

Performance assessment of the hybrid nanofluid mixture of iron oxide nanoparticles and graphene nanosheets in the elimination of CO₂ from the air, using a venturi scrubber

A.A. Jamshidi¹, Sh. Shahsavari^{1,*}, F. Farahmand Ghavi², A. Kazemi³, F. Azizinejad²

1- Department of Chemical Engineering, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran

2- Department of Chemistry, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran

3- Department of Chemical Engineering and Nanopolymer, Tehran Petroleum Industry Research Institute, Iran

Abstract

Research subject: The combustion of fossil fuels to supply energy produces large amounts of carbon dioxide. Carbon dioxide emissions have led to rising global temperature and many natural disasters, including floods, hurricanes, rising sea levels, and widespread droughts, that threaten ecological systems and human life. Therefore, the uptake and removal of carbon dioxide from sources or the environment play a key role in countering the threat of global warming.

Research approach: In this study, a venturi scrubber was utilized to eliminate CO₂ from the air stream on a semi-industrial scale. The effects of different parameters including inlet air flow rate to the venturi scrubber, solvent flow rate, and solvent loss during the scrubbing process were investigated on CO₂ absorption by a nanofluid solvent containing iron oxide/water at the presence of tetramethylammonium hydroxide (TMAH) as a surface-active material.

Main results: The surface-active material of TMAH prevents the agglomeration of nanoparticles in the base fluid and stabilizes the fluid. The maximum efficiency of absorption and the highest molar flux of CO₂ were achieved when iron oxide nanoparticles were used along with graphene nanosheets with the ratios of iron oxide nanoparticles (25%) and graphene nanosheets (75%) at the presence of TMAH surface-active material due to their nature. The reason is the better agitation (of the solution) by iron oxide nanoparticles that results in an increased displacement of graphene nanosheets. The random Brownian movements of nanoparticles create micron size eddies that increase mass transfer at the gas-liquid interface. In addition, molar flux and CO₂ gas absorption efficiency decreased by increasing the concentration of nanoparticles.

key words

Hybrid nanofluid

Venturi scrubber

Gas absorption

Iron oxide nanoparticles

Graphene nanosheets

*To whom correspondence should be addressed:
sh.shahsavari@srbiau.ac.ir

ارزیابی عملکرد نانوسیال هیبریدی نانواکسید آهن و نانورق گرافن برای حذف دی‌اکسید کربن از هوا به وسیله شوینده ونتوری

علی اکبر جمشیدی^۱، شاداب شهسواری^{۱*}، فرهنگ فرهمند قوی^۲، عباس کاظمی^۳
فریبرز عزیزی نژاد^۲

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

۲- گروه شیمی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

۳- گروه مهندسی شیمی و نانوپلیمر، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: احتراق سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی، مقدار زیادی دی‌اکسید کربن تولید می‌کند. انتشار گاز دی‌اکسید کربن منجر به افزایش دمای زمین و بروز بلایای طبیعی زیادی از جمله سیل، طوفان، افزایش سطح آب دریاها و خشکسالی گسترده شده که سامانه‌های اکولوژیکی و حیات انسان را تهدید می‌کند. بنابراین جذب و حذف دی‌اکسید کربن از منابع یا محیط، نقش کلیدی در مقابله با تهدید گرمایش جهانی دارد.

روش تحقیق: در این مطالعه برای حذف گاز دی‌اکسید کربن از جریان هوا از دستگاه شوینده ونتوری در مقیاس نیمه‌صنعتی استفاده شده است. نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دبی هوای ورودی بر شوینده ونتوری، دبی حلال، میزان هدررفت حلال در فرایند شستشو، جذب دی‌اکسید کربن به کمک حلال نانوسیال آب/اکسید آهن- نانورقه‌های گرافن در حضور ماده فعال سطحی تترامتیل آمونیوم هیدروکسید (TMAH) مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج اصلی: ماده فعال سطحی TMAH مانع از به هم چسبیدن نانوذرات در سیال پایه و موجب پایداری آن‌ها می‌شود. مقدار بیشینه بازده جذب و شار مولی انتقال جرم گاز دی‌اکسید کربن توسط نانوذرات اکسید آهن و نیز نانورقه‌های گرافن برای مخلوط نانوذرات اکسید آهن (۲۵٪) و نانورق گرافن (۷۵٪) در حضور ماده فعال سطحی TMAH نسبت به حالت‌های دیگر به دلیل ماهیت آن‌ها بیشتر است؛ زیرا نانوذرات اکسید آهن سبب هم‌زدگی بهتر و در نتیجه افزایش جابه‌جایی نانورقه‌های گرافن می‌شوند. حرکت‌های کاتوره‌ای براونی نانوذرات موجب گردابه‌های میکرونی شده که باعث افزایش انتقال جرم در سطح گاز - مایع می‌شود. همچنین مقدار شار مولی و بازده جذب گاز دی‌اکسید کربن با افزایش غلظت نانوذرات به دلیل افزایش قابل توجه گرانش نانوسیال کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

نانوسیال هیبریدی

شوینده ونتوری

جذب گاز

نانوذرات اکسید آهن

نانورقه‌های گرافن

*مسئول مکاتبات:

sh.shahsavari@srbiau.ac.ir

۱ مقدمه

آلودگی‌های زیست‌محیطی نظیر آلودگی خاک، آلودگی آب و آلودگی هوا به دلیل توسعه سریع صنایع همواره بقای جهان را تهدید می‌کنند. از این میان، آلودگی هوا یکی از دغدغه‌های اصلی امروزه بشر است. آلودگی هوا باعث مشکلات بهداشتی، مرگ‌ومیر، آسیب خاک و غیره می‌شود. علاوه بر این، آلودگی هوا منجر به بروز بیماری‌های تنفسی و مشکلات قلبی عروقی می‌شود. آلودگی‌های هوا ناشی از نیروگاه‌های زغال سنگ، وسایل نقلیه با سوخت فسیلی، زباله‌سوزی، کارخانه سیمان، صنعت فولاد، صنعت کاغذ و نفت است. از طرفی با توجه به تأمین ۸۵ درصدی انرژی جهان با سوخت‌های فسیلی، احتراق آن‌ها مقدار زیادی دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند. همچنین نیروگاه‌های زغال سنگ یکی از منابع اصلی تأمین تقاضای انرژی جهان محسوب می‌شود که می‌تواند سهم قابل توجهی در آلودگی هوا و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای اسیدی داشته باشد.

در دو دهه اخیر گازهای گلخانه‌ای و اثر گلخانه‌ای به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است در میان تمام گازهای گلخانه‌ای، گاز دی‌اکسیدکربن بزرگ‌ترین عامل افزایش دمای زمین است. با توجه به افزایش رو به رشد غلظت جهانی دی‌اکسیدکربن در جو، تأثیر انتشار گاز دی‌اکسیدکربن بر آب‌وهوای جهانی محسوس‌تر شده است؛ به‌طوری‌که بیش از ۶۰٪ گرمایش جهانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش دمای زمین باعث بروز بلایای طبیعی زیادی از جمله سیل، طوفان، افزایش سطح آب دریاها و خشکسالی گسترده شده که سامانه‌های اکولوژیکی و حیات انسان را تهدید می‌کند؛ لذا جذب و حذف آن از منابع یا محیط، نقش کلیدی در مقابله با تهدید گرمایش جهانی دارد [۱].

روش‌های مختلفی به‌منظور تقلیل اثرات مخرب دی‌اکسیدکربن بر محیط‌زیست از جمله جداسازی با فرایندهای غشایی، تقطیر جریان گاز و جداسازی توسط جاذب‌ها ارزیابی شده است. در جداسازی غشایی از غشای تراوا نسبت به گاز از جنس پلیمر، فلز یا سرامیک استفاده می‌شود که گزینش‌پذیری آن به نوع گاز و ماهیت مواد مورد استفاده بستگی دارد. اگرچه فرایند غشایی برای جداسازی دی‌اکسیدکربن از گاز طبیعی استفاده می‌شود؛ اما هنوز به لحاظ اقتصادی برای جداسازی دی‌اکسیدکربن حاصل از دودکش کارخانه‌ها به‌صرفه نیست [۲]. درحالی‌که تقطیر گاز و جداسازی به‌وسیله میعان برای خلوص دی‌اکسیدکربن بیش از ۹۰٪ و در دمای پایین قابل استفاده است [۳]. در جداسازی به‌وسیله جاذب و حلال‌ها، گاز دی‌اکسیدکربن توسط جذب‌کننده مایع یا جامد جذب

شده و سپس در سامانه بازیابی، دی‌اکسیدکربن از جاذب جدا می‌شود که بسته به نوع جاذب و سازوکار جذب می‌تواند متفاوت باشد. در جاذب‌های جامد با سازوکار PSA (Pressure Swing Adsorption) و TSA (Swing Adsorption) جداسازی دی‌اکسیدکربن به ترتیب در دما و فشار ثابت صورت می‌پذیرد [۴،۵]. جداسازی دی‌اکسیدکربن با جاذب مایع بسته به نوع حلال جذب‌کننده به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی انجام می‌شود [۶،۷]. این روش‌ها با محدودیت‌هایی از قبیل بزرگی تجهیزات مصرفی، مصرف انرژی بالا، هزینه عملیاتی بالا و قیمت بالای خرید و امحای حلال جاذب پس از اشیاع شدن مواجه هستند که بازدهی این روش‌ها و دستیابی به حالت بهینه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۸].

با توجه به مشکلات ناشی از استفاده از حلال‌های شیمیایی و نیز استفاده از میکروذرات، نانوسیال به‌عنوان جاذب جدید برای غلبه بر برخی محدودیت‌ها و افزایش نرخ جذب پیشنهاد شده است. برای اولین بار کریشنامورتی و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۶ تأثیر حضور نانوذرات در سیال پایه بر بازده جذب را بررسی کرده‌اند که منجر به افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود. جذب گازهای اسیدی به‌خصوص دی‌اکسیدکربن فرایندی است که به‌شدت مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این فرایند معمولاً از سیال پایه آب برای جذب دی‌اکسیدکربن و جداسازی آن از گاز سنتز استفاده می‌شود. پارک (Park) و همکارانش [۱۰] فرایند جذب دی‌اکسیدکربن در محلول کلونییدی سیلیکا را مورد ارزیابی قرار داده و معادلات بدون بعد برای محاسبه ضریب انتقال جرم را گزارش کرده‌اند. در ادامه آن‌ها در سال ۲۰۰۷ با استفاده از سیال پایه آمینی از جمله مونواتانول آمین معادله تعیین ضریب انتقال جرم را توسعه داده‌اند [۱۱،۱۲]. همچنین در این زمینه می‌توان به کارهای صورت گرفته توسط کیم و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۸ اشاره کرد.

در این مطالعه بازده حذف گاز دی‌اکسیدکربن از جریان هوا از دستگاه شوینده و نتوری ارزیابی شده است و در این راستا تأثیر ماده فعال سطحی ترماتیل‌آمونیم هیدروکسید برای حصول نانوسیال کارآمد بررسی شده است؛ همچنین تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دبی هوای ورودی به شوینده و نتوری و دبی حلال مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای عملیاتی بر توزیع قطرات حلال، افت فشار در گلوگاه شوینده و نتوری، میزان هدررفت حلال ارزیابی شده است.

۲ بخش تجربی

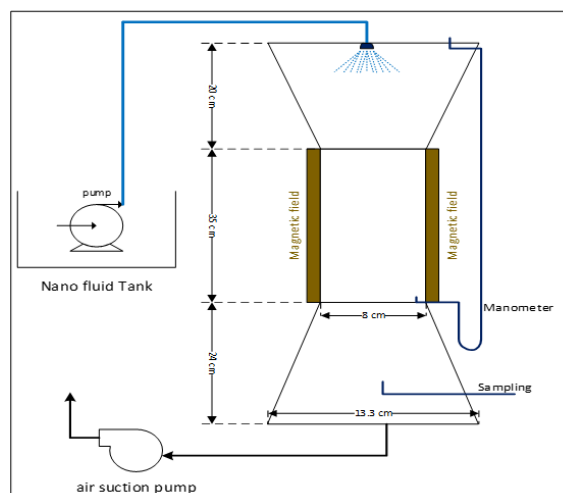
۲-۱ مواد

اوریفیس ۸ cm است. در این سامانه در انتهای ونتوری مکنده هوا برای هدایت جریان هوا به داخل ونتوری مجهز به وارونگر (Inverter) (تنظیم دور مکنده) برای تنظیم دبی هوا استفاده شده است. همچنین به منظور انتقال نانوسیال یا آب یک پمپ شناور به کار گرفته شده است که برای اندازه گیری دبی جریان آن از روتامتر استفاده شده است. در این سامانه برای اعمال میدان مغناطیسی از سیم پیچ الکتریکی با ۳۴۰ دور با شدت جریان بین ۰/۵ تا ۸ آمپر و کمینه اختلاف پتانسیل ۲۶ ولت در خارج ونتوری در قسمت گلوگاه برای ایجاد میدان مغناطیسی در مرکز ونتوری استفاده شده است. برای تنظیم انرژی الکتریکی مورد نیاز سامانه از اتو ترانس با بیشینه جریان متناوب ۸ آمپر استفاده شد همچنین برای تأمین میدان مغناطیسی

برای تهیه نانوسیال هیبریدی از نانوذرات اکسید آهن و نانورقه های گرافن از شرکت نانومواد تحقیقاتی امریکا (US Research Nanomaterials, Inc.) به ترتیب با خلوص ۹۹/۱٪ و ۹۶/۴٪ و نیز از ماده فعال سطحی تترامتیل آمونیوم هیدروکسید (Tetramethyl ammonium hydroxide) از شرکت مرک آلمان استفاده شد. آب دو بار تقطیر در تمامی آزمایش ها برای تهیه نانوسیال به کار گرفته شده است.

۲-۲ تهیه نانوسیال هیبریدی

در این مطالعه نانوسیال ها در غلظت های متفاوت با رقیق سازی نانوسیال اولیه با غلظت بالاتر حاصل می شود. با توجه به مطالعات گزارش شده برای انجام این پژوهش، نانوسیال ۰/۵ کسر وزنی به عنوان محلول مرجع غلیظ انتخاب شد. بدین منظور برای



شکل ۱ طرحواره سامانه شوینده ونتوری

Fig. 1 Scheme of the venturi detergent system

متناوب، از ترانس افزایش دهنده با قابلیت افزایشی ولتاژ و آمپراژ ۱ به ۵ برای تأمین شدت جریان بالا استفاده شده است. برای بازیابی و جداسازی حلال حمل شده از شوینده ونتوری یا محاسبه میزان هدررفت حلال، سیکلون جداسازی در این سامانه قرار داده شده است. برای محاسبه افت فشار سامانه، مانومتر بین ورودی دستگاه و انتهای گلوگاه جریان هوا تعبیه شده است. همچنین برای نمونه گیری لوله ای به قطر ۵ میلی متر در سامانه در نظر گرفته شده است.

۲-۴ اندازه گیری و مشخصه یابی

۲-۴-۱ محاسبه جذب گاز دی اکسید کربن

در این مطالعه برای محاسبه مقدار گاز دی اکسید کربن از روش تیتراسیون استفاده شد. بدین منظور ابتدا به ۳۰ cc از حلال جمع شده در سیکلون سامانه شوینده ونتوری سود ۰/۱ مولار اضافه کرده تا محلول به دلیل تبدیل شدن دی اکسید کربن به کربنات $\text{CO}_3^{(2-)}$ ، دارای

تهیه نانوسیال ۰/۵ کسر وزنی ابتدا هر یک از نانوذرات توزین شده و سپس به آب دو بار تقطیر شده اضافه می شود. برای حاصل شدن نانوسیال یکنواخت آن را به مدت ۴ ساعت با سرعت گردش ۶۵۰ دور بر دقیقه هم زده می شود. نانوسیال یکنواخت به دست آمده در معرض امواج فراصوت با دوره تناوب ۰/۵ ثانیه و شدت ۶۰ به مدت ۱ ساعت با فاصله زمانی ۲۰ دقیقه قرار داده می شود. همچنین به منظور تهیه نانوسیال حاوی ماده فعال سطحی و یکسان بودن نمونه های مورد ارزیابی بر اساس مطالعات گزارش شده، حدود یک بیستم مجموع جرم نانوذرات، ماده فعال سطحی TMAH به نانوسیال غلیظ اولیه اضافه می شود.

۲-۳ سامانه شوینده ونتوری مورد استفاده

شکل ۱ طرحواره دستگاه شوینده ونتوری در مقیاس نیمه صنعتی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد. ارتفاع گلوگاه ونتوری ۳۵ cm و قطر داخلی

۲-۴-۴ اندازه‌گیری هدررفت حلال

محاسبه میزان هدررفت حلال مورد استفاده در حذف دی‌اکسیدکربن در شوینده و نتوری بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور در این مطالعه با اندازه‌گیری میزان رطوبت و سرعت هوا در ورودی و خروجی شوینده و نتوری با دستگاه بادسنج، اندازه‌گیری و بر اساس معادله زیر میزان هدررفت حلال (سانتی‌مترمکعب بر دقیقه) محاسبه می‌شود.

$$\text{loss of solvent} = 6 \times 10^7 Q_{\text{air}} \rho (H_o - H_i) \quad (5)$$

که Q_{air} دبی حجمی هوای خشک (m^3/s)، ρ چگالی هوای خشک (kg/m^3) و به ترتیب H_o و H_i رطوبت هوا در ورودی و خروجی و نتوری است.

۳ نتایج و بحث

۳-۱-۱ ارزیابی پراکندگی نور دینامیکی (DLS)

در این مطالعه از روش پراکندگی نور برای اندازه‌گیری قطر نانوذرات موجود در سیال پایه استفاده شد. آزمایش‌های ارزیابی پراکندگی نور دینامیکی برای غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی نانوسیال به منظور جلوگیری از انحراف داده‌ها از مقادیر واقعی و نیز کاهش خطای اندازه‌گیری ناشی از تداخل نانوذرات انجام شد. تمامی آزمون‌های ارزیابی پراکندگی نور دینامیکی نانوسیال‌ها بعد از گذشت مدت زمان ۱۰ دقیقه پس از آماده‌سازی نمونه نانوسیال با امواج فراصوت صورت پذیرفت. مقدار اندازه ذره و شاخص پراکندگی برای نانوسیال در غیاب ماده فعال سطحی TMAH به ترتیب ۲۳۴/۶ دسی‌نانومتر و ۰/۴۵۳ و نیز برای نانوسیالات در حضور ماده فعال سطحی TMAH به ترتیب ۲۴/۱ دسی‌نانومتر و ۰/۱۸ است. نتایج به‌دست‌آمده برای توزیع اندازه نانوسیال نشان می‌دهد که قطر متوسط نانوذرات در سیال پایه در غیاب ماده فعال سطحی TMAH دارای بیشترین فراوانی در بازه ۱۰۰-۱۰۰۰ دسی‌نانومتر است که حاکی از تشکیل توده‌های بزرگ از نانوذرات در سیال پایه بوده و در نتیجه منجر به افزایش ناپایداری نانوسیال می‌شود. در مقابل برای نانوذرات پوشش‌یافته به ماده فعال سطحی TMAH در سیال پایه، نتایج حاکی از توزیع اندازه ذرات با بیشترین فراوانی در بازه ۱۰-۴۰ دسی‌نانومتر است. این عدم کلوخه شدن و تشکیل توده‌های بزرگ نانوذرات به افزودن ماده فعال سطحی TMAH نسبت داده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اندازه نانوذرات در محیط مایع آبی در حضور ماده فعال سطحی TMAH کمتر است یا به عبارت دیگر، اندازه نانوذرات یکنواخت‌تر و نزدیک به مقدار متوسط است که نشان‌دهنده پایداری نانوسیال و عدم

خاصیت بازی شود. سپس توسط اسید کلریدریک ۰/۱ مولار محلول تا حصول pH کمتر از ۳ تیتیر می‌شود که نمودار حاصل از pH دارای قله‌هایی خواهد بود. نهایتاً برای تعیین میزان دی‌اکسیدکربن جذب‌شده از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$[CO_2] = \frac{(V_2 - V_1) \times M}{\bar{V}} \quad (1)$$

که در این رابطه V_1 و V_2 به ترتیب حجم اسیدکلریدریک ۰/۱ مولار مصرفی متناظر با قله‌های اول و دوم در نمودار pH تیتراسیون است. M مولاریته اسید و $\bar{V}$ حجم نمونه است.

۲-۴-۲ بازده فرایند حذف گاز دی‌اکسیدکربن و شار مولی متوسط

برای بررسی تأثیر نانوذرات و ترکیب آن‌ها بر فرایند حذف دی‌اکسیدکربن، بازده فرایند ($\eta(\%)$) بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\eta(\%) = \beta \left(\frac{C_{l,o}}{C_{CO_2,i}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که $\beta = Q_l/Q_g$ نسبت دبی جریان حلال به دبی جریان گاز دی‌اکسیدکربن، $C_{l,o}$ غلظت دی‌اکسیدکربن در حلال خروجی از شوینده و نتوری (مول بر لیتر) و $C_{g,in}$ غلظت گاز دی‌اکسیدکربن در ورودی و نتوری شوینده (مول بر لیتر) است. شار مولی متوسط (N_{Ave}) به‌صورت تابعی از غلظت دی‌اکسیدکربن جذب شده، t_c مدت زمان در تماس بودن حلال و گازها و d_p قطر قطرات حلال در شوینده و نتوری به‌صورت زیر است.

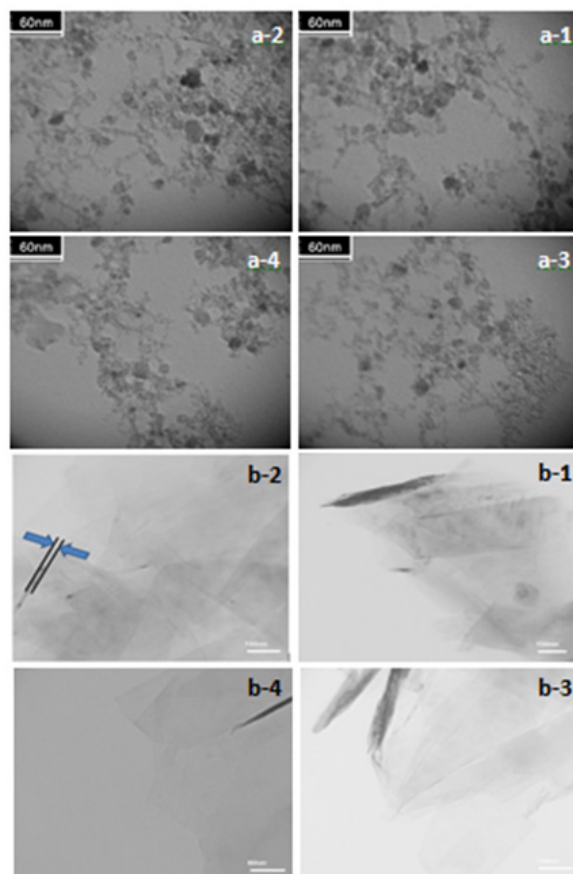
$$N_{Ave} = \frac{C_{l,o}}{t_c} d_p \quad (3)$$

۲-۴-۳ روش تعیین ضریب انتقال جرم

در این مطالعه از رابطه توسعه‌داده‌شده توسط اشتاینبرگر و تربال برای عدد شرود (Sh) استفاده شد و ضریب انتقال جرم از عدد شرود محاسبه می‌شود [۱۴-۱۷].

$$Sh = \frac{k_g R T d_p}{D_g} = 2 + 0.347 (Re \cdot Sc^{0.5})^{0.62} \quad (4)$$

که k_g ضریب انتقال جرم برای دی‌اکسیدکربن در فاز گاز، D_g ضریب نفوذ دی‌اکسیدکربن در حلال (برابر با ضریب نفوذ دی‌اکسیدکربن در آب فرض شده)، T دما، R ثابت گاز، Re و Sc که به ترتیب عدد رینولدز و عدد اشمیت هستند.



شکل ۲ آزمون TEM از (الف) نانوذرات اکسید آهن و (ب) نانورقه‌های گرافن
Fig. 2 TEM analysis of (a) iron oxide nanoparticles and (b) graphene nanoparticles

نتایج به‌دست‌آمده، افزودن ماده فعال سطحی TMAH سبب افزایش بیش از ۳ برابری پتانسیل زتا می‌شود که این افزایش قابل توجه بار سطحی منفی، منجر به یکنواختی بهتر توزیع نانوذرات در سیال پایه شده و از انباشگی آن‌ها جلوگیری می‌کند.

۲-۳ آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission electron microscope)

در این مطالعه برای تشخیص ساختار نانوذرات اکسید آهن و نیز نانورقه‌های گرافن بر حسب مورفولوژی، هندسه، قطر و اندازه نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شد [۱،۲]. بدین منظور براساس متون علمی گزارش شده، نانوذرات اکسید آهن یا نانورقه‌های گرافن مورد استفاده در این مطالعه را با افزودن به اتانول به میزان ۰/۰۰۰۱٪ جرمی رقیق و به روی صفحه گرافیت کاملاً صاف (با برجستگی‌های کمتر از ۲ نانومتر) به اندازه‌ی تقریبی ۰/۱ سی‌سی منتقل می‌شود. پس از تبخیر کامل اتانول، آزمون TEM بر آن انجام شد. در این آزمون، ساختار نانوذرات با تابش پرتو الکترونی بر سطح گرافیت تشخیص داده شد [۱۵]. با استفاده از مناطقی که تابش الکترون توسط نانوذرات جذب شده است و مناطقی که تابش عبور می‌کند (سطح گرافیت) و مقیاس موجود در عکس‌های TEM

تشکیل توده‌های بزرگ نانوذرات در سیال پایه است. به‌طور مشابه در مطالعه تجربی جذب گاز دی‌اکسید کربن با نانوذرات ترکیبی نانواکسید نیکل و نانولوله کربنی نتایج بهتر از نظر توزیع اندازه ذرات در حضور ماده فعال سطحی SDS (Sodium dodecyl sulfate) و Cetyl CTAB (trimethyl ammonium bromide) حاصل شده است [۱۴].

همچنین اندازه‌گیری میزان بار سطحی نانوذرات اکسید آهن و نیز نانورقه‌های گرافن به‌وسیله آزمون پتانسیل زتا می‌تواند شاخصی برای پایداری آن‌ها باشد. در صورت یکسان بودن بار سطحی نانوذرات به دلیل ایجاد نیروی دافعه الکترواستاتیکی از به هم پیوستگی آن‌ها جلوگیری می‌کند. بنابراین هرچه میزان بارهای سطحی نانوذرات بیشتر باشد، میزان پایداری افزایش و کلوخه‌شدن کاهش می‌یابد. تمامی آزمون پتانسیل زتای نانوذرات پس از گذشت مدت زمان ۳۰ دقیقه از تهیه آن انجام شد و برای آزمون از ناحیه میانی ظرف حاوی نانوذرات نمونه‌گیری شده است. پتانسیل زتای نانوذرات در محیط سیال پایه در حضور و غیاب ماده فعال سطحی TMAH به ترتیب ۱۰۷/۶- و ۳۴- میلی‌ولت برای نانوذرات اکسید آهن ۹۸/۶- و ۳۶- میلی‌ولت برای نانورقه‌های گرافن است. با توجه به

می‌شود در تمامی حالت‌ها برای نانوسیال حاوی نانوذرات به‌صورت مجزا یا ترکیبی با نسبت‌های مختلف با افزودن ماده فعال سطحی TMAH بازده جذب افزایش می‌یابد. ماده فعال سطحی TMAH با پوشاندن سطح نانوذرات سبب افزایش بار سطحی و در نتیجه قطبیت بیشتر می‌شود که با توجه به ماهیت قطبی گاز اسیدی دی‌اکسید کربن میزان جذب نانوذرات پوشش یافته با ماده فعال سطحی TMAH افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که برای غلظت وزنی ۰/۱، ۰/۵ و ۱ به ترتیب برای نانوسیال حاوی ذرات Fe_3O_4 و نانورق گرافن تقریباً ۱۰ و ۵ درصد افزایش بازده حذف حاصل شد و به‌طور مشابه در همین غلظت‌ها افزایش ۲ تا ۳٪ برای نانوسیال ترکیبی با نسبت‌های مختلف مشاهده شده است.

همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش کسر وزنی نانوذرات در سیال پایه میزان جذب دی‌اکسید کربن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. برای نانوذره Fe_3O_4 در غیاب و حضور ماده فعال سطحی TMAH کسر وزنی بهینه ۰/۵ است؛ درحالی‌که برای نانورق گرافن غلظت بهینه کسر وزنی ۰/۱ است. یعنی عملکرد نانورق‌های گرافن در جذب دی‌اکسید کربن بسیار بهتر بوده است که این امر از تفاوت در ماهیت دو نانوذره ناشی می‌شود؛ زیرا نانورق گرافن دارای پهنای بیشتری بوده و لذا سطح بیشتری را برای جذب دی‌اکسید کربن ایجاد می‌کند اما در غلظت‌های بالاتر به دلیل مانعیت ایجادشده برای جابه‌جایی نانورق‌های گرافن بازده جذب کاهش می‌یابد. اما برای نانوسیال

نانوذرات، شکل و مورفولوژی، هندسه و همچنین قطر و اندازه نانوذرات تعیین شد. تصاویر حاصل از آزمون TEM برای نانوذرات اکسید آهن و نیز نانورق‌های گرافن به ترتیب در شکل ۲ نشان داده شده است.

تصاویر TEM نانوذرات اکسید آهن نشان می‌دهد متوسط اندازه قطر نانوذرات اکسید آهن در این پژوهش در حدود ۱۰ الی ۳۰ نانومتر است. بر این اساس می‌توان به این نتیجه رسید که شکل نانوذرات اکسید آهن موجود در سیال به‌صورت تقریباً کروی بوده که بر گرانیوی، خواص هیدرودینامیکی و فیزیکی نانوسیال و در نتیجه خاصیت جذب گاز بسیار موثر است. همچنین با توجه به تصاویر TEM شکل نانورق‌های گرافن در این مطالعه به صورت ورقه‌هایی بسیار پهن‌آور بوده که بر گرانیوی نانوسیال تأثیرگذار است و تقریباً ضخامت متوسط نانورق‌های کربنی در حدود ۱۰ الی ۳۰ نانومتر است.

۳-۳ بررسی غلظت بهینه نانوسیال و تأثیر ماده فعال سطحی TMAH

در این مطالعه جهت تعیین بهینه غلظت و نسبت ترکیب نانوذرات و نیز تأثیر ماده فعال سطحی TMAH بر عملکرد نانوسیال، آزمون جذب دی‌اکسید کربن به‌وسیله نانوسیال‌ها در شوینده و نتوری انجام شد که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. بدین‌منظور تمامی آزمایش‌ها در دبی نانوسیال $10^{-5} \times 3/33$ مترمکعب بر ثانیه، دبی جریان هوای $0/08$ مترمکعب بر ثانیه و غلظت دی‌اکسید کربن $10^{-3} \times 2/55$ مول بر مترمکعب در جریان ورودی صورت گرفت. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده

جدول ۱ بازده جذب گاز دی‌اکسید کربن توسط نانوذرات بر حسب غلظت‌های متفاوت
Table 1 Efficiency of carbon dioxide adsorption by nanoparticles in different concentrations

Nanofluid	Weight percent						
	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1	5
Fe_3O_4	26.65	73.66	69.1	71.46	74.72	73.41	72.27
Fe_3O_4 with TMAH	79.68	56.71	80.75	79.59	82.81	81.83	77.76
Graphene	79.94	81.57	83.69	86.96	84.84	83.53	82.71
Graphene with TMAH	83.37	86.30	88.59	91.04	87.77	85.98	0.85
Graphene+ Fe_3O_4 (1:1)	77.98	79.45	82.06	0.85	83.69	81.90	79.94
Graphene+ Fe_3O_4 (1:1) with TMAH	80.43	81.41	83.37	86.96	86.30	85.81	84.67
Graphene+ Fe_3O_4 (1:3)	84.67	86.79	89.08	92.67	90.22	88.10	86.47
Graphene+ Fe_3O_4 (1:3) with TMAH	86.63	89.57	91.85	94.46	92.50	91.04	88.10
Graphene+ Fe_3O_4 (3:1)	73.58	75.05	76.68	78.64	81.74	76.68	73.74
Graphene+ Fe_3O_4 (3:1) with TMAH	75.05	76.84	78.96	81.08	83.53	77.98	72.11

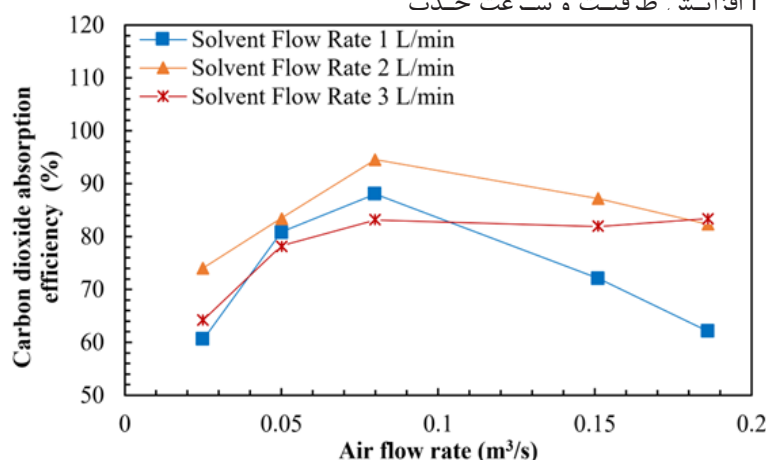
شد. مقدار نسبت دی اکسید کربن به هوای ورودی ۱:۱۵ در نظر گرفته شد و نتایج در شکل ۳ ارائه شده است. همان طور که شکل ۳ مشاهده می شود با افزایش دبی هوای ورودی به شوینده و نتوری مقدار بازده جذب به مقدار بیشینه رسیده و سپس کاهش می یابد. همچنین در غیاب میدان مغناطیسی با افزایش دبی حلال از ۱ به ۲ لیتر بر دقیقه بازده برای تمامی دبی های هوای ورودی افزایش یافته و برای افزایش دبی حلال از ۲ به ۳ لیتر بر دقیقه مقادیر بازده جذب گاز دی اکسید کربن کاهش می یابد که به مدت زمان تماس دو سیال گاز و حلال و همچنین رژیم جریان مرتبط است. برای دبی جریان حلال کم، با توجه به قطر متوسط کم قطرات حلال، سطح تماس ما بین حلال و نیز هوا کاهش می یابد؛ اما با افزایش دبی حلال قطرات حلال کوچک تر شده و می تواند سطح تماس بیشتری را برای انتقال جرم بین دو فاز فراهم کند. همچنین با افزایش دبی حلال سرعت خطی حرکت حلال در ونتوری می شود و موجب کاهش زمان ماند در ونتوری می شود در نتیجه بازده فرایند جذب کاهش قابل توجهی می یابد.

۳-۵ بررسی تأثیر دبی حلال و هوای ورودی بر ضریب انتقال جرم

ضریب انتقال جرم برای جذب دی اکسید کربن برای دبی ها مختلف هوای ورودی و حلال با نانوسیال با

ترکیبی شرایط کمی متفاوت است. غلظت بهینه برای نسبت ۱:۱ نانوگرافن و Fe_3O_4 کسر وزنی ۰/۱ است که برای نانوسیال در غیاب و حضور ماده فعال سطحی TMAH میزان بازده جذب دی اکسید کربن به ترتیب ۸۵ و ۸۶/۹۶ درصد بوده که کمتر از بازده به دست آمده برای نانوگرافن و بیشتر از نانو Fe_3O_4 به صورت مجزا است. با افزایش نانو Fe_3O_4 به ۱:۳ نسبت به نانوگرافن رفتار نانوسیال ترکیبی به نانوسیال Fe_3O_4 مجزا نزدیک تر و مقادیر بازده نسبت به ۱:۱ کاهش قابل توجهی یافته و نزدیک به مقادیر به دست آمده برای نانوسیال Fe_3O_4 است. لذا غلظت بهینه برای این نسبت ترکیب کسر وزنی ۰/۵ است. در حالی که برای نسبت ۱:۳ نانوگرافن و نانو Fe_3O_4 به ترتیب بالاترین میزان بازده جذب دی اکسید کربن ۹۲/۶۷ و ۹۴/۴۶ درصد برای نانوسیال در غیاب و حضور ماده فعال سطحی TMAH به دست آمده است و غلظت بهینه، کسر وزنی ۰/۱ است. این افزایش قابل توجه می تواند به دلیل حرکت های کاتوره ای نامنظم نانوسیال Fe_3O_4 در نانوسیال ترکیبی باشد که با افزایش اختلاط و جابه جایی بیشتر نانوقره های گرافن و در نتیجه جذب بالاتر دی اکسید کربن شود.

در ارزیابی کیم و همکارانش [۱۳] افزایش میزان و سرعت جذب با افزودن نانوذرات به دلیل افزایش سطح انتقال جرم گزارش شده است به طور مشابه کانی و همکارانش [۱۶] افزایش ظرفیت و سرعت جذب



شکل ۳ بازده جذب گاز دی اکسید کربن برای دبی های حلال و هوای ورودی متفاوت
Fig. 3 Carbon dioxide adsorption efficiencies for different solvent discharges and inlet air

نسبت ۱:۳ نانوگرافن و نانو Fe_3O_4 با ماده فعال سطحی TMAH آزمایش شد که نتایج در شکل ۴ نشان داده شد. همان طور که مشاهده می شود در تمامی دبی های حلال، مقدار ضریب انتقال جرم دی اکسید کربن با افزایش دبی حجمی هوا در شوینده و نتوری افزایش قابل توجهی می یابد. برای مثال برای دبی جریان ۲ لیتر بر دقیقه با افزایش دبی هوا از ۰/۲۵ به ۰/۵ و ۰/۸ مترمکعب بر ثانیه ضریب انتقال جرم به ترتیب ۲/۵ و ۴/۳۴ برابر می شود. همچنین برای هر سه دبی

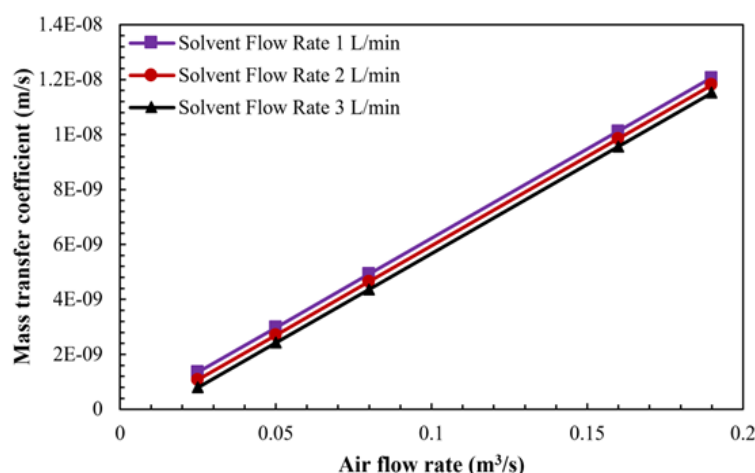
دی اکسید کربن در حضور نانولوله های کربنی را گزارش کرده اند.

۳-۴ تأثیر دبی حلال و هوا بر بازده جذب دی اکسید کربن

با توجه به نتایج به دست آمده از بهینه کردن نسبت ترکیب و غلظت نانوسیال، بررسی تأثیر دبی حلال و هوا در نسبت ترکیبی ۳:۱ نانوذره Fe_3O_4 و نانوقره گرافن پوشش یافته با ماده فعال سطحی TMAH در کسر وزنی ۰/۱ درصد با بیشینه بازده جذب دی اکسید کربن انجام

دبی هوا و حلال به شوینده ونتوری مقدار هدررفت افزایش می‌یابد و این میزان برای دبی هوا ۰/۱۵۶ و ۰/۱۸۶ مترمکعب بر ثانیه به‌طور قابل توجهی بیشتر است. به‌طوری‌که برای هر یک از دبی‌های حلال با افزایش دبی هوا از ۰/۲۵ به ۰/۱۸۶ میزان هدررفت تقریباً ۵/۲ برابر می‌شود. نکته قابل توجه این است که در دبی هوای یکسان با افزایش دبی حلال میزان هدررفت به‌طور تدریجی افزایش یافته به‌طوری‌که در

حلال، ضریب انتقال جرم هر دبی هوا نسبت به دبی ماقبل خود با نسبت تقریباً یکسان افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش می‌تواند به اثرات هیدرودینامیکی مرتبط باشد که با افزایش دبی و سرعت جریان هوا عدد رینولدز و در نتیجه عدد شرود افزایش می‌یابد. درحالی‌که کاهش ضریب انتقال جرم در دبی یکسان هوا با افزایش دبی حلال از ۱ به ۳ لیتر بر دقیقه مشاهده می‌شود.



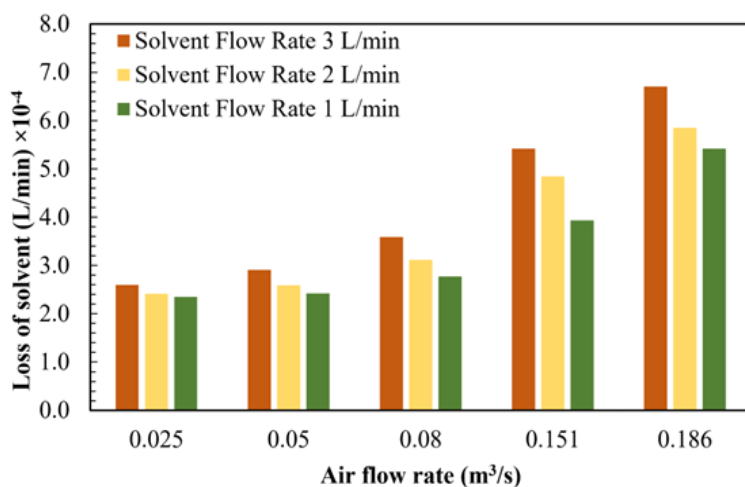
شکل ۴ ضریب انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن بر حسب دبی جریان هوا برای دبی‌های مختلف حلال

Fig. 4 Mass transfer coefficient of carbon dioxide gas in terms of air flow rate for different solvents

دبی هوا ۰/۰۵ با افزایش دبی حلال از ۱ به ۳ لیتر بر دقیقه میزان هدر رفت ۱/۲ برابر می‌شود و بیشترین میزان تغییرات متعلق به دبی هوای ۰/۱۵۱ مترمکعب بر ثانیه با ۸/۳۷ درصد افزایش میزان هدررفت حلال است. این پدیده می‌تواند مربوط به افزایش سطح تماس بین حلال و مولکول‌های هوای ورودی باشد که با افزایش دبی هوا، اندازه قطرات حلال به دلیل

۳-۶ ارزیابی تأثیر دبی حلال و هوای ورودی به شوینده ونتوری بر میزان هدررفت حلال

در این مطالعه برای بهترین نانوسیال با نسبت ۱:۳ نانوگرافن و نانو Fe_3O_4 با ماده فعال سطحی TMAH و غلظت بهینه ۰/۱ درصد وزنی تأثیر دبی حلال و هوا بر میزان هدررفت بررسی شد که نتایج در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش



شکل ۵ نمودار هدررفت حلال در گلوگاه ونتوری شوینده در دبی‌های حلال و هوای ورودی متفاوت در عدم حضور میدان مغناطیسی

Fig. 5 Diagram of solvent loss in detergent venturi glucose at solvent flows and different inlet air in the absence of magnetic field

افزایش نسبت دبی گاز دی‌اکسیدکربن به هوای ورودی از ۱:۲۰ به ۱:۱۵ مقدار سرعت جذب افزایش می‌یابد اما برای افزایش نسبت از ۱:۱۵ به ۱:۱۰ این مقدار کاهش می‌یابد. افزایش دبی حلال به شوینده و نتوری موجب افزایش عدد رینولدز (Re) و عدد شرود (Sh) و در نتیجه موجب افزایش ضریب انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن در فاز گازی می‌شود. افزودن نانوذرات تقریباً همواره باعث افزایش بازده جذب نسبت به سیال پایه (به همراه مواد فعال سطحی) می‌شود. در هر نانوسیال بیشینه بازده جذب در کسر وزنی خاصی از نانوذرات ظاهر می‌شود که بیشینه مقدار بازده جذب برای جذب دی‌اکسیدکربن با نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید آهن، نانوورقه‌های گرافن، و ترکیبی از این دو نوع نانوذرات با نسبت ۳:۱ در حضور ماده فعال سطحی TMAH در کسر وزنی‌های نانوذرات ۰/۱ درصد مشاهده شده است. برای مخلوط نانوذرات اکسید آهن (۲۵٪) و نانوگرافن (۷۵٪) در حضور ماده فعال سطحی TMAH مقدار بازده جذب و شار مولی انتقال جرم گاز دی‌اکسیدکربن نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر است.

افزایش میزان تبخیر حلال کاهش یافته و در نتیجه میزان هدررفت به دلیل وزن بسیار کم قطرات با اندازه‌های کوچک افزایش می‌یابد. بدین ترتیب بازده جداسازی قطرات حلال در جریان هوای عبوری در سیکلون تقلیل می‌یابد [۱۷].

۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، حذف گاز دی‌اکسیدکربن از جریان هوا از دستگاه شوینده و نتوری در مقیاس نیمه‌صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفته است و اثر پارامترهای متفاوت از جمله دبی هوای ورودی به شوینده و نتوری، دبی حلال، میزان هدررفت حلال در فرایند شستشو، جذب دی‌اکسیدکربن به کمک حلال نانوسیال آب/اکسید آهن- نانوورقه‌های گرافن در حضور ماده فعال سطحی تترامتیل‌آمونیم‌هیدروکسید بررسی شده است. حضور ماده فعال سطحی TMAH مانع از چسبیدن نانوذرات در سیال و سبب پایداری بیشتر آن‌ها می‌شود. با افزایش دبی حلال در شوینده و نتوری میزان هدررفت حلال افزایش و با کاهش دبی هوای ورودی به شوینده و نتوری هدررفت حلال کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Wang M., Lawal A., Stephenson P., Siders J., and Ramshaw C., Post-Combustion CO₂ Capture with Chemical Absorption: A State-of-the-Art Review, *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1609-1624, 2011.
- [2] Donaldson T.L. And Nguyen Y.N., Carbon Dioxide Reaction Kinetics and Transport in Aqueous Amine Membranes, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 19, 260-266, 1980.
- [3] Lucadamo G.A., Membrane-Aided Distillation for Carbon Dioxide and Hydrocarbon Separation, US4602477A, 1986.
- [4] Bae Y.S. and Snurr R.Q., Development and Evaluation of Porous Materials for Carbon Dioxide Separation and Capture, *Angewandte Chemie International Edition*, 50, 11586-11596, 2011.
- [5] Aaron D. and Tsouris C., Separation of CO₂ from Flue Gas: A Review, *Separation Science And Technology*, 40, 321-348, 2005.
- [6] Hikita H., Asai S., and Takatsuka T., Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Sodium Hydroxide and Sodium Carbonate-Bicarbonate Solutions, *The Chemical Engineering Journal*, 11, 131-141, 1976.
- [7] Breeuwsma A. and Lyklema J., Physical and Chemical Adsorption of Ions in the Electrical Double Layer on Hematite (α -Fe₂O₃), *Journal of Colloid and Interface Science*, 43, 437-448, 1973.
- [8] Savage D. and Kim C., Chemical Kinetics of Carbon Dioxide Reactions with Diethanolamine and Diisopropanolamine in Aqueous Solutions, *AIChE Journal*, 31, 296-301, 1985.
- [9] Mi T. and Yu X., Dust Removal and Desulphurization in a Novel Venturi Scrubber, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 62, 159-167, 2012.
- [10] Adelberg M., Breakup Rate and Penetration of a Liquid Jet in a Gas Stream, *AIAA Journal*, 5, 1408-1415, 1967.
- [11] Sharifi A. and Mohebbi A., A Combined CFD Modeling with Population Balance Equation to Predict Pressure Drop in Venturi Scrubbers, *Research on Chemical Intermediates*, 40, 1021-1042, 2014.
- [12] Gulhane N., Landge A., Shukla D., and Kale S., Experimental Study of Iodine Removal Efficiency in Self-Priming Venturi Scrubber, *Annals of Nuclear Energy*, 78, 152-159, 2015.
- [13] Karatay E., Microfluidic Studies of Interfacial Transport: Universiteit Twente, 2013.
- [14] Ashfaq T., Qureshi K., Shah A., Waheed K., Siddique W., Irfan N., Ahmed M., and Farooq A., CFD Investigation of Iodine Mass Transfer in Venturi Scrubbing Solution of Filtered Containment Venting System, *Progress in Nuclear Energy*, 111, 195-204, 2019.
- [15] Kim H.G., Kim H.J., Lee M.H., and Kim J.H., Experimental Study on the Enhancement of Particle Removal Efficiency in Spray Tower Scrubber Using Electrospray, *Asian Journal of Atmospheric Environment (AJAE)*, 8, 2014.
- [16] Cooney D.O., Modeling Venturi Scrubber Performance for H₂S Removal from Oil-Shale Retort Gases, *Chemical Engineering Communications*, 35, 315-338, 1985.
- [17] Gamisans X., Sarra M., and Lafuente F., The Role of The Liquid Film on The Mass Transfer in Venturi-Based Scrubbers, *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 372-380, 2004.