای مختلف گاز.

Fig. 8. Effect of inlet gas flow rate on the reduction of relative humidity at different gas pressures.

به عبارت دیگر در سرعت جریان گاز ۱ SLPM، مقاومت انتقال جرم بیشتری در فاز گاز وجود دارد. بنابراین، اثر افزایش سرعت جاذب مایع در کاهش مقاومت انتقال جرم فاز مایع و در پی آن، مقاومت انتقال جرم کلی مشهودتر است که اثر خود را بر روند تغییر نمودارها نشان می‌دهد.

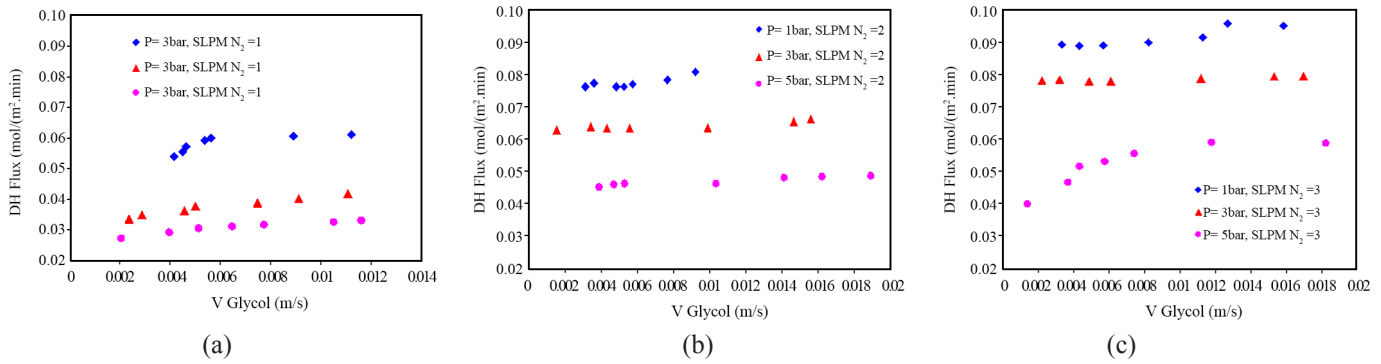
فشار گاز ورودی

فشار گاز ورودی عاملی است که با تغییر آن، افزون بر اثر در عملکرد سامانه رطوبت‌زدا، عملکرد سامانه رطوبت‌زن نیز تغییر می‌کند. همان‌طور که گفته شد، سامانه‌های رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا به یکدیگر وابسته هستند. از آنجا که جریان گاز مرطوب از سامانه رطوبت‌زن وارد سامانه رطوبت‌زدا می‌شود، باید شیر اتصال را که رابط میان این دو سامانه است، کاملاً باز کرده تا حداقل کاهش فشار در سامانه رطوبت‌زدا ایجاد شود. حال که گاز مرطوب از سامانه رطوبت‌زن به‌طور مستقیم وارد سامانه رطوبت‌زدا می‌شود، تغییر در فشار سامانه رطوبت‌زدا به‌طور خودکار فشار سامانه رطوبت‌زن را متأثر کرده و در پی آن عملکرد سامانه رطوبت‌زن تغییر می‌کند. به‌طور کلی، افزایش فشار گاز باعث کاهش ظرفیت جذب بخار آب به‌وسیله گاز می‌شود. بنابراین، افزایش فشار در سامانه رطوبت‌زن موجب می‌شود تا گاز رطوبت کمتری را جذب کند. از طرف دیگر با افزایش فشار گاز، تمایل به خروج بخار آب از گاز افزایش می‌یابد، یعنی در سامانه رطوبت‌زدا با افزایش فشار گاز مرطوب، تمایل به خروج بخار آب از گاز افزایش می‌یابد و رطوبت بیشتری را از خود خارج می‌کند. اما در سامانه بررسی‌شده در این پژوهش، نتیجه آزمایش چیز دیگری را نشان داد. هنگامی که فشار در سامانه رطوبت‌زدا افزایش داده شد، انتظار این بود که بخار آب بیشتری به‌وسیله سامانه جذب شود. اما، چون فشار سامانه رطوبت‌زن نیز افزایش یافت، این موضوع باعث

(نسبت به سرعت‌های کمتر گاز) افزایش می‌یابد، بنابراین درصد کاهش رطوبت نسبی کاهش می‌یابد.

به‌عنوان مثال در فشار ۱ bar، با افزایش مقدار جاذب، مقدار شار جذب بخار آب افزایش یافت و در حد نهایت در سرعت جریان گاز ۱ SLPM معادل $0.06 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{min}$ بود، در حالی که این پارامتر در ۳ برابر SLPM، معادل $0.095 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{min}$ بود و افزایش ۵۸٪ را نشان داد. مقدار شار جذب بخار آب در فشار ۵ bar و در سرعت‌های جریان گاز برابر ۱ و ۳ SLPM به‌ترتیب معادل $0.034 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{min}$ و $0.06 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{min}$ بود و افزایش ۷۷٪ را نشان داد. به‌عبارت دیگر، افزایش فشار گاز، اختلاف شار جذب بخار آب را در سرعت‌های مختلف جریان گاز افزایش داده است. همچنین، مقدار درصد کاهش رطوبت نسبی در فشار ۱ bar، در حد نهایت در سرعت جریان گاز ۱ SLPM معادل ۵۷٪ به‌دست آمد. در حالی که مقدار شار جذب در سرعت جریان گاز ۳ SLPM معادل ۴۴٪ بود و کاهش ۲۲٪ را نشان داد. این پارامتر در فشار ۵ bar و سرعت‌های جریان گاز برابر ۱ و ۳ SLPM معادل ۴۳٪ و ۳۳٪ بود و کاهش ۲۵٪ را نشان داد.

همچنین، با افزایش مقدار جاذب مایع، شار جذب بخار آب و درصد کاهش رطوبت نسبی افزایش یافت و پس از مدتی ثابت شد که این روند در تمام فشارها و سرعت‌های جریان گاز دیده شد. افزایش عوامل نامبرده به‌دلیل کاهش مقاومت انتقال جرم فاز مایع در اثر افزایش مقدار جاذب است که پس از آن به‌دلیل ثابت‌شدن مقدار مقاومت انتقال جرم فاز مایع، افزایش مقدار جاذب اثری بر شار جذب بخار آب و درصد کاهش رطوبت نسبی ندارد. همچنین با توجه به نمودارها، تفاوت اندکی در شیب نمودارها در سرعت‌های جریان گاز مختلف دیده شد. اما، شار جذب بخار آب در سرعت‌های جریان گاز کم، اثرپذیری بیشتری از سرعت گلیکول (جاذب) نشان داد. این رفتار را می‌توان به مقاومت‌های انتقال جرم مرتبط دانست.



شکل ۹- اثر فشار گاز ورودی به ماژول رطوبت‌زدا در سرعت‌های مختلف جریان گاز بر شار جذب بخار آب.

Fig. 9. Effect of inlet gas pressure to humidification module on the water absorption flux at different gas flow rates.

کاهش یافت (۴۷٪ کاهش) که بیانگر اثر افزایش فشار بر کاهش رطوبت گاز ورودی به بخش رطوبت‌زداست. همچنین، مقدار شار جذب بخار آب در سرعت جریان گاز ۳ SLPM و فشارهای ۱ و ۵ bar به ترتیب ۰/۰۹۵ و ۰/۰۶ mol/m².min بود و کاهش ۳۷٪ را نشان داد. به عبارت دیگر افزایش سرعت گاز، مقدار کاهش شار جذب بخار آب را در فشارهای مختلف کاهش داده است.

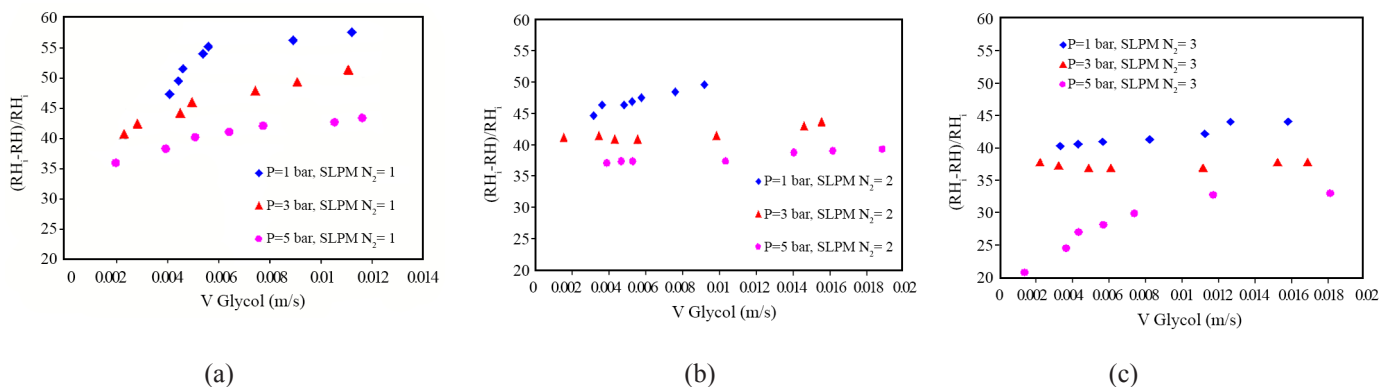
همچنین در سرعت جریان گاز ۱ SLPM، مقدار درصد کاهش رطوبت نسبی در فشار ۱ bar در حد نهایت برابر با ۵۸٪ بود، در حالی که این مقدار در فشار ۵ bar برابر با ۴۳٪ بود و کاهش ۲۶٪ را نشان داد. کاهش رطوبت نسبی در سرعت جریان گاز ۳ SLPM و فشارهای ۱ و ۵ bar برابر با ۴۴٪ و ۳۳٪ بود که کاهش ۲۵٪ را نشان داد.

در جدول ۳ نتایج سایر پژوهشگران با پژوهش حاضر مقایسه شده است. با مقایسه نتایج شار جذب بخار آب در این جدول می‌توان گفت، با استفاده از غشای آب‌دوست پلی‌اتر ایمید و جاذب مناسب، شار جذب بیشتری در سامانه رطوبت‌زدا به دست می‌آید.

شد تا گاز رطوبت کمتری را جذب کند و با رطوبت کمتر وارد سامانه رطوبت‌زدا شود. بنابراین، هرچه رطوبت گاز ورودی به سامانه رطوبت‌زدا کاهش یابد، کاهش شار جذب بخار آب به وسیله سامانه رطوبت‌زدا را به دنبال دارد. بنابراین در این حالت باید انتظار کاهش جذب بخار آب را داشت.

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ گویای این واقعیت است که اثر کاهش رطوبت گاز ورودی به ماژول رطوبت‌زدا بر افزایش فشار گاز ورودی ماژول رطوبت‌زدا، غالب است. یعنی در این سامانه با افزایش فشار گاز مرطوب، شار جذب بخار آب و نیز درصد کاهش رطوبت نسبی کاهش می‌یابد که نشانگر کاهش شدید رطوبت نسبی گاز ورودی به سامانه رطوبت‌زداست (یا همان گاز خروجی از سامانه رطوبت‌زن).

به عنوان مثال در سرعت جریان گاز ۱ SLPM، مقدار شار جذب بخار آب در فشار ۱ bar و در حد نهایت برابر با ۰/۰۶ mol/m².min بود، در حالی که این مقدار در فشار ۵ bar به ۰/۳۲ mol/m².min



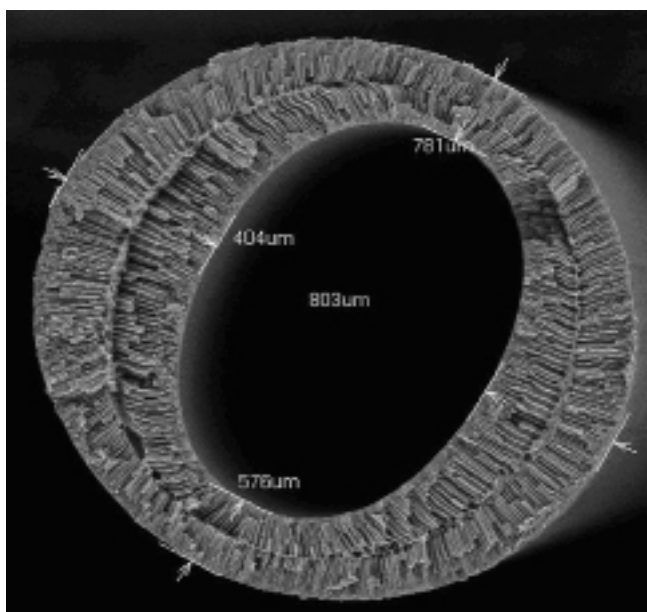
شکل ۱۰- اثر فشار گاز ورودی به ماژول رطوبت‌زدا بر کاهش رطوبت نسبی در سرعت‌های مختلف جریان گاز.

Fig. 10. Effect of inlet gas pressure to humidification module on the reduction of relative humidity at different gas flow rates.

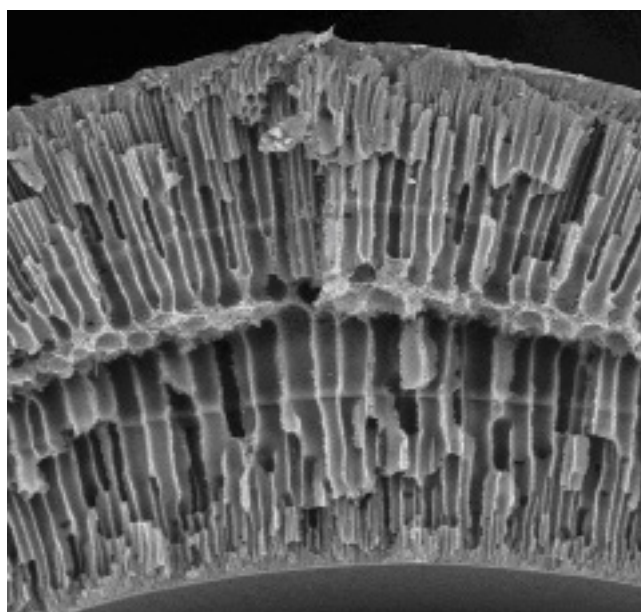
جدول ۳- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج سایر پژوهشگران در فرایند رطوبت‌زدایی گاز با تماس دهنده غشایی.

Table 3. The comparison of the results of this study with other researchers results in gas humidification process by membrane contactor.

Absorption flux (mole/m ² .min)	Operating parameter	Absorbent	Membrane structure	Ref.
0.015 - 0.025	Increasing gas humidity	LiCl	Porous PVDF- hollow fiber	Zhang et al. [3]
0.027 - 0.034	Increasing absorbent flow rate	LiCl	Porous PVDF-hollow fiber	Zhang et al. [6]
0.03 - 0.043	Increasing gas flow rate	LiCl	PVDF-hollow fiber	Zhang [7]
0.015 - 0.021	Increasing gas flow rate	Saturated LiCl	PP-hollow fiber	Chiari et al. [11]
0.01 - 0.06	Pressure difference	LiCl	PEI-hollow fiber	Peinemann et al. [12]
0.012 - 0.038	Increasing gas flow rate	TEG	PDMS-spiral wound	Usachov et al. [13]
0.06 - 0.095	Increasing gas flow rate	MEG	PEI-hollow fiber	This research



(a)



(b)

شکل ۱۱- ریزنگارهای SEM از غشای الیاف توخالی پلی‌اتر ایمید: (a) سطح مقطع و (b) دیواره.

Fig. 11. The SEM micrographs of polyetherimide hollow fiber membrane: (a) cross section and (b) wall.

نتیجه‌گیری

از میان روش‌های موجود در رطوبت‌زدایی گاز، پژوهشگران روش رطوبت‌زدایی با جاذب مایع را تأیید کرده‌اند که با استفاده از تماس‌دهنده‌های غشایی الیاف توخالی می‌توان با بهینه‌کردن شرایط عملیاتی، بیشترین شار جذب بخار آب را به دست آورد. عامل‌های بررسی‌شده در این فرایند شامل سرعت جریان و فشار گاز ورودی بودند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد، با افزایش سرعت جریان

در شکل ۱۱ تصاویر SEM غشای استفاده‌شده نشان داده شده است. در این تصاویر ساختار متخلخل با حفره‌های انگشتی‌شکل غشا کاملاً دیده می‌شود که این ساختار به افزایش عملکرد غشا کمک می‌کند. به عبارت دیگر، حفره‌های انگشتی‌شکل مسیر انتقال جرم را در داخل غشا کوتاه می‌کند، در حالی که کوچک بودن اندازه حفره‌ها روی سطوح داخلی و خارجی غشا به افزایش مقاومت در برابر ترشدگی کمک می‌کند.

اختصارات

P	فشار گاز ورودی (bar)
$(RH_i - RH)/RH_i$	درصد کاهش رطوبت نسبی
SLPM N ₂	سرعت گاز نیتروژن
V glycol	سرعت جاذب گلیکول (m/s)

قدردانی

از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به دلیل حمایت مالی با اعتبار پژوهشی به شماره ۹۵/۳۸۹۰۸۱/BNUT تشکر و قدردانی می‌شود.

گاز مرطوب، شار جذب بخار آب زیاد و درصد کاهش رطوبت نسبی کم شد. همچنین با ازدیاد فشار گاز مرطوب، شار جذب بخار آب و درصد کاهش رطوبت نسبی کاهش یافت. با توجه به این مطلب که شرایط مطلوب برای گاز خروجی از سامانه کمترین رطوبت نسبی گاز یا بیشترین شار جذب بخار آب باشد، دو حالت پیش می‌آید: (۱) اگر کمترین رطوبت نسبی در جریان گاز خروجی از سامانه رطوبت‌زدا مطلوب باشد، باید سرعت جریان گاز ورودی کاهش و فشار گاز تا حد امکان زیاد باشد. و (۲) اگر بیشترین شار جذب بخار آب در سامانه رطوبت‌زدا مدنظر باشد، باید سرعت جریان گاز و جاذب افزایش یابند.

مراجع

- Mosaddegh-Sedghi S., Rodrigue D., Brisson J., and Lliuta M.C., Wetting Phenomenon in Membrane Contactors-Causes and Prevention, *J. Membr. Sci.*, **452**, 332-353, 2014.
- Gabelman A. and Hwang S.T., Hollow Fiber Membrane Contactors, *J. Membr. Sci.*, **159**, 61-106, 1999.
- Zhang L.Z., Huang S.M., and Pei L.X., Conjugate Heat and Mass Transfer in a Cross-Flow Hollow Fiber Membrane Contactor for Liquid Desiccant Air Dehumidification, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **55**, 8061-8072, 2012.
- Huang S.M. and Yang M., Heat and Mass Transfer Enhancement in a Cross-Flow Elliptical Hollow Fiber Membrane Contactor Used for Liquid Desiccant Air Dehumidification, *J. Membr. Sci.*, **449**, 184-192, 2014.
- Huang S.M., Zhang L.Z., and Pei L.X., Transport Phenomena in a Cross-Flow Hollow Fiber Membrane Bundle Used for Liquid Desiccant Air Dehumidification, *Indoor Built Environ.*, **22**, 559-574, 2013.
- Zhang L.Z., Huang S.M., Chi J.H., and Pei L.X., Conjugate Heat and Mass Transfer in a Hollow Fiber Membrane Module for Liquid Desiccant Air Dehumidification: A Free Surface Model Approach, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **55**, 3789-3799, 2012.
- Zhang L.Z., An Analytical Solution to Heat and Mass Transfer in Hollow Fiber Membrane Contactors for Liquid Desiccant Air Dehumidification, *J. Heat Transfer*, **133**, 1-8, 2011.
- <http://www.meglobal.biz>, One of the World's Largest Producers of Ethylene Glycol, Available 2020.
- Esato K. and Eiseman B., Experimental Evaluation of Gore-Tex Membrane Oxygenator, *J. Thoracic Cardiovasc. Surg.*, **69**, 690-697, 1975.
- Isetti C., Nannei E., and Magrini A., On the Application of a Membrane Air-Liquid Contactor for Air Dehumidification, *Energy Build.*, **25**, 185-193, 1997.
- Bergero S. and Chiari A., Experimental and Theoretical Analysis of Air Humidification/Dehumidification Processes Using Hydrophobic Capillary Contactors, *Appl. Therm. Eng.*, **21**, 1119-1135, 2001.
- Kneifel K., Nowak S., Albrecht W., Hilke R., Just R., and Peinemann K.V., Hollow Fiber Membrane Contactor for Air Humidity Control: Modules and Membranes, *J. Membr. Sci.*, **276**, 241-251, 2006.
- Usachov V., Laguntsov N., Okunev A., Teplyakov V., and Glukhov S., Experimental Study of the Membrane Contactor Systems for Gas Dehumidification, *ARS Separatoria Acta*, **2**, 36-46, 2003.
- Albrecht W., Hilke R., Kneifel K., Weigel T., and Peinemann K.V., Selection of Microporous Hydrophobic Membranes for Use in Gas/Liquid Contactors: An Experimental Approach, *J. Membr. Sci.*, **263**, 66-76, 2005.
- Zhang L.Z. and Zhang N., A Heat Pump Driven and Hollow Fiber Membrane-based Liquid Desiccant Air Dehumidification System: Modeling and Experimental Validation, *Energy*, **65**, 441-451, 2014.

16. Zhang L.Z., Zhang N., and Yin S.Y., Performance Study of a Heat Pump Driven and Hollow Fiber Membrane Based Two-Stage Liquid Desiccant Air Dehumidification system, *Appl. Energy*, **179**, 727-737, 2016.
17. Bakeri G., Matsuura T., Ismail A.F., and Rana D., A Novel Surface Modified Polyetherimide Hollow Fiber Membrane for Gas-Liquid Contacting Processes, *Sep. Purif. Technol.*, **89**, 160-170, 2012.
18. Ismail A.F., Dunkin I.R., Gallivan S.L., and Shilton S.J., Production of Super Selective Polysulfone Hollow Fiber Membranes for Gas Separation, *Polymer*, **40**, 6499-6506, 1999.