Research Article

DOI: 10.22034/ijche.2022.319813.1163

DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.125.3.3

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

Study of Water Vapor Absorption from Gas Using Tetra-Ethylene Glycol (TREG)

M. Mehdi Kaibollahi[1], P. Keshavarz[2*]

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Shiraz University

2- Associate Professor of Chemical Engineering, Shiraz University

Email: pkeshavarz@shirazu.ac.ir

Abstract

According to the importance of water vapor available in the natural gas, achieving a powerful absorbent looks quite necessary. In this study, for the first time, tetraethylene glycol (TREG) and its mixture with triethylene glycol (TEG) were used to remove water vapor from a wet air stream. Following this, to achieve a good vision about the performance of TREG, the results were compared with the pure TEG and the impact of gas flow rate was considered. Based on the obtained results, all absorbents applied in this work resulted in a better performance in lower gas flow rates. Further, although TEG was the best absorbent at low gas flow rates, TREG had the best performance in water vapor removal at high gas flow rates. Finally, in the best operational condition in this work, the use of TEG led to the reduction of water vapor from 90% to about 10% at 60 ml.min-1. However, applying TERG had a better result at 120 ml.min^{-1} and caused the water vapor to reduce from 90% to approximately 5%. High water vapor absorption in high flow rates indicates the high capability of TREG to employ in gas dehydration processes in industrial scales.

Received: 14 December 2021
Accepted: 10 March 2022
Page Number: 57-68

Keywords:
Bubble Column,
TREG,
TEG,
Dehumidification

Please Cite this Article Using:

Mehdi Kaibollahi, M., Keshavarz, P., "Study of Water Vapor Absorption from Gas Using Tetra-Ethylene Glycol (TREG)", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 125, pp. 57-68, In Persian, (2023).

مقـــالـــه پـــژوهشی

DOI: 10.22034/ijche.2022.319813.1163
DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.125.3.3

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

بررسی جذب بخار آب از هوا با استفاده از تترا اتیلن گلایکول (TREG) و تری‌اتیلن گلایکول (TEG)

محمدمهدی کیب‌اللهی[۱]، پیمان کشاورز[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

پیام نگار: pkeshavarz@shirazu.ac.ir

چکیده

با توجه به اهمیت حذف بخار آب موجود در گازهای طبیعی، دست‌یابی به یک جاذب پرقدرت در فراوری گازهای طبیعی بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، برای نخستین بار از جاذب تترا اتیلن گلایکول (TREG) و ترکیب آن با تری‌اتیلن گلایکول (TEG) برای حذف بخار آب از جریان هوای مرطوب استفاده شد. در ادامه، برای دست‌یابی به بینشی صحیح از عمل‌کرد TREG، نتایج به‌دست‌آمده با جاذب خالص TEG مقایسه و تأثیر دبی جریان هوا نیز در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج، تمامی جاذب‌های به‌کار گرفته‌شده در این تحقیق، عمل‌کردی بهتر در دبی‌های پایین‌تر داشت. هم‌چنین، در حالی‌که TEG جاذبی بهتر در دبی‌های پایین‌تر بوده است، TREG عمل‌کردی بسیار بهتر در میزان حذف بخار آب در دبی‌های بالاتر داشته است. در نهایت، در بهترین شرایط عملیاتی لحاظ‌شده در این تحقیق، استفاده از TEG در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه منجربه کاهش رطوبت ورودی هوا از ۹۰٪ به حدود ۱۰٪ شد. حال آن‌که، استفاده از TREG در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه نتایج بهتری را به‌همراه داشت و میزان حذف را به مقداری در حدود ۵٪ کاهش داد. میزان بالای جذب بخار آب در دبی‌های بالا، نشان‌دهندهٔ قابلیت بالای TREG در به‌کارگیری در فرایندهای شیرین‌سازی در مقیاس صنعتی دارد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹
شماره صفحات: ۵۷ تا ۶۸

کلیدواژه‌ها:
برج حبابی،
ترا اتیلن گلایکول،
تری‌اتیلن گلایکول،
نم‌زدایی

* شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکدهٔ مهندسی شیمی، نفت و گاز

استناد به مقاله:
کیب‌اللهی، م. م.، کشاورز، پ.، "بررسی جذب بخار آب از هوا با استفاده از تترا اتیلن گلایکول (TREG) و تری‌اتیلن گلایکول (TEG)"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ویکم، شماره ۱۲۵، صص. ۶۸-۵۷، (۱۴۰۱).

۱. مقدمه

گاز طبیعی که مدت‌ها به‌عنوان محصولی ناخواسته در استخراج نفت خام در نظر گرفته می‌شد، امروزه به منبعی اصلی برای تولید حرارت و الکتریسیته برای مصارف خانگی و صنعتی تبدیل شده است[۱،۲]. همراه با گاز طبیعی اجزای نامطلوب دیگری چون کربن‌دی‌اکسید، سولفوریک اسید و بخار آب نیز وجود دارد که باید از واحدهای شیرین‌سازی و نم‌زدایی حذف شوند[۳،۴]. حضور این اجزای نامطلوب در جریان گازی مشکلاتی چون کاهش ارزش حرارتی گاز طبیعی و آلودگی محیط زیست را در پی دارد. هم‌چنین، وجود بخار آب علاوه بر ایجاد مشکلاتی در صحیح سوختن گاز طبیعی، موجب ایجاد هیدرات گازی در جریان درون لوله می‌شود که مشکلات جدی را در روند انتقال گاز به‌همراه دارد[۵،۶]. از این‌رو، در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای یافتن جاذب‌های قدرتمند برای جداسازی بخار آب از جریان گاز طبیعی استخراج‌شده انجام گرفته است. یک جاذب قدرتمند باید علاوه بر میزان جذب بالا، خصوصیات دیگری چون نداشتن واکنش با تأسیسات، فشار بخار کم و مقاومت مکانیکی بالا را داشته باشد[۷].

به‌تازگی محلول‌های گلایکولی، به‌خصوص TEG، به‌عنوان جاذب‌هایی رایج در کاربردهای آزمایشگاهی و صنعتی طرفدار پیدا کرده است. به‌طور مثال، در یک تحقیق اولیه، سیلویانو گروسو در سال ۱۹۸۷ به بررسی میزان جذب بخار آب با تری‌اتیلن گلایکول (TEG)، مخلوط تری‌اتیلن گلایکول و دی‌اتیلن گلایکول (DEG) و مخلوط تری‌اتیلن گلایکول و تترااتیلن گلایکول (TREG) پرداخت که از تترا اتیلن به‌طور خالص گزارشی ارائه نداد[۸]. در ادامهٔ این پژوهش چانگ در سال ۱۹۹۴ بر روی شاخص‌های تأثیرگذار در بازدهی برج جذب مطالعاتی را انجام داد که برای این منظور برج را با دو مایع جاذب متفاوت پر کرد. نتایج نشان داد که فاکتورهایی نظیر نوع جاذب، دمای جاذب، دبی هوای ورودی به برج، دمای هوای ورودی و اندازهٔ پکینگ‌ها در راندمان رطوبت‌زدایی مؤثر است که مهم‌ترین این فاکتورها نوع جاذب بود[۹]. در ادامه، زوریگات و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به بررسی عوامل مؤثر در جذب بخار آب با تری اتیلن گلایکول پرداختند؛ در این تحقیق که از یک برج پرشده استفاده شد، دبی گاز ورودی، دبی مایع ورودی، جنس پکینگ، میزان رطوبت گاز ورودی و غلظت تری‌اتیلن گلایکول بررسی شد. نتیجهٔ این تحقیق با نتایج چانگ مقایسه شد. نتایج نشان داد که بازدهی جذب بخار آب به‌وسیلهٔ گاز با افزایش میزان مایع ورودی و افزایش غلظت تری‌اتیلن‌گلایکول بیشتر می‌شود[۱۰]. در نهایت، طبق تحقیقات پایمونی و همکارانش در سال ۲۰۱۱، در گلایکول حضور هیدروکسیل که همان پیوند اتم اکسیژن و اتم هیدروژن است و در مولکول آب نیز وجود دارد، باعث می‌شود که مولکول‌های آب به‌سمت مولکول‌های گلایکول جذب شوند و همین ویژگی گلایکول‌ها را به یک جاذب خوب برای آب تبدیل می‌کند[۱۱].

چنان‌که ذکر شد، آزمایش‌های زیادی در رابطه با آب‌گیری از هوا با گلایکول انجام شده است؛ ولی در رابطه با تترا اتیلن گلایکول داده‌های دقیقی از میزان جذب آب با تترا اتیلن گلایکول ارائه نشده است. تترا اتیلن گلایکول که یک مادهٔ بی‌رنگ با بویی ملایم و کمی سمی و گران‌رو است، از خانوادهٔ گلایکول‌ها و دارای گروه هیدروکسیل است. این ماده با فرمول شیمیایی $C_8H_{18}O_5$ توانایی جذب بخار آب را دارد. هم‌چنین دارای دمای جوش بالاتری نسبت به تری‌اتیلن‌گلایکول است. خواص فیزیکی این ماده همراه با تری‌اتیلن‌گلایکول و آب خالص در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی تری‌اتیلن گلایکول، تترا اتیلن گلایکول و آب [۹،۱۱].

Table 1. physical specification of TEG, TREG and water [9,11].

Properties	TEG	TREG	Water
Molecular weight	150.17 $g.mol^{-1}$	194.23 $g.mol^{-1}$	18.01 $g.mol^{-1}$
Desnsity	1.12 $g.cm^{-3}$	1.13 $g.cm^{-3}$	0.99 $g.cm^{-3}$
Melting point	-7 °C	-9.4 °C	0.0 °C
Boiling point	285 °C	327 °C	100 °C
Vapor pressure	0.000176 kPa	0.0000062 kPa	2.3388 kPa
Viscosity	49 $mPa.s^{-1}$	61.9 $mPa.s^{-1}$	1 $mPa.s^{-1}$
Flash point	177 °C	204 °C	---
Spontaneous flash point	304 °C	370 °C	---

در این تحقیق، تلاش شده است که به عمل‌کرد جاذب‌های بخار آب تری‌اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول به‌صورت خالص و ترکیبی از یکدیگر در یک سامانهٔ برج حباب پرداخته شود. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند دیدگاهی جدید را برای معرفی تترا اتیلن گلایکول به‌عنوان یک جاذب شیمیایی قدرتمند ارائه کند. این نخستین مطالعهٔ استفاده از تترا اتیلن گلایکول خالص برای جذب بخار آب است.

۲. مواد و آزمایش

۲-۱ مواد

در این تحقیق از مادهٔ تری‌اتیلن‌گلایکول و تترا اتیلن‌گلایکول برای مقایسهٔ میزان جذب بخار آب استفاده شده است که هر دو با میزان خلوص ۹۹ درصد و از محصولات شرکت مرک تهیه شدند. هم‌چنین، از تری‌اتیلن گلایکول و تترا اتیلن با خلوص ۹۵ درصد وزنی نیز استفاده شد.

این مواد از ترکیب مادهٔ خالص و آب مقطر تهیه شدند. برای مقایسهٔ میزان جذب دو ترکیب باهم، از ترکیب تری اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول با نسبت مساوی استفاده شد.

۲-۲ تجهیزات

برای انجام آزمایش جذب بخار آب، از یک کمپرسور (مدل HALEA ACO-328) برای دمیدن هوا به درون برج‌ها، دو برج شیشه‌ای به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قطرهای ۳/۵ (برای برج مرطوب‌کننده) و ۲ سانتی‌متر (برای برج جذب)، روتامتر (مدل LZB-3WB)، رطوبت سنج دیجیتالی (شرکت KIMO، مدل TH-300)، پمپ آب (مدل NEU-A900) و یک هیتر (مدل Witeg) برای ثابت نگه‌داشتن دمای حمام آب استفاده شد.

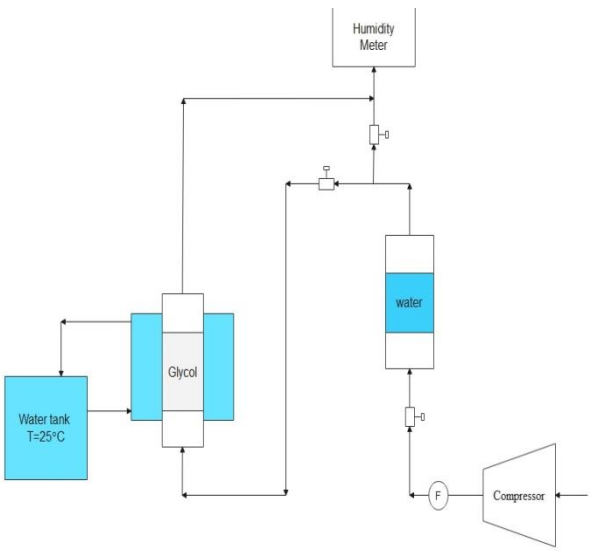
۲-۳ روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش ابتدا باید کمپرسور به دبی‌سنج، وصل و دبی مورد نظر، تنظیم و خروجی دبی سنج به برج مرطوب‌ساز، متصل و سپس خروجی برج مرطوب‌ساز به محفظهٔ اندازه‌گیری رطوبت وصل شود، مدت زمانی صبر می‌کنیم تا سامانه پایدار شود. سپس رطوبت نسبی، دمای نقطهٔ شبنم و دمای هوا را اندازه‌گیری می‌کنیم. این رطوبت اندازه‌گیری‌شده مربوط به ورودی برج جذب است.

حمام آب در دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس ثابت نگه داشته می‌شود. برای عمل جذب در دمای ثابت، آب با پمپ به محفظهٔ بیرونی برج جذب هدایت می‌شود.

رطوبت اندازه‌گیری‌شده در مرحلهٔ اول رطوبت ورودی به برج جذب است. در مرحلهٔ بعد برج جذب را از جاذب مناسب پر می‌کنیم و سپس خروجی برج مرطوب‌ساز به ورودی برج جذب وصل می‌شود. هم‌چنین خروجی برج جذب که هوای خشک‌شده است، به محفظهٔ اندازه‌گیری رطوبت وصل می‌شود تا رطوبت نسبی، دمای نقطهٔ شبنم و دمای هوای خروجی اندازه‌گیری شود.

در این پژوهش دمای هوای خروجی در بازه‌های زمانی ده دقیقه‌ای و به‌مدت سه ساعت اندازه‌گیری شده است. طرحوارهٔ سامانه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. طرحوارهٔ کلی جذب بخار آب در برج حباب.

Figure 1. Schematic diagram of water vapor absorption in bubble column.

۲-۴ روش انجام محاسبات جذب بخار آب

برای محاسبهٔ بازده حذف بخارآب از هوا از معادلهٔ زیر استفاده می‌کنیم:

$$\eta = \frac{Qin Cin - Qout\ Cout}{Qin\ Cin} \times 100 \qquad (۱)$$

معادلهٔ (۱) بازده حذف بخار آب را حساب می‌کند. ترم‌های به‌کار رفته در این معادله در ادامه توضیح داده شده‌اند:

η: راندمان حذف بخار آب (بی بعد)

$Q_{in}(ml/min)$ و Q_{out} دبی‌های ورودی و دبی خروجی برج جذب و C_{in} (g/m^3) و C_{out} غلظت‌های بخار آب در هوای ورودی و خروجی است.

با توجه به معادلهٔ (۱)، برای به‌دست‌آوردن بازده حذف بخار آب به غلظت بخار آب در هوای ورودی و خروجی نیاز است که به‌دلیل این‌که دستگاه رطوبت‌سنج، رطوبت نسبی را به ما گزارش می‌کند باید از معادلهٔ (۲) با داشتن رطوبت نسبی، غلظت بخار آب به دست آورده شود.

$$C_{H2O}=X_{H2O}\cdot n_{air}\cdot M_{H2O} \quad (۲)$$

همان‌طور که معادلهٔ (۲) نشان می‌دهد، برای به‌دست‌آوردن غلظت، نیاز به محاسبهٔ دو شاخص چگالی هوا (n_{air}) و کسر مولی (X_{H2O}) است که از معادلهٔ (۳) و (۴) به دست می‌آید.

$$n_{air}=\frac{P\cdot 100}{R\cdot(T+273.15)} \quad (۳)$$

شاخص‌های به‌کار رفته در معادلهٔ ۳ در زیر توضیح داده می‌شود:

R : ثابت گازها $(8.31447215\ J.mol^{-1}.K^{-1})$

P : فشار هوا (hPa)

T : دمای هوا $(℃)$

$$X_{H2O}=\frac{PH2O}{P} \quad (۴)$$

از معادلهٔ (۴) پیداست که فشار جزئی آب مجهول است؛ مقدار آن با استفاده از رطوبت نسبی و معادلهٔ زیر حساب می‌شود.

$$RH=\frac{PH2O}{e(T)}\times 100 \quad (۵)$$

در معادلهٔ (۵)، (RH) رطوبت نسبی و e(T) فشار بخار آب است که فشار بخار آب از معادلهٔ (۶) حساب می‌شود.

$$e=a_0+T\cdot(a_1+T\cdot(a_2+T\cdot(a_3+T\cdot(a_4+T\cdot(a_5+T\cdot a_6))))) \quad (۶)$$

در معادلهٔ (۶) ضرایب a_0 تا a_6 اعداد ثابت است که مقادیر عددی آن‌ها بدین صورت است:

$a_0 = 6.107799961$، $a_1 = 4.436518521\cdot10^{-1}$،

$a_2 = 1.428945805\cdot10^{-2}$، $a_3 = 2.650648471\cdot10^{-4}$،

$a_4 = 3.031240396\cdot10^{-6}$، $a_5 = 2.034080948\cdot10^{-8}$ و

$a_6 = 6.136820929\cdot10^{-11}$.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱ تأثیر دبی

در ابتدا تأثیر دبی بر میزان جذب بررسی شد و از سه دبی ۶۰،۱۲۰،۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه برای هوای ورودی در آزمایش جذب بخار آب استفاده شده است.

۳-۱-۱ تأثیر دبی بر جذب بخار آب با تری‌اتیلن گلایکول

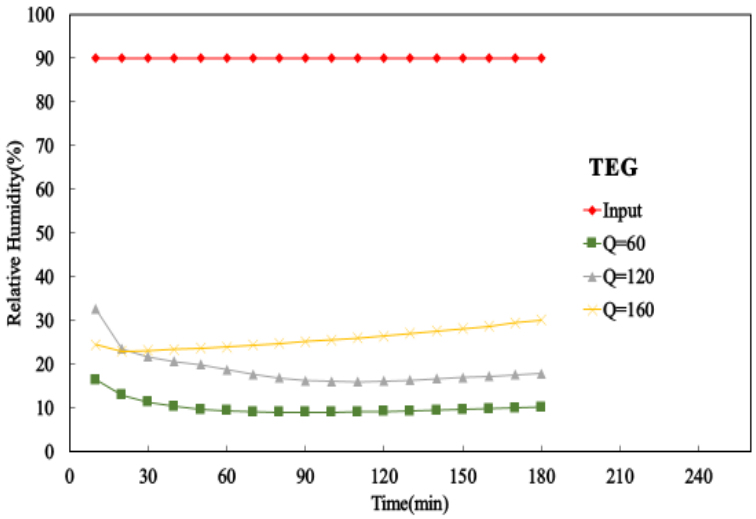
شکل (۲) تأثیر دبی بر جذب بخار آب بر تری‌اتیلن گلایکول را نشان می‌دهد. هوای ورودی با سه دبی ۱۶۰، ۱۲۰ و ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه وارد برج جذب شده است. رطوبت هوای ورودی حدود ۹۰٪ است و رطوبت هوای خروجی از برج در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به کمترین میزان خود که حدود ده درصد است، رسیده است. این اختلاف رطوبت نسبی خروجی در دبی‌های مختلف ناشی از دو عامل است:

۱- هرچه دبی کمتر می‌شود زمان ماند بیشتر می‌شود؛ در نتیجه هوای مرطوب می‌تواند مدت زمان بیشتری با جاذب در تماس باشد و به همین دلیل عمل جذب بهتر انجام گرفته است.

۲- در دبی پایین‌تر میزان بخار آب واردشده به برج جذب کمتر است. از همین روی، جاذب عمل جذب را بهتر انجام می‌دهد و خروجی برج جذب دارای رطوبت نسبی پایین‌تری است.

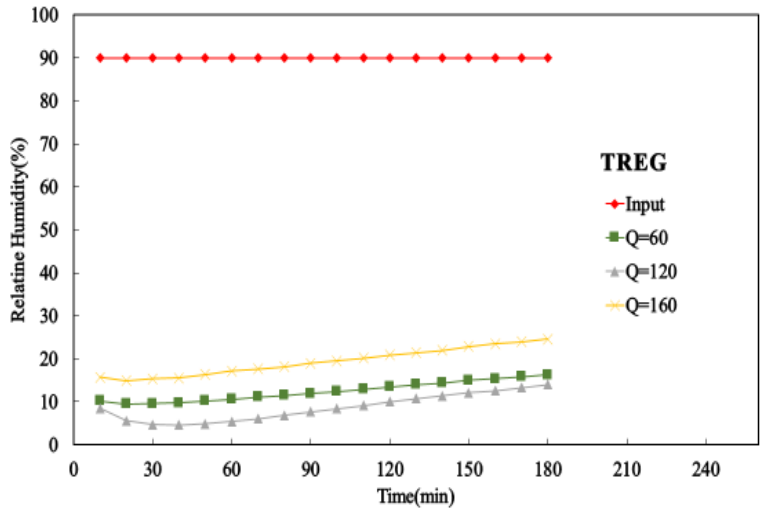
۳-۱-۲ تأثیر دبی بر جذب بخار آب با تترا اتیلن گلایکول

شکل (۳) تأثیر دبی بر جذب تترا اتیلن گلایکول را نشان می‌دهد. هوای ورودی با سه دبی ۶۰،۱۲۰و۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه وارد برج جذب شده و رطوبت هوای ورودی به برج حدود ۹۰٪ است؛ اما بر خلاف تری اتیلن گلایکول در پایین‌ترین دبی بیشترین مقدار جذب انجام نشده است و این نتیجه به‌دلیل گران‌روتر بودن تترا اتیلن گلایکول نسبت به تری‌اتیلن گلایکول است؛ زیرا در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه حباب‌های هوا درشت‌تر هستند و سریع‌تر فاز مایع را ترک می‌کنند که در نتیجه زمان اقامت کمتری را در فاز



شکل ۲. تأثیر دبی بر جذب بخار آب با تری‌اتیلن گلایکول.

Figure 2. Impact of flow rate on the water vapor absorption of TEG.



شکل ۳. تأثیر دبی بر جذب بخار آب با تترا اتیلن گلایکول.

Figure 3. Impact of flow rate on the water vapor absorption of TREG.

مایع دارند. هم‌چنین در این شرایط، اغتشاش در جاذب بسیار کم است و به همین دلیل در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه جذب به میزان کمتری انجام می‌شود.

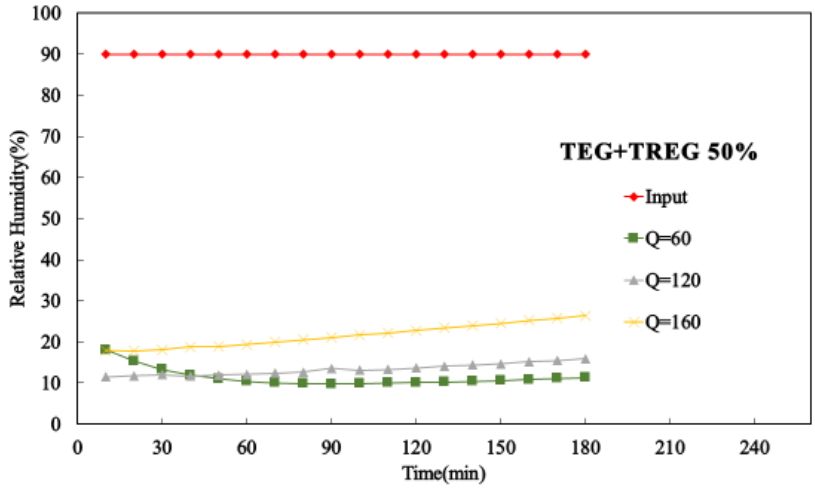
۳-۱-۳- تأثیر دبی بر جذب بخار آب با ترکیب تری اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول

شکل (۴) تأثیر دبی بر جذب بخار آب را به‌وسیلهٔ ترکیب با نسبت مساوی وزنی از تری‌اتیلن گلایکول و تتراتیلن گلایکول نشان می‌دهد. هوای ورودی با سه دبی ۶۰، ۱۲۰و ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه وارد برج جذب شده که در این برج از ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول به‌عنوان جاذب استفاده شده است و در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه رطوبت هوای خروجی به کمترین میزان خود رسیده است.

۳-۲ تأثیر نوع جاذب بر جذب بخار آب

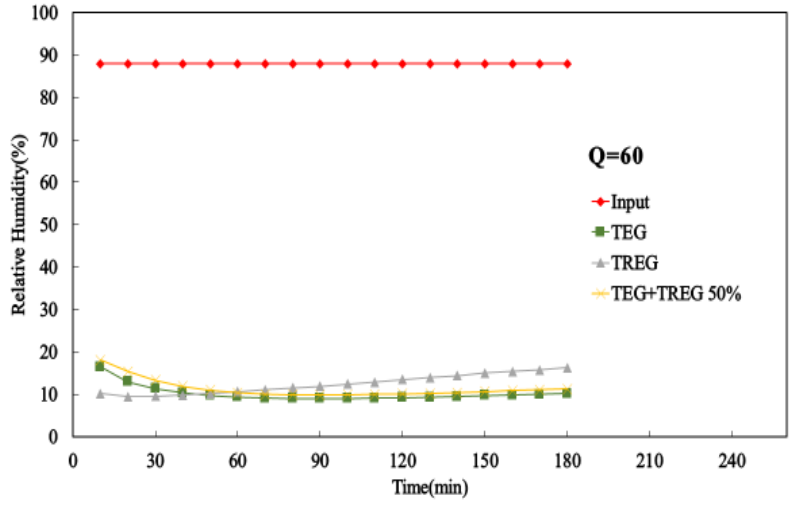
۳-۲-۱ تأثیر نوع جاذب در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

شکل (۵) تأثیر نوع جاذب بر میزان حذف بخار آب را در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۴. تأثیر دبی بر جذب بخار آب با ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و ترا اتیلن گلایکول.

Figure 4. Impact of flow rate on the water vapor absorption of the mixture of TEG and TREG.



شکل ۵. تأثیر جاذب در جذب بخار آب در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

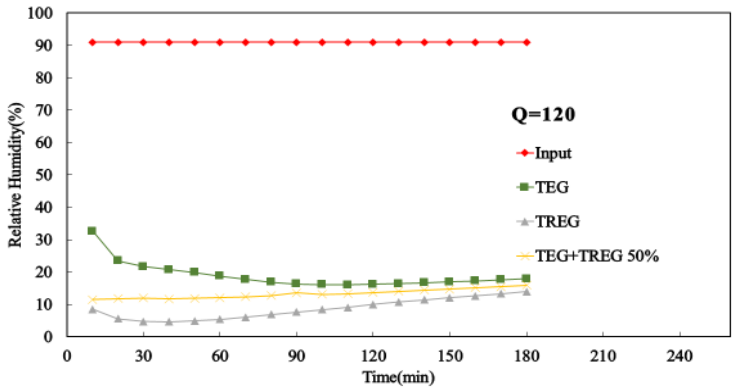
Figure 5. Impact of absorbent on the water vapor absorption at 60 ml.min^{-1}.

چنان‌که در شکل پیداست، در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه جاذب تری‌اتیلن گلایکول بهترین عمل‌کرد را از خود نشان داده است. گران‌روی پایین‌تر تری‌اتیلن گلایکول و هم‌چنین ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و ترا اتیلن گلایکول نسبت‌به ترا اتیلن گلایکول خالص باعث شده است که این دو ماده، جذب بهتری را نسبت به تتراتیلن گلایکول خالص انجام دهند.

۳-۲-۲ تأثیر نوع جاذب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

در شکل (۶) عمل‌کرد هر سه جاذب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه نشان داده شده است.

همان‌گونه که شکل (۶) نشان می‌دهد، در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه اثر گران‌روی به‌دلیل اغتشاش بیشتر در جاذب کم شده و به همین دلیل جاذب ترا اتیلن گلایکول بهترین عمل‌کرد را از خود نشان داده است. هم‌چنین توانسته رطوبت ورودی ۹۰٪ را به پایین‌تر از ۵٪ کاهش دهد که این نشان‌دهندهٔ قدرت بسیار بالای ترا اتیلن گلایکول در جذب بخار آب از هواست. با گذشت زمان به‌دلیل افزایش میزان آب موجود در جاذب و کاهش قدرت جذب جاذب، رطوبت موجود در هوای خروجی افزایش می‌یابد.



شکل ۶. تأثیر جاذب در جذب بخار آب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

Figure 6. Impact of absorbent on the water vapor absorption at 120 ml.min^{-1}.

۳-۲-۳ تأثیر نوع جاذب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

در شکل (۷) مقایسهٔ عمل‌کرد هر سه جاذب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷)، تترا اتیلن گلایکول بیشترین قدرت جذب را دارد و به‌دلیل دبی بالا و افزایش میزان آب موجود در هوای ورودی به برج در زمان ثابت، قدرت جذب نسبت به دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه کمتر است و جاذب در مدت زمان کمتری قدرت خود را از دست می‌دهد.

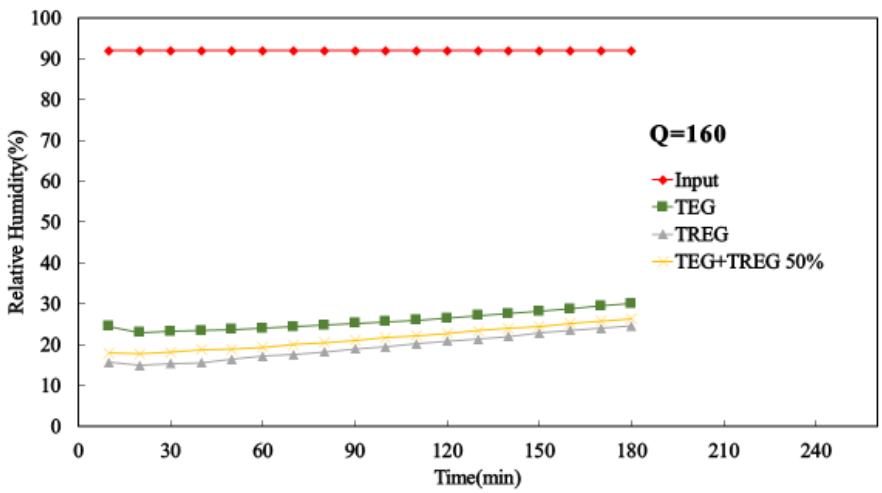
در ادامهٔ تحقیق میزان خلوص جاذب بررسی و مقایسه شد.

۳-۳ تأثیر خلوص جاذب

در جذب بخار آب از هوا، هرچه میزان خلوص جاذب بیشتر باشد فرایند جذب بهتر انجام می‌شود. در ادامه، هر دو جاذب با ۵ درصد وزنی آب، ترکیب و در هر سه دبی ۶۰، ۱۲۰و۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه آزمایش جذب انجام و نتایج ارائه شد.

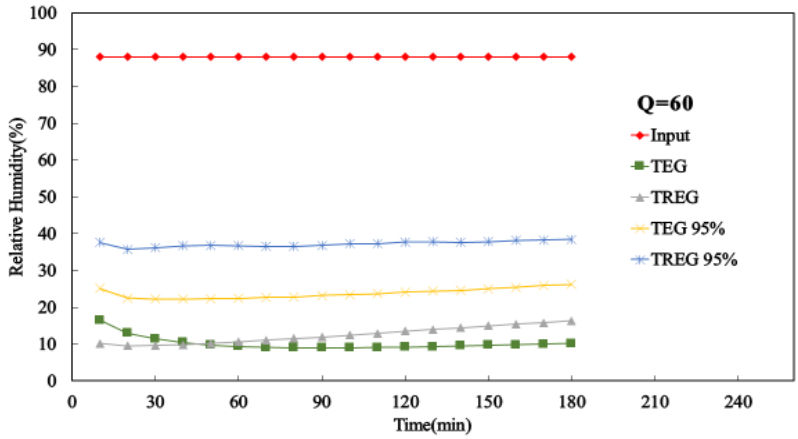
۳-۳-۱ تأثیر خلوص جاذب در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

در شکل (۸) تأثیر خلوص بر میزان جذب برای دو مادهٔ تری‌اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول با خلوص ۹۵ درصد نمایش داده شده است.



شکل ۷. تأثیر جاذب بر جذب بخار آب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

Figure 7. Impact of absorbent on the water vapor absorption at 160 ml.min^{-1}.



شکل ۸. تأثیر خلوص جاذب بر جذب بخار آب در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

Figure 8. Impact of absorbent purity on the water vapor absorption at 60 ml.min^{-1}.

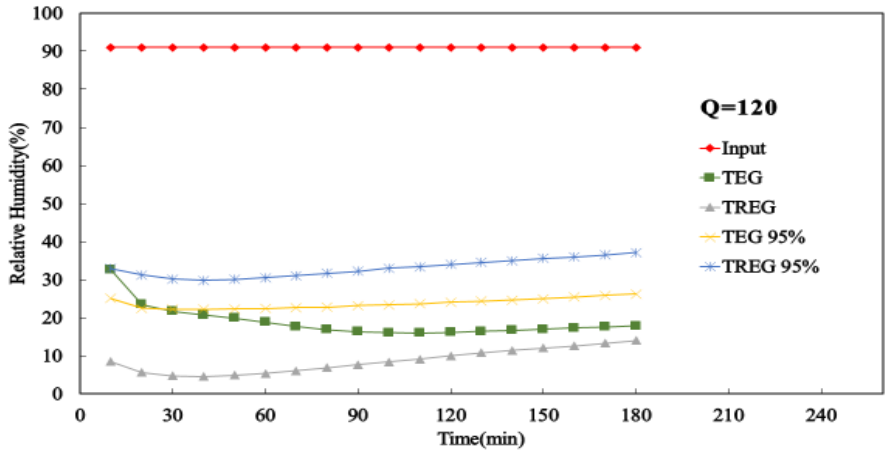
همان‌گونه که در شکل (۸) مشهود است، در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، ترکیب تری‌اتیلن گلایکول با آب، قدرت بیشتری در جذب نسبت‌به ترکیب تترا اتیلن گلایکول و آب از خود نشان داده است.

۳-۳-۲ تأثیر خلوص جاذب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

در شکل (۹) تأثیر خلوص بر میزان جذب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه برای دو مادهٔ تری‌اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول نشان داده شده است. در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه نیز همانند دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و آب عمل‌کرد بهتری نسبت به ترکیب تترا اتیلن گلایکول و آب از خود نشان داده است.

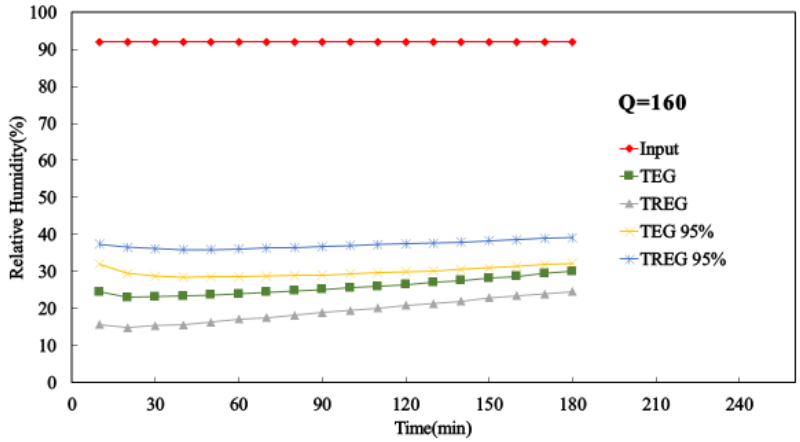
۳-۳-۳ تأثیر خلوص جاذب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

شکل (۱۰) تأثیر خلوص جاذب بر میزان جذب بخار آب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد.



شکل ۹. تأثیر خلوص جاذب بر میزان جذب بخار آب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

Figure 9. Impact of absorbent purity on the water vapor absorption at 120 ml.min^{-1}.



شکل ۱۰. تأثیر خلوص جاذب بر میزان جذب بخار آب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

Figure 10. Impact of absorbent purity on the water vapor absorption at 160 ml.min^{-1}.

با توجه به شکل (۱۰)، در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه نیز ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و آب عمل‌کرد بهتری در جذب بخار آب از هوا نسبت‌به ترکیب تترا اتیلن گلایکول و آب از خود نشان داد.

برای بررسی دلیل عمل‌کرد بهتر ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و آب، گران‌روی هر دو ترکیب بررسی شد. نتیجه نشان داد زمانی‌که تری‌اتیلن گلایکول با آب مخلوط می‌شود گران‌روی محلول به میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند؛ ولی این تغییر برای تترا اتیلن گلایکول بسیار ناچیز است. به همین دلیل در ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و آب، حباب‌های کوچک‌تر به تعداد بالا در برج جذب ایجاد شد که باعث جذب بهتر می‌شود.

در جدول (۲) اطلاعات به‌دست‌آمده از گران‌روی مواد ارائه شده است.

جدول ۲. گران‌روی جاذب‌ها.

Table 2. The viscosity of absorbents.

Materials	Viscosity (cP)
TEG	56.8
TREG	75.3
TEG 95%	47.95
TREG 95%	74.2

چنان‌که در جدول (۲) پیداست، گران‌روی تترا اتیلن گلایکول خالص حدود ۳۰٪ از تری‌اتیلن گلایکول خالص بیشتر است. این امر جذب بهتر تری‌اتیلن گلایکول خالص را در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه توجیه می‌کند.

هم‌چنین هنگامی‌که تری‌اتیلن گلایکول را با مقدار جزئی از آب مخلوط می‌کنیم گران‌روی آن حدود ۱۸٪ کاهش پیدا می‌کند. این امر موجب می‌شود تا حباب‌های ریزتری در برج جذب تشکیل شود. با افزایش تعداد حباب‌ها، سطح انتقال جرم افزایش می‌یابد و عمل جذب بهتر انجام می‌شود. این در صورتی است که با ترکیب تترا اتیلن گلایکول با مقدار مساوی آب، گران‌روی این ماده تنها حدود ۱/۵٪ کاهش می‌یابد و به همین دلیل در خلوص ۹۵٪ در تمامی دبی‌های آزمایش تری‌اتیلن گلایکول ۹۵٪ عمل‌کرد بهتری را از خود نشان داده است.

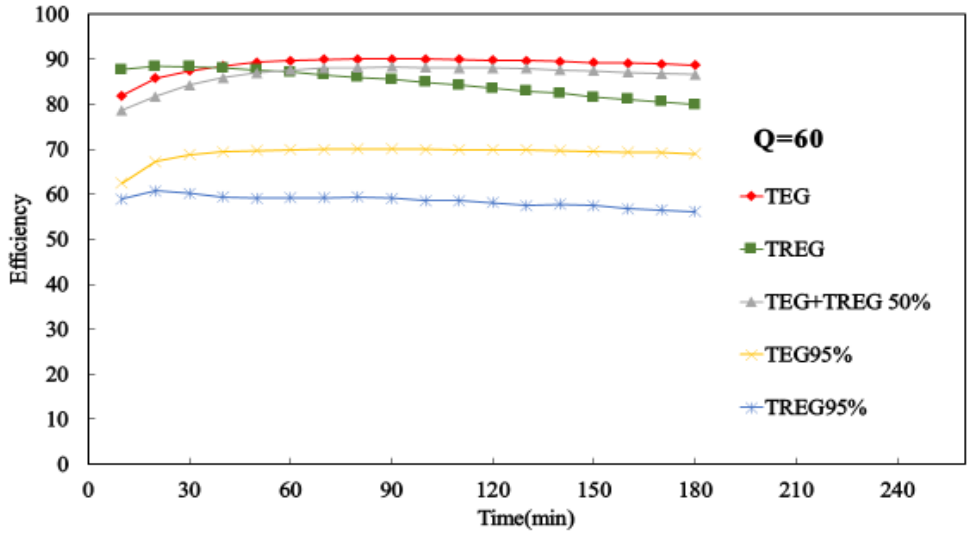
۳-۴ بازده جذب

بازده تمامی نتایج در دبی‌ها و جاذب‌های متفاوت حساب شد و در ادامه برای نتیجه‌گیری بهتر ارائه شده است.

۳-۴-۱ بازده جذب در دبی۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

بازده هر پنج جاذب که شامل تری‌اتیلن گلایکول خالص، تترا اتیلن گلایکول خالص، ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول با نسبت وزنی مساوی، تری‌اتیلن گلایکول با خلوص ۹۵٪ و تترا اتیلن گلایکول با خلوص ۹۵٪ در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در شکل (۱۱) ارائه شده است.

در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه بهترین عمل‌کرد را تری اتیلن گلایکول از خود نشان داده است که دلیل آن پیش‌تر توضیح داده شد.



شکل ۱۱. بازده کلی در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

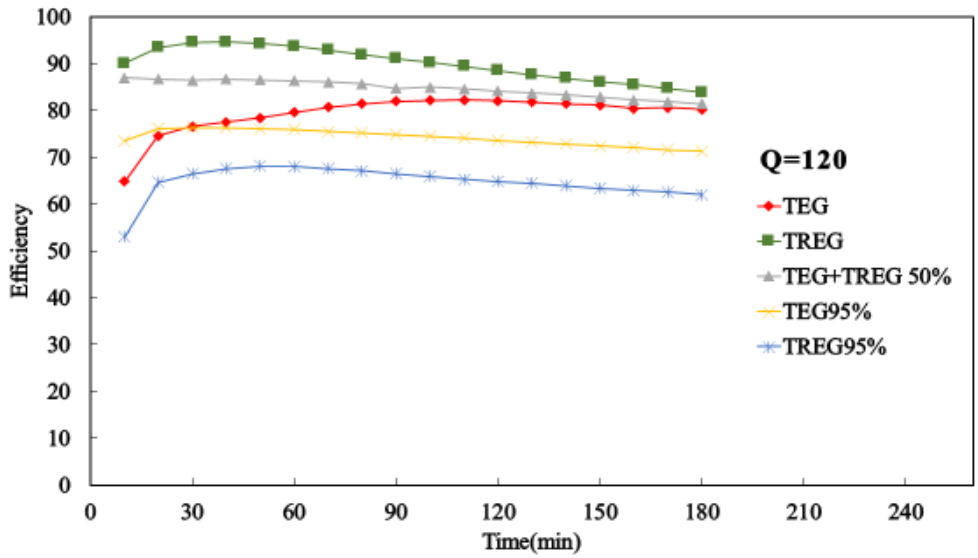
Figure 11. Overal efficiency at 60 ml.min^{-1}.

۳-۴-۲ بازده جذب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

بازده هر پنج جاذب این بار در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در شکل (۱۲) ارائه شد. در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه بهترین عمل‌کرد جذب را، تترا اتیلن گلایکول به خود اختصاص داده است و با بازده حدود ۹۵٪ در بیشترین مقدار خود عمل‌کرد بسیار بهتری نسبت به تری‌اتیلن گلایکول خالص از خود نشان داده است.

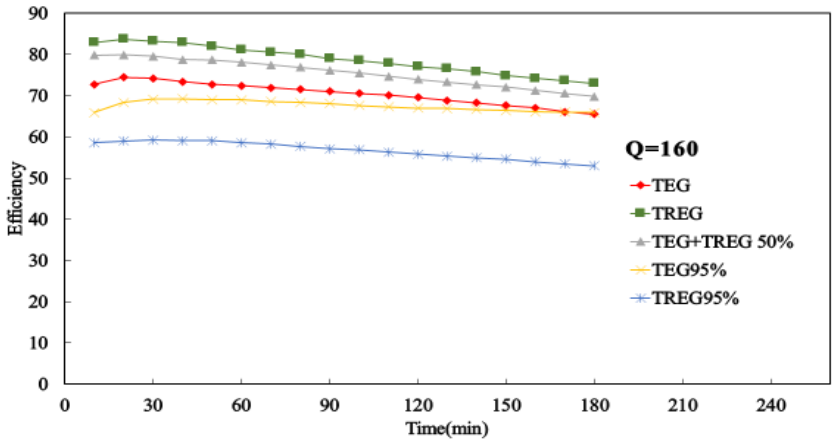
۳-۴-۳ بازده جذب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه

در مرحلهٔ آخر، بازده پنج جاذب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در شکل (۱۳) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه نیز تترا اتیلن گلایکول عمل‌کرد بهتری در جذب از خود نشان داد.



شکل ۱۲. بازده جذب در دبی ۱۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

Figure 12. Overal efficiency at 120 ml.min^{-1}.



شکل ۱۳. بازده جذب در دبی ۱۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه.

Figure 13. Overal efficiency at 160 ml.min^{-1}.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از یک برج تماس‌دهندهٔ حبابی از پنج جاذب- شامل تری‌اتیلن گلایکول خالص، تترا اتیلن گلایکول خالص، ترکیب تری‌اتیلن گلایکول و تترا اتیلن گلایکول با نسبت وزنی مساوی، تری‌اتیلن گلایکول با خلوص ۹۵٪ و تترا اتیلن گلایکول با خلوص۹۵٪ در دبی‌های ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌لیتر بر دقیقه- استفاده شد. بر اساس آزمایش‌ها، مشاهده شد که اگرچه جاذب تری‌اتیلن گلایکول عمل‌کرد بهتری در دبی ۶۰ میلی‌لیتر بر دقیقه از خود نشان داد؛ اما جاذب تترا اتیلن گلایکول عمل‌کرد بسیار بهتری در دبی‌های بالاتر داشت که این خود نشان از پتانسیل بالای این جاذب برای استفاده در جذب بخار آب موجود در گاز طبیعی استخراج‌شده از مخزن دارد.

مراجع

[1] Rahimpour, M., Saidi, M., Seifi, M., "Improvement of natural gas dehydration performance by optimization of operating conditions: A case study in Sarkhun gas processing plant", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 15, pp. 118-126, (2013).

[2] Hayhoe, K., Kheshgi, H. S., Jain, A. K., Wuebbles, D. J., "Substitution of natural gas for coal: climatic effects of utility sector emissions", Climatic Change, Vol. 54, No. 1, pp. 107-139, (2002).

[3] Shadanfar, H., Elhambakhsh, A., Keshavarz, P., "Air dehumidification using various TEG based nano solvents in hollow fiber membrane contactors", Heat and Mass Transfer, Vol. 5, pp. 1623–1631 (2021).

[4] Elhambakhsh, A., Ghanaatian, A., Keshavarz, P., "Glutamine functionalized iron oxide nanoparticles for high-performance carbon dioxide absorption", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 94, p. 104081, (2021).

[5] Elhambakhsh, A., Keshavarz, P., "Enhanced CO_2 capture efficiency applying amine-based nano magnetite/sulfinol-M nano solvents at high pressures", Environmental Science and Pollution Research, Vol. 28, No. 3, pp. 3455-3464, (2021).

[6] Hubbard, R., "Recent developments in gas dehydration and hydrate inhibition", SPE Gas Technology Symposium, (1991).

[7] Chebbi, R., Qasim, M., Jabbar, N. A., "Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas", Energy Reports, Vol. 5, pp. 723-732, (2019).

[8] Grosso, S., "Glycol choice for gas dehydration merits close study", (1978).

[9] Chung, T. -W., "Predictions of moisture removal efficiencies for packed-bed dehumidification systems", Gas separation & purification, Vol. 8, No. 4, pp. 265-268, (1994).

[10] Zurigat, Y., Abu-Arabi, M., Abdul-Wahab, S., "Air dehumidification by triethylene glycol desiccant in a packed column", Energy Conversion and Management, Vol. 45, No. 1. pp. 141-155, (2004).

[11] Paymooni, K., Rahimpour, M. R., Raeissi, S., Abbasi, M., Baktash, M. S., "Enhancement in triethylene glycol (TEG) purity via hydrocarbon solvent injection to a TEG+ water system in a batch distillation column", Energy & Fuels, Vol. 25, No. 11. pp. 5126-137, (2011).