

## مروری بر تاثیر حضور نانو ذرات در محلول های آمینی در جذب گاز دی اکسیدکربن

تاریخ دریافت مقاله: تیر ۱۳۹۹

تاریخ پذیرش مقاله: مرداد ۱۳۹۹

حسن پاشایی<sup>۱</sup>، احد قائمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> محقق پسا دکترا، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

نام نویسنده مسئول:

احد قائمی

### چکیده

در این تحقیق، اثر نانو اکسیدهای فلزی مانند  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ،  $\text{NiO}$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  به همراه سیال پایه، بر روی جذب گاز کربن دی اکسید در ستون حبایی بررسی شده است. بررسی ها نشان داد که افزودن نانو ذرات به محلول پایه در ابتدا باعث بهبود خصوصیات انتقال جرم در فرآیند جذب  $\text{CO}_2$  گردیده و سپس اثر عکس داشته است. همچنین، بررسی ها نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات در سیال پایه در غلظت های کمتر از غلظت بهینه، میزان جذب گاز نسبت به سیال پایه افزایش می یابد. اما با افزودن نانو ذرات به بیش از غلظت بهینه، میزان جذب کاهش یافته است. همچنین افزودن نانو ذرات به محلول های پایه متفاوت نشان می دهد که نانو ذرات در محلول های مختلف، اثر متفاوت داشته و به یک اندازه میزان جذب  $\text{CO}_2$  را بهبود نمی دهند. بررسی های این تحقیق نشان می دهد که حرکت براونی و اثر گریزینگ یا شاتل از مهم ترین عوامل افزایش انتقال جرم در نانو سیالات می باشد که این افزایش، بهبود راندمان جذب گاز را به دنبال خواهد داشت. به طور کلی در این تحقیق سعی بر آن است تا با بیان مبانی، اصول و معادلات حاکم بر برج های حباب در زمینه جذب گاز کربن دی اکسید، توسط نانو محلول های آمین، زمینه لازم برای استفاده بهینه از این تجهیزات فراهم آید.

**واژگان کلیدی:** انتقال جرم، ستون حبایی، جذب  $\text{CO}_2$ ، فاکتور بهبود، نانو ذرات.

## مقدمه

یکی از بزرگترین مسائل زیست محیطی جهان امروز، افزایش بیش از حد آثار گازهای گلخانه ای است [۱-۳]. در این بین گاز کربن دی اکسید به دلیل بالاترین زمان ماند و بیشترین مقدار در اتمسفر از مهمترین گازهای گلخانه ای است [۴-۶] که کاهش آن از نظر زیست محیطی اهمیت بسیار زیادی دارد [۷]. حذف گازهای اسیدی مانند کربن دی اکسید و سولفور اسید به منظور جلوگیری از خوردگی تجهیزات بسیار مهم می باشد [۸]. مهمترین منابع تولید گاز کربن دی اکسید، صنایع پتروشیمی و پالایش [۹]، احتراق زغال سنگ، نیروگاه ها و تولید انرژی از گاز طبیعی می باشد. با توجه به حجم فعالیت های صنعتی نفت و گاز و پتروشیمی در ایران، کشور ما نیز از این قاعده مستثنی نیست. به طوری که براساس فهرست<sup>۱</sup> CDIAC که در سال ۲۰۰۸ برای سازمان ملل متحد جمع آوری ایران با تولید ۱/۶۹٪ از CO<sub>2</sub> جهان در رتبه دهم قرار دارد. بنابراین بررسی و به کارگیری روش های مرسوم و روش های جدید برای جداسازی کربن دی اکسید، امری اجتناب ناپذیر است. از جمله روش هایی که برای حذف این آلاینده استفاده می شود فرآیند جذب می باشد [۱۰، ۱۱]. فرآیندهای جذب در مایع به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم می شوند [۱۲، ۱۳]. در روش جذب فیزیکی هیچ گونه واکنشی اتفاق نمی افتد [۱۴] و ناخالصی های جریان گاز از طریق ایجاد نیروهای بین مولکولی در فاز مایع حل می شوند [۱۵، ۱۶]. در این روش از حلال های فیزیکی مانند دی متیل اتر، پلی اتیلن گلیکول، متانول، رکتیسول و سلکسوس استفاده می شود [۱۷]. مزیت اصلی استفاده از حلال های فیزیکی این است که محدودیتی در جذب گاز ندارند [۱۸]. مقدار گاز جذب شده توسط حلال فیزیکی به تعادل مایع - بخار حلال وابسته است که آن نیز با تغییر دما و فشار کنترل می شود. در فشارهای بالای جزء گازی (بیش از ۵۲۵ کیلو پاسکال) حل شونده، ظرفیت جذب گاز توسط حلال های فیزیکی بیشتر از حلال های شیمیایی است. بنابراین فرآیند جذب فیزیکی برای تصفیه گازهای غنی از جزء حل شونده انتخاب بسیار مناسبی است [۱۹، ۲۰]. جذب شیمیایی در غلظت های پایین تا متوسط به جذب فیزیکی ترجیح داده می شوند [۲۱]. برای فرآیند جذب شیمیایی در فاز مایع از محلول های آلکانول آمین مانند منو اتانول آمین (MEA)، دی اتانول آمین (DEA)، تری اتانول آمین (TEA)، n-متیل دی اتانول آمین، دی گلیکول آمین و کربنات پتاسیم داغ به عنوان جاذب استفاده می شود [۲۲، ۲۳]. این مواد به دلیل ارزان بودن و نیز خاصیت واکنش جذب، به طور گسترده در حذف گازهای اسیدی مورد استفاده قرار می گیرند [۸]. عیب این فرآیند تشکیل نمک هایی با پایداری حرارتی (HSS)<sup>۲</sup> با آمین، باعث غیر فعال کردن و محدود کردن توانایی آمین ها شده و از احیای مجدد آن ها جلوگیری می نماید. همچنین مزاحمت های آنیونی مانند کلرید، نیترات و غیره و محصولات جانبی سبب افزایش خوردگی می گردد. به منظور کاهش این مشکل در حین جداسازی، میزان HSS باید به حداقل مقدار خود رسیده و از میزان ۱۰٪ غلظت کل آمین تجاوز ننماید. به طور کلی جذب شیمیایی برای جریان های گازی با فشار پایین که غلظت جز حل شونده گاز در آن ۳-۲۵ درصد است، مناسب می باشد. اما اگر غلظت جز حل شونده گاز از این میزان بیشتر شود، هزینه بازیابی حلال افزایش می یابد. نانو سیالات مایعاتی هستند که در آن نانو ذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر، به صورت پایدار در سیال پایه معلق هستند. این سیالات می توانند مشکلاتی از قبیل رسوب، چسبندگی و خوردگی، که در مخلوط های جامد/مایع میلی متری و میکرومتری به طور مرسوم اتفاق می افتد، را حل کنند. اما عملکرد حرارتی سیال پایه را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهند. امروزه با توجه به گسترش روز افزون فناوری نانو، نانو سیالات به عنوان سیالاتی با پتانسیل و ضرایب انتقال جرم بالا به منظور افزایش جذب کربن دی اکسید در مایعات مطرح می شوند. تحقیقات انجام شده توسط محققین در این زمینه بیانگر آن است که نانو سیال ها با بهبود ضریب انتقال جرم، فرآیند جذب گاز را بهبود می بخشد. اصطلاح نانو سیال نخستین بار توسط چوی<sup>۳</sup> ابداع شد [۲۴]. وی گزارش داد که با افزودن مقدار کمی نانو ذره به سیال پایه، هدایت حرارتی به بیش از ۴۰٪ می رسد. بررسی مطالعات نشان می دهد که وجود ذرات نانو در محلول های شیمیایی باعث تغییر در شدت جذب گاز دی اکسید کربن می شود. در این تحقیق علاوه بر ارائه یک مطالعه جامع بر جذب گاز دی اکسید کربن توسط نانو سیال ها، اثر شرایط عملیاتی بر شدت انتقال جرم دی اکسید کربن، نوع و مقدار نانو ذرات، نوع محلول و غلظت آن و حلالیت گاز مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱- اثر نانو ذرات بر حلالیت

با وجود مطالعات قبلی در مورد بررسی میزان جذب در نانوسیال ها، در مورد اثر نانو ذرات بر قابلیت انحلال گاز در نانو سیالات تحقیقات اندکی انجام شده است. چوی، کبلین اسکی<sup>۴</sup> و همکاران [۲۵] مکانیسم بالقوه ای مانند حرکت براونی، لایه بندی مایعات<sup>۵</sup> و خوشه بندی نانو ذره را برای افزایش هدایت حرارتی سازماندهی کردند. آنها اثر نانو ذرات در جذب آمونیاک در ستون حبابی را مورد مطالعه قرار داده و از ۲- اتیل - ۱- هگزانول و n- اکتانول و ۲- اکتانول به عنوان فعال سطحی استفاده نمودند و نشان دادند که افزودن نانو ذرات و فعال سطحی به طور همزمان، عملکرد جذب را ۵/۳۲ برابر افزایش می دهد. ما و همکاران [۷] نرخ انتقال جرم و حرارت نانو لوله های کربنی را

<sup>1</sup> Carbon Dioxide Information Analysis Center<sup>2</sup> Heat Stable Salts<sup>3</sup> Choi et al.<sup>4</sup> Koblinski et al.<sup>5</sup> Liquid layering

با استفاده از نانو سیالات در ستون حبایی بررسی کردند. بر اساس نتایج تحقیقات آنها، با افزایش غلظت نانو ذرات سیلیکا در آب، میزان جذب گاز کربن دی اکسید افزایش یافته است. جذب گاز کربن دی اکسید در ستون حبایی با استفاده از نانو سیال آب/سیلیکا توسط کیم و همکاران [26] بررسی شده است. با اضافه کردن نانوذرات سیلیکا به مایع پایه، در دقایق اولیه، نرخ جذب و مقدار کل گاز جذب شده به ترتیب ۷۶ و ۲۴ درصد افزایش نشان داده است. آنها نشان دادند که ضریب انتقال جرم  $CO_2$  در نانو سیال ۵ برابر بیشتر از آب است. پینیدا<sup>۶</sup> و همکاران [۲۷] اثر نانو ذرات  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  در جذب  $CO_2$  در یک برج سینی دار با محلول پایه متانول را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که افزودن نانو ذرات  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  میزان جذب را به ترتیب ۹/۴ و ۷/۹ درصد افزایش می دهد. آنها متوجه شدند که غلظت بهینه نانو ذرات برای هر دو نانو ذره، ۰/۰۵٪ حجمی است. نیو<sup>۷</sup> و همکاران [۲۸] در مورد اثر میدان مغناطیسی در جذب آب و آمونیاک در یک دیوار مرطوب مطالعاتی انجام داده اند. آنها میدان مغناطیسی را در جهت فیلم ریزان و مخالف فیلم ریزان اعمال کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که میدان مغناطیسی هم جهت با فیلم ریزان، میزان انتقال جرم را افزایش و میدان مغناطیسی مخالف جهت فیلم ریزان، نرخ انتقال جرم را کاهش می دهد. وو<sup>۸</sup> و همکاران [۲۹] اثر نانو ذرات  $Fe_3O_4$  بر عملکرد جذب آمونیاک/آب تحت میدان مغناطیسی خارجی را بررسی نمودند. آنها دریافتند که ترکیب نانو سیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی خارجی عملکرد جذب آمونیاک/آب را افزایش می دهد. در این تحقیق، نانو سیال آب /  $Fe_3O_4$  با غلظت ۰/۲ - ۰/۲۸ تسلا استفاده شده است. نتایج نشان داده که میزان جذب با افزایش غلظت نانو سیال و شدت میدان مغناطیسی افزایش می یابد. سلیمی و همکاران [۳۰] اثر استفاده از نانو سیالات در فرآیند جذب گاز در برج آکنده در حضور میدان مغناطیسی برای جذب  $CO_2$  را مورد بررسی قرار داده و دریافتند که اضافه کردن نانو ذرات به محلول پایه باعث افزایش ضریب انتقال جرم و در نتیجه افزایش میزان انتقال جرم می شود. آنها غلظت بهینه آب/  $Fe_3O_4$  و آب/  $NiO$  را به ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ درصد و حداکثر میزان انتقال جرم در مقایسه با آب را به ترتیب ۱۲ و ۹/۵ درصد به دست آوردند. همچنین در غلظت های بهینه با اعمال میدان مغناطیسی میزان انتقال جرم به ترتیب ۱۴ و ۱۰/۵ درصد بدست آمد. حق طلب و همکاران [۳۱] اثر نانو اکسیدهای روی و سیلیسیم را در جذب  $CO_2$  در یک راکتور همزده مورد آزمایش قرار دادند. اندازه گیری حلالیت  $CO_2$  در آب خالص و ۰/۰۱٪ وزنی از نانو ذرات نشان داد که، افزودن نانو ذرات باعث افزایش میزان جذب شده و تاثیر نانو ذرات اکسید روی بیشتر از سیلیسیم می باشد. لی و همکاران [۳۲] نرخ انتقال حرارت و جرم در فرآیند جذب محلول آب/آمونیاک را با استفاده از نانو ذرات  $Al_2O_3$  و نانو لوله های کربنی در ستون های حبایی بررسی نمودند. علاوه بر این، آماریس<sup>۹</sup> و همکاران [۳۳] از نانو لوله های کربنی برای بررسی عملکرد  $LiNO_3/NH_3$  در ستون حبایی استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد، وجود نانو لوله های کربن باعث افزایش قابل توجهی در نرخ انتقال جرم و گرما می شود. لی و کانگ<sup>۱۰</sup> [۳۴] مطالعه ای را در مورد اثر نانو ذرات  $Al_2O_3$  در پایداری  $CO_2$  در محلول آبی  $NaCl$  در یک ستون حبایی انجام دادند. نتایج بررسی های آنها نشان داد که حلالیت با حضور نانو ذرات  $Al_2O_3$  در سه دمای مختلف افزایش می یابد. آنها همچنین غلظت بهینه نانو ذرات برای افزایش حلالیت  $CO_2$  در نانو سیال را ۰/۰۱٪ حجمی به دست آوردند. این مطالعات نشان داد که با افزودن مقدار کمی از نانو ذرات، ظرفیت جذب به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. از آنجائیکه آزمایشات قبلی در جاذب ستون حبایی انجام گرفته اند، بنابراین حرکت پراکنده نانو ذرات یک عامل موثر در فاکتور تاثیر گذار در اختلاط حباب های گاز در سیال شده و باعث شکستن حباب های گاز به اندازه های کوچکتر می شود. که باعث افزایش شدت جذب در مقایسه با سیال پایه می گردد [۳۴، ۳۵، ۳۶].

## ۲- فاکتور بهبود

فاکتور بهبود به عنوان نسبت ضریب انتقال جرم نانو سیالات به محلول خالص برای ارزیابی بهبود ضریب انتقال جرم تعریف می شود [۳۷]. با اندازه گیری زمان جذب و جرم جذب شده، به راحتی می توان میزان جذب را از رابطه زیر به دست آورد [۳۸]:

$$m_{abs}^o = \frac{m_{Co_2-final} - m_{Co_2-initial}}{t_{abs}} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $m_{abs}^o$  نرخ جذب گاز کربن دی اکسید در محلول،  $m_{Co_2-initial}$  جرم اولیه،  $m_{Co_2-final}$  جرم نهایی و  $t_{abs}$  زمان جذب را نشان می دهد. زمانی که نانو ذرات به محلول اضافه می شوند، ممکن است میزان جذب محلول تغییر کند. به منظور تعیین اثر نانو ذرات در میزان جذب از رابطه زیر استفاده می شود [۳۹]:

$$E = \frac{n_{Co_2-nanofluid}}{n_{Co_2-basefluid}} \quad \text{یا} \quad E = \frac{m_{abs,mixed-fluide}^o}{m_{abs,base-fluide}^o} \quad (2)$$

<sup>6</sup> Pineda et al.

<sup>7</sup> Niu et al.

<sup>8</sup> Wu et al.

<sup>9</sup> Amaris et al.

<sup>10</sup> Li and Kang

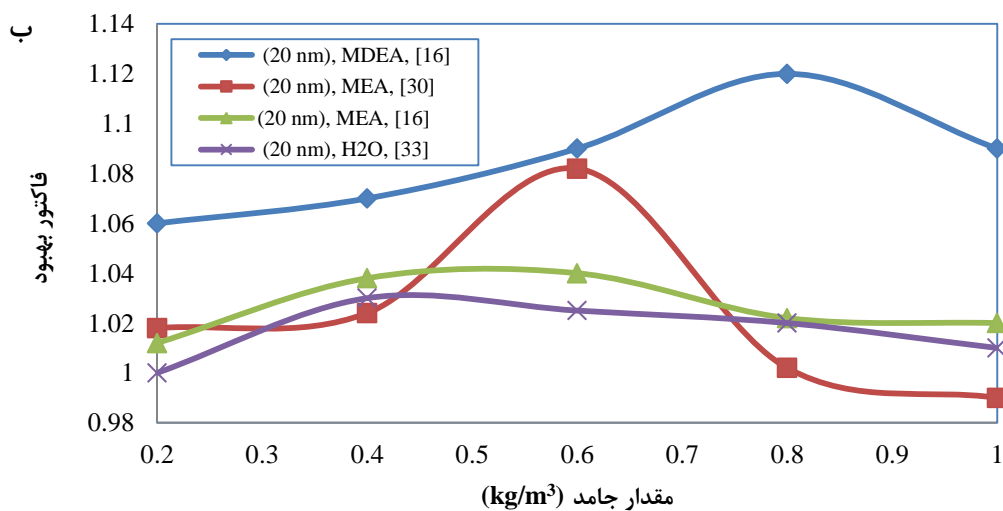
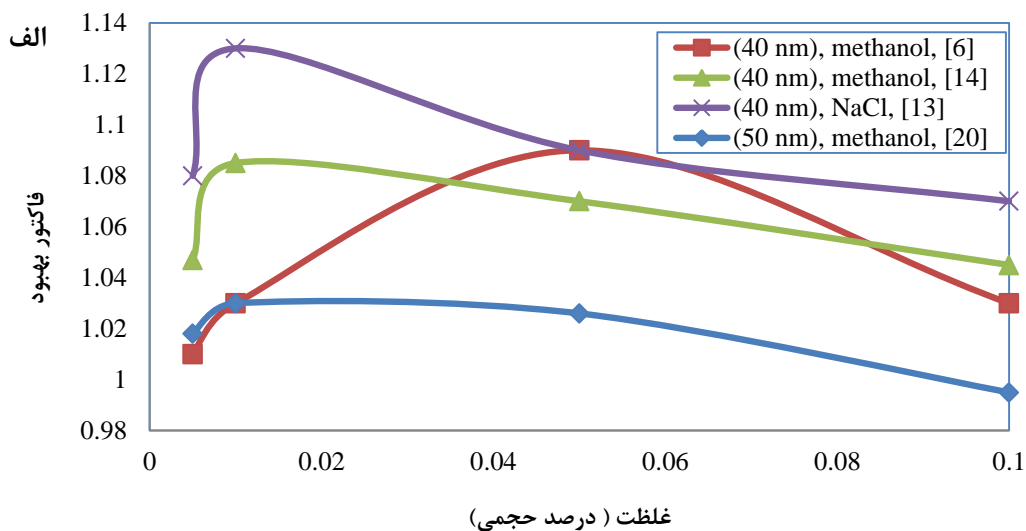
در رابطه (۲)، E فاکتور بهبود می باشد که تاثیر نانو ذرات بر میزان جذب CO<sub>2</sub> را نشان می دهد. اگر E بزرگتر از یک باشد، به معنی این است که افزودن نانو ذرات باعث افزایش میزان جذب شده است. اگر E کوچکتر از یک باشد، افزودن نانو ذرات باعث کاهش عملکرد جذب شده است.

### ۳- اثر مقدار نانو ذرات در میزان جذب

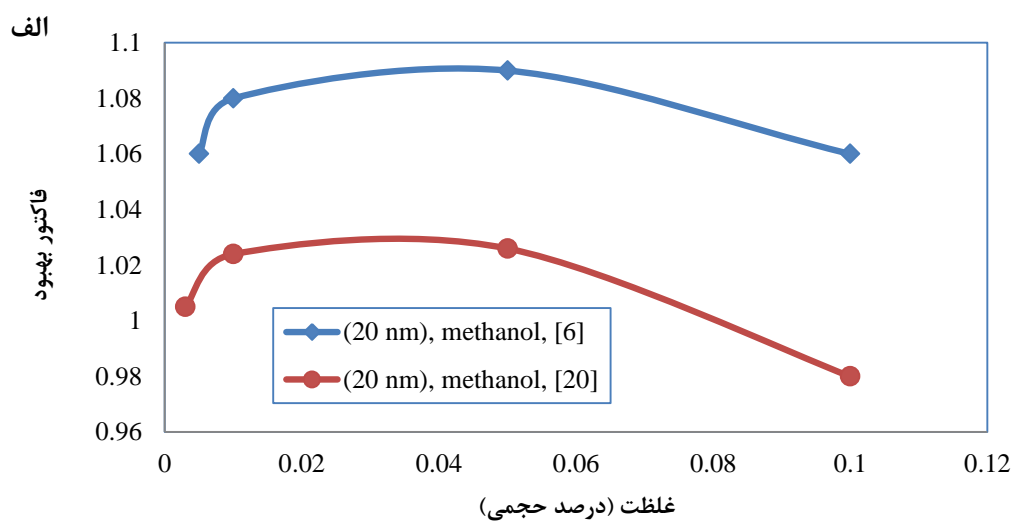
جریان حامل جاذب با توجه به حرکت براونی و افزایش میزان جذب به دلیل جریان اختلاطی جاذب و CO<sub>2</sub>، از اثرات اصلی مقدار نانو ذرات در جذب می باشد. به منظور بررسی اثر نانو ذرات بر میزان جذب، از معادله ۲ برای هر یک از نانو ذرات استفاده می شود. کیم و همکاران [۴۰] مطالعه ای بر روی اثر نانو ذرات مس، اکسید مس و آلومینای ۵۰ نانومتری بر سرعت جذب آمونیاک در آب توسط ستون حبابی انجام داده اند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار نانو ذرات، میزان جذب افزایش می یابد. مطالعه ی جذب CO<sub>2</sub> با استفاده از نانو سیال متانول / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و متانول / SiO<sub>2</sub> در ستون حبابی توسط لی و همکاران [۴۱] انجام شده است. مطالعه آنها نشان داد که وقتی، ۱٪ اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیس استفاده شود، حداکثر جذب CO<sub>2</sub> در مقایسه با متانول خالص به ترتیب ۴/۵ و ۵/۶٪ افزایش می یابد. جانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران [۳۵] میزان جذب کربن دی اکسید در نانو سیال حاوی نانو ذرات آلومینا با حلال پایه متانول را در یک جاذب ستون حبابی مورد مطالعه قرار داده اند. آنها نشان دادند که میزان جذب در مقایسه با متانول خالص ۸/۳ درصد افزایش داشته است. پنگ<sup>۱۲</sup> و همکاران [۴۲] از نانو ذرات نقره برای افزایش سرعت انتقال جرم آب / آمونیاک در فرآیند ستون حبابی استفاده نمودند. به طوری که با استفاده از ۰/۰۲ درصد وزنی از نانو ذرات نقره، میزان جذب در مقایسه با آب پایه، ۵۵٪ افزایش را نشان داد. کیم و همکاران [۴۳]، جذب CO<sub>2</sub> در نانو سیال SiO<sub>2</sub> در ستون حبابی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که با استفاده از ۰/۰۲۱ درصد وزنی سیلیکا، جذب کل در نانو سیال با پایه آب، ۲۴٪ افزایش یافته است. در این فرآیند به محض جذب گاز در نانو سیال، پایداری نانو ذرات باعث شکستن حباب های گاز به حباب های کوچکتر شده و سطح انتقال جرم افزایش می یابد. بنابراین حباب های کوچک باعث تشدید حلالیت گاز شده و در نهایت منجر به افزایش جذب کل در نانو سیال می شود.

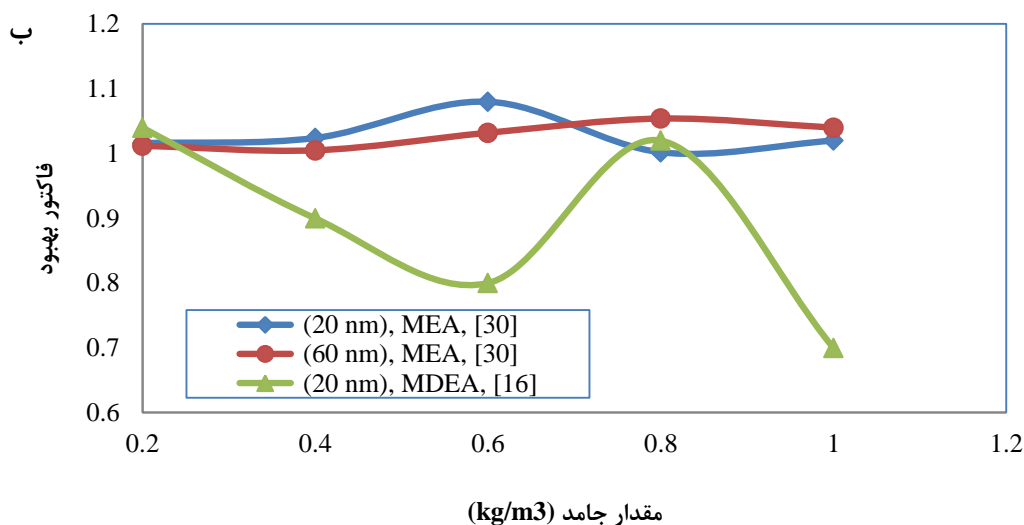
در سال های اخیر، محققان علاقه زیادی به استفاده از نانو ذرات اکسید نشان داده اند، زیرا این ماده دارای مواد شیمیایی آنتی باکتریال [۴۴]، نیمه هادی، فعالیت فتوکاتالیستی [۴۵] و خواص نوری [۴۶] مناسبی هستند. به عنوان مثال، در فرآیند شیمیایی تولید متانول از گاز سنتز (CO و H<sub>2</sub>)، اکسید روی به عنوان یک کاتالیزور استفاده می شود [۴۷]، که از عوامل موثر و لازم در تبدیل گاز سنتز به متانول می باشد. علاوه بر این، جذب CO<sub>2</sub> در پودر اکسید روی به روش های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۸]. اخیراً برهمکنش CO<sub>2</sub> با پودر نانو ذرات اکسید روی توسط طیف سنجی مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفته است [۴۹]. شکل های ۱ و ۲، نمودار غلظت محلول بر حسب فاکتور بهبود در مقادیر نانو ذرات را نشان می دهند. این نتایج نشان می دهد که با افزایش مقدار نانو ذرات، نرخ جذب می تواند افزایش و یا کاهش بیابد. به طوری که با افزایش مقدار نانو ذرات تا مقدار ماکزیمم، فاکتور بهبود نیز افزایش یافته و بعد از آن کاهش می یابد. یعنی، یک مقدار بهینه از نانو ذرات برای افزایش میزان جذب CO<sub>2</sub> وجود دارد [۵۰]. نتایج نشان می دهد برای نانو ذرات با توانایی جذب CO<sub>2</sub> کمتر، با افزایش مقدار جامد مقدار نانو ذرات افزایش یافته و با توجه به اثر اختلاط مرزها، انتقال جرم افزایش می یابد. علاوه بر این، نانو ذرات اطراف حباب ها، از انعقاد حباب ها، که منجر به تقویت ناحیه انتقال جرم گاز- مایع می شود، جلوگیری می کنند. اما زمانی که مقدار جامد بیش از حد زیاد باشد، چون ناحیه سطح تماس گاز- مایع محدود می شود باعث کاهش انتقال جرم می شود [۳۷، ۵۱].

<sup>11</sup> Jung<sup>12</sup> Pang



شکل ۱- فاکتور بهبود جذب CO<sub>2</sub> در غلظت های مختلف نانو ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>





شکل ۲- فاکتور بهبود جذب CO<sub>2</sub> در غلظت های مختلف نانو ذرات SiO<sub>2</sub>

نتایج در شکل های ۱ و ۲ نشان می دهند که با افزایش میزان نانو ذرات مقدار جذب افزایش یافته است. همچنین این نمودارها نشان می دهند که، حباب ها در جاذب بیشتر و بیشتتر شده و سبب افزایش شدت توزیع نانو ذرات و افزایش سرعت حرکت و فراوانی نانو ذرات در سطح تماس گاز/ مایع می شوند. از آنجائیکه همه این عوامل اثر جذب را بهبود می بخشند، بنابراین باعث افزایش نرخ جذب می شوند [۵۳]. علاوه بر مطالعات اشاره شده در بالا، جدول ۱ انواع موارد مورد بررسی توسط محققین داخلی و خارجی را نشان می دهد. در زمینه دفع گاز کربن دی اکسید توسط آمین ها مطالعات انجام شده بسیار کمتر از جذب است. از میان کارهای محدودی که در این رابطه انجام گرفته است می توان به موارد زیر اشاره کرد: کریت چفیلد [۵۴] در سال ۱۹۸۸، بوش و همکارش [۵۵] در سال ۱۹۹۰ و زو و همکارانش [۵۶] در سال ۱۹۹۵ احیا کربن دی اکسید از محلول های آمینی را در ظروف همزن دار یا برج آکنده بررسی کرده اند. در سال ۱۹۹۷ رناود و همکارانش [۵۷] دفع کربن دی اکسید از محلول متیل دی اتانول آمین را در محدوده دمایی ۳۱۲ تا ۳۸۳ کلوین و فشار ۰/۰۵ تا ۰/۸۵ در ظرف همزن دار بررسی نمودند و نشان دادند که در فشارهای بالاتر تئوری جذب برای شرایط دفع عینا قابل اعمال نیست و مقداری انحراف دارد.

جدول ۱- تاثیر محلول های مختلف در یستم های گوناگون جذب

منابع	دستگاه	فرضیات	مدل	پارامتر مورد بررسی	شرایط جذب	جاذب - محلول
[۵۶]	راکتور همزن دار - کربن دی اکسید	-	- ضریب نفوذ	- میزان جذب، غلظت نانو ذرات	شیمیایی	متیل دی اتانول آمین، پیپرازین- نانو ذرات سلیکا
[۵۸]	ناپیوسته - کربن دی اکسید	- برای حلالیت : قانون هنری - برای ضریب نفوذ: فرمول Wilke - Chang	- انتقال جرم: دانکورت - ایزوترم: لانگمویر	- میزان جذب، سرعت دوران، انتقال جرم، غلظت - مقایسه ذرات نانو و میکرو	فیزیکی	هگزادکان و روغن آفتابگردان- دی اکسید تیتانیوم
[۴۰]	جذب کننده حبابی - آمونیاک (۱۸/۷- ٪ وزنی)	- شرایط پایدار است	- انتقال جرم: مدل تجربی	- میزان جذب، غلظت نانو ذرات	فیزیکی	آب - نانو مس، نانو اکسید مس و نانو اکسید آلومینیوم (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ ٪ وزنی)
[۵۹]	ستون حبابی - کربن دی اکسید	- شرایط پایدار	-	- سرعت انتقال جرم، غلظت نانو ذرات	شیمیایی	آب، متیل دی اتانول آمین-
[۵۱]	ستون حبابی - کربن دی اکسید	- شرایط پایدار	- حجم گاز جذب شده	- مقدار جذب، انتقال جرم - غلظت بهینه نانو ذرات	شیمیایی	منو اتانول آمین- نانو ذرات اکسید آلومینا و سیلیس
[۵۴]	راکتور همزن دار - کربن دی اکسید	-	- ضریب نفوذ: Nagy - ایزوترم: لانگمویر	- مقایسه ذرات نانو و میکرو	فیزیکی	آب- نانو ذرات آلومینا و میکرو ذرات آلومینا
[۳۴]	راکتور حبابی - کربن دی اکسید	-	-	- غلظت نانو ذرات، میزان جذب، میزان حلالیت ، توزیع نانو ذرات	شیمیایی	آب - نانو اکسید آلومینیوم و NaCl (۳/۵٪)
[۶۰]	transient hot-wire system کربن دی اکسید	-	-	- پایداری محلول - ضریب نفوذ حرارت	شیمیایی	آب، متانول- کلراید سدیم- نانو اکسید آلومینیوم
[۶۱]	آکنده دوار - کربن دی اکسید	-	-	- سرعت، دبی مایع و گاز، غلظت محلول	شیمیایی	آب- مونو اتانول آمین و دی اتانول آمین
[۶۲]	برج آکنده- کربن دی اکسید	- موازنه همزمان جرم و انرژی - واکنش سریع در فیلم مایع	- مدل پاندا - رابطه گابریلسن	- مقایسه نتایج با نتایج تونتیاوچوتیکول [۲۷] و گابریلسن	شیمیایی	۲- آمینو ۲- متیل ۱- پروپانول
[۶۳]	برج جذب پر شده- هیدروژن سولفید	- استفاده از اصول پاندا	- توسعه مدل پاندا	- ثابت های سنتیکی درجه دوم - توزیع غلظت و ضریب انتخاب پذیری	شیمیایی	آب- متیل دی اتانول آمین
[۳۰]	برج آکنده- کربن دی اکسید	- دبی مایع ورودی به برج ۰/۲ تا ۰/۳۲۱ لیتر بر دقیقه	- استفاده از مدل Billet و Schultes	- میزان انتقال جرم و ضریب انتقال جرم - میدان مغناطیسی	شیمیایی	آب- نانو اکسید مگنتیت و نانو اکسید نیکل

## ۴- انتقال جرم

## ۴-۱- انتقال جرم حجمی گاز- مایع در نانو سیالات

تحقیقات پژوهشگران نشان می دهد که، شناخت توزیع زمان اقامت فازها برای تعیین ضریب انتقال جرم حجمی ( $k_L a$ ) ضروری می باشد. به منظور توضیح افزایش انتقال جرم توسط ذرات ریز، سه مکانیزم به طور عمده مورد استفاده قرار می گیرد: اثر شاتل یا گریزینگ<sup>۱۳</sup>، اثر اختلاط مرز و اثر مهار انعقاد حباب. اثر شاتل بیان می کند که ذرات ریز می توانند وارد سطح انتقال جرم گاز- مایع شده و یک مقدار مشخصی از گاز را جذب کنند. و بعد از جذب مولکول های گاز در لایه مرزی و با توجه به تفاوت غلظت، ذرات حامل جذب شده به مایع برگشته و سپس گاز ها را در توده مایع دفع می کنند. به همین منظور ذرات بیشتر، گاز بیشتری را جذب نموده و به این ترتیب ذرات بیشتر، اثر بیشتری در جذب  $CO_2$  دارند. ولی چون سطح تماس گاز- مایع در آزمایشات و جذب محدود می باشد، نهایتاً ظرفیت جذب نیز محدود می شود. اگر غلظت ذرات بسیار بالا باشد، وجود ذرات بیشتر در سطح تماس گاز- مایع می تواند مانع انتقال جرم شده و فاکتور بهبود جذب را کاهش دهند. اما تعدادی از محققین [۶۴] معتقدند که این مکانیسم نمی تواند کاهش ضریب انتقال جرم گاز- مایع با افزایش مقدار نانو ذرات را توضیح بدهد. اثر مخلوط کردن مرز معتقد است که ذرات در داخل لایه مرزی می توانند شرایط هیدرودینامیکی را طوری تغییر دهند که منجر به افزایش انتقال جرم شده و به خوبی اثر ذرات بی اثر و ذرات بزرگ در افزایش انتقال جرم را توضیح دهد. اثر مهار انعقاد حباب بیان می کند که ذرات ریز می توانند سطح تماس گاز و مایع را تغییر داده و شار انتقال جرم را تحت تاثیر قرار دهند. اما تاثیر آن بر ضریب انتقال جرم مشخص نیست. به طور کلی، نظریه های فوق جامع و قابل قبول برای توضیح اثر نانو ذرات بر انتقال جرم گاز- مایع نبوده و نیاز به تحقیقات بیشتر می باشد. کاستنیک [۶۵] در سال ۱۹۷۷ با استفاده از تئوری نفوذ هیگگی و با جایگزین کردن زمان تماس با تئوری کولموگوروف که از جریان ایزونتروپیک متلاطم حاصل شده بود، رابطه زیر را برای ضریب انتقال جرم پیشنهاد کرد.

$$k_L a \alpha \frac{u_G (u_G + C)^{13/20}}{2u_G + C} \quad (3)$$

در معادله بالا،  $C$  یک عدد ثابت است. چن و همکاران [۶۶] در سال ۲۰۰۸ رابطه زیر را برای محاسبه ضریب انتقال جرم ارائه نمودند.

$$k_L a = \frac{Q_g}{V_l} \ln \frac{C_{Ag1}}{C_{Ag2}} \quad (4)$$

$$\frac{dC_{co_2}}{dt} = K_L a (C_{co_2}^* - C_{co_2}) \quad \text{و} \quad C_{co_2}^* = H_{co_2} \cdot P_{co_2} = \frac{\rho}{E_H \cdot M_s} \cdot P_{co_2} \quad (5)$$

همچنین برخی از محققین، روابطی را تحت شرایط خاص برای ضریب انتقال جرم ارائه نموده اند که تعدادی از آنها، در جدول ۲ خلاصه شده است.



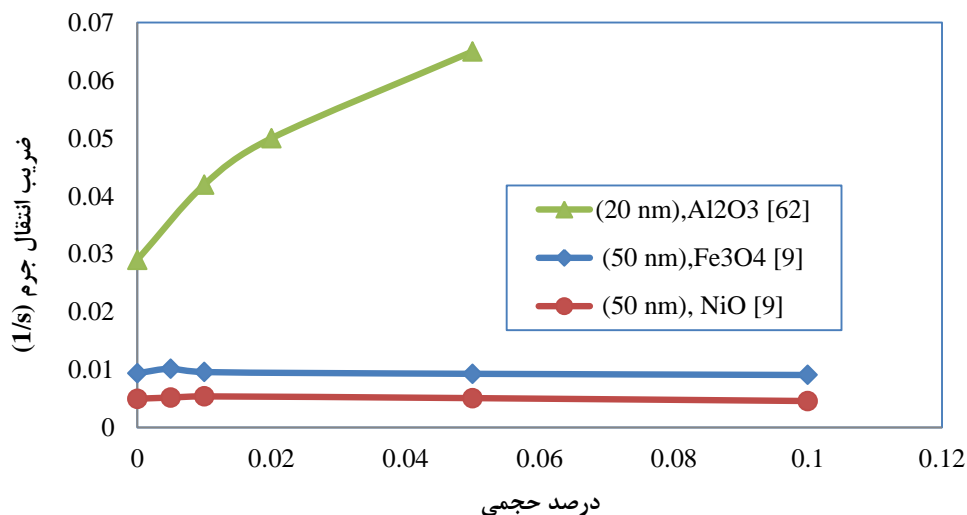
جدول ۲- تعدادی از روابط ضریب انتقال جرم حجمی توسط برخی از محققین

منابع	رابطه پیشنهادی	محدوده پارامترها	سیستم
[۶۷]	$\frac{k_L a D_c^2}{D_i} = 0.6 \left(\frac{v_L}{D_i}\right)^{0.5} \left(\frac{g D_c^2 \rho_L}{\sigma}\right)^{0.62} \left(\frac{g D_c^3}{v_L^2}\right) \varepsilon_G^{1.1}$	$u_G$ (m/s): 0.003-0.4 $U_L$ (m/s): 0.0-0.44 $D_c$ (m): 0.152-0.6 $H_i$ (m): 0.126-0.35 $\rho_L$ (kg / m <sup>3</sup> ): 800-1600 $\mu_L$ (pas): 0.00058-0.021 $\sigma$ (N / m): 0.022-0.0742	آب-هوا گلیکول-هوا متانول-هوا، محلول گلیکول-هوا، محلول متانول-هوا، آب-اکسیژن، آب-هلیوم، آب-کربن دی اکسید
[۶۸]	$k_L a = 3.31 \frac{D_i \varepsilon_G}{d_b^2 \rho_L D_i} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_i}\right)^{1/3}$	$\left(\frac{d_b \rho_L u_G}{\mu_L \varepsilon_G}\right)^{1/2}$ معادله تئوری	گاز-مایع
[۶۹]	$\frac{k_L a D_c^2}{D_i} = 0.09 \left(\frac{v_{eff}}{D_i}\right)^{0.5} \left(\frac{g D_c^2 \rho_L}{\sigma}\right)^{0.75} \left(\frac{g D_c^3}{v_{eff}^2}\right)^{0.39} \left(\frac{u_G}{g D_c}\right) \left(1 + C \left(\frac{u_{b\infty} \lambda}{d_\infty}\right)^m\right)^{m-1}$	- $u_G$ (m/s) < 0.1 $\mu_L$ (pas): 0.0005-0.06 $\rho_L$ (kg / m <sup>3</sup> ): 995-1230 C= 0 for unelastic liquids C= 0.133 for elastic liquids M= 0.55 $\lambda$ = characteristic relaxation time	آب-هوا محلول شکر-آب محلول CMC-هوا محلول سدیم پلی آکریلات-هوا
[۷۰]	$k_L a = \frac{14.9 g f}{u_G} \left(\frac{u_G \mu_L}{\sigma_L}\right)^{1.76} \left(\frac{\mu_L^4 g}{\rho_L \sigma^3}\right)^{-0.248} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.243} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_i}\right)^{-0.604}$ $f=1.0$ for nonelectrolytes $f = 10^{0.0681 I} < 1.0 \frac{K g i o n}{m^3}$ $f = 1.114 * 10^{0.021 I} > 1.0 \frac{K g i o n}{m^3}$	- $u_G$ (m/s): 0.042-0.38 $H_i$ (m): 0.13-0.22 $D_c$ (m): 0.1-0.19 - $\rho_L$ (kg / m <sup>3</sup> ): 998-1230 - $\mu_L$ (pas): 0.0008-0.011 $\sigma$ (N / m): 0.025-0.082 $D_i$ (m <sup>2</sup> / s): 4.6-26	آب-هوا آب-اکسیژن آب-هیدروژن آب-متان آب-دی اکسید کربن هوا- محلول شکر هوا- بوتان نرمال هوا- محلول متانول هوا- محلول الکترولیت
[۷۱]	$k_L a = 0.00315 u_G^{0.59} \mu_{eff}^{-0.54}$	$u_G$ (m/s): 0.08 $D_c$ (m): 0.14 $H_i$ (m): 2.6	محلول آبی CMC (۱-۲) (/)
[۷۲]	$\frac{k_L a D_c^2}{D_i} = 0.6 S c^{0.5} E o^{0.62} G a^{0.31} (\varepsilon_G)_p^M$ $n = 2.188 * 10^3 Re^{-0.598} Fr^{0.146} M_{ol}^{-0.004}$ $M = 0.3 \ln(n) + .004$	$u_G$ (m/s): 0.45	نیترژن-آب
[۷۳]	$\frac{k_L a D_c^2}{D_i} = 0.62 \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_i}\right)^{0.5} \left(\frac{g \rho_L D_c^2}{\sigma}\right)^{0.33} \left(\frac{g \rho_L^2 D_c^3}{\mu_L^2}\right) \left(\frac{v_g}{\sqrt{g D_c}}\right)^{0.68} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.04}$ $Sh = 0.62 S c^{0.5} B o^{0.33} F r^{0.68} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.04}$	$D_c$ (m): 0.095	مایع آلی- گاز (۵۰ نوع)

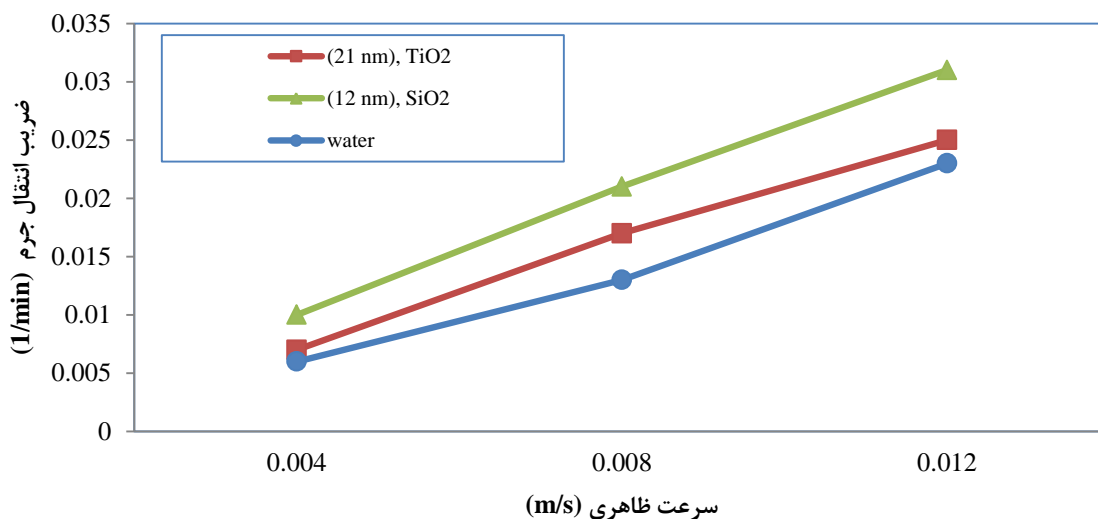
مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از نانو سیالات در فرآیندهای انتقال چندان گسترده نمی باشد. به طوری که در برخی از مطالعات نتایج متناقضی به دست آمده است. به منظور افزایش انتقال جرم، ذرات ریز مطرح شده و از آنها در افزایش فرآیندهای انتقال جرم و کاهش حجم تجهیزات استفاده شده است. بهبود نرخ انتقال جرم با استفاده از ذرات ریز، برای اولین بار توسط کارز و همکارش [۷۴] مطرح

شد. آنها عنوان کردند که، نانو مواد در نانو سیال، می توانند باعث اثر گریزینگ شوند. با توجه به نتایج این محققین، با افزایش مقدار ذرات، اثر گریزینگ در جذب، ابتدا افزایش یافته و سپس ثابت می ماند. در سال ۲۰۰۳ ژنو و همکارانش [۷۵] تأثیر ذرات ریز در نرخ انتقال جرم را بررسی نموده و بدین نتیجه رسیدند که ذرات ریز در محلول های آبی به دلایلی از قبیل تغییر ضخامت فیلم در اثر اختلاط و یا کاهش ضریب نفوذ گاز، موجب افزایش و یا کاهش ضریب انتقال جرم می شود. تحقیقات بعدی که توسط روتیا<sup>۱۴</sup> و همکاران [۷۶] انجام شد، نشان داد که ذرات ریز می توانند نرخ انتقال جرم را افزایش داده و آن را توسط چهار مکانیزم مورد بررسی قرار دادند. پارک و چو [۷۷] در سال ۲۰۰۶ تأثیر نانو سیال سیلیکا با اندازه ذرات ۱۲ نانو متر را در جذب کربن دی اکسید مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که سرعت جذب با افزایش غلظت نانو ذره در محلول به علت خاصیت کشسانی ایجاد شده کاهش می یابد. صمدی و همکاران [۷۸] مطالعه ای را در مورد تاثیر نانو سیال آب/  $Al_2O_3$  در جذب  $CO_2$  در ستون دیوار مرطوب انجام داده اند. با توجه به نتایج تحقیقات آنها، با افزایش غلظت نانو سیال و دبی مایع، ضریب انتقال جرم و میزان انتقال جرم افزایش یافت. به طوری که با افزایش ۱٪ حجمی اکسید آلومینیوم، ضریب انتقال جرم بیش از ۵۵٪ افزایش را نشان داد. جیانگ و همکاران (۲۰۱۴) [۳۷] اثر نانو اکسیدهای تیتانیوم، آلومینیوم، منیزیم و سیلیسیم در محلول های منواتانول آمین و متیل دی اتانول آمین را در راکتور حبابی برای جذب  $CO_2$  مورد بررسی قرار داده اند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که در بیشتر آزمایشات نانو ذرات باعث بهبود انتقال جرم شده و با افزایش مقدار نانو ذرات، در ابتدا میزان جذب افزایش و سپس کاهش می یابد. همچنین در محلول پایه منواتانول آمین، تاثیر نانو ذرات با اندازه بزرگتر، بیشتر از نانو ذرات کوچکتر بود. سیف و همکاران [۷۹] اثر اندازه نانو ذرات و حرکت براونی نانو ذرات بر عملکرد سینک حرارتی در میکرو کانالها را مطالعه نمودند. سیرینی و اس و همکاران [۵۹] اثر یک سیال مغناطیسی (حاوی نانو ذرات اکسید آهن با سیال پایه آب) را برای جذب گاز کربن دی اکسید در محلول آمین در یک ستون حبابی بررسی نمودند. اندازه ذرات هنگامی که این سیال مغناطیسی به محلول آمین در سیستم جذب گاز کربن دی اکسید اضافه می شود به عنوان تابعی از غلظت و زمان مورد مطالعه قرار گرفت. آنها چنین دریافتند که این سیال مغناطیسی سرعت انتقال جرم را تا حدود ۴۳٪ در فرآیند جذب کربن دی اکسید توسط محلول متیل دی اتانول آمین افزایش می دهد. همچنین، کوماتی و سورش<sup>۱۵</sup> [۸۰] اثر نانو ذرات مغناطیسی  $Fe_3O_4$  در جذب  $CO_2$  در یک ستون دیواره مرطوب را مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که میزان جذب با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش می یابد. به طوری که حداکثر افزایش ضریب انتقال جرم ۹۲/۸٪ است که در ۰/۳۹ کسر حجمی رخ می دهد. آنها دریافتند که میدان مغناطیسی اثر کمی بر روی میزان جذب گاز دارد. کشیشیان و همکاران [۸۱] با استفاده از روش الکتروشیمیایی جریان محدود، اثر نانو ذرات سیلیکا در انتقال جرم در یک لوله مدور را مورد مطالعه قرار دادند، و کسر حجمی بهینه نانو ذرات برای افزایش انتقال جرم را به دست آوردند. با توجه به شکل ۳، مشخص است که یک نقطه بهینه وجود دارد که در آنجا ضریب انتقال جرم ماکزیمم است. به طوری که، با افزایش غلظت نانو ذرات تا نقطه بهینه، ضریب انتقال جرم افزایش می یابد. ولی بعد از این نقطه با افزایش غلظت، ضریب انتقال جرم کاهش یافته و حتی ممکن است به مقادیر کمتر از محلول خالص نیز برسد. کاهش انتقال جرم با افزایش غلظت، ممکن است به علت ته نشینی نانو ذرات و ناپایداری نانو سیال باشد، که باعث تغییر ساختار نانو سیال می شود. گراردی و همکاران [۸۲]، در تحقیقی مشابه، نانو ذرات آلومینا در آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که، با افزایش درصد حجمی نانو ذرات، ضریب نفوذ کاهش می یابد. آنها برخی از دلایل خود را اینگونه عنوان کردند که: در سیستم های کلونیدی مانند نانو سیالات، نیروهایی با برد کوتاه<sup>۱۶</sup> وجود دارد که می تواند لایه نازکی از مولکول های سیال پایه در اطراف نانو ذرات ایجاد کند. سپس این مولکول های سیال پایه به سطح چسبیده، با نانو ذرات حرکت می کنند. از آنجائیکه ضریب نفوذ این ذرات از ضریب نفوذ ذرات آزاد کمتر است، بنابراین با افزایش غلظت نانو ذرات، انتقال جرم کاهش می یابد. همچنین، با افزایش غلظت نانو ذرات، تعداد نانو ذرات جامدی که در سر راه مولکول های آب قرار دارند، افزایش یافته و منجر به افزایش انحنا در مسیر مولکول های آب می شوند. سرعت ظاهری گاز یکی دیگر از عوامل اصلی تاثیرگذار در انتقال جرم می باشد. شکل ۴، ضریب انتقال جرم در آب و غلظت بهینه نانوسیال با سرعت ظاهری متفاوت گاز  $CO_2$  را نشان می دهد. ضریب انتقال جرم تقریباً با سرعت ظاهری گاز به صورت خطی افزایش می یابد. سرعت ظاهری گاز به دلیل ناپایداری متفاوت نانو سیالات، اثر گریزینگ را تحت تاثیر قرار می دهد. بنابراین، افزایش سرعت ظاهری گاز به طور قابل ملاحظه ای اثر گریزینگ را بهبود می دهد [۸۳].

<sup>14</sup> Ruthiya et al.<sup>15</sup> Suresh<sup>16</sup> Short-range forces



شکل ۳- تاثیر مقدار نانو ذرات در ضریب انتقال جرم



شکل ۴- ضریب انتقال جرم در سرعت های ظاهری متفاوت گاز [۸۴]

#### ۲-۴- ضریب انتقال جرم مایع در نانو سیالات

برای فرآیندهای انتقال جرم همراه با واکنش شیمیایی آهسته، دانش  $K_L a$  کافی است. ولی برای محاسبه بهبود فاکتورها در واکنش شیمیایی سریع و آبی در فیلم مایع، نیاز به دانستن  $k_L$  می باشد. با توجه به ابهامات در تعیین مساحت فصل مشترک (بین سطحی)، تخمین  $k_L$  از روی دانش  $k_L a$  و اندازه گیری مقادیر  $a$  خطای زیادی ایجاد می کند. داده های  $k_L$  را می توان از اندازه گیری تک حباب تعیین نمود. تحقیقات کرامبیگل و همکاران [۸۵] نشان داد که اگر  $u_g < 0.06$  m/s (که مربوط به انتقال جرم با حلالیت کم می شود) باشد، می توان نتایج حباب های تنها را برای مجموعه ای از حبابها استفاده نمود. اگر گازها حلالیت بالا داشته باشند، نرخ انتقال جرم بالا رخ داده و شرایط پیچیده خواهد بود. تعدادی از روابط معروف برای  $k_L$  یا عدد شروود در جدول زیر آورده شده است.

$$K_L = \frac{K_{La}}{a} \quad (۶)$$

جدول ۳- تعدادی از روابط ضریب انتقال جرم مایع توسط برخی از محققین

منابع	رابطه	دامنه پارامترها	سیستم
[۸۶]	$k_L = 0.0042 \left( \frac{(\rho_L - \rho_G) \mu_L g}{\rho_L^2} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_i} \right)^{-1/2}$	$\rho_L (kg / m^3): 1000-1178$ $\mu_L (pa-s): 0.0006-0.0697$ $\rho_L - \rho_G (kg / m^3): 1000-1178$ $d_p > 2.5mm$	برای حباب های بزرگ محلول آبی گلیکول- کربن دی اکسید، آب- کربن دی اکسید، آب اکسیژن، آب نمک- اکسیژن، محلول پلی اکریل آمید کربن دی اکسید
	$k_L = 0.0031 \left( \frac{(\rho_L - \rho_G) \mu_L g}{\rho_L^2} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_i} \right)^{-1/3}$	$\rho_L (kg / m^3): 698-1160$ $\mu_L (pa-s): 0.00084-0.001$ $\rho_L - \rho_G (kg / m^3): 174-1160$ $d_p < 2.5mm$	برای حباب های کوچک محلول آبی گلیکول کربن دی اکسید، آب نمک- کربن دی اکسید، واکس-هیدروژن، محلول آبی اتانل-هگزان
[۸۷]	$\frac{k_L d_p}{D_i} = 2 + 0.0187 [Sc^{0.339} Re^{0.484} \left( \frac{d_{vs} g^{1/3}}{D_i^{2/3}} \right)^{0.072}]^{1.61}$ $Sc = \frac{\mu_L}{\rho_L D_i}$ $Re = \frac{d_{vs} u_G \rho_L}{\mu_L}$	$D_c (m): 0.025-1.1$ $\rho_L (kg / m^3): 776-1696$ $\sigma (N / m): 0.025-0.076$ $\mu_L (pa-s): 0.0009-0.152$	هوا-آب، هوا-محلول کربنات سدیم، هوا-حلال نفتی، هوا-گلیسرین، هوا- محلول کلراید روی
[۸۸]	$k_L = 0.5 \frac{D_i}{d_{vs}} \left( \frac{v_L}{D_i} \right)^{1/2} \left( \frac{g d_{vs}^3}{v_L^2} \right)^{1/4} \left( \frac{g d_{vs}^2 \rho_L}{\sigma} \right)^{3/8}$	$u_G (m / s): 0.006-0.4$ $u_L (m / s): 0.0-0.44$ $D_c (m): 0.152-0.6$ $H_i (m): 0.126-0.35$ $\rho_L (kg / m^3): 500-1600$ $\sigma_L (N / m): 0.022-0.0742$ $\mu_L (pa-s): 0.00056-0.021$	آب-هوا، گلیکول-هوا، متانول-هوا، محلول آبی گلیکول-هوا، محلول آبی متانول-هوا، آب-اکسیژن، آب-هلیوم، آب-کربن دی اکسید
[۸۹]	$k_L = \frac{0.15 D_i}{d_{vs}} \left( \frac{v_L}{D_i} \right)^{1/2} \left( \frac{d_{vs} u_G \rho_L}{\mu_L} \right)^{3/4}$	$u_G (m / s) < 0.08$ $\rho_L (kg / m^3): 996-1005$ $\sigma_L (N / m): 0.053-0.073$ $\mu_L (pa-s): 0.00089-0.001$	محلول آبی الکل-هوا، الکترولیت-هوا
[۹۰]	$k_L = \frac{D_c}{D_i} (2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3})$	$D_c (mm) < 1.5$	نانو محلول کربنات کلسیم- کربن دی اکسید

### نتیجه گیری

در دهه گذشته بسیاری از خصوصیات جالب نانو سیالات مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق یک مروری کلی بر مطالعات اخیر در زمینه نانوسیال، شامل اثر سرعت ظاهری و غلظت نانو ذرات در بهبود میزان جذب و انتقال جرم انجام گردید. همچنین، جذب گاز CO<sub>2</sub> توسط نانو ذرات اکسید فلزی در ستون حبابی با استفاده از انواع سیالات پایه مانند آب، متانول، مونو اتانول آمین و متیل دی اتانول آمین بررسی شده است. برخی از مطالعات گزارش کرده اند که استفاده از نانو مواد به دلیل عملکرد نانو ذرات در مرزها، باعث افزایش ضریب انتقال جرم در فاز مایع شده و در نتیجه باعث بهبود نرخ انتقال جرم در طول فرآیند جذب می شوند. در حالی که برخی از گزارش ها نتایجی برعکس را ارائه نموده اند که لزوم انجام تحقیقات نظری و تجربی بیشتر در این زمینه را نشان می دهد. با توجه به اینکه، مطالعات انجام شده در زمینه نانو سیالات چندان گسترده نمی باشد و مکانیسم عملکرد نانوذرات در افزایش ضریب انتقال جرم و بهبود راندمان جذب همچنان تا حدودی مبهم است. اما حرکات براونی نانوذرات، اثر گریزینگ و افزایش زمان ماند فاز گاز در نانوسیال، نسبت به سیال پایه و بهبود انتقال حرارت از جمله عواملی است که این بهبود را توجیه می کند. نتایج آزمایش های انجام شده توسط محققین بیانگر این نکته می باشد که با افزایش نانو ذرات به سیال پایه تا غلظت بهینه، به دلیل اختلاط مرزها، میزان جذب گاز نسبت به سیال پایه افزایش می یابد. ولی با افزایش بیشتر نانو ذرات تا غلظت های بیش از غلظت بهینه، به دلیل کاهش سطح تماس گاز- مایع و رسوب نانو ذرات، نرخ جذب و انتقال جرم کاهش می یابد. تحقیقات نشان داده که در شرایط یکسان، نقش محلول پایه در نانو سیالات در میزان جذب CO<sub>2</sub> نیز مهم است. به طوری که در یک شرایط مشابه، میزان جذب نانو سیال با پایه دی اتانول آمین بیشتر از نانو سیال با پایه مونواتانول آمین می باشد. این نتیجه نشان می دهد که واکنش شیمیایی یک عامل مهم بوده و اثر فاکتور بهبود با افزایش نرخ واکنش شیمیایی، ضعیف می

شود. همچنین، تاثیر انواع نانو ذرات در محلول پایه، در نرخ جذب متفاوت بوده و ترتیب برخی از آنها در محلول پایه دی متیل اتانول آمین به صورت:  $\text{TiO}_2 > \text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$  می باشد.

### منابع و مراجع

1. Pashaei, H., M.N. Zarandi, and A. Ghaemi, Experimental study and modeling of CO<sub>2</sub> absorption into diethanolamine solutions using stirrer bubble column. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2017. 121: p. 32-43.
2. Ghaemi, A. and A.H. Behroozi, Comparison of hydroxide-based adsorbents of Mg(OH)<sub>2</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub> for CO<sub>2</sub> capture: utilization of response surface methodology, kinetic, and isotherm modeling. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2020. 10(5): p. 948-964.
3. Khajeh, M. and A. Ghaemi, Exploiting response surface methodology for experimental modeling and optimization of CO<sub>2</sub> adsorption onto NaOH-modified nanoclay montmorillonite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. 8(2): p. 103663.
4. Etemad, E., A. Ghaemi, and M. Shirvani, Rigorous correlation for CO<sub>2</sub> mass transfer flux in reactive absorption processes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015. 42: p. 288-295.
5. Fashi, F., A. Ghaemi, and P. Moradi, Piperazine-modified activated alumina as a novel promising candidate for CO<sub>2</sub> capture: experimental and modeling. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2019. 9(1): p. 37-51.
6. Taheri, F.S., et al., High CO<sub>2</sub> adsorption on amine-functionalized improved mesoporous silica nanotube as an eco-friendly nanocomposite. *Energy & Fuels*, 2019. 33(6): p. 5384-5397.
7. Norouzbahari, S., S. Shahhosseini, and A. Ghaemi, Modeling of CO<sub>2</sub> loading in aqueous solutions of piperazine: Application of an enhanced artificial neural network algorithm. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015. 24: p. 18-25.
8. Pashaei, H., A. Ghaemi, and M. Nasiri, Modeling and experimental study on the solubility and mass transfer of CO<sub>2</sub> into aqueous DEA solution using a stirrer bubble column. *RSC Adv.*, 2016. 6(109): p. 108075-108092.
9. Ghaemi, A., S. Shahhosseini, and M.G. Maragheh, Nonequilibrium modeling of reactive absorption processes. *Chemical Engineering Communications*, 2009. 196(9): p. 1076-1089.
10. Ghaemi, A., et al., Kinetics and absorption rate of CO<sub>2</sub> into partially carbonated ammonia solutions. *Chemical Engineering Communications*, 2011. 198(10): p. 1169-1181.
11. Ghaemi, A., S. Shahhosseini, and M. Ghannadi Maragheh, Experimental Investigation of Reactive Absorption of Ammonia and Carbon Dioxide by Carbonated Ammonia Solution. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 2011. 30(2): p. 43-50.
12. Niknafs, H., A. Ghaemi, and S. Shahhosseini, Dynamic heat and mass transfer modeling and control in carbon dioxide reactive absorption process. *Heat and Mass Transfer*, 2015. 51(8): p. 1131-1140.
13. Ghaemi, A. and A. Hemmati, Mass transfer coefficient for PZ+ CO<sub>2</sub>+ H<sub>2</sub>O system in a packed column. *Heat and Mass Transfer*, 2020: p. 1-15.
14. Ghaemi, A., M. Torab-Mostaedi, and M.G. Maragheh, Nonequilibrium dynamic modeling of simultaneous reactive absorption of gases. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2011. 42(1): p. 173-179.
15. Norouzbahari, S., S. Shahhosseini, and A. Ghaemi, Chemical absorption of CO<sub>2</sub> into an aqueous piperazine (PZ) solution: development and validation of a rigorous dynamic rate-based model. *RSC Adv.*, 2016. 6(46): p. 40017-40032.
16. Amiri, M., S. Shahhosseini, and A. Ghaemi, Optimization of CO<sub>2</sub> capture process from simulated flue gas by dry regenerable alkali metal carbonate based adsorbent using response surface methodology. *Energy Fuels*, 2017. 31(5): p. 5286-5296.
17. Norouzbahari, S., S. Shahhosseini, and A. Ghaemi, CO<sub>2</sub> chemical absorption into aqueous solutions of piperazine: modeling of kinetics and mass transfer rate. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015. 26: p. 1059-1067.
18. Ghaemi, A., S. Shahhosseini, and M.G. Maragheh, Nonequilibrium dynamic modeling of carbon dioxide absorption by partially carbonated ammonia solutions. *Chemical Engineering Journal*, 2009. 149(1-3): p. 110-117.
19. Ha, J., Characteristics of Heat and Mass transfer properties by using silica nanoparticles in ammonia-water system. 2002, MA thesis, Korea university, Korea.

20. Naeem, S., A. Ghaemi, and S. Shahhosseini, Experimental investigation of CO<sub>2</sub> capture using sodium hydroxide particles in a fluidized bed. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016. 33(4): p. 1278-1285.
21. Naeem, S., S. Shahhosseini, and A. Ghaemi, Simulation of CO<sub>2</sub> capture using sodium hydroxide solid sorbent in a fluidized bed reactor by a multi-layer perceptron neural network. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016. 31: p. 305-312.
22. Mirzaei, F. and A. Ghaemi, Mass Transfer Modeling of CO<sub>2</sub> Absorption into Blended Aqueous MDEA-PZ Solution. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 2020. 9(3): p. 77-101.
23. Ghaemi, A., A.H. Behroozi, and H. Mashhadimoslem, Mass Transfer Flux of CO<sub>2</sub> into Methyldiethanolamine Solution in a Reactive-Absorption Process. *Chemical Engineering & Technology*, 2020. 43(10): p. 2083-2091.
24. Pashaei, H., et al., Experimental investigation of the effect of nano heavy metal oxide particles in Piperazine solution on CO<sub>2</sub> absorption using a stirrer bubble column. *Energy Fuels*, 2018. 32(2): p. 2037-2052.
25. Koblinski, P., et al., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International journal of heat and mass transfer*, 2002. 45(4): p. 855-863.
26. Kang, Y.T., H.J. Kim, and K.I. Lee, Heat and mass transfer enhancement of binary nanofluids for H<sub>2</sub>O/LiBr falling film absorption process. *International journal of refrigeration*, 2008. 31(5): p. 850-856.
27. Pineda, I.T., et al., CO<sub>2</sub> absorption enhancement by methanol-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> nanofluids in a tray column absorber. *International journal of refrigeration*, 2012. 35(5): p. 1402-1409.
28. Niu, X.F., K. Du, and F. Xiao, Experimental study on ammonia-water falling film absorption in external magnetic fields. *International journal of refrigeration*, 2010. 33(4): p. 686-694.
29. Wu, W.-D., et al., Nanoferrofluid addition enhances ammonia/water bubble absorption in an external magnetic field. *Energy and buildings*, 2013. 57: p. 268-277.
30. Salimi, J., M. Haghshenasfard, and S.G. Etemad, CO<sub>2</sub> absorption in nanofluids in a randomly packed column equipped with magnetic field. *Heat and mass transfer*, 2015. 51(5): p. 621-629.
31. Haghtalab, A., M. Mohammadi, and Z. Fakhroueian, Absorption and solubility measurement of CO<sub>2</sub> in water-based ZnO and SiO<sub>2</sub> nanofluids. *Fluid phase equilibria*, 2015. 392: p. 33-42.
32. Lee, J.K., et al., The effects of nanoparticles on absorption heat and mass transfer performance in NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O binary nanofluids. *International journal of refrigeration*, 2010. 33(2): p. 269-275.
33. Amaris, C., M. Bourouis, and M. Vallès, Passive intensification of the ammonia absorption process with NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> using carbon nanotubes and advanced surfaces in a tubular bubble absorber. *Energy*, 2014. 68: p. 519-528.
34. Lee, J.W. and Y.T. Kang, CO<sub>2</sub> absorption enhancement by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in NaCl aqueous solution. *Energy*, 2013. 53: p. 206-211.
35. Jung, J.-Y., J.W. Lee, and Y.T. Kang, CO<sub>2</sub> absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol. *Journal of mechanical science and technology*, 2012. 26(8): p. 2285-2290.
36. Pashaei, H. and A. Ghaemi, CO<sub>2</sub> absorption into aqueous diethanolamine solution with nano heavy metal oxide particles using stirrer bubble column: Hydrodynamics and mass transfer. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020: p. 104110.
37. Jiang, J., et al., Experimental study of CO<sub>2</sub> absorption in aqueous MEA and MDEA solutions enhanced by nanoparticles. *International Journal of greenhouse gas control*, 2014. 29: p. 135-141.
38. Heydarifard, M., et al., Reactive absorption of CO<sub>2</sub> into Piperazine aqueous solution in a stirrer bubble column: Modeling and experimental. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2018. 79: p. 91-116.
39. Pashaei, H., A. Ghaemi, and M. Nasiri, Experimental investigation of CO<sub>2</sub> removal using Piperazine solution in a stirrer bubble column. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2017. 63: p. 226-240.



40. Kim, J.-K., J.Y. Jung, and Y.T. Kang, The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid. *International journal of refrigeration*, 2006. 29(1): p. 22-29.
41. Lee, J.W., et al., CO<sub>2</sub> bubble absorption enhancement in methanol-based nanofluids. *International journal of refrigeration*, 2011. 34(8): p. 1727-1733.
42. Pang, C., et al., Mass transfer enhancement by binary nanofluids (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O+ Ag nanoparticles) for bubble absorption process. *International journal of refrigeration*, 2012. 35(8): p. 2240-2247.
43. Kim, W.-g., et al., Synthesis of silica nanofluid and application to CO<sub>2</sub> absorption. *Separation Science and Technology*, 2008. 43(11-12): p. 3036-3055.
44. Fakhroueian, Z., et al., Influence of modified ZnO quantum dots and nanostructures as new antibacterials. *Advances in nanoparticles*, 2013. 2(03): p. 247.
45. Lam, S.-M., et al., Transition metal oxide loaded ZnO nanorods: preparation, characterization and their UV-vis photocatalytic activities. *Separation and Purification Technology*, 2014. 132: p. 378-387.
46. Djurišić, A.B. and Y.H. Leung, Optical properties of ZnO nanostructures. *small*, 2006. 2(8-9): p. 944-961.
47. Kurtz, M., et al., Active Sites on Oxide Surfaces: ZnO-Catalyzed Synthesis of Methanol from CO and H<sub>2</sub>. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005. 44(18): p. 2790-2794.
48. Xia, X., et al., Probing the surface heterogeneity of polycrystalline zinc oxide by static adsorption microcalorimetry. 1. The influence of the thermal pretreatment on the adsorption of carbon dioxide. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008. 112(29): p. 10938-10942.
49. Wöll, C., Structure and Chemical Properties of Oxide Nanoparticles Determined by Surface-Ligand IR Spectroscopy. *ACS Catalysis*, 2019. 10(1): p. 168-176.
50. Noei, H., et al., Activation of carbon dioxide on ZnO nanoparticles studied by vibrational spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011. 115(4): p. 908-914.
51. Jiang, J., et al., Chemical absorption kinetics in MEA solution with nano-particles. *Energy Procedia*, 2013. 37: p. 518-524.
52. Sumin, L., et al., Experimental and theoretical studies of CO<sub>2</sub> absorption enhancement by nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and carbon nanotube particles. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2013. 21(9): p. 983-990.
53. Pashaei, H., et al., Experimental modeling and optimization of CO<sub>2</sub> absorption into piperazine solutions using RSM-CCD methodology. *ACS omega*, 2020. 5(15): p. 8432-8448.
54. Critchfield, J., CO<sub>2</sub> absorption/desorption in methyldiethanolamine solutions promoted with MEA and D2EA. Mass transfer and reaction kinetics. University of Texas, Austin, TX, USA, 1988.
55. Bosch, H., G. Versteeg, and W. Van Swaaij, Desorption of acid gases (CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S) from loaded alkanolamine solutions. 1990, Elsevier Science Publishers BV: Amsterdam. p. 505-512.
56. Xu, G.-W., et al., Desorption of CO<sub>2</sub> from MDEA and activated MDEA solutions. *Industrial & engineering chemistry research*, 1995. 34(3): p. 874-880.
57. Cadours, R., et al., Kinetics of CO<sub>2</sub> desorption from highly concentrated and CO<sub>2</sub>-loaded methyldiethanolamine aqueous solutions in the range 312– 383 K. *Industrial & engineering chemistry research*, 1997. 36(12): p. 5384-5391.
58. Mondal, T.K., *Phase Equilibrium Modeling in Gas Purification System*. 2009.
59. Srinivas, K., M. Rajagopal, and A. Suresh, Synthesis, characterization and testing for ferrofluids for mass transfer intensification. *Int J Chem Sci*, 2007. 5: p. 1913-1928.
60. Pang, C. and Y.T. Kang, Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids (H<sub>2</sub>O/CH<sub>3</sub>OH+ NaCl+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles) for CO<sub>2</sub> absorption application. 2012.
61. Rahimi, M. and M. Soleiman, Experimental Study of Carbon Dioxide Absorption from Air Stream in Rotating Packed Bed. *Journal of separation science and engineering*, 2013. 5: p. 1-16.
62. Khan, A.A., G. Halder, and A. Saha, Carbon dioxide capture characteristics from flue gas using aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) and monoethanolamine (MEA) solutions in packed bed absorption and regeneration columns. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015. 32: p. 15-23.

63. Zhang, P., et al., Regeneration of 2-amino-2-methyl-1-propanol used for carbon dioxide absorption. *Journal of Environmental Sciences*, 2008. 20(1): p. 39-44.
64. Vinke, H., P. Hamersma, and J. Fortuin, Enhancement of the gas-absorption rate in agitated slurry reactors by gas-adsorbing particles adhering to gas bubbles. *Chemical Engineering Science*, 1993. 48(12): p. 2197-2210.
65. Kaštánek, F., The volume mass transfer coefficient in a bubble bed column. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*, 1977. 42(8): p. 2491-2497.
66. Chen, P.-C., et al., Scrubbing of CO<sub>2</sub> greenhouse gases, accompanied by precipitation in a continuous bubble-column scrubber. *Industrial & engineering chemistry research*, 2008. 47(16): p. 6336-6343.
67. Akita, K. and F. Yoshida, Gas holdup and volumetric mass transfer coefficient in bubble columns. Effects of liquid properties. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1973. 12(1): p. 76-80.
68. Fair, J., Designing gas-sparged reactors. *Chem. Eng*, 1967. 74(14): p. 67-74.
69. Nakanoh, M. and F. Yoshida, Gas absorption by Newtonian and non-Newtonian liquids in a bubble column. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1980. 19(1): p. 190-195.
70. Hikita, H., et al., The volumetric liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns. *The chemical engineering journal*, 1981. 22(1): p. 61-69.
71. Deckwer, W.D., et al., Fischer-Tropsch synthesis in the slurry phase on manganese/iron catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982. 21(2): p. 222-231.
72. Luo, X., et al., Maximum stable bubble size and gas holdup in high-pressure slurry bubble columns. *AIChE journal*, 1999. 45(4): p. 665-680.
73. Öztürk, S., A. Schumpe, and W.D. Deckwer, Organic liquids in a bubble column: holdups and mass transfer coefficients. *AIChE journal*, 1987. 33(9): p. 1473-1480.
74. 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.
75. Zhou, M., W.F. Cai, and C.J. Xu, A new way of enhancing transport process—The hybrid process accompanied by ultrafine particles. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2003. 20(2): p. 347-353.
76. Ruthiya, K., et al., Mechanisms of physical and reaction enhancement of mass transfer in a gas inducing stirred slurry reactor. *Chemical Engineering Journal*, 2003. 96(1-3): p. 55-69.
77. Park, S.-W., et al., Absorption of carbon dioxide into aqueous colloidal silica solution with diisopropanolamine. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2008. 14(2): p. 166-174.
78. Samadi, Z., M. Haghshenasfard, and A. Moheb, CO<sub>2</sub> absorption using nanofluids in a wetted-wall column with external magnetic field. *Chemical Engineering & Technology*, 2014. 37(3): p. 462-470.
79. Seyf, H.R. and B. Nikaein, Analysis of Brownian motion and particle size effects on the thermal behavior and cooling performance of microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 2012. 58: p. 36-44.
80. Komati, S. and A.K. Suresh, CO<sub>2</sub> absorption into amine solutions: a novel strategy for intensification based on the addition of ferrofluids. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 2008. 83(8): p. 1094-1100.
81. Keshishian, N., M.N. Esfahany, and N. Etesami, Experimental investigation of mass transfer of active ions in silica nanofluids. *International communications in heat and mass transfer*, 2013. 46: p. 148-153.
82. Gerardi, C., et al., Nuclear magnetic resonance-based study of ordered layering on the surface of alumina nanoparticles in water. *Applied Physics Letters*, 2009. 95(25): p. 253104.
83. Wang, T., et al., Enhanced CO<sub>2</sub> absorption and desorption by monoethanolamine (MEA)-based nanoparticle suspensions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016. 55(28): p. 7830-7838.
84. Saeednia, L., H. Hashemipour, and D. Afzali, Study on mass transfer enhancement in a gas-liquid system using nanomaterials. 2015.



85. Krumbiegel, G., et al., Studies on the metabolism of aristolochic acids I and II. *Xenobiotica*, 1987. 17(8): p. 981-991.
86. Calderbank, P. and M. Moo-Young, The continuous phase heat and mass-transfer properties of dispersions. *chemical Engineering science*, 1961. 16(1-2): p. 39-54.
87. Hughmark, G., Holdup and mass transfer in bubble columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1967. 6(2): p. 218-220.
88. Akita, K. and F. Yoshida, Bubble size, interfacial area, and liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1974. 13(1): p. 84-91.
89. Schügerl, K., et al., Application of tower bioreactors in cell mass production, in *Advances in Biochemical Engineering*, Volume 8. 1978, Springer. p. 63-131.
90. Du, L., et al., Effects of nanoparticles with different wetting abilities on the gas-liquid mass transfer. *Chemical Engineering Science*, 2014. 114: p. 105-113.