

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

### افزایش جذب حبابی دی‌اکسید کربن در نانو سیال آب/ اکسید نیکل در حضور ماده فعال سطحی

#### مقاله پژوهشی

دانیال جعفری فارسانی<sup>۱</sup>، الهام عامری<sup>۲\*</sup>

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران  
۲- دانشکده مهندسی شیمی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

#### چکیده

جهت رفع مشکلات ناشی از استفاده از حلال‌های شیمیایی نظیر محلول‌های آمینی و محلول کاستیک، از یک برج جذب تک حبابی برای بررسی تأثیر نانو سیالات پایه آبی با نانو ذرات اکسید نیکل بر فرآیند جذب گاز دی‌اکسید کربن استفاده شد. برای انجام این کار، دی‌اکسید کربن، به صورت تک حباب‌هایی از انتهای یک ستون شامل نانو سیال آب/اکسید نیکل پر شده، وارد شده و ضرایب انتقال جرم و میزان جذب مورد بررسی قرار گرفته شد. برای بررسی اثر کسر وزنی نانو ذرات بر فرآیند انتقال جرم در برج تک حبابی سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج نشان داد که نانو ذرات اکسید نیکل آبگریز بوده و افزودن ماده فعال سطحی به نانو سیال موجب بالا رفتن بار الکتریکی سطحی نانو ذرات اکسید نیکل شده و قطبیت سطح را برای جذب گاز بالا می‌برند. به این ترتیب گاز دی‌اکسید کربن به دلیل ماهیت بسیار قطبی بر سطح نانو ذرات جذب شده و این پدیده موجب افزایش تا ۲۷۰ درصدی میزان جذب گاز مذکور در نانو سیال نسبت به سیال پایه شد. بیشینه مقدار شار انتقال جرم برای جذب دی‌اکسید کربن با نانو سیال حاوی نانو ذرات اکسید نیکل در کسر وزنی نانو ذرات ۰/۱ درصد مشاهده شد. در انتها نیز یک رابطه تجربی برای تخمین ضریب انتقال جرم گاز دی‌اکسید کربن ارائه گردید که این رابطه تابعی از رژیم جریان و نوع نانو سیال می‌باشد. نتایج نشان داد که مقدار خطای محاسبات برای مدل ارائه شده، کمتر از ۲۰٪ است و این مدل می‌تواند با تقریب مناسبی نتایج آزمایشگاهی را تخمین بزند.

#### اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷

#### کلید واژگان:

نانو سیال  
نانو ذرات نیکل  
سرامیک  
جذب گاز  
رابطه تجربی

### Bubble Absorption Enhancement in Water-Based Nanofluids Using Nickel Oxide Nanoparticles in the Presence of Surfactant

Danial Jafari Farsaani<sup>1</sup>, Elham Ameri<sup>2</sup>

1- Department of Chemical Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran.

2- Department of Chemical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

#### Article Information

Original Research Paper

Doi:

[20.1001.1.24233226.1401.16.1.1.8](https://doi.org/10.1001.1.24233226.1401.16.1.1.8)

#### Keywords:

Nanofluid

Nickel Oxide Nanoparticles

Ceramic

Gas Absorption

Corrolation

#### Abstract

To solve the problems caused by the use of chemical solvents such as amine solutions and caustic solution, a single bubble adsorption tower was used to investigate the effect of water-based nanofluids with nickel oxide nanoparticles on the CO<sub>2</sub> adsorption process. CO<sub>2</sub> was introduced as single bubbles from the end of a column, and the mass transfer coefficients and adsorption rates were investigated. The results showed that nickel oxide nanoparticles are hydrophobic and the addition of surfactant to nanofluid increases the surface electric charge of nickel oxide nanoparticles and increases the surface polarity for gas absorption. In this way, carbon dioxide gas is absorbed on the surface of nanoparticles due to its very polar nature, and this phenomenon increased the amount of gas absorption in the nanofluid by 270% compared to the base fluid. The maximum mass transfer flux for adsorption of CO<sub>2</sub> with nanofluids containing nickle oxide nanoparticles was observed in the weight fraction of nanoparticles of 0.1%. To investigate the effect of important parameters on the mass transfer process in a single bubble tower, parameters of nanoparticle weight fraction, gas injection nozzle diameter, with different levels were investigated. Finally, an experimental relationship was presented to estimate the mass transfer coefficient of CO<sub>2</sub> gas, which is a function of the flow regime and microscopic structure of nanoparticles. The results showed that the amount of computational error for the proposed model is less than 20% and this model can estimate the laboratory results with a suitable approximation.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

#### Please cite this article using:

Danial Jafari Farsaani, Elham Ameri, Bubble Absorption Enhancement in Water-Based Nanofluids Using Nickel Oxide Nanoparticles in the Presence of Surfactant, New Process in Material Engineering, 2023, 17(1), 13-27.

## ۱- مقدمه

مهم‌ترین مسئله‌ای که امروزه توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است گرم شدن زمین در اثر گازهای گلخانه‌ای است که این مسئله جهان را در آستانه یک فاجعه بزرگ انسانی و زیست‌محیطی قرار داده و دانشمندان عامل اصلی آن را انتشار گازهای دی‌اکسید کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی و معدنی کشورهای صنعتی می‌دانند. در جو زمین چندین گاز وجود دارد که نقش شیشه را در یک گلخانه دارند که نسبت به نور مرئی خورشید شفاف هستند و اجازه می‌دهند تا این نور به زمین برسد، اما نور زیر قرمزی که به طرف خارج از زمین نشر می‌یابد، توسط این گازها به دام افتاده و تبدیل به گرما می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که دی‌اکسید کربن حدود ۷۵-۸۰٪ گازهای گلخانه‌ای در ایران را شامل می‌شود. بر اساس گزارش جدید آژانس بین‌المللی انرژی، جایگاه ایران در میان کشورهای جهان از نظر میزان انتشار کربن دی‌اکسید ناشی از احتراق سوخت، از رتبه ۱۳ در ۲ سال قبل از این گزارش به رتبه دهم ارتقا یافته است و اکنون ایران با انتشار سالانه بیش از ۶۰۰ میلیون تن گاز گلخانه‌ای در میان کشورهای در حال توسعه در جایگاه چهارم قرار دارد. دانشمندان اقلیم‌شناس پیش‌بینی می‌کنند در صورتی که نحوه زندگی تغییری نکند و مدل مصرفی کماکان حفظ شود، طی دو بیست سال آینده تراکم گاز کربنیک در جو زمین دو برابر خواهد شد. دو برابر شدن تراکم این گاز در جو زمین می‌تواند به‌طور متوسط گرمای کلی کره زمین را بین ۲ تا ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. گرمایش زمین به میزان چند درجه می‌تواند فاجعه‌های بزرگی را در محیط‌زیست به بار بیاورد [۱].

فرآیند جذب دی‌اکسید کربن توسط آب در عملیات خالص‌سازی جریان‌های گازی تحت فشار استفاده می‌شود. استفاده از این فرآیند فقط در مورد جریان‌هایی که میزان قابل‌توجهی دی‌اکسید کربن دارند توجیه اقتصادی دارد (برای مثال در فرآیند ساخت آمونیاک که جریان گازی حاوی ۲۵ درصد دی‌اکسید کربن است). اجزاء اصلی در این سیستم عبارت‌اند از یک برج پر شده جهت جذب و یک

برج گاز زدا که در آن فشار از روی جریان مایع برداشته می‌شود، در حین ریزش به سمت پائین دی‌اکسید کربن از آن جدا می‌شود. همچنین بخشی از گاز دی‌اکسید کربن در یک مخزن تبخیر ناگهانی از مایع جدا می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به حرارت دهی، به‌کارگیری حلال ارزان‌قیمت (آب) و عدم واکنش حلال با مواد موجود در جریان گازی اشاره کرد. برخی از معایب این روش عبارت‌اند از: اتلاف مقادیر قابل‌توجهی هیدروژن و دیگر ترکیبات با ارزش از جریان گازی، بالا بودن توان مصرف جهت پمپ کردن، کم بودن بازده جداسازی دی‌اکسید کربن و ناخالص بودن محصول دی‌اکسید کربن. در واحدهای تولید اوره از آمونیاک، با توجه به خلوص بالای موردنیاز برای گاز دی‌اکسید کربن روش‌های دیگری برای تهیه گاز به کار گرفته می‌شود (مانند استفاده از آمین‌ها).

راهکارهایی جهت ارتقا میزان جذب در این سامانه‌ها وجود دارد. از جمله روش‌های ارتقاء عملکرد جذب گاز استفاده از دستگاه‌های انتقال جرم مختلف با خواص و محدودیت‌های متفاوت است. به‌عنوان مثال انتخاب ستون فیلم ریزان یا جذب‌کننده حبابی یا استفاده از برج جذب پر شده هر یک دارای خواص منحصربه‌فردی هستند که به‌نوبه خود می‌توانند میزان انتقال جرم را تحت تأثیر قرار دهند. از مواد فعال سطحی نیز می‌توان برای افزایش نرخ جذب استفاده نمود. این مواد با ایجاد تلاطم در لایه‌مرزی گاز مایع سبب افزایش نرخ جذب می‌شوند. استفاده از میکرو ذرات در سیستم‌های جذب گاز نیز به‌شدت روی ضریب انتقال جرم حجمی تأثیر می‌گذارد و هرچه اندازه این ذرات کاهش یابد، ضریب انتقال جرم و در نتیجه نرخ انتقال جرم افزایش می‌یابد. مطالعاتی چند در این خصوص در دنیا صورت گرفته است که اکثراً مؤید این مطلب هستند؛ اما اساسی‌ترین مشکلات استفاده از میکروذرات بحث کلوخه شدن و رسوب ذرات است و اینکه در غلظت‌های کم ذرات، ضریب انتقال جرم کمی افزایش می‌یابد و در غلظت‌های بالای ذرات، مقدار ضریب انتقال جرم کاهش می‌یابد. همچنین میزان افزایش ضریب انتقال جرم ناشی از افزودن میکرو ذرات چندان هم

زیاد نیست. محققان علت اینکه میکروذرات نمی‌توانند ضریب انتقال جرم را به میزان قابل توجهی افزایش دهند، تعداد آن‌ها در لایه مرزی گاز-مایع می‌دانند. افزایش ناچیز ضریب انتقال جرم به کمک میکروذرات، محققان را به سمت به کارگیری نانو ذرات سوق داد. امروزه، نانو ذرات در فنون مختلف بکار گرفته شده و نتایج مطلوبی در بردارند [۲-۵]. برای اولین بار در سال ۲۰۰۶ اثر انتقال جرم در نانو سیال مورد بررسی قرار گرفت. طی یک آزمایش ضریب نفوذ برای یک قطره رنگ در نانو سیال و نیز در آب بدون یون اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حضور نانو ذرات در سیال پایه منجر به افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود و چنانچه اندازه ذرات بسیار ریز شود (مانند نانو ذرات) مکانیسم غالب برای افزایش ضریب انتقال جرم حرکات براونی ذرات در فصل مشترک است و حرکات براونی به خودی خود نمی‌تواند باعث افزایش انتقال جرم شوند [۶]. به عبارتی نانو ذرات نمی‌توانند مولکول‌ها را هل داده و باعث نفوذ بیشتر آن‌ها شوند، بلکه حرکات براونی نانو ذرات، سیال را با خود همراه ساخته و به‌نوعی باعث به هم خوردگی در سیال می‌شوند که انتقال جرم را افزایش می‌دهد. لذا می‌توان گفت نانو ذرات با حرکات براونی خود منجر به یک جابجایی بسیار کوچک در لایه مایع در سطح تماس شده که به نانو جابجایی موسوم است. سرعت انتقال مولکول‌ها در فاز مایع توسط این نانو جابجایی‌ها به مراتب بزرگ‌تر از سرعت انتقال مولکول‌ها بر اثر نفوذ است [۶].

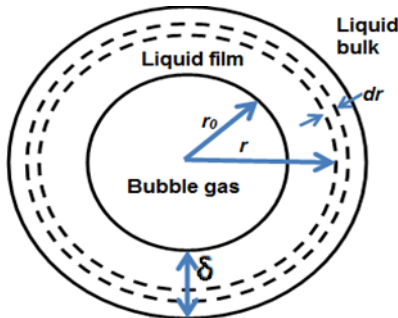
مطالعات بعدی صورت گرفته توسط محققین را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود، یک دسته از مطالعات روی فرآیند جذب آمونیاک در سیال پایه که معمولاً آب است صورت گرفته است که این فرآیند در سیستم‌های تراکم بخار کاربرد دارد. دسته دوم مربوط به فرآیند جذب دی‌اکسید کربن است که در سیالات پایه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. دسته سوم نیز به دلیل اهمیت ویژه جذب اکسیژن در آب در برخی فرآیندها، روی این سیستم صورت گرفته است. به‌تازگی اشرف منصوری و همکاران متانول - دی‌اکسید کربن مورد مطالعه قرار گرفت [۱۷]. به

به مرور و بررسی مطالعات انجام شده در خصوص انتقال جرم در نانو سیالات پرداخته‌اند [۷].

جذب گازهای اسیدی بخصوص دی‌اکسید کربن فرآیندی است که بشدت مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این فرآیند معمولاً از سیال پایه آب برای جذب دی‌اکسید کربن و جداسازی آن از گاز سنتز استفاده می‌کنند. در سال ۲۰۰۶ فرآیند جذب دی‌اکسید کربن در محلول کلوئیدی سیلیکا مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به خواص رئولوژیکی محلول کلوئیدی سیلیکا که رفتاری غیر نیوتنی دارد، ضریب انتقال جرم محاسبه و برای این منظور به یک سری معادلات بدون بعد ارائه شد [۸]. یانگ و همکارانش<sup>۱</sup> با استفاده از سیال پایه آمینی از جمله مونو اتانول آمین نیز به نتیجه مشابه رسیدند [۹-۱۰]. همچنین در این زمینه می‌توان به کارهای صورت گرفته توسط کیم و همکاران<sup>۲</sup> اشاره نمود [۱۱]. کوماتی و همکارانش<sup>۳</sup> در یک آزمایش موفقیت‌آمیز به بررسی جذب دی‌اکسید کربن در نانو سیال شامل ذرات مغناطیسی موجود در سیال پایه متیل دی‌اتانول آمین در مقیاس صنعتی پرداختند و نتیجه گرفتند که استفاده از نانو سیال بجای سیال پایه منجر به افزایش سرعت جذب خواهد شد [۱۲]. پیندا و همکاران<sup>۴</sup> و لی و همکاران<sup>۵</sup> به بررسی اثر نانو ذرات سیلیکا و آلومینا در سیال پایه متانول پرداختند که نتایج آن‌ها نیز نشان از افزایش حدود ۵ درصدی در سرعت نفوذ به ازای ۰/۰۱ درصد حجمی نانو ذره داشت [۱۳-۱۴]. در سال ۲۰۱۶ عملکرد میزان ارتقاء جذب دی‌اکسید کربن توسط نانو سیال‌های آب-سیلیکا و آب-آلومینا مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. افزایش جذب در حضور سیلیکا برابر ۲۳/۵٪ و در حضور آلومینا برابر با ۲۳/۵٪ به دست آمد. در سال ۲۰۱۷ افزایش جذب دی‌اکسید کربن در نانو سیال متانول آلومینا با غلظت‌های حجمی ۰/۰۰۵ الی ۰/۵ مورد بررسی قرار گرفت و ضریب انتقال جرم به‌طور میانگین به میزان ۲۶٪ در غلظت حجمی ۰/۰۱٪ افزایش یافت [۱۶].

در سال ۲۰۱۱ تأثیر حضور نانو ذرات سیلیکا و آلومینا بر عملکرد جذب در یک ستون حبابی برای سیستم جذب متانول - دی‌اکسید کربن مورد مطالعه قرار گرفت [۱۷]. به

پارامترهای نانو سیال به‌عنوان مشخصات فیزیکی مسئله وارد می‌شوند. برای بررسی انتقال جرم در فصل مشترک گاز-مایع، یک حباب گاز تنها را در نظر می‌گیریم که در فاز مایع در حال صعود می‌باشد. از آنجا که فاز گاز خالص فرض می‌شود لذا مقاومت انتقال جرم در فاز گاز صرف‌نظر شده و در یک لایه مایع در فصل مشترک انتقال جرم گاز به مایع صورت می‌گیرد. شکل ۱ طرح المان بکار رفته برای بررسی انتقال جرم در سیستم مورد نظر را بیان می‌کند.



شکل (۱): طرح المان سیال اطراف حباب گاز و جهت جریان گاز.

در این بخش برای مدل‌سازی فرآیند از روش ارائه شده توسط کیم کمک گرفته شده است [۱۹]. موازنه جرم در المان نشان داده شده در شکل ۴ (محدوده بین خط چین‌ها) بر اساس جز قابل حل که با A نمایش داده می‌شود به صورت زیر است:

$$N_{A,r}A|_r - N_{A,r}A|_{r+dr} = \frac{\partial C_A}{\partial t} A dr \quad (1)$$

که در این رابطه  $N_{A,r}$  شار مولی جزء A در جهت شعاعی و A سطح مقطع المان است؛ و CA غلظت جزء A و t زمان و dr ضخامت المان مایع است. با تقسیم طرفین رابطه بر حجم المان:

$$-\frac{d(r^2 N_{A,r})}{r^2 dr} = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (2)$$

$$N_{A,r} = -D_{nf} \frac{\partial C_A}{\partial r} + C_A u \quad (3)$$

که  $D_{nf}$  ضریب نفوذ جزء A در مایع و u سرعت جریان سیال در فیلم مایع است. با توجه به اینکه در لایه مایع جریان سیال صفر در نظر گرفته می‌شود و مطابق تئوری نوشوندگی سطح

منظور بررسی تأثیر دما بر میزان جذب، دماهایی که در آن آزمایش‌ها صورت می‌گرفت ۲۰ و ۲۰- درجه سلسیوس بود و همچنین بازه‌ی مورد آزمایش غلظت حجمی نانو ذرات برابر ۰/۵٪ - ۰/۰۰۵٪ بود. آن‌ها متوجه شدند که حداکثر میزان افزایش در جذب دی‌اکسید کربن در قیاس با متانول خالص در غلظت حجمی ۰/۰۱٪ از نانو ذرات آلومینا برابر ۳/۱٪ و در غلظت حجمی ۰/۰۵٪ از نانو ذرات سیلیکا برابر ۲۰۸٪ می‌باشد.

اخیراً مطالعه تجربی و مدل‌سازی ریاضی فرآیند جذب گازهای دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن با استفاده از جاذب نانو سیال سیلیس-آب در یک برج پرشده انجام شده است. دو برج پرشده با حلقه‌های راشینگ پلاستیکی جهت فرآیند جذب و دفع آماده شد. نتایج نشان می‌دهد که شار انتقال جرم فاز گاز در شدت جریان‌های بالای خوراک گازی بیش از دو برابر می‌باشد [۱۸]. در این پژوهش به بررسی جذب گاز و محاسبه ضریب انتقال جرم در فرآیند جذب گاز دی‌اکسید کربن در نانو سیال و پارامترهای تأثیرگذار بر آن پرداخته شد. همچنین از روش متفاوت محاسباتی برای ارائه یک رابطه تجربی برای تخمین میزان جذب و ضریب انتقال جرم گاز دی‌اکسید کربن در نانو سیال آب / اکسید نیکل به همراه ماده فعال‌کننده سطحی استفاده می‌شود. از آنجا که محققین تاکنون برای تعیین روابطی که قادر به پیش‌بینی ضرایب انتقال جرم باشد گزارشی ارائه نکرده‌اند، روابط تجربی برای تعیین ضریب انتقال جرم برای نانو سیالات وجود ندارد. لذا بررسی ضرایب انتقال جرم و به دست آوردن یک رابطه تجربی که قادر به پیشگویی این پارامتر مهم باشد بسیار حائز اهمیت است. به همین دلیل در این پژوهش، هدف اصلی تعیین یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی ضرایب انتقال جرم در فرآیند جذب گاز دی‌اکسید کربن، با استفاده از برج حبابی در حضور نانو سیال است.

برای تعیین پارامترهای انتقال جرم از قبیل ضریب نفوذ و ضریب انتقال جرم حجمی در فاز مایع نیاز به مدل‌سازی فرآیند جذب می‌باشد. لذا برای مدل‌سازی فرآیند جذب گاز در نانو سیال، همانند سیال پایه عمل می‌شود و در نهایت

دارد، باعث ایجاد تغییرات غلظت در بالک نسبت به زمان می‌شود:

$$(N_{AA})_{in} = V \frac{\partial C_A}{\partial \theta'} \rightarrow N_A \frac{A}{V} = \frac{\partial C_{AL}}{\partial \theta'} \quad (7)$$

مقصود از  $V$  نیز حجم بالک مایع است. با تعریف شار مولی بر اساس ضریب انتقال جرم  $k_L$  داریم:

$$N_A = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) \rightarrow \frac{\partial C_{AL}}{\partial \theta'} = k_L \frac{A}{V}(C_{Ai} - C_{AL}) = k_L a(C_{Ai} - C_{AL}) \quad (8)$$

در رابطه اخیر  $a$  نسبت سطح به حجم المان مایع است. برای حل معادله دیفرانسیل به دست آمده نیاز به یک شرط اولیه است. با فرض اینکه در ابتدای فرآیند، سیال عاری از جزء A استفاده شده باشد داریم:

$$@ \theta' = 0, \quad C_{AL} = 0 \quad (9)$$

با استفاده از این شرط اولیه حل معادله دیفرانسیل به صورت زیر خواهد بود [۱۹]:

$$C_{AL} = C_{Ai}(1 - e^{-k_L a \theta'}) \quad (10)$$

رابطه اخیر تغییرات غلظت بالک مایع را با زمان کل تماس گاز-مایع،  $\theta$  بیان می‌کند. اینک با معلوم شدن  $C_{AL}$  شرایط مرزی بیان شده برای حل معادله دیفرانسیل مشخص شده است و معادله قابل حل خواهد بود. برای حل معادله دیفرانسیل از تبدیل لاپلاس استفاده می‌شود. از این پس تبدیل لاپلاس تابع  $C_A$  با  $\bar{C}_A$  نمایش داده می‌شود که تابعیت  $\Gamma, s$  دارد که  $s$  متغیر تبدیل لاپلاس است.

$$D \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial r^2} + D \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial r} = s \bar{C}_A - C_{AL} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial r} - \frac{s}{D} \bar{C}_A = -\frac{C_{AL}}{D} \quad (12)$$

متعاقباً شرایط مرزی با استفاده از تبدیل لاپلاس برابرند با [۵۱]:

$$@r = r_0, \quad \bar{C}_A = \frac{C_{Ai}}{s} \quad (13)$$

$$@r = r_0 + \delta, \quad \bar{C}_A = \frac{C_{AL}}{s}$$

به این ترتیب معادله دیفرانسیل پاره‌ای به یک معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم ناهمگن تبدیل شده است.

تکه‌هایی از مایع به سطح آمده و با گاز در تماس خواهند بود لذا در این لایه فقط انتقال جرم به طریق نفوذ انجام خواهد شد و طرف راست معادله به صورت جمله اول خلاصه می‌شود.

$$-\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (-D_{nf} r^2 \frac{\partial C_A}{\partial r}) = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (4)$$

از این پس بجای  $D_{nf}$  به معنی ضریب نفوذ گاز در نانو سیال از  $D$  استفاده می‌شود.

$$\frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial C_A}{\partial r}) = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (5)$$

برای حل این معادله دیفرانسیل جزئی نیاز به داشتن شرایط مرزی و اولیه است. به‌عنوان شرط اولیه می‌توان گفت سیال قبل از برخورد با حباب گاز دارای غلظت  $C_{AL}$  می‌باشد. همچنین در تمام زمان تماس، غلظت جزء A در فصل مشترک گاز-مایع برابر غلظت تعادلی جزء A خواهد بود و در بیرون از لایه مایع یعنی در بالک مایع در تمام زمان تماس غلظت جزء A برابر  $C_{AL}$  خواهد بود. بیان ریاضی این شرایط مرزی به صورت زیر است [۱۹]:

$$\begin{aligned} @ t = 0, \quad C_A &= C_{AL} \\ @ t > 0 \quad \& \quad r = r_0, \quad C_A &= C_{Ai} \\ @ t > 0 \quad \& \quad r = r_0 + \delta, \quad C_A &= C_{AL} \end{aligned} \quad (6)$$

مقصود از  $\delta$  ضخامت فیلم مایع اطراف حباب است. غلظت جزء A در بالک مایع با گذشت زمان تغییر می‌کند. در این تحلیل پارامتر زمان به دو صورت بیان می‌شود. یکی زمان تماس زمان میکروسکوپی است که در واقع زمان تماس یک حباب تنها با مایع را بیان می‌کند و برای اندازه‌گیری آن کافی است زمان صعود یک حباب را از پایین برج تا بالای آن با استفاده از کرنومتر اندازه‌گیری نمود. این زمان با  $t$  نمایش داده شد. دوم زمان تماس ماکروسکوپی یا کلی است که به صورت مجموع زمان تماس تمامی حباب‌های گاز در یک آزمایش تعریف می‌شود. برای محاسبه آن کافی است تعداد حباب‌های هر آزمون را در زمان صعود متوسط آن‌ها ضرب نمود. زمان تماس ماکروسکوپی را با  $\theta'$  نشان می‌دهیم. با این تعاریف چنانچه موازنه جزء A برای بالک مایع نوشته شود. از آنجا که فقط ورود جزء A به بالک وجود

## ۲-۱- تهیه نانو سیال

در این پژوهش به منظور تهیه نانو سیال ابتدا مقدار مشخصی از نانو ذرات اکسید نیکل توزین گردید و سپس درون آب دو بار تقطیر شده ریخته و به مدت ۴ ساعت تحت هم زدن با سرعت گردش ۶۵۰ دور بر دقیقه قرار داده شد. در انتها نیز نانو سیال یکنواخت به دست آمده را درون دستگاه اولتراسونیک (Hielscher آلمان، مدل UP400) قرار داده و امواج فراصوت با دوره تناوب ۰/۵ ثانیه و شدت ۶۰٪ به مدت ۱ ساعت با فاصله زمانی ۲۰ دقیقه به داخل نانو سیال فرستاده شد. همچنین به منظور بررسی اثر ماده فعال سطحی نیز در حدود یک بیستم جرم نانو ذرات که در اینجا حدود ۰/۲۵ گرم تعیین شد به نانو سیال غلیظ اولیه اضافه گردید.

## ۲-۲- روش آزمون جذب گاز

در بررسی جذب دی‌اکسید کربن در نانو سیال، جهت تماس گاز و مایع از یک برج حبایی از نوع تک حباب استفاده شد. این برج از یک لوله به قطر داخلی ۱۶۲ میلی‌متر و طول ۱۰۰ سانتیمتر و از جنس پلی‌متیل متاکریلات شفاف تهیه شده و در پایین آن از یک روزنه جهت ورود گاز و تولید حباب در اندازه‌های متفاوت استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها به میزان ۱۰۰ میلی‌لیتر سیال جهت جذب دی‌اکسید کربن بکار رفته است که ارتفاع سیال در ستون به ۴۸/۵ سانتیمتر می‌رسد. گاز به آرامی از پایین برج به کمک دستگاه کنترل شدت جریان (پمپ سرنگی مدل بروکس ساخت کشور آلمان) به داخل برج تزریق می‌شود. شکل شماتیک فرایند و دستگاه جذب گاز در شکل ۲ نشان داده شده است.

جواب عمومی معادله همگن به صورت زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$\bar{C}_{Ah} = \frac{C_1}{r} \cos\left(r\sqrt{-\frac{s}{D}}\right) + \frac{C_2}{r} \sin\left(r\sqrt{-\frac{s}{D}}\right) \quad (14)$$

و جواب خصوصی آن برابر است با:

$$\bar{C}_{Ap} = \frac{C_{AL}}{s} \quad (15)$$

جواب نهایی برابر مجموع این دو جواب است:

$$\bar{C}_A(r, s) = \bar{C}_{Ah} + \bar{C}_{Ap} = \frac{C_1}{r} \cos\left(r\sqrt{-\frac{s}{D}}\right) + \frac{C_2}{r} \sin\left(r\sqrt{-\frac{s}{D}}\right) + \frac{C_{AL}}{s} \quad (16)$$

با جایگذاری شرایط مرزی، ثابت انتگرال‌گیری  $C_1$  و  $C_2$  به صورت زیر تعیین می‌شوند [۱۹]:

$$C_1 = \frac{(C_{Ai} - C_{AL})[\sin\left(r_0\sqrt{-\frac{s}{D}}\right) + \tan\left(\delta\sqrt{-\frac{s}{D}}\right)\cos\left(r_0\sqrt{-\frac{s}{D}}\right)]}{s \tan\left(\delta\sqrt{-\frac{s}{D}}\right)} \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{(C_{AL} - C_{Ai})[\cos\left(r_0\sqrt{-\frac{s}{D}}\right) - \tan\left(\delta\sqrt{-\frac{s}{D}}\right)\sin\left(r_0\sqrt{-\frac{s}{D}}\right)]}{s \tan\left(\delta\sqrt{-\frac{s}{D}}\right)}$$

## ۲- مواد و روش تحقیق

نانو ذرات اکسید نیکل از شرکت U.S. Nano با خلوص ۹۹٪ با خواص فیزیکی ارائه شده در جدول ۱ تهیه شد. ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات با دانسیته ۱/۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به منظور پایداری نانو ذرات در محیط سیال پایه استفاده گردید.

جدول (۱): خواص نانو ذرات نیکل.

میانگین قطر نانو ذرات (nm)	۱۰ الی ۲۰
دانسیته واقعی (g/cm <sup>3</sup> )	۶/۶۷
جرم مولکولی (g/mol)	۷۴/۷
سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	۱۰۰ الی ۱۵۰
رنگ	پودر جامد سیاه-خاکستری

در این حالت محلول حاصل که دارای خاصیت بازی است توسط محلول اسید کلریدریک ۰/۱ مولار تیترا می‌شود و پس از افزودن هر مقدار مشخصی از اسید، pH محلول ثبت می‌گردد. این کار تا جایی که به pH کمتر از ۳ برسد ادامه می‌یابد. واکنش‌های فرآیند در جدول ۲ نشان داده شده است. غلظت گاز دی‌اکسید کربن از رابطه زیر به دست می‌آید.

جدول (۲): واکنش‌های انجام شده طی فرآیند تیتراسیون برگشتی اسید و باز.

معادله واکنش	یون مصرفی
$Na_2CO_3 + HCl \rightarrow NaCl + NaHCO_3$	$CO_3^{2-}$
$NaHCO_3 + HCl \rightarrow NaCl + H_2O + CO_2$	$HCO_3^-$

$$[CO_2] = \frac{(V_2 - V_1) \times M}{\Delta} \quad (19)$$

در این رابطه  $V_1$  و  $V_2$  به ترتیب حجم اسید مصرفی در تیتراسیون است.  $M$  مولاریته اسید و  $\Delta$  حجم نمونه موجود در برج جذب (۱۰۰ میلی‌لیتر) است.

## ۲-۵- پارامترهای انتقال جرم در برج تک حبابی

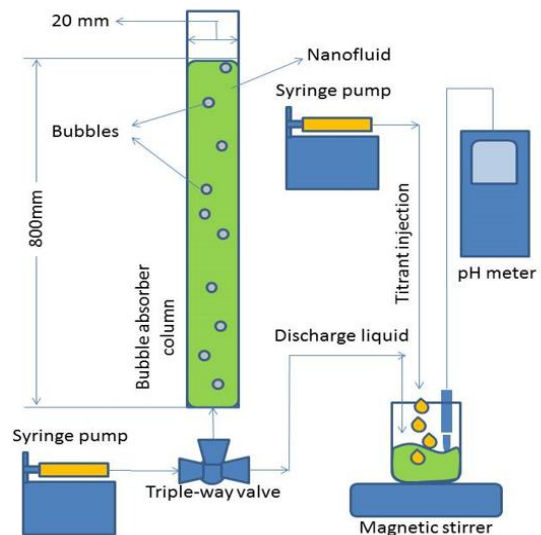
### ۲-۵-۱- تعریف پارامترهای مؤثر

در فرآیند جذب دی‌اکسید کربن توسط نانو سیال پایه آبی چند پارامتر مهم و تأثیرگذار وجود دارد که تغییر در آنها منجر به تغییر در میزان جذب می‌گردد. این پارامترها عبارت‌اند از کسر وزنی نانو ذرات در نانو سیال، قطر روزنه تولید حباب که مستقیماً بر قطر حباب‌های گاز تأثیرگذار است، دبی گاز ورودی، سرعت صعود حباب، جمعیت و تعداد حباب‌های تزریقی در طول آزمایش، ارتفاع ستون جاذب مایع و غیره.

در ادامه مقادیر و نحوه محاسبه هر یک از پارامترهای مؤثر بر فرآیند بیان شده است.

**الف) ارتفاع جاذب (H):** در کلیه آزمایش‌ها حجم نانو سیال ۱۰۰ میلی‌لیتر و ارتفاع ستون مایع ۴۸/۵ سانتیمتر ثابت در نظر گرفته شد.

**ب) قطر حباب‌ها (db):** قطر حباب‌ها تابعی از قطر نازل تزریق گاز است. در کلیه آزمایش‌های فاز تک حبابی قطر



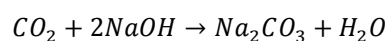
شکل (۲): تصویر برج جذب بکار رفته و شماتیک فرآیند.

## ۲-۳- آزمون‌های مشخصه یابی نانو سیال و نانو ذرات

میزان پایداری و همچنین بارهای سطحی نانو ذرات با آزمون پتانسیل زتا شرکت Malvern ساخت کشور انگلستان تعیین شد. دستگاه میکروسکوپ انتقالی الکترونی (Hitachi، Na 9000 ژاپن) جهت بررسی شکل و اندازه نانو ذرات استفاده شد.

### ۲-۴- روش تیتراسیون به کمک pH متر

در این پژوهش از روش تیتراسیون به کمک pH متر برای بررسی توانایی نانو سیالات در جذب آلاینده‌های محیطی از جمله گاز دی‌اکسید کربن بهره برده شد. در این آزمایش‌ها که در غلظت‌های متفاوت نانو سیال مورد ارزیابی قرار گرفته است، مقدار مشخصی از گاز به صورت حباب تنها به درون ستون مایع حاوی نانو سیالات تزریق شد. در انتها محتویات درون ستون به ارلنی که از قبل مقدار ۱ میلی‌لیتر محلول سود ۰/۵ مولار در آن موجود است ریخته می‌شود. این امر باعث می‌گردد که گاز دی‌اکسید کربن حل شده تماماً به فرم یون  $CO_3^{2-}$  درآید و در اثر اختلاط میزان گاز جذب شده کاهش نیابد.



**(ن) تعیین غلظت بالک مایع ( $C_L$ ):** با استفاده از تیتراسیون مایع در انتهای فرآیند جذب، غلظت بالک مایع در انتهای زمان تماس گاز-مایع به دست می‌آید.

**(و) شار مولی متوسط ( $N$ ):** این پارامتر با استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای زیر قابل محاسبه است:

$$N_{av} = \frac{C_L \times V_L}{n \times 4\pi r_0^2 \times \theta} \quad (21)$$

حجم مایع ( $V_L$ ) در تمام آزمایش‌ها ثابت (100 ml) بوده است و مقصود از  $n$  تعداد حباب‌ها در هر آزمایش است.  $\theta$  زمان تماس کل حباب‌های گاز با مایع می‌باشد و نمایش دهنده زمان انتقال جرم است.

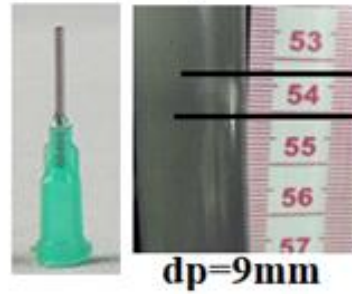
#### ۲-۶- روش تعیین ضرایب انتقال جرم

براین اساس با استفاده از اندازه‌گیری میزان جذب گاز و برخی پارامترهای هیدرودینامیکی جریان حباب می‌توان شار انتقال جرم را محاسبه نمود. برای تعیین ضرایب انتقال جرم در آزمون‌های جداگانه، حجم‌های مختلف گاز (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ میلی‌لیتر در شرایط استاندارد) به برج جذب تزریق می‌شود، سپس غلظت گاز جذب شده و شار مولی با استفاده از موارد فوق تعیین می‌شوند. رابطه اساسی زیر برای بیان تغییرات شار انتقال جرم برحسب غلظت گاز جذب شده قابل تعریف است:

$$N_{av} = k_L(C_{Observed}^* - C_L) \quad (22)$$

که در رابطه فوق  $k_L$  ضریب انتقال جرم است و از شیب نمودار شار ( $N_{av}$ ) برحسب غلظت جذب شده متوسط گاز دی‌اکسید کربن در هر جاذب به دست خواهد آمد. لازم به ذکر است که  $C_{Observed}$  غلظت مشاهده شده‌ی گاز در شرایط تعادلی در هر جاذب خواهد بود که ممکن است مقدار آن با حلالیت گاز در آب متفاوت باشد و این پارامتر از عرض از مبدأ نمودار شار برحسب غلظت قابل محاسبه است. نمودار حاصل و روند تغییرات شار انتقال جرم برحسب غلظت برای یک جاذب خاص به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل با تغییر حجم‌های مختلف گاز در آزمون‌های مختلف می‌توان به نوعی مقدار شار انتقال جرم

نازل ۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری قطر حباب در هر آزمایش از حباب‌های گازی در حال صعود در جاذب عکس‌برداری شده است. سپس با استفاده از مقیاس موجود در تصاویر قطر حباب اندازه‌گیری می‌شود. نتایج اندازه‌گیری قطر حباب در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): متوسط اندازه حباب.

**(پ) زمان صعود حباب ( $t_b$ ):** با توجه به اینکه زمان صعود حباب‌ها تابعی از قطر حباب و ارتفاع ستون مایع است لذا مقدار آن بسته به اندازه حباب خواهد بود. زمان متوسط صعود حباب برای ۳۰ عدد حباب به کمک کورنومتر اندازه‌گیری شد و مقدار ۳/۶۲ ثانیه به دست آمد.

**(ت) دبی گاز ( $Q_g$ ):** دبی گاز ارسالی توسط پمپ سرنگی قابل تغییر است. دبی گاز با توجه به قطر روزنه نازل و برای داشتن جریان تک حباب به صورت تجربی مقدار ۲۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت تنظیم شد.

**(ج) تعداد حباب‌ها ( $n$ ):** تعداد حباب‌های تزریقی به برج جذب برابر است با حجم کل گاز تزریقی بر حجم یک حباب گاز. براین اساس تعداد حباب‌های گازی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$n = \frac{6V}{\pi d_p^3} \quad (20)$$

**(د) زمان تماس کل حباب‌ها،  $\theta$ :** زمان تماس کل از نسبت حجم گاز تزریقی ( $V_g$ ) به دبی تزریق گاز ( $Q_g$ ) به دست می‌آید.



که  $s$  سرعت نوشندگی سطح<sup>۷</sup> نامیده می‌شود و واحد آن عکس زمان است. در ابتدای فرآیند غلظت بالک مایع صفر است و در انتهای فرآیند غلظت بالک مایع افزایش می‌یابد و در صورت ادامه ورود حباب به برج در زمان ماکروسکوپیک بینهایت غلظت بالک مایع به سمت غلظت تعادلی میل می‌نماید. به همین دلیل نیروی محرکه انتقال جرم به مرور کاهش می‌یابد که برای وارد نمودن این نکته در معادله مربوط به  $N_{A,av}|_{r_0}$  کافی است معادل  $\varphi(t)$  را در آن جایگذاری نمود [۱۹]:

$$N_{A,av}|_{r_0} = \int_0^{\infty} -D \frac{\partial C_A(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} se^{-st} dt \quad (26)$$

$$= -D \frac{\partial \int_0^{\infty} C_A(r,t) se^{-st} dt}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$$

و بر اساس تعریف تبدیل لاپلاس:

$$N_{A,av}|_{r_0} = -sD \frac{\partial \bar{C}_A(r,s)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (27)$$

$$= k_L(C_{Ai} - C_{AL})$$

ضریب انتقال جرم فاز مایع متوسط از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_L = -\frac{sD}{(C_{Ai} - C_{AL})} \frac{\partial \bar{C}_A(r,s)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (28)$$

با استفاده از رابطه  $\bar{C}_A(r,s)$  و مشتق‌گیری از آن و جایگذاری در معادله حاصل عبارت  $\frac{\partial \bar{C}_A(r,s)}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\quad (29)$$

$$\frac{\partial \bar{C}_A(r,s)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} =$$

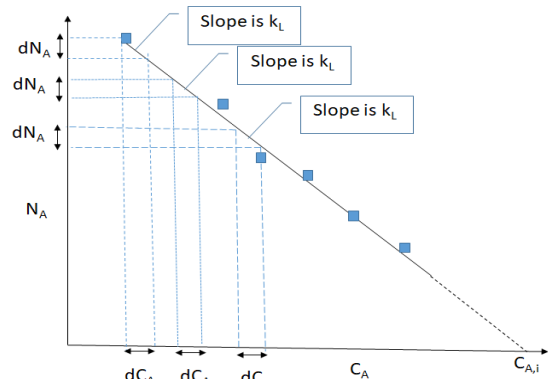
$$-\frac{C_1}{r_0^2} \cos\left(r_0 \sqrt{-\frac{s}{D}}\right) - \frac{C_2}{r_0^2} \sin\left(r_0 \sqrt{-\frac{s}{D}}\right) -$$

$$\frac{C_1}{r_0} \sqrt{-\frac{s}{D}} \sin\left(r_0 \sqrt{-\frac{s}{D}}\right) + \frac{C_2}{r_0} \sqrt{-\frac{s}{D}} \cos\left(r_0 \sqrt{-\frac{s}{D}}\right)$$

با جایگذاری ثوابت  $C_1$  و  $C_2$  در معادله فوق و چند مرحله ساده‌سازی نتیجه نهایی و ساده شده زیر را خواهد داد [۱۹]:

$$k_L = \frac{D \sinh\left(\delta \sqrt{\frac{s}{D}}\right) + Dr_0 \sqrt{\frac{s}{D}} \cosh\left(\delta \sqrt{\frac{s}{D}}\right)}{r_0 \sinh\left(\delta \sqrt{\frac{s}{D}}\right)} \quad (30)$$

در طول زمان را مشخص نمود و چون رابطه خطی فوق برای هر بازه کوچک دیفرانسیلی قابل کاربرد است لذا برای کل بازه تغییرات غلظت می‌توان این رابطه خطی را صادق دانست.



شکل (۴): نمودار شار انتقال جرم بر حسب غلظت.

## ۲-۷- پارامترهای میکروسکوپی انتقال جرم

با توجه به اینکه پارامتر مهم در فرآیند مدل‌سازی تعیین میزان گاز جذب شده است، لذا چنانچه بتوان شار مولی جزء  $A$  را محاسبه نمود نیازی به دانستن پروفایل غلظتی نیست. در ادامه به بررسی میزان شار مولی متوسط پرداخته خواهد شد. با توجه به اینکه کل میزان گاز جذب شده در فاز مایع برابر میزان شار مولی آن در فصل مشترک گاز-مایع است، لذا شار مولی گاز از رابطه زیر قابل تعریف است:

$$N_A = N_{A,r}(r,t) \rightarrow N_A(r_0,t) = -D \frac{\partial C_A}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (23)$$

با استفاده از رابطه شار مولی متوسط جزء  $A$  برابر است با [۱۹]:

$$N_{A,av}|_{r_0} = \int_0^{\infty} N_A(r_0,t) \varphi(t) dt \quad (24)$$

$$= k_L(C_{Ai} - C_{AL})$$

در رابطه مقصود از  $\varphi(t)$  تابع توزیع زمان نوشندگی سطح خواهد بود که از تئوری نوشندگی سطح توسط دانکورت<sup>۶</sup> قابل اقتباس است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$\varphi(t) = se^{-st} \quad (25)$$

است می‌توان مقدار غلظت بالک را به صورت متوسط در رابطه جایگذاری نمود که در رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_L = \frac{C_{L,f} + C_{L,i}}{2} = \frac{C_{L,f} + 0}{2} = \frac{C_{L,f}}{2} \quad (33)$$

که در این رابطه  $C_{L,f}$  مقدار غلظت گاز جذب شده در انتهای فرآیند جذب است و نیز  $C_{L,i}$  مقدار گاز موجود در نانو سیال در ابتدای فرآیند جذب است و از آنجایی که نانو سیال در ابتدای فرآیند عاری از گاز ماده جذب شده است، مقدار آن برابر با صفر فرض می‌شود. فلذا به کمک رابطه آخر می‌توان به این نکته پی برد که غلظت متوسط برای محاسبه پارامترهای انتقال جرم به کمک برازش داده‌ها نصف غلظت گاز جذب شده در انتهای فرآیند است. به منظور برازش داده‌ها (رگرسیون خطی و غیرخطی) از نرم‌افزار متلب استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمون پتانسیل زتا

جهت بررسی پایداری نانو ذرات اکسید نیکل و سنجش عدم کلوخه شدن این ذرات، آزمون پتانسیل زتا انجام شد. در شکل ۵ نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل زتا برای نانو سیال‌های حاوی نانو ذرات اکسید نیکل پس از گذشت مدت زمان ۳۰ دقیقه از ساخت نانو سیال و پراکنده‌سازی نانو ذرات به کمک دستگاه اولتراسونیک در حضور و عدم حضور ماده فعال سطحی ارائه شده است. در بررسی پایداری نانو ذرات میزان بارهای سطح مورد مطالعه قرار می‌گیرند که بالا بودن چگالی بارهای الکتروستاتیکی، پایداری زیاد نانو ذرات در محیط سیال را نشان می‌دهد. با توجه به ماهیت نانو ذرات و سیال پایه معیار پایداری نانو ذرات در محیط سیال این است که ماکزیمم بارهای سطحی یا کمتر از  $-40\text{mV}$  باشد و یا بیشتر از  $+40\text{mV}$  باشد. در نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل زتا نانو ذرات دارای بارهای سطحی منفی می‌باشند که در این حالت بیشترین مقدار نانو ذرات دارای بار منفی کمتر از  $40\text{mV}$  می‌باشد. به دلیل پایداری نانو ذرات در محیط سیال پایه مذکور می‌توان از انباشته شدن نانو ذرات و تأثیر آن بر خواص فیزیکی از جمله ویسکوزیته و مکانیزم جذب گاز

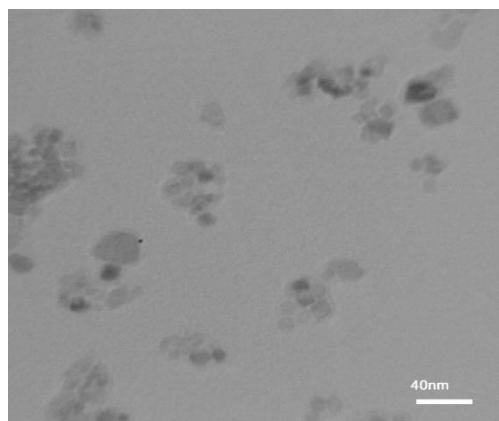
چنانکه ملاحظه می‌شود ضریب انتقال جرم فاز مایع تابع سرعت نوشوندگی سطح (s)، ضریب نفوذ جزء حل شونده در A در فاز مایع (D)، شعاع حباب گاز ( $r_0$ ) و ضخامت فیلم مایع اطراف حباب گاز ( $\delta$ ) است و هیچ تابعیتی از زمان یا غلظت ندارد. بر این اساس شار مولی متوسط جزء A عبارت است از [۱۹]:

$$N_{A,av} = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) = \frac{D \sinh\left(\delta \sqrt{\frac{s}{D}}\right) + Dr_0 \sqrt{\frac{s}{D}} \cosh\left(\delta \sqrt{\frac{s}{D}}\right)}{r_0 \sinh\left(\delta \sqrt{\frac{s}{D}}\right)} (C_{Ai} - C_{AL}) \quad (31)$$

با جایگذاری  $C_{AL}$  در رابطه فوق و اندکی ساده‌سازی داریم:

$$N_{A,av} = C_{Ai} \frac{D \sinh\left(\frac{\delta}{D} \sqrt{sD}\right) + r_0 \sqrt{sD} \cosh\left(\frac{\delta}{D} \sqrt{sD}\right)}{r_0 \sinh\left(\frac{\delta}{D} \sqrt{sD}\right)} e^{-k_L a \theta} \quad (32)$$

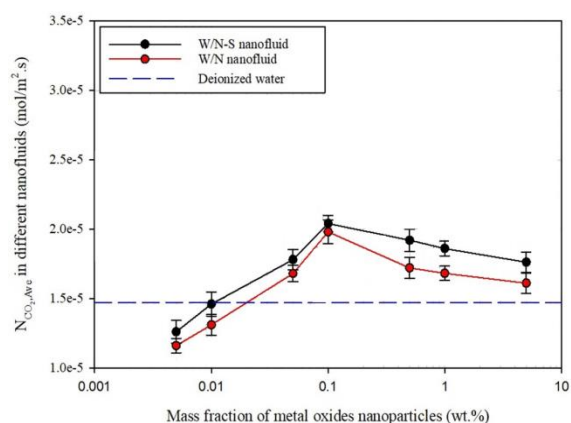
به این ترتیب با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی و نتایج مدل‌سازی پارامترهای مجهول مسئله قابل تعیین هستند. به طور کلی به کمک رابطه به دست آمده می‌توان با داشتن مقادیر شار مولی گاز جذب شده برحسب زمان جذب مقدار ضریب انتقال جرم را به صورت تجربی محاسبه نمود. همچنین به کمک برازش داده‌های چند متغیره نیز می‌توان مقادیر ضریب نوشوندگی، ضخامت لایه نفوذ و ضریب نفوذ گاز درون نانو سیال مورد نظر را محاسبه نمود. سپس به کمک مقادیر به دست آمده عدد شروود، رینولدز و نیز اشمیت را برای حالات متفاوت محاسبه نمود و سپس رابطه کلی را برای حالتی که از نانو سیال برای حذف گاز استفاده شود نیز استخراج نمود. به منظور محاسبه ضریب انتقال جرم، ضریب نفوذ گاز در نانو سیال، فاکتور نوشوندگی سطحی و ضخامت لایه نفوذ و غلظت گاز در سطح گاز-مایع از روابط  $N_{av}$  و  $N_{A,av}$  استفاده شد. در رابطه  $N_{av}$  می‌توان با داشتن میزان فلاکس گاز در غلظت‌های متفاوت درون نانو سیال به کمک برازش خطی مقادیر ضریب انتقال جرم و نیز غلظت در سطح مشترک گاز مایع را محاسبه نمود. از آنجایی که مقدار فلاکس گاز در این حالت به صورت متوسط محاسبه گردیده



شکل (۶): تصویر TEM نانو ذرات اکسید نیکل.

### ۳-۳- بهینه غلظت نانو ذرات برای جذب گاز

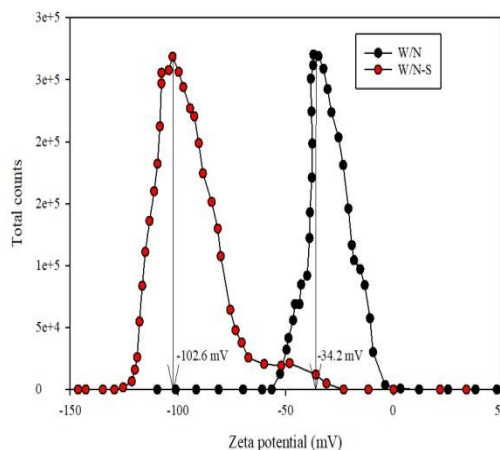
برای بررسی تأثیر نانو ذرات در میزان جذب ابتدا آزمون جذب برای یک ستون از نوع تک حبابی انجام شد. در شکل ۷ مقادیر شار انتقال جرم گاز دی‌اکسید کربن برای نانو سیالات برحسب کسر وزنی نانو ذرات نشان داده شده است.



شکل (۷): شار انتقال جرم دی‌اکسید کربن در نانو سیال در حضور و عدم حضور ماده فعال سطحی برحسب کسر وزنی نانو ذرات.

لازم به ذکر است که این آزمایش‌ها در حالتی انجام شده که ۶۰ میلی‌لیتر گاز مورد نظر در شرایط استاندارد با قطر حباب‌های ۹ میلی‌متر به نانو سیال تزریق شد و سپس مقادیر گازهای جذب شده به روش تیتراسیون برگشتی در نانو سیال به کمک pH متر اندازه‌گیری گردید. شکل ۷ نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات باعث افزایش شار انتقال جرم نسبت به سیال پایه (به همراه مواد فعال سطحی) خواهد شد. بیشینه مقدار شار انتقال جرم برای جذب دی‌اکسید کربن در حضور

توسط نانو سیال صرف نظر نمود. نتایج حاصل از شکل ۵ نشان می‌دهد که برای حالتی که از نانو سیال در حضور ماده فعال سطحی استفاده شود بیشینه بار پتانسیل سطحی نانو ذرات در حدود ۱۰۲/۶- میلی ولت می‌باشد و این مقدار از معیار پایداری (40 mV-) کمتر است. پس می‌توان به این نتیجه رسید که نانو ذرات مورد استفاده در این پژوهش در هر حالت‌های مختلف پایدار بوده و بارهای سطحی آن به اندازه کافی بوده است که اجازه به هم چسبیدن نانو ذرات را در سیال پایه نمی‌دهد (منظور از پایداری نانو سیال عدم کلوخه شدن نانو ذرات در محیط سیال پایه و ته‌نشین نشدن آن‌ها است).



شکل (۵): نتایج آزمایش پتانسیل زتا برای نانو ذرات اکسید نیکل در آب به عنوان سیال پایه در حضور و عدم حضور ماده فعال سطحی SDS.

### ۳-۲- بهینه غلظت نانو ذرات

در شکل ۶ تصویر میکروسکوپ انتقالی الکترونی نانو ذرات اکسید نیکل به منظور مشخص‌سازی هندسه و اندازه نانو ذرات نشان داده شده است. شکل هندسه نانو ذرات اکسید نیکل تقریباً به صورت کروی بوده و در محدوده نانو (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) است.

### ۳-۴- محاسبه ضریب انتقال جرم و غلظت تعادلی

#### گاز در فصل مشترک

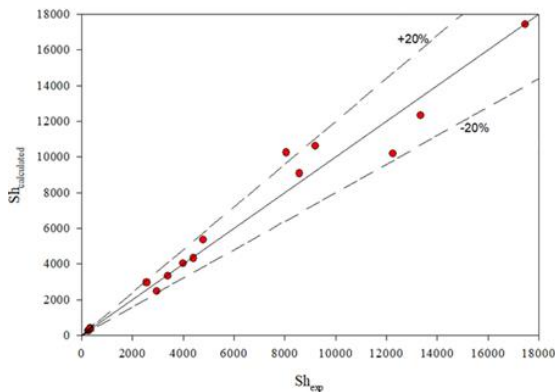
به کمک مقادیر متفاوت از گازهای دی‌اکسید کربن به درون نانو سیال مورد نظر و سپس اندازه‌گیری غلظت گاز جذب شده و متوسط فلاکس انتقال جرم، می‌توان ضریب انتقال جرم را به کمک شیب نمودار و عرض از مبدأ محاسبه نمود. برای این کار کافی است که متوسط فلاکس انتقال جرم را برحسب غلظت متوسط گاز جذب شده در نانو سیال محاسبه نمود. بدین منظور حجم‌های متفاوتی از گازهای مذکور (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ میلی‌لیتر در شرایط استاندارد) هر یک به‌صورت جداگانه در نمونه نانو سیال عاری از گاز مورد نظر به کمک پمپ سرنگی تزریق شده (به‌صورت تک حباب با اندازه‌های ۹ میلی‌متر) و سپس مقدار غلظت متوسط گاز جذب شده و به کمک آن متوسط فلاکس انتقال جرم در آن محاسبه گردیده است؛ بنابراین به کمک یازده عدد داده آزمایشگاهی برای نمونه نانو سیال و گاز می‌توان ضریب انتقال جرم و غلظت تعادلی در فصل مشترک گاز-مایع را محاسبه نمود. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است تغییرات شار مولی گاز جذب شده توسط نانو سیال برحسب غلظت گاز جذب شده در نانو سیال تابعیتی خطی داشته و بنابراین به کمک رابطه (۱) می‌توان به کمک برازش خطی داده‌ها غلظت گاز در سطح مشترک (که به دلیل تغییر در ماهیت شیمیایی و یا فیزیکی نانو سیال می‌تواند تابعیتی از نوع نانو سیال داشته باشد) و نیز ضریب انتقال جرم را محاسبه نمود. نتایج مشابه با این پژوهش نیز توسط سایر پژوهشگران نیز ارائه گردیده است که نشان‌دهنده این است که فرآیند آزمایشگاهی به‌درستی صورت گرفته است [۲۰ و ۲۲]؛ بنابراین به کمک این رابطه مقادیر پارامترهای ذکر شده محاسبه گردید و در جدول ۳ ارائه شد. به منظور محاسبه مقدار ضریب نفوذ گازها در نانو سیالات، ضریب نوشوندگی سطح و نیز ضخامت لایه نفوذ از رابطه (۳۵) استفاده شد. در این راستا به کمک نرم‌افزار متلب و روش برازش داده‌های غیرخطی چند متغیره‌ای این مقادیر به کمک شار جذب گاز و غلظت‌های گاز جذب شده در نانو سیال محاسبه گردید. همچنین مقادیر ضریب نفوذ گازهای

ماده فعال سطحی در کسر وزنی نانو ذرات ۰/۱ درصد مشاهده شد. برای حالتی که از ماده فعال سطحی در ساخت نانو سیال آب/اکسید نیکل استفاده شود مقدار جذب گاز اسیدی نسبت به حالتی که از ماده فعال سطحی استفاده نشود افزایش می‌یابد و همچنین مقادیر بیشینه جذب گاز برای هر دو حالت (حضور و عدم حضور ماده فعال سطحی) در یک غلظت مشاهده می‌شود. علت این پدیده را می‌توان به دلیل آن دانست که نانو ذرات اکسید نیکل بسیار آب‌گریز هستند و با اضافه شدن ماده فعال سطحی سطوح این نانو ذرات از ماده فعال سطحی پوشیده شده و قسمت آب دوست ماده فعال سطحی به سمت خارج (در جهت محیط سیال پایه) جهت‌گیری می‌کند و موجب بالا رفتن بارهای الکتریکی سطح شده و قطبیت سطح را برای جذب گاز بالا می‌برند (نانو ذرات در سطح مشترک گاز-مایع قرار می‌گیرند). به این ترتیب گاز دی‌اکسید کربن به دلیل ماهیت بسیار قطبیت بر سطح نانو ذرات پوشیده شده با مولکول‌های ماده فعال سطحی جذب شده و این پدیده موجب افزایش سرعت جذب و فلاکس مولی گازهای اسیدی به داخل نانو سیال می‌شود. در این رابطه، جذب گاز دی‌اکسید کربن در نانو سیال پایه آمینو/آلومینا به همراه سورفکتانت مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها، تشکیل یک لایه نازک از سورفکتانت بر روی سطح نانو ذرات، خواص جذب ذرات را تغییر می‌دهد به‌طوری‌که ذرات نزدیکی خوبی با مولکول‌های سیال پایه و گاز دی‌اکسید کربن و یک نیروی دافعه قوی بین ذرات برقرار می‌کنند و در نتیجه میزان جذب گاز را بهبود می‌بخشند [۶]. همچنین لو و همکاران<sup>۸</sup> به بررسی جذب CO<sub>2</sub> توسط نانو سیال آب/آلومینا به همراه سورفکتانت سدیم دودسیل بنزن سولفونات پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ترکیب سورفکتانت و نانو ذرات جذب CO<sub>2</sub> را نسبت به نانو ذرات بدون سورفکتانت افزایش می‌دهد [۲۱].

رابطه ارائه شده در ادامه برای حالتی به دست آمد که گاز دی‌اکسید کربن توسط نانو سیال در حضور ماده فعال سطحی جذب شد و علاوه بر پارامترهای رینولدز و اشمیت از قطر متوسط نانو ذرات ( $d_{np}$ ) و همچنین قطر مولکولی آب ( $d_{bf}$ ) نیز در محاسبات استفاده شد. قطر متوسط نانو ذرات اکسید نیکل ۵۰ نانومتر در نظر گرفته شد و نیز قطر متوسط مولکول‌های آب نیز ۰/۲۷۵ نانومتر در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از داده‌های تجربی اندازه‌گیری عدد شروود برای نانو سیال و داده‌های محاسبه شده از رابطه (۳۴) در شکل ۹ نشان داده شده است.

(۳۴)

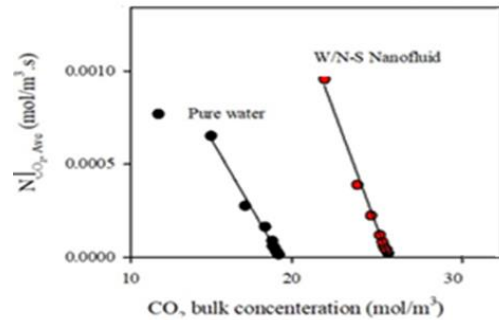
$$Sh_{nf} = \frac{5.53039 \times 10^{-6} (Re_{nf})^{2.622} (Sc_{nf})^{36.38} \left(\frac{d_{np}}{d_{bf}}\right)^{-0.4}}{1518.434 + 1366.034 (Sc_{nf})^{34.492}}$$



شکل (۹): نمودار داده‌های عدد شروود محاسباتی به کمک رابطه (۳۸) برحسب داده‌های آزمایشگاهی برای نانو سیال آب و حضور ماده فعال سطحی.

همان‌طور که در این شکل مشخص است انحراف داده‌های تجربی برای عدد شروود تجربی برای نانو سیال در حضور ماده فعال سطحی از داده‌های محاسبه شده از رابطه تقریباً کمتر از ۲۰٪ بوده که نشان‌دهنده این است که این مدل به دست آمده به روش برازش غیرخطی چند متغیره می‌تواند داده‌های عدد شروود آزمایشگاهی نانو سیال آب / اکسید نیکل را در حضور ماده فعال سطحی با خطای قابل قبولی تخمین بزند.

مورد استفاده در این پژوهش در نانو سیال نیز در جدول ۴ ارائه گردیده است که مقادیر ضریب نوشندگی سطح و همچنین ضخامت لایه نفوذ نیز برای حالات متفاوت در جدول ۵ ذکر گردیده است.



شکل (۸): شار انتقال جرم گازهای دی‌اکسید کربن در نانو سیال برحسب غلظت متوسط گاز در انتهای فرآیند جذب گاز.

جدول (۳): مقادیر ضریب انتقال جرم و غلظت در سطح مشترک گاز-مایع برای جذب گازهای اسیدی توسط نانو سیال.

نوع سیال	$C_{observed}^*$ (mol/m <sup>3</sup> )	$k_L$ (m/s)	$R^2$
آب خالص	۱۹/۳	$۲/۹۷ \times 10^{-۴}$	/۹۹۰
نانو سیال	۲۶	$۴/۶۶ \times 10^{-۴}$	/۹۹۲

جدول (۴): مقادیر ضریب نفوذ برای جذب گازهای اسیدی توسط نانو سیال.

نوع سیال	$D$ (m/s)	$R^2$
آب خالص	$۲/۱۲ \times 10^{-۹}$	۰/۹۸۸
نانو سیال	$۲/۴۵ \times 10^{-۹}$	۰/۹۸۱

جدول (۵): مقادیر ضریب نوشندگی سطح و ضخامت لایه نفوذ.

نوع سیال	$\delta$ (m)	$S$ (s <sup>-1</sup> )
آب خالص	$۱/۲۱ \times 10^{-۵}$	$۶/۸۷۳ \times 10^{-۴}$
نانو سیال	$۱/۶۷ \times 10^{-۵}$	$۷/۲۳۳ \times 10^{-۴}$

### ۳-۵- رابطه تجربی ارائه شده برای انتقال جرم توسط نانو سیال

پس از محاسبه پارامترهای ارائه شده در روابط به کمک برازش غیرخطی چند متغیره رابطه‌ای برحسب عدد رینولدز و اشمیت ارائه گردید. این رابطه به کمک نرم‌افزار اکسل محاسبه گردید و مقدار  $R^2$  برای این محاسبه ۰/۹۵۳ به دست آمد که نشان دهند این است که این رابطه خطی به‌خوبی می‌تواند مقادیر تجربی را با مقدار خطای کمی تخمین بزند.

## ۴- نتیجه‌گیری

جداسازی گازهای اسیدی توسط فرآیندهای اسکرایینگ به صورت گسترده در مقیاس‌های صنعتی اجرا می‌شود. به دلیل مشکلات متعدد حلال‌های شیمیایی از قبیل خوردگی، سمیت و هزینه عملیاتی بالای آن‌ها به کارگیری حلال‌های مناسب‌تر از موارد مورد علاقه صنایع نفت و گاز و پتروشیمی می‌باشد. اخیراً استفاده از نانو سیالات بر پایه آبی یا حلال‌های آلی به عنوان جاذب در فرآیندهای جذب گاز توسط محققین پیشنهاد شده است. برای این منظور در این مطالعه جهت رفع مشکلات ناشی از استفاده از حلال‌های شیمیایی نظیر محلول‌های آمینی و محلول کاستیک، از یک برج جذب تک حبابی برای بررسی تأثیر نانو سیال پایه آبی با نانو ذرات اکسید نیکل بر فرآیند جذب گاز دی‌اکسید کربن با حضور ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات استفاده شده است. نتایج کلی به صورت زیر ارائه شده است:

نتایج حاصل از آزمون پتانسیل زتا نشان می‌دهد که برای حالتی که از نانو سیال در حضور ماده فعال سطحی استفاده شود بیشینه بار پتانسیل سطحی نانو ذرات در حدود  $-10.2/6$  میلی ولت می‌باشد و این مقدار از معیار پایداری ( $40 \text{ mV}$ ) کمتر است. پس می‌توان به این نتیجه رسید که نانو ذرات مورد استفاده در این پژوهش در حالت‌های مختلف پایدار بوده است. بیشینه مقدار شار انتقال جرم برای جذب دی‌اکسید کربن در حضور ماده فعال سطحی در کسر وزنی نانو ذرات  $0/1$  درصد مشاهده شد. برای حالتی که از ماده فعال سطحی در ساخت نانو سیال آب/اکسید نیکل استفاده شود مقدار جذب گاز اسیدی نسبت به حالتی که از ماده فعال سطحی استفاده نشود افزایش می‌یابد و همچنین مقادیر بیشینه جذب گاز برای هر دو حالت (حضور و عدم حضور ماده فعال سطحی) در یک غلظت مشاهده می‌شود. ماده فعال سطحی با تغییر در ساختار مولکولی نانو ذرات می‌تواند بر میزان جذب گاز توسط نانو سیالات تأثیر گذار باشد. نتایج آزمون‌های تجربی با نتایج حاصل از مدل تخمین زده شده به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج

مقایسه (حدود ۲۰ درصد خطا) نشان از دقت بالای مدل و تطابق آن با داده‌های تجربی است.

## ۵- مراجع

[1] S. B. Idso, "Carbon dioxide and global change", 1989.

[۲] م. مسائلی و ک. امینی، "بررسی سختی و رفتار تریبولوژیکی نانوکامپوزیت سطحی  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$  ساخته شده با فرآوری هم‌زن اصطکاکی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۰، شماره ۱، صفحه ۱۲۵-۱۳۶، بهار ۱۳۹۵.

[۳] م. مکاریان و ا. عامری، "تأثیر نانو ذرات سرامیکی سیلیسیم کربید بر خواص تریبولوژیکی روغن پایه پارافینیک SN50HVI"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۶، شماره ۱، صفحه ۲۷-۴۱، بهار ۱۴۰۱.

[۴] س. جبارزاد، ح. ر. بخششی، ح. ر. راد، ا. ع. نوربخش و ت. احمدی، "بررسی شرایط بهینه آسیاب کاری در تولید نانو کامپوزیت  $\text{Mg-3Zn-1Mn}$ "، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۶، شماره ۱، صفحه ۱-۱۰، بهار ۱۴۰۱.

[۵] ح. یوسفی و ب. هاشمی، "سنتر نانو ذرات اکسید روی دوپ شده توسط نقره به روش سل-ژل پکنینی و مشخصه‌یابی و بررسی خواص فوتوکاتالیستی آن‌ها"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۲، شماره ۴، صفحه ۶۷-۷۹، زمستان ۱۳۹۷.

[6] B. Olle, S. Bucak, T. C. Holmes, L. Bromberg, T. A. Hatton & D. I. Wang, "Enhancement of oxygen mass transfer using functionalized magnetic nanoparticles", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 45, pp. 4355-4363, 2006.

[7] J. P. Wen, X. Q. Jia & W. Feng, "Hydrodynamic and Mass Transfer of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Internal Loop Airlift Reactors with Nanometer Solid Particles", *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, vol. 28, pp. 53-60, 2005.

[8] Z. Samadi, M. Haghshenasfard & A. Moheb, "CO<sub>2</sub> absorption using nanofluids in a wetted-wall column with external magnetic field," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 37, pp. 462-470, 2014.

- [17] J. W. Lee, J. Y. Jung, S. G. Lee & Y. T. Kang, "CO<sub>2</sub> bubble absorption enhancement in methanol-based nanofluids", *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, pp. 1727-1733, 2011.
- [18] D. Khafari-Nezhad, E. Ameri & S. H. Esmaili-Faraj, "Experimental study and modeling of simultaneous absorption of CO<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub>S mixture by silica water nanofluid in a packed bed column", *Journal of Separation Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 39-51, 2022.
- [19] W. G. Kim, H. U. Kang, K. M. Jung & S. H. Kim, "Synthesis of silica nanofluid and application to CO<sub>2</sub> absorption", *Separation Science and Technology*, vol. 43, pp. 3036-3055, 2008.
- [20] M. H. K. Darvanjooghi, M. N. Esfahany, S. H. J. S. Esmaili-Faraj & P. Technology, "Investigation of the effects of nanoparticle size on CO<sub>2</sub> absorption by silica-water nanofluid", *Separation and Purification Technology*, vol. 195, pp. 208-215, 2018.
- [21] S. Lu, J. Song, Y. Li, M. Xing & Q. He, "Improvement of CO<sub>2</sub> absorption using AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in a stirred thermostatic reactor", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 93, pp. 935-941, 2015.
- [22] M. H. Karimi Darvanjooghi, M. Pahlevaninezhad, A. Abdollahi & S. M. J. A. J. Davoodi, "Investigation of the effect of magnetic field on mass transfer parameters of CO<sub>2</sub> absorption using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-water nanofluid", *AIChE Journal*, vol. 63, pp. 2176-2186, 2017.
- [9] M. Taheri, A. Mohebbi, H. Hashemipour & A. M. Rashidi, "Simultaneous absorption of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) from CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S-CH<sub>4</sub> gas mixture using amine-based nanofluids in a wetted wall column", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 28, pp. 410-417, 2016.
- [10] L. Yang, K. Du, X. F. Niu, B. Cheng & Y. F. Jiang, "Experimental study on enhancement of ammonia-water falling film absorption by adding nano-particles", *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, pp. 640-647, 2011.
- [11] J. H. Kim, C. W. Jung & Y. T. Kang, "Mass transfer enhancement during CO<sub>2</sub> absorption process in methanol/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 484-491, 2014.
- [12] S. Komati & A. K. Suresh, "Anomalous enhancement of interphase transport rates by nanoparticles: Effect of magnetic iron oxide on gas-liquid mass transfer", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 49, pp. 390-405, 2009.
- [13] I. T. Pineda, J. W. Lee, I. Jung & Y. T. Kang, "CO<sub>2</sub> absorption enhancement by methanol-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> Nano fluids in a tray column absorber", *International Journal of Refrigeration*, vol. 35, pp. 1402-1409, 2012.
- [14] J. S. Lee, J. W. Lee & Y. T. Kang, "CO<sub>2</sub> absorption/regeneration enhancement in DI water with suspended nanoparticles for energy conversion application", *Applied Energy*, vol. 143, pp. 119-129, 2015.
- [15] J. Salimi & F. Salimi, "CO<sub>2</sub> capture by water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> mixture nanofluids in an absorption packed column", *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 15, pp. 185-192, 2016.
- [16] S. Krishnamurthy, P. Bhattacharya, P. E. Phelan & R. S. Prasher, "Enhanced Mass Transport in Nanofluids", *Nano Letters*, vol. 6, pp. 419-423, 2006.

### ۶- پی نوشت

- [1] Yang et al  
 [2] Kim et al  
 [3] Komati et al  
 [4] Pineda et al  
 [5] Lee et al  
 [6] Danckwerts  
 [7] Surface Renewal Rate  
 [8] Lu et al