



Review Article



DOI: 10.22034/farayandno.2024.2027173.1960



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

A Review on Effective Mass Transfer Mechanisms in Presence of Nanoparticles

Neda Mohammadi Nezhad¹, Ali Maleki², Fatemeh Bahadori^{3*}

¹ PhD candidate in Chemical Engineering, Kurdistan University, Kurdistan, Iran

² Chemical Engineer, Mahabad Petrochemical Company, Mahabad, Iran

³ Associate Professor of Chemical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Received: 23 Apr 2024

Accepted: 28 Jun 2024

Abstract

This study thoroughly investigates the fundamental mechanisms influencing mass transfer in nanofluids and assesses how each mechanism either weakens or intensifies this process based on previous research. Additionally, it examines key operating parameters that enhance absorption efficiency, including nanoparticle concentration, the nature and synthesis of nanoparticles, the surface-area-to-volume ratio, as well as the viscosity, density of the nanofluid, and the use of surfactants. By detailing these factors, the study provides a clear understanding of how they impact mass transfer performance, emphasizing that neglecting these considerations significantly affects the final yield.

Keyword: Nano Fluid, Absorption, Mass Transfer, Carbon Dioxide

* f.bahadori@che.uut.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Mohammadi Nezhad, N., Maleki, A., Bahadori, F., "A Review on Effective Mass Transfer Mechanisms in Presence of Nanoparticles", Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 86, pp. 83-98, In Persian, (2024).



DOI: 10.22034/farayandno.2024.2027173.1960



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

مروری بر مکانیسم‌های موثر انتقال جرم در حضور نانوذرات در فرآیند جذب کربن دی اکسید

ندا محمدی نژاد¹، علی ملکی²، فاطمه بهادری^{3*}

¹ دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

² کارشناس ارشد مهندسی شیمی، پتروشیمی مهاباد، مهاباد، ایران

³ دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

دریافت: 1403/02/04 پذیرش: 1403/04/08

چکیده

در این مطالعه مکانیسم‌های اساسی موثر در انتقال جرم در فرآیند جذب دی‌اکسید کربن در نانوسیالات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و تاثیر هر یک از این مکانیسم‌ها در تضعیف یا تشدید انتقال جرم بر اساس مطالعات پیشین مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای عملیاتی موثر در بهبود بازده نهایی فرآیند جذب نظیر غلظت نانوذرات بکار رفته، ماهیت سیال پایه و نانوذرات، روش سنتز نانوذرات بکار گرفته شده، نسبت سطح به حجم ذرات، ویسکوزیته و دانسیته نانوسیال و بکارگیری و عدم بکارگیری سورفکتانت، مورد مطالعه قرار گرفته است. نهایتاً، مطالعه حاضر ضمن تشریح فاکتورهای عملیاتی موثر بر بهبود عملکرد نانوسیالات، تصویر شفافی از مکانیسم‌های موثر بر فرآیند انتقال جرم را ارائه می‌کند و به وضوح نشان می‌دهد که در صورت عدم توجه به فاکتورهای مذکور بازده نهایی به شدت تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: نانوسیال، جذب، انتقال جرم، دی‌اکسید کربن

* f.bahadori@che.uut.ac.ir

1- مقدمه

امروزه گسترش روزافزون چالش‌های زیست محیطی در اثر تخلیه پساب‌های صنعتی و انتشار گازهای حاصل از فرآیندهای مختلف به جو در نتیجه گسترش صنایع مختلف، از جمله برجسته‌ترین دغدغه‌های جامعه علمی به شمار می‌رود. بررسی‌های انجام شده در این زمینه به وضوح حاکی از آن است که در صورت عدم کنترل این روند فزآیند و رو به رشد، بشر با صدمات جبران ناپذیر زیست محیطی مواجه خواهد بود [1]. نگرانی‌هایی در مورد انتشار دی‌اکسید کربن توسط انسان که باعث گرم شدن جهانی هوای کره زمین شده است وجود دارد. بنابراین تکنولوژی‌های کاهش، جداسازی و جمع‌آوری دی‌اکسید کربن برای کاهش این مشکل بسیار مهم هستند. بهترین روش برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، افزایش بازده انرژی و حذف آن از نیروگاه است. جذب دی‌اکسید کربن از گاز سنتز در چرخه ترکیبی گازی سازی یکپارچه (IGCC) ممکن است بهره‌وری انرژی سیستم‌های تولید برق را افزایش دهد که در کاهش گرم شدن جهانی هوای کره زمین نیز نقش دارد [2].

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته توسط محققین مختلف، انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر بخارات آب، دی‌نیتروژن اکسید، دی‌اکسید کربن و متان به جو به عنوان اصلی‌ترین عامل پدیده‌هایی همچون تغییرات آب و هوایی، تغییرات در ارتفاع آب دریا، تابستان‌های به شدت گرم و زمستان‌های سرد و مشکلات کشاورزی شناخته شده است. علاوه بر این، اثرات سو انتشار سایر آلاینده‌ها همچون گوگرد و... بر کسی پوشیده نیست. در این راستا، نظر به اینکه استفاده از سوخت‌های فسیلی در آینده نزدیک به عنوان یک منبع انرژی ادامه خواهد داشت، انتشار ترکیبات مذکور به جو اجتناب ناپذیر خواهد بود، که در نهایت منجر به اثرات سو بیشتری بر محیط زیست و اتمسفر می‌شود. بنابراین تدبیر یک راه اقتصادی، پایدار و سازگار با محیط زیست برای کاهش این تبعات ضروری است.

مطابق با آمارهای موجود، زغال سنگ بزرگترین منبع انرژی برای تولید برق و دومین منبع بزرگ انرژی اولیه در جهان محسوب می‌شود. بنابراین بررسی فناوری‌های جداسازی آلاینده‌های ناشی از احتراق آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این راستا تلاش‌های متعددی توسط محققین مختلف صورت گرفته است که بکارگیری منابع انرژی تجدید پذیر از جمله آن‌ها است. بر اساس آخرین آمارهای منتشر شده فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر در دهه‌های گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. متوسط هزینه خالص تولید برق برای فناوری‌های انرژی بادی و خورشیدی به ترتیب 66 و 85 درصد کاهش یافته است. این بدان معنی است که هزینه تراز شده برای انرژی خورشیدی تنها در یک دهه گذشته حدود 6 برابر بیشتر بوده است. با این حال، با وجود سرعت پیشرفت در فناوری‌های تجدیدپذیر، بشر همچنان بر روی سوخت‌های فسیلی برای تولید تقاضای جهانی انرژی تکیه دارد. در این راستا، انتظار می‌رود حدود 78% تقاضای جهانی انرژی تا سال 2004 همچنان از طریق سوخت‌های فسیلی (زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت) تامین شود. با این وجود، در دهه‌های اخیر فناوری‌های انرژی تجدید پذیر به بلوغ رسیده و رفته رفته جایگزین سوخت‌های فسیلی می‌شوند. با این حال، این واقعیت غیر قابل انکار است که لزوم حذف و کاهش میزان انتشار آلاینده‌های موجود در جریان گاز خروجی از صنایع به جو همچنان تا سال‌های پیش‌رو پا برجا است [3-5].

به دام انداختن و ذخیره کردن دی‌اکسید کربن به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تشدید اثرات سو زیست محیطی گازهای گلخانه‌ای، یک روش کارآمد محسوب می‌شود، که روش‌های متعددی برای گرفتن آن نظیر جذب توسط حلال، جذب سطحی توسط فاز جامد، غشاء، جداسازی برودتی و تلفیقی از این فناوری‌ها ارائه شده است. از میان این

فناوری‌ها، در حال حاضر جذب توسط حلال به عنوان یکی از اقتصادی‌ترین روش‌ها شناخته می‌شود. حلال‌های زیادی برای جذب دی‌اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفته که شامل مونواتانول آمین، دی‌آمین‌ها و آمین‌های نوع سوم نظیر پیرازین و مشتقات آن، آمونیاک، نمک‌های اسید آمینه، مایعات یونی و مخلوط آن‌ها می‌باشد [4, 6]. در این میان، مونواتانول آمین به عنوان معیار صنعت به شمار می‌رود زیرا رایج‌ترین حلال به کار رفته است. با این حال، این نوع آمین دارای معایبی نظیر نیاز به انرژی بالا برای بازیابی حلال، نرخ تخریب بالا و خوردگی است. تحقیقاتی به منظور کاهش هزینه‌های انرژی نظیر به کارگیری انرژی خورشیدی همراه با فرآیند جذب آمینی به عنوان مکمل الزامات کلی انرژی صورت گرفته است. با این حال پیاده‌سازی مقیاس کامل انجام نشده است و هنوز نیاز است که مشکلات تخریب حلال، فراریت حلال و خوردگی مورد توجه قرار گیرند [5, 7, 8].

هرچند که جذب گازهای گلخانه‌ای با استفاده از حلال یکی از محبوب‌ترین و پرکاربردترین استراتژی‌های ممکن در این زمینه محسوب می‌شود، با این وجود بهبود و ارتقا سرعت انتقال جرم در این فرآیندها و از طرفی کاهش مصرف انرژی فرآیند احیا حلال‌های مصرفی از اصلی‌ترین چالش‌های محققان در دهه‌های اخیر محسوب می‌شود [9, 10]. زیرا علاوه بر ظرفیت جذب آلاینده‌ها، سرعت جذب این ترکیبات نیز به عنوان یک پارامتر اثرگذار در نظر گرفته می‌شود. از سویی لزوم کاهش انرژی مصرفی در حین فرآیند احیا حلال، در افزایش کارایی روش، کاملاً روشن است. در این راستا، بر اساس نتایج گزارش شده توسط محققان در این زمینه، بکارگیری نانوذرات به عنوان یک راهکار موثر و پربازده در زمینه بهبود سرعت انتقال جرم و انتقال حرارت قابل اتکا است. مطابق آنچه که در مراجع علمی گوناگون ارایه شده است نانوذرات به ذرات کوچک فلزی یا پلیمری اطلاق می‌شود که دارای اندازه ابعادی در مقیاس نانو بوده و دارای خواص بسیار متفاوتی از نظر الکتریکی، مغناطیسی، حرارتی و... است و در نتیجه همین امر این ذرات گزینه بسیار مطلوبی جهت کاربردهای مختلفی نظیر فرآیندهای شیمیایی، الکتریکی، آیرودینامیکی، زیستی، پزشکی و غیره می‌باشند. ایده بکارگیری نانوسیالات برای اولین بار در سال 1995 توسط چوی و ایستمن مطرح شد. در این پژوهش به واسطه اضافه کردن ذرات فلزی و اکسیدهای آن‌ها در مقیاس 1 تا 100 نانومتر به حلال پایه، متوجه تغییرات اساسی در خواص حرارتی حلال مورد مطالعه شدند. این مطالعه هرچند بسیار بدوی و مقدماتی به نظر می‌آمد اما نقطه آغازی برای بررسی‌های گسترده‌تر در این حوزه محسوب می‌شد. بر این اساس لزوم ارایه یک مطالعه جامع به منظور بررسی مکانیسم اثرگذاری نانوذرات بر فرآیندهای انتقال جرم و انتقال حرارت با هدف بکارگیری موثر و مناسب این ذرات در فرآیندهای مختلف بسیار حائز اهمیت است. بدین ترتیب، در این مطالعه، ضمن تشریح روند اثرپذیری فرآیندهای انتقال جرم در حضور نانوذرات، به بررسی اساسی‌ترین و مطرح‌ترین مطالعات انجام شده در این حوزه توسط محققان روی خواهیم آورد.

2- مبانی نظری

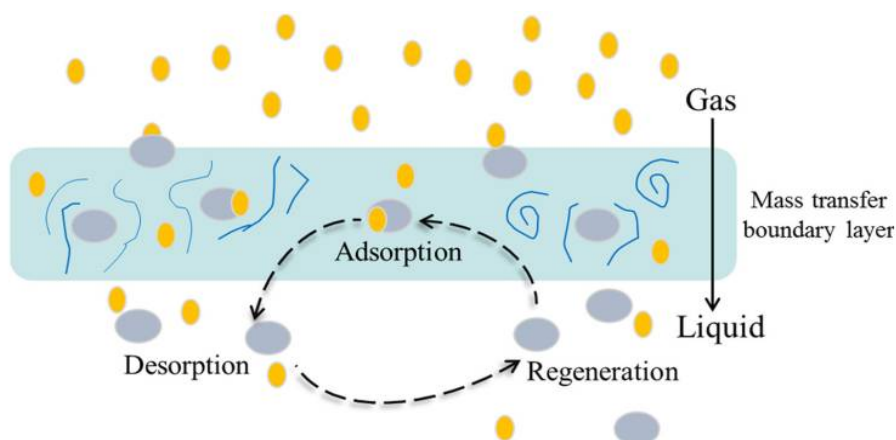
بر اساس مطالعات صورت گرفته در این زمینه حضور نانوذرات درون حلال پایه منجر به القا چندین مکانیسم اساسی خواهد شد که در نهایت باعث افزایش میزان انتقال جرم در نانوسیال می‌شود بطوریکه عملیات انتقال به مراتب نسبت به حلال پایه از وضعیت بسیار مطلوب‌تری برخوردار است. اگر چه مقالات متعددی انتقال جرم و حرارت نانوسیال را مورد بررسی قرار دادند [11, 12] اما بخش جذب گاز با استفاده از نانوسیال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله سعی شده است که پژوهش‌های صورت گرفته در مورد جذب گاز دی‌اکسید کربن با نانوذرات مورد بررسی قرار

گیرد و مکانیسم‌ها و فاکتورهای تاثیرگذار بر جذب دی‌اکسید کربن تجزیه و تحلیل گردد. در این بخش ضمن معرفی این مکانیسم‌ها، هریک از آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

بهبود فرآیند انتقال جرم با بهره‌گیری از نانوذرات را می‌توان توسط مکانیسم‌های مختلفی که انتقال و نفوذ مولکول‌های جذب شونده در محلول جاذب را تعیین کرده و تحت تاثیر قرار می‌دهند، توضیح داد. عمده مکانیسم‌های پذیرفته شده در بهبود انتقال جرم در سیستم‌های گاز-مایع شامل اثر گریزینگ، اثر هیدرودینامیکی در لایه مرزی گاز-مایع و جلوگیری از ادغام حباب است.

اثر گریزینگ نخستین بار توسط کارس¹ و همکارانش ارائه شد. بر اساس آنچه که در این پژوهش مطرح شد میزان جذب گاز در مایعات در حضور ذرات جامد در یک سیستم سه فازی گاز-مایع-جامد به میزان قابل قبولی افزایش می‌یابد [13].

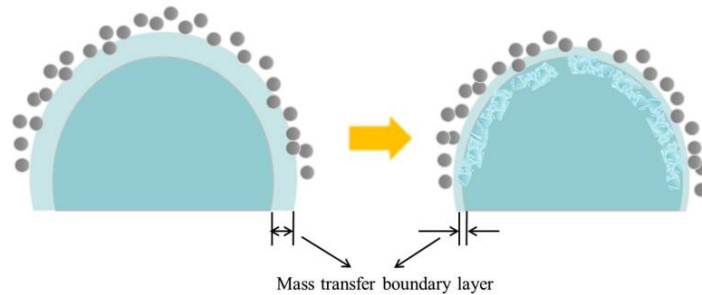
اثر گریزینگ یک پدیده انتقال گاز از فصل مشترک گاز-مایع به لایه‌های عمیق‌تر فاز مایع است. مطابق مباحث مطرح شده در این پژوهش زمانی که قطر نانوذرات از ضخامت لایه انتقال جرم کمتر باشد، ذرات در اثر حرکت بروانی خود وارد لایه انتقال جرم گاز-مایع می‌شوند. بدین ترتیب، با توجه به جذب سطحی قوی ملکول‌های جز نفوذ کننده گازی بر روی سطح نانوذرات پراکنده شده در لایه مرزی انتقال جرم، غلظت جزء گازی جذب شونده درون نانوسیال در نزدیکی فصل مشترک گاز-مایع، نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان ادعا کرد که در نتیجه این امر، نیروی محرکه انتقال جرم در بین سطح تماس گاز-مایع و لایه‌های عمیق‌تر از توده مایع افزایش می‌یابد و به دنبال آن میزان نرخ جذب افزایش پیدا می‌کند. در ادامه پس از یک زمان تماس مشخص و رسیدن ذره به درون توده مایع، جزء جذب شده از سطح ذره دفع می‌گردد و بدین ترتیب ذرات احیاء می‌شوند و این روند مجدداً از سر گرفته می‌شود. بر این اساس این پدیده را می‌توان به عنوان یک مکانیسم پیوسته رفت و برگشتی در نانوسیالات شناخت. مطابق با نتایج بدست آمده توسط محققین این پدیده می‌تواند به طور چشمگیری ضریب انتقال جرم فاز مایع را بهبود بخشد. شکل 1 مکانیسم گریزینگ یا شاتل را برای جذب گاز توسط نانوسیال به وضوح نشان می‌دهد [14-18].



شکل 1- شماتیک اثر گریزینگ [13]

¹ Kars

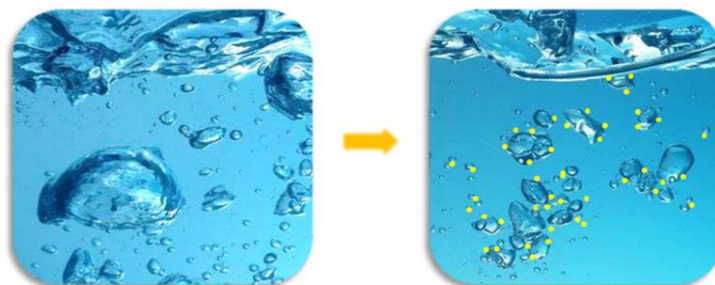
مکانیسم اثر هیدرودینامیکی که اختلاط لایه مرزی گاز-مایع نیز نامیده می‌شود، در شکل 2 نشان داده شده است. مطابق با این مکانیسم که در پژوهش‌های متعددی تشریح شده است، نانوذرات به واسطه در تماس بودن با لایه بیرونی حباب‌های موجود در فاز مایع موجب ایجاد یک لایه مرزی انتقال جرم نازک در اطراف حباب می‌شوند. این لایه که به علت تراکم نانوذرات دارای خواص انتقال جرمی مطلوب‌تری نسبت به فاز مایع است به واسطه افزایش آشفتگی جریان و ضریب انتقال جرم فاز مایع موجب افزایش میزان نفوذ گاز به درون فیلم مایع می‌گردد. این مکانیسم که در مطالعه‌ای توسط کلایتمنس و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته و بررسی‌های انجام شده نشان داده ضخامت لایه مرزی در اثر برخورد متواتر بین ذرات و لایه مرزی، کاهش می‌یابد [19, 20].



شکل 2- شماتیک اثر هیدرودینامیکی [15]

حضور حباب‌ها در فصل مشترک گاز-مایع به صورت قابل ملاحظه‌ای سطح تماس گاز-مایع و به دنبال آن انتقال جرم را بهبود می‌بخشند. در حین برخورد دو حباب در محیط مایع، فیلم مایع بین آن‌ها با گذشت زمان به ضخامت کمتر از میکرون کاهش می‌یابد. بسته به تعادل بین کشش سطحی، هیدرودینامیک و نیروهای سطحی، ممکن است فیلم به اندازه کافی نازک گشته تا پاره شود و منجر به ادغام حباب گردد. با این حال حضور نانوذرات درون فاز مایع تاثیر قابل توجهی بهبود و کنترل این روند دارد. همانگونه که در شکل 3 مشاهده می‌گردد ذرات جامد موجود در نانوسیالات به راحتی به سطح حباب می‌چسبند و این امر سبب تقویت سفتی حباب و به دنبال آن کاهش سرعت به هم پیوستن حباب‌ها می‌شود که در نهایت منجر افزایش سطح تماس گاز-مایع و بهبود ضریب انتقال جرم می‌شود. با این وجود این مکانیسم تحت تاثیر کشش سطحی محلول، اختلاف چگالی بین ذرات و محلول، ویسکوزیته محلول، اندازه ذره و آبگریز بودن ذرات قرار دارد [21, 22].

در این راستا، بر اساس پژوهش انجام شده توسط جانگ همکارانش اثر هیدرودینامیکی و جلوگیری از اجماع حباب‌های گازی موجود در فاز مایع از جمله برجسته‌ترین و موثرترین مکانیسم‌های شناخته شده در بهبود فرآیندهای جذب است [23].



شکل 3- شماتیک مکانیسم جلوگیری از ادغام حباب [15]

3- بحث و یافته‌ها

همانطور که پیش از این مطرح شد، نانوسیالات به مراتب از پتانسیل بالاتری در جذب دی‌اکسید کربن نسبت به سیالات معمولی از خود نشان داده‌اند. با این حال مکانیسم حاکم در فرآیند جذب در نانوسیالات و سیالات معمولی بسیار متفاوت است. در این راستا، تاکنون مطالعات متعددی در زمینه بهبود میزان جذب دی‌اکسید کربن در نانوسیالات توسط محققین صورت گرفته است، با این حال شناسایی و تعریف پارامترهای اثرگذار بر کیفیت و عملکرد نانوسیال و به دنبال آن بازده نهایی فرآیند جذب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

مطابق با پژوهش‌های صورت گرفته یکی از اصلی‌ترین فاکتورهای مطرح شده در این زمینه غلظت نانوذرات بکارگرفته شده است که در مطالعات متعددی توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. این فاکتور که یکی از اساسی‌ترین شاخص‌های اثرگذار در این زمینه است، به شدت به ماهیت نانوذرات بکارگرفته شده و سیال پایه بستگی دارد. دیدگاه بدوی نسبت به این مساله آن است که بکارگیری نانوذرات بیشتر در نهایت پتانسیل نانوسیال را در جهت بهبود عملکرد مکانیسم‌های موثر انتقال جرمی به مراتب افزایش می‌دهد. با این حال مطالعات صورت گرفته در این زمینه حکایت از روند متفاوت‌تری دارد.

نتایج بدست آمده در پژوهش‌های متعدد نشان داده، در برخی موارد افزایش غلظت نانوذرات بکارگرفته شده منجر به تاثیرات سوئی در عملکرد مکانیسم‌های انتقال جرمی داشته است. به بیان شفاف‌تر، هرچند که در ظاهر انتظار می‌رود افزایش غلظت نانوذرات به دلیل بیشتر شدن میزان ذرات در دسترس در محیط سیال پایه، منجر به افزایش ظرفیت نانوسیال در مکانیسم‌های همچون اثر گریزینگ، شکستن حباب، اثرهیدرودینامیکی و اختلاط لایه مرزی شود، با این حال روند مشاهده شده در بعضی موارد دور از انتظار است. این امر را می‌توان به دلایل متعددی نسبت داد. مطابق با مطالعات صورت گرفته در این زمینه، افزایش غلظت نانوذرات گاهی منجر به بیشتر شدن تمایل این ذرات برای تجمع و به دنبال آن لخته شدن و کلوخه شدن این ذرات می‌شود که در نتیجه همین امر سطح موثر ذرات کاهش و همچنین اندازه ذرات موجود در فاز مایع افزایش پیدا می‌کند و در نهایت تمایل ذرات به ته نشینی تشدید می‌شود و در صورتیکه این روند بطور پیوسته افزایش پیدا کند در نهایت محلول به دو فاز مایع-جامد تفکیک می‌شود و کسر زیادی ذرات از حالت تعلیق و پراکنده بودن درون فاز مایع خارج می‌شوند و در نهایت منجر به کاهش چشمگیری در بازده جذب دی‌اکسید کربن می‌شود. بر این اساس، لزوم تعیین مقدار بهینه غلظت نانوذرات بکارگرفته شده در نانوسیالات مختلف، بسیار حائز اهمیت است. تغییرات مربوط به میزان غلظت نانوذره موجود در نانوسیالات مختلف بر حسب بازده جذب دی‌اکسید کربن در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته شده است و در تمامی این پژوهش‌ها یک غلظت بهینه با توجه به ماهیت دوفاز جامد و مایع درگیر در تهیه نانوسیال و اندازه ذرات بکار گرفته شده، گزارش شده است [23-28].

لی و همکاران [29] جذب و واجذب دی‌اکسید کربن را در غلظت‌های متفاوت نانوذرات Al_2O_3 و SiO_2 (0, 0/005، 0/01، 0/03 و 0/05 درصد حجمی) مورد بررسی قرار دادند. برای هر دو نانوسیال، نسبت افزایش جذب CO_2 با افزایش غلظت نانوسیال تا 0/01 درصد حجمی افزایش یافت و سپس به دلیل کاهش سطح موثر نانوذرات کاهش یافت اما با افزایش غلظت نانوذرات فرآیند واجذب دی‌اکسید کربن نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد.

در تحقیقات دیگری مشخص شد که در غلظت 0/01 حجمی از نانوذرات Al_2O_3 بهترین ظرفیت جذب اتفاق می افتد. این به دلیل اختلاط موثر نانوذرات در اثر حرکت براونی ذرات است در حالی که در غلظت های بالاتر از یک مقدار خاص، حرکت براونی ذرات کمتر است که این باعث کاهش برهم کنش ذرات می گردد [30، 31]. وون و همکاران [32] از نانوذرات Al_2O_3 و محلول آبی $NaCl$ جهت جذب CO_2 استفاده کردند. آزمایش های جذب در سیستم جاذب نوع حباب انجام شد. غلظت نانوذرات از 0/005 تا 0/1 درصد حجمی تغییر داده شد. مشخص شد که غلظت بهینه نانوذرات Al_2O_3 در نانوسیال مبتنی بر محلول آبی 0/01 درصد حجمی $NaCl$ است. و سپس حلالیت CO_2 برای محلول آبی در 30 درجه سانتی گراد، 20 درجه سانتی گراد و 10 درجه سانتی گراد به ترتیب به 11/0%، 12/5% و 8/7% افزایش می یابد. می توان نتیجه گرفت که اثر نانوذرات بر افزایش انتقال جرم در ناحیه حالت غیر اشباع نسبت به حالت اشباع از اهمیت بیشتری برخوردار است.

رحمتمند و همکاران [33] فرآیند جذب دی اکسید کربن در یک سیستم آزمایشگاهی فشار بالا را با استفاده از نانوسیال در تماس مستقیم با حالت استاتیک در یک مخزن بسته مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق عملکرد جذب نانوسیالات مختلف با محلول های پایه و با نانوسیالات دیگر در شرایط مختلف مقایسه شد. نتایج نشان می دهد که SiO_2 و Al_2O_3 در غلظت های بالاتر نانوذرات (0/1 درصد وزنی) موثرتر بوده و می توانند ظرفیت جذب را به ترتیب تا 21% و 18% افزایش دهد. نانوذرات Fe_3O_4 و CNT در غلظت پایین تر نانوذرات (0/02 درصد وزنی) موثرتر بوده و می تواند آن را به ترتیب تا 24% و 34% افزایش دهد. نانوذرات CNT برای محلول متیل دی اتانول آمین در مقایسه با محلول دی اتانول آمین با افزایش ظرفیت جذب تا 23% موثرتر است. به نظر می رسد که جذب گاز دی اکسید کربن بر روی سطح نانوذرات منجر به ظرفیت جذب بالاتر نانوسیال در شرایط تعادل می شود.

تاثیر غلظت نانوذرات بر مقدار ویکسوزیته و هدایت حرارتی نانوذرات غیرقابل انکار است. هرچند این دو فاکتور به شدت تحت تاثیر ماهیت دو فاز جامد-مایع (نانوذرات-حلال پایه) درگیر در نانوسیال است، اما به میزان قابل توجهی در میزان بازده فرآیند انتقال جرم اثرگذار است [32]. مطالعات متعددی این پارامتر را مورد بررسی قرار داده است. بر این اساس، اضافه شدن نانوذرات به سیال پایه موجب ایجاد یک لایه مایع با ویژگی های خاص در نوار مرزی جامد-مایع می شود. در این لایه مقدار ویکسوزیته و دانسیته فاز مایع تحت تاثیر نانوذره است و با توجه به ماهیت دو فاز جامد و مایع درگیر، مقدار ویکسوزیته و دانسیته در این نوار مرزی نسبت به فاز مایع متفاوت است. در نتیجه همین امر مقدار متوسط ویکسوزیته و دانسیته نانوسیال نسبت به حلال پایه تفاوت قابل توجهی دارد [31، 32، 1].

از آنجایی که این دو پارامتر به عنوان پارامترهای عملیاتی اثرگذار شناخته می شوند، بنابراین پیش بینی دقیق آن ها بسیار حائز اهمیت است. در این راستا مدل های ریاضی متعددی توسط محققین ارائه شده است که مقدار دانسیته و ویکسوزیته نانوسیالات را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کنند. برخی از مدل های اساسی و کاربردی در این زمینه در زیر ارائه شده است.

$$\rho_{nf} = \rho_p \phi_p + (1 - \rho_p) \rho_f \quad (1)$$

جدول 1- روابط پیش بینی ویسکوزیته نانوسیال

مرجع	رابطه ویسکوزیته	محققین و سال
[34]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = 1 + 2.5\varphi$	انیشیتین ² ، 1906
[35]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = (1 - \varphi)^{-2.5}$	برینکمن ³ ، 1952
[36]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = (1 - \varphi/\varphi_m)^{-\varphi_m}$	کریگر ⁴ ، 1959
[37]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = \frac{9}{8} \left(\frac{\varphi/\varphi_m}{\varphi - \varphi_m} \right)^{1/3}$	فرانکل ⁵ ، 1967
[38]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = (1 + 1.5\varphi) \exp\left(\frac{\varphi}{1 - \varphi_m}\right)$	نیلسن ⁶ ، 1970
[39]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = 1 + 2.5\varphi + \frac{25}{4}\varphi^2 + f(\varphi^3)$	لاندگرن ⁷ ، 1972
[40]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = 1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2$	بتچلر ⁸ ، 1977
[41]	$\mu_{nf}/\mu_{bf} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2}$	کیتانو ⁹ و همکاران، 1981
[42]	$\ln(\mu_{nf}/\mu_{bf}) = a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2$	وایت ¹⁰ ، 1991

همچنین تاثیر اضافه شدن نانوذرات به حلال پایه بر روند انتقال جرم را می توان از طریق واری تئوری انیشیتین-استوکس (رابطه 2) به وضوح درک کرد.

$$D = \frac{k.T}{3\pi\mu d} \quad (2)$$

بر اساس رابطه فوق ارتباط معکوس بین ضریب نفوذ با اندازه ذرات و ویسکوزیته فاز مایع به وضوح مشهود است. از سویی مطابق با مطالعات صورت گرفته در غلظت های بسیار پایین از نانوذرات، کمتر از 0/005 درصد وزنی، ذرات پراکنده شده در فاز مایع هیچ ممانعتی برای حرکت سایر ذرات ایجاد نمی کند. این روند تا غلظت های در حدود 0/1 درصد وزنی برقرار است و به واسطه افزایش غلظت نانوذرات تا این مقدار میزان جذب دی اکسید کربن به دلیل تشدید انتقال جرم جابجایی توسط ذرات، افزایش پیدا می کند. با این حال با گذر از این مرز و افزایش هرچه بیشتر غلظت نانوذرات بکار گرفته شده و به دنبال آن کاهش فضای بین ذرات و محدود شدن آزادی حرکت آن ها و همچنین بیشتر شدن برهمکنش بین نانوذرات، میزان توانایی نانوسیال در جذب دی اکسید کربن کاهش می یابد. هرچند غلظت و ماهیت نانوذرات بکار گرفته شده و نوع حلال پایه از اساسی ترین و اثرگذار ترین فاکتورهای موثر در روند تشریح شده محسوب می شوند، با این حال از تاثیر اندازه ذرات نمی توان چشم پوشی کرد. مطالعات بسیاری با تمرکز بر این موضوع

² Einstein

³ Brinkman

⁴ Krieger

⁵ Frankel

⁶ Nielsen

⁷ Lundgren

⁸ Batchelor

⁹ Kitano

¹ White

توسط محققین صورت گرفته است. نتایج بدست آمد به وضوح حاکی از تاثیر کاهش اندازه ذرات بر افزایش میزان جذب دی اکسید کربن است. با این حال، این روند مشاهده شده یکسان نیست و نتایج متفاوتی مشاهده شده است [43-48].

تاثیر ماهیت نانوذرات و حلال پایه از دیگر عوامل اثرگذار بر کیفیت انتقال جرم است که در مطالعات متعدد مورد بحث و بررسی قرار گرفته شده است. این فاکتور که نسبت به سایر پارامترها بیشتر قابل کنترل است تاثیر بسزایی در بهبود عملکرد ذرات درون حلال پایه دارد. بررسی های صورت گرفته در زمینه مطالعه تاثیر ماهیت حلال پایه نشان داده که سیالاتی که قدرت جذب شیمیایی بالاتری برای جذب دی اکسید کربن دارند، نسبت به حلال های فیزیکی گزینه بسیار مناسب تری برای حلال پایه نانوسیالات محسوب می شوند. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داده که بازده جذب دی اکسید کربن در نانوسیالات حاوی نانوذرات SiO_2 با اندازه 15 نانومتر در حلال پایه پیپرازین حاوی 20 درصد پتاسیم بی کربنات و 8 درصد متانول افزایش پیدا می کند [43, 47]. بر این اساس، لزوم در نظر گرفتن تاثیر ماهیت دوفاز جامد و مایع درگیر در نانوسیال جهت دستیابی به حداکثر میزان بازده جذب، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. از سویی ذکر این نکته بسیار حائز اهمیت است که ماهیت نانوذرات بکارگرفته شده در بهبود بازده جذب در حلال های فیزیکی نسبت به حلال های شیمیایی، از تاثیر بسیار بالاتری برخوردار است. بطوریکه به واسطه اضافه شدن نانوذرات با خواص مطلوب فیزیکی و انتقال جرمی در نهایت بازده جذب دی اکسید کربن بطور چشمگیری افزایش پیدا می کند. به عنوان مثال بازده جذب دی اکسید کربن در متانول به واسطه به کارگیری نانوذرات Al_2O_3 تا حدود 16 درصد و برای آب تا 23 درصد افزایش پیدا می کند [22, 48]. بر این اساس تفاوت میان بازده جذب نانوذرات مختلف به وضوح حاکی از تاثیر بسیار زیاد ماهیت دو فاز جامد و مایع درگیر در ایجاد نانوسیال است که در نهایت منجر به تفاوت در خواص الکتریکی، حرارتی و... حلال پایه می شود [49-53].

نسبت سطح به حجم نانوذرات از دیگر خواص کلیدی نانوذرات است که در بهبود توانایی جذب نانوسیال اثرگذار است. از آنجایی که یکی از اصلی ترین مکانیسم های حضور نانوذرات در فرآیند جذب بصورت جذب سطحی ملکول گازی جذب شونده روی این ذرات است، بنابراین این پارامتر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بر این اساس ذرات با سطح در دسترس بیشتر به واسطه تشدید مکانیسم های همچون اثر گریزینگ و یا ظرفیت بیشتر در جذب سطحی ملکول های دی اکسید کربن، بازده جذب بالاتری از خود نشان می دهند. با این حال ذکر این نکته بسیار حائز اهمیت است که این فاکتور به شدت تحت تاثیر روش سنتز و ساخت نانوذرات است [47, 53-57].

بکارگیری و یا عدم بکارگیری سورفکتانت از دیگر فاکتورهای موثر در بازده نانوسیال در جذب دی اکسید کربن محسوب می شود. در بسیاری از موارد نانوذرات به خودی خود گزینه بسیار مطلوبی از نظر خواص انتقال جرمی برای فرآیند جذب می باشند. با این حال تمایل پایین این ذرات به پراکندگی و ایجاد یک امولسیون پایدار بکارگیری آن ها را با محدودیت های چشمگیری روبرو می کند. بر این اساس، استفاده از سورفکتانت ها گزینه بسیار مناسبی جهت تقویت پایداری ذرات پراکنده شده در حلال پایه محسوب می شود. با این حال، حضور سورفکتانت در برخی موارد نانوسیال را به میزان قابل توجهی مستعد کفزایی می کند. در این راستا مطالعات بسیاری در زمینه بررسی و ارایه یک سورفکتانت مناسب جهت افزایش پایداری ذرات در حلال پایه صورت گرفته است. همانطور که بر اساس مطالعات پیشین مشهود است هرچند بکارگیری سورفکتانت با چالش های معدودی نظیر افزایش تمایل سیستم به کفزایی

همراه است، با این حال در بهبود پایداری نانوسیال در اثر بکارگیری سورفکتانت غیر قابل چشم پوشی است [58-61].

پارامتر دیگری که در جذب دی اکسید کربن اهمیت دارد، غلظت اولیه دی اکسید کربن است. با افزایش مقدار اولیه دی اکسید کربن، درصد جذب افزایش می یابد. که این امر به علت افزایش مقدار جذب شونده در محیط واکنش می باشد. با این حال از تاثیر حضور نانوذرات در این فرآیند نمی توان چشم پوشی کرد. به عبارت دیگر هر چند حضور مقدار دی اکسید کربن بیشتر در محیط واکنش امکان جذب بالاتری را فراهم می کند با این حال به کارگیری نانوذرات و به دنبال آن مکانیسم های القا شده به سیال در اثر حضور این ذرات منجر به آن می شود که بتوان جهت دستیابی به ظرفیت های جذب مشابه در سیستم های حاوی نانوذرات از حلال های جذب شونده با ظرفیت جذب پایین تر بهره جست. که در نتیجه این امر فرآیند احیا حلال نیز به مراتب از نظر مصرف انرژی در سطح مطلوب تری قرار خواهد گرفت. با این حال هر چند که این فاکتور به عنوان یک پارامتر اثرگذار در بازده فرآیند جذب مطرح است، در مطالعات محدودی به این پارامتر توجه شده است. این امر یکی از برجسته ترین چالش ها در زمینه مطالعه فرآیند جذب دی اکسید کربن با استفاده از نانوسیالات است [62-64].

دما پارامتر دیگری است که روی انتقال جرم گاز و مایع تاثیر زیادی دارد. پژوهش انجام شده نشان می دهد که انحلال دی اکسید کربن در حضور نانوذرات $Al_2O_3/NaCl$ در دمای 10 درجه سانتی گراد نسبت به 20 و 30 درجه سانتی گراد کم تر است که این به علت است که در دمای بالاتر، نانوذرات دارای حرکت براونی و انرژی جنبشی بیشتر است که باعث می شود که از چسبندگی و خوشه ای شدن ذرات جلوگیری شود. بنابراین سطح آزاد نانوذرات در دمای بالاتر بیشتر خواهد بود و در نتیجه این امر مکانیسم های موثر بر انتقال جرم در حضور نانوذرات به نحو بهتری عمل خواهد کرد و ضریب نفوذ افزایش خواهد یافت [65, 66].

تاثیر دبی گاز و مایع روی انتقال جرم مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش دبی گاز و مایع موجب افزایش انتقال جرم شده است. ضریب انتقال جرم دی اکسید کربن با افزایش دبی گاز و مایع از 9 تا 40 درصد افزایش یافت. افزایش دبی مایع تاثیر بیشتری در مقایسه با افزایش دبی گاز، در جذب دی اکسید کربن دارد. در فرآیند جذب دی اکسید کربن، عامل محدود کننده دی اکسید کربن است. با افزایش مقدار محلول جاذب امکان افزایش حداکثری جذب دی اکسید کربن فراهم می گردد. از سویی افزایش شدت جریان فاز مایع و به دنبال آن افزایش سرعت جریان مذکور منجر به افزایش میزان آشفتگی جریان نانوسیال می شود. این امر به طور مستقیم بر تشدید مکانیسم های موثر نانوذرات در انتقال جرم نظیر حرکت براونی ذرات موثر خواهد بود [67, 68].

هر چند تعداد مطالعات داخلی صورت گرفته محدود نیست [69-71] با این حال لزوم ارائه مطالعات جامع تر و عمیق تر با در نظر گرفتن مبانی نظری و پایه های علمی حاکم بر مکانیسم های مورد بحث، بسیار حائز اهمیت است. از سویی عدم بررسی عمیق و جامع مکانیسم های مطرح شده بصورت آزمایشگاهی و باقی ماندن آن ها در حد مطالعات تئوری از جمله بزرگترین خلاء های موجود در این زمینه است که همچنان پابرجا است. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که مطالعات انجام شده در زمینه بررسی پارامترهای عملیاتی موثر در بهبود بازده جذب دی اکسید کربن در نانوسیال نیاز به ارتقاء و عمق بیشتری دارد و در زمینه مطالعه برخی فاکتورها نظیر دما یا شدت جریان دو فاز همچنان محدود

است. بر این اساس با توجه به پتانسیل بسیار بالا، بررسی‌های آزمایشگاهی و مطالعات عمیق‌تر این حوزه از دانش ضروری است.

4- نتیجه‌گیری

مکانیسم‌های متعددی را می‌توان به عنوان مکانیسم موثر در بهبود فرآیند انتقال جرم در حضور نانوذرات در نظر گرفت. مکانیسم‌های همچون اثر تفکیک حباب، اثر شاتل، اثر هیدرودینامیکی، بواسطه فاکتورهای عملیاتی مختلفی همچون غلظت نانوذرات به کار گرفته شده، ویسکوزیته، دانسیته، ماهیت حلال پایه و ذرات مورد استفاده، نسبت سطح به حجم و همچنین بکارگیری یا عدم به کارگیری سورفکتانت، دما، شدت جریان گاز و مایع و همچنین مقدار دی‌اکسید کربن موجود در جریان گاز ورودی قابل کنترل و ارتقا است. با این حال، ذکر این نکته بسیار قابل تأمل است که منحصر برای هیچ نانوذره‌ای نمی‌توان یک غلظت بهینه واحد را بدون در نظر گرفتن تأثیر فاکتورهای عملیاتی موثر نظیر ماهیت دوفاز جامد-مایع، حضور یا عدم حضور سورفکتانت، روش سنتز نانوذره و سایر شرایط عملیاتی، ارائه کرد. بطور کلی اگرچه مکانیسم‌های ارائه شده نتایج آزمایشگاهی را به صورت منطقی توجیه می‌کند، اما هر کدام دامنه مربوطه به خود را دارد و به طور قطعی اثبات شده نیست. در حالی که ممکن است از مکانیسم‌های مختلف برای توضیح فرآیند انتقال جرم نانوسیالات سیستم‌های جذب استفاده شود، تعیین اینکه کدام مکانیسم نقش اصلی را بازی می‌کند دشوار است. هرچند که مطالعات زیادی نشان داده است که نانوسیال می‌تواند باعث بهبود انتقال جرم در فرآیندهای گاز-مایع شود، اما برخی از محققان به نتایج متضادی دست یافته‌اند. در برخی تحقیقات حضور نانوذرات در فاز مایع سبب تضعیف انتقال جرم شده است. توضیح احتمالی برای این تضعیف عبارت است از عواملی همچون تجمع نانوذرات که سبب کاهش انتقال جرم می‌گردد؛ افزایش ویسکوزیته فاز مایع که منجر به افزایش ضخامت لایه مرزی نفوذ می‌شود و در نتیجه آن ضریب انتقال جرم فاز مایع کاهش می‌یابد و در نهایت تماس بین فاز گاز و مایع با اختلال مواجه می‌گردد. بر این اساس می‌توان گفت که لزوم بررسی موشکافانه و هرچه دقیق‌تر مکانیسم‌های موثر بر انتقال جرم در نانوسیالات به منظور افزایش هرچه بیشتر کارایی این سیالات در فرآیندهای صنعتی مبتنی بر انتقال جرم بسیار حائز اهمیت است.

5- فهرست علائم

علائم انگلیسی

T دما، K

T₀ دمای مرجع، K

k ثابت بولتزمن، J/K

d قطر ذرات، m

D ضریب نفوذ، m²/s

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m³

ρ_{nf} چگالی نانوسیال، kg/m³

ρ_p چگالی ذرات، kg/m³

چگالی سیال پایه، kg/m^3	ρ_f
ویسکوزیته، Pa.s	μ
ویسکوزیته نانوسیال، Pa.s	μ_{nf}
ویسکوزیته سیال پایه، Pa.s	μ_{bf}
کسر حجمی ذرات، -	φ_p
کسر حجمی ماکسیمم، -	φ_m

6- منابع

- [1] Hu, G., et al., Carbon dioxide absorption into promoted potassium carbonate solutions: A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016. 53: p. 28-40.
- [2] Jung-Yeul Jung., et al., CO₂ absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012 26, 2285–2290.
- [3] Osman, A.I., et al., Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021. 19(2): p. 797-849.
- [4] Jansen, D., et al., Pre-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015. 40: p. 167-187.
- [5] Wang, X. and C. Song, Carbon capture from flue gas and the atmosphere: A perspective. *Frontiers in Energy Research*, 2020. 8: p. 560849.
- [6] Meng, F., et al., Research progress of aqueous amine solution for CO₂ capture: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. 168: p. 112902.
- [7] Aghel, B., et al., Review on CO₂ capture by blended amine solutions. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022. 119: p. 103715.
- [8] Llamas, B., et al., Greenhouse gas emissions–carbon capture, storage and utilisation. *Greenhouse gases*, 2016. 81.
- [9] Dugas, R.E. and G.T. Rochelle, CO₂ absorption rate into concentrated aqueous monoethanolamine and piperazine. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011. 56(5): p. 2187-2195.
- [10] Lv, B., et al., Mechanisms of CO₂ capture into monoethanolamine solution with different CO₂ loading during the absorption/desorption processes. *Environmental science & technology*, 2015. 49(17): p. 10728-10735.
- [11] M.N.A.W.M. Yazid., et al., Heat and mass transfer characteristics of carbon nanotube nanofluids: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80 (2017) 914e941
- [12] O. Mahian., et al., A review of entropy generation in nanofluid flow, *Int. J. Heat. Mass Tran* 65 (2013) 514e532
- [13] Kars, R., R. Best, and A. Drinkenburg, The sorption of propane in slurries of active carbon in water. *The Chemical Engineering Journal*, 1979. 17(2): p. 201-210.
- [14] Ting, J. and A. Drinkenburg, Absorption of gases into activated carbon—water slurries in a stirred cell. *Chemical engineering science*, 1992. 47(6): p. 1337-1345.
- [15] Kluytmans, J., et al., Mass transfer in sparged and stirred reactors: influence of carbon particles and electrolyte. *Chemical Engineering Science*, 2003. 58(20): p. 4719-4728.
- [16] Alper, E., B. Wichtendahl, and W.-D. Deckwer, Gas absorption mechanism in catalytic slurry reactors. *Chemical Engineering Science*, 1980. 35(1-2): p. 217-222.
- [17] Alper, E. and S. Öztürk, The effect of activated carbon loading on oxygen absorption into aqueous sodium sulphide solutions in a slurry reactor. *The Chemical Engineering Journal*, 1986. 32(2): p. 127-130.

- [18] Linek, V., M. Kordač, and M. Soni, Mechanism of gas absorption enhancement in presence of fine solid particles in mechanically agitated gas-liquid dispersion. Effect of molecular diffusivity. *Chemical engineering science*, 2008. 63(21): p. 5120-5128.
- [19] Yoon, S., J.T. Chung, and Y.T. Kang, The particle hydrodynamic effect on the mass transfer in a buoyant CO₂-bubble through the experimental and computational studies. *International journal of heat and mass transfer*, 2014. 73: p. 399-409.
- [20] Kim, J.H., C.W. Jung, and Y.T. Kang, Mass transfer enhancement during CO₂ absorption process in methanol/Al₂O₃ nanofluids. *International journal of heat and mass transfer*, 2014. 76: p. 484-491.
- [21] Kim, W.-g., et al., Synthesis of silica nanofluid and application to CO₂ absorption. *Separation Science and Technology*, 2008. 43(11-12): p. 3036-3055.
- [22] Pineda, I.T., et al., CO₂ absorption enhancement by methanol-based Al₂O₃ and SiO₂ nanofluids in a tray column absorber. *International journal of refrigeration*, 2012. 35(5): p. 14. ۰۹-۰۲
- [23] Jung, J.-Y., J.W. Lee, and Y.T. Kang, CO₂ absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol. *Journal of mechanical science and technology*, 2012. 26: p. 2285-2290.
- [24] Zarei, F., et al., Enhanced CO₂ absorption and reduced regeneration energy consumption using modified magnetic NPs. *Energy*, 2023. 278: p. 127776.
- [25] Zhang, N., et al., A brief review of enhanced CO₂ absorption by nanoparticles. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2018. 19(3-4): p. 3-4.
- [26] Zarei, F. and P. Keshavarz, High performance CO₂ Absorption/Desorption using Amine-Functionalized magnetic nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, 2023. 323: p. 124438.
- [27] Lee, J.S., J.W. Lee, and Y.T. Kang, CO₂ absorption/regeneration enhancement in DI water with suspended nanoparticles for energy conversion application. *Applied energy*, 2015. 143: p. 119-129.
- [28] Li, H., CO₂ capture by various nanoparticles: Recent development and prospective. *Journal of Cleaner Production*, 2023: p. 137679.
- [29] J.S. Lee, J.W. Lee, Y.T. Kang, CO₂ absorption/regeneration enhancement in DI water with suspended nanoparticles for energy conversion application, *Appl. Energ* 143 (2015) 119e129.
- [30] J.-Y. Jung, J.W. Lee, Y.T. Kang, CO₂ absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol, *J. Mech. Sci. Technol.* 26 (2012) 2285e2290.
- [31] J.W. Lee, Y.T. Kang, CO₂ absorption enhancement by Al₂O₃ nanoparticles in NaCl aqueous solution, *Energy* 53 (2013) 206e211.
- [32] Jae Won Lee, Yong Tae Kang, CO₂ absorption enhancement by Al₂O₃ nanoparticles in NaCl aqueous solution, *Energy Volume 53*, 1 May 2013, Pages 206-211.
- [33] Behnaz Rahmatmand, Peyman Keshavarz, Shahab Ayatollahi, Study of Absorption Enhancement of CO₂ by SiO₂, Al₂O₃, CNT, and Fe₃O₄ Nanoparticles in Water and Amine Solutions, *J. Chem. Eng. Data* 2016, 61, 4, 1378–1387.
- [34] Einstein, A., A new determination of molecular dimensions. *Ann. Phys.*, 1906. 19: p. 289-306.
- [35] Brinkman, H.C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of chemical physics*, 1952. 20(4): p. 571-571.
- [36] Krieger, I.M. and T.J. Dougherty, A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*, 1959. 3(1): p. 137-152.
- [37] Frankel, N. and A. Acrivos, On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres. *Chemical Engineering Science*, 1967. 22(6): p. 847-853.
- [38] Nielsen, L.E., Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. *Journal of Applied Physics*, 1970. 41(11): p. 4626-4627.
- [39] Lundgren, T.S., Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. *Journal of fluid mechanics*, 1972. 51(2): p. 273-299.
- [40] Batchelor, G., The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of fluid mechanics*, 1977. 83(1): p. 97-117.

- [41] Kitano, T., T. Kataoka, and T. Shiota, an empirical equation of the relative viscosity of polymer melts filled with various inorganic fillers. *Rheologica Acta*, 1981. 20: p. 207-209.
- [42] White, F., *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [43] Lee, J.W. and Y.T. Kang, CO₂ absorption enhancement by Al₂O₃ nanoparticles in NaCl aqueous solution. *Energy*, 2013. 53: p. 206-211.
- [44] Wang, T., et al., Enhanced CO₂ absorption and desorption by monoethanolamine (MEA)-based nanoparticle suspensions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016. 55(28): p. 7830-7838.
- [45] Darvanjooghi, M.H.K., M.N. Esfahany, and S.H. Esmaeili-Faraj, Investigation of the effects of nanoparticle size on CO₂ absorption by silica-water nanofluid. *Separation and Purification Technology*, 2018. 195 :p. 208-215.
- [46] Li, S.H., Y. Ding, and X.S. Zhang, Enhancement on CO₂ bubble absorption in MDEA solution by TiO₂ nanoparticles. *Advanced Materials Research*, 2013. 631: p. 127-134.
- [47] Lee, J.W., et al., Combined CO₂ absorption/regeneration performance enhancement by using nanoabsorbents. *Applied energy*, 2016. 178: p. 164-176.
- [48] Samadi, Z., M. Haghshenasfard, and A. Moheb, CO₂ absorption using nanofluids in a wetted-wall column with external magnetic field. *Chemical Engineering & Technology*, 2014. 37(3 :p. 462-470.
- [49] Zhang, Y., et al., The use of TiO₂ nanoparticles to enhance CO₂ absorption. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016. 50: p. 49-56.
- [50] Jiang, J., et al., Experimental study of CO₂ absorption in aqueous MEA and MDEA solutions enhanced by nanoparticles. *International Journal of greenhouse gas control*, 2014. 29: p. 135-141.
- [51] Rahmatmand, B., P. Keshavarz, and S. Ayatollahi, Study of absorption enhancement of CO₂ by SiO₂, Al₂O₃, CNT, and Fe₃O₄ nanoparticles in water and amine solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2016. 61(4): p. 1378-1387.
- [52] Jiang, J.-z., L. Liu, and B.-m. Sun, Model study of CO₂ absorption in aqueous amine solution enhanced by nanoparticles. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011. 5: p. 51-58.
- [53] Rafigh, S.M. and A. Heydarinasab, Mesoporous chitosan-SiO₂ nanoparticles: synthesis, characterization, and CO₂ adsorption capacity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017. 5(11): p. 10379-10386.
- [54] Wan Isahak, W.N.R., et al., Enhancement of CO₂ capture using CuO nanoparticles supported on green activated carbon. *Advanced Materials Research*, 2015. 1087: p. 111-115.
- [55] Ota, M., et al., CO₂ adsorption property of amine-modified amorphous TiO₂ nanoparticles with a high surface area. *Colloids and Interfaces*, 2018. 2(3): p. 25.
- [56] Bian, S.-W., et al., A template-free, thermal decomposition method to synthesize mesoporous MgO with a nanocrystalline framework and its application in carbon dioxide adsorption. *Journal of Materials Chemistry*, 2010. 20(39): p. 8705-8710.
- [57] Khine, E.E., et al., Synthesis and characterization of calcium oxide nanoparticles for CO₂ capture. *Journal of Nanoparticle Research*, 2022. 24(7): p. 139.
- [58] Yekeen, N., et al., Impact of nanoparticles-surfactant solutions on carbon dioxide and methane wettabilities of organic-rich shale and CO₂/brine interfacial tension: Implication for carbon geosequestration. *Energy Reports*, 2022. 8: p. 15669-15685.
- [59] Islam, A., et al., Enhancing the sorption performance of surfactant-assisted CaO nanoparticles. *RSC Advances*, 2014. 4(110): p. 65127-65136.
- [60] Kumar, R.S., et al., Effect of nanoparticle on rheological properties of surfactant-based nanofluid for effective carbon utilization: capturing and storage prospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. 28(38): p. 53578-53593.
- [61] Choi, I.D., J.W. Lee, and Y.T. Kang, CO₂ capture/separation control by SiO₂ nanoparticles and surfactants. *Separation Science and Technology*, 2015. 50(5): p. 772-780.

- [62] I.P. Koronaki, M.T. Nitsas, C.A. Vallianos, Enhancement of carbon dioxide absorption using carbon nanotubes e a numerical approach, *Appl. Therm. Eng.* 99 (2016) 1246e1253.
- [63] M. Darabi, M. Rahimi, A. Molaei Dehkordi, Gas absorption enhancement in hollow fiber membrane contactors using nanofluids: modeling and simulation, *Chemical Engineering and Processing, Process Intensif.* 119 (2017) 7e15.
- [64] I. Torres Pineda, J.W. Lee, I. Jung, Y.T. Kang, CO₂ absorption enhancement by methanol-based Al₂O₃ and SiO₂ nanofluids in a tray column absorber, *Int. J. Refrig.* 35 (2012) 1402e1409
- [65] B. Olle, S. Bucak, T.C. Holmes, L. Bromberg, T.A.H. And, D.I.C. Wang, Enhancement of oxygen mass transfer using functionalized magnetic nanoparticles, *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006) 4355e4363.
- [66] X. Fang, Y. Xuan, Q. Li, Experimental investigation on enhanced mass transfer in nanofluids, *Appl. Phys. Lett.* 95 (2009) 99e105.
- [67] Z. Samadi, M. Haghshenasfard, A. Moheb, CO₂ absorption using nanofluids in a wetted-wall column with external magnetic field, *Chem. Eng. Technol.* 37 (2014) 462e470
- [68] Golkhar, P. Keshavarz, D. Mowla, Investigation of CO₂ removal by silica and CNT nanofluids in microporous hollow fiber membrane contactors, *J. Membr. Sci.* 433 (2013) 17e24
- [69] م. انبیاء، ف. اشراقی، "سنتز و شناسایی CNT@MOF-199 به منظور افزایش جذب گاز CO₂"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره 38، شماره 1، صفحه 45-53، خرداد 1398
- [70] ک. رحیمی، س. ریاحی، م. عباسی، ز. فخر وئیان، "عامل دار کردن نانولوله‌های کربنی چند دیواره به دی آمین به منظور افزایش جذب دی‌اکسید کربن"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره 40، شماره 2، صفحه 73-81، شهریور 1400
- [71] ف. زارعی، ع. الهام بخش، پ. کشاورز، "بررسی تاثیر نانوذرات TiO₂ و Fe₂O₃ بر جذب/واجذب CO₂"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره 42، شماره 3، صفحه 139-150، آذر 1402