دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲

# بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان جذب کربن دیاکسید با استفاده از نانوسیال آب-آلومینا در برج دیواره مرطوب با استفاده از روش سطح - پاسخ

**حامد رشیدی\*<sup>\*\*</sup>، سجاد ممیوند** گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده: امروزه استفاده از حلالهای حاوی نانوذره ها برای بهبود نرخ جذب گازهای اسیدی مورد توجه بسیاری از پژوه شگران قرار گرفته است. در این مطالعه جذب فیزیکی کربن دی اکسید در نانوسیال بر پایه آب حاوی نانوذره های آلومینا در برج دیواره مرطوب مورد بررسی قرار گرفته است. از روش سطح-پاسخ با طراحی مرکب مرکزی برای تجزیه و تحلیل و بهینه سازی عملکرد سیستم نانوسیال استفاده شد. در این راستا عملکرد فرایند با اندازه گیری ضریب انتقال جرم فاز مایع براساس متغیرهای مستقل، غلظت نانوذره ها (اج ۱۰-۱)، شدت جریان سیال ( ۱۰۰ ۳۱/۰۰۰) و دمای سیال (۲۵ ۴۵-۲۵) ارزیابی شد. با استفاده از تحلیل واریانس، یک مدل درجه دو جهت پیش بینی ضریب انتقال جرم در نانوسیال آب-آلومینا با <sup>2</sup> برابر ۱۰/۷۷ ارائه شد. نتیجه ها نشان می دهد که ضریب انتقال جرم در حضور نانوذره های آلومینا به طور چشمگیری افزایش می یابد. با اضافه کردن ۱ و ۲۵ گرم در لیتر از نانوذره های آلومینا در سیال پایهٔ آب نرخ جذب گاز ۲۷ و ۱۹ درصد افزایش می یابد. با اضافه کردن ۱ و ۲۵ گرم در لیتر از نانوذره های آلومینا در سیال پایهٔ آب نرخ جذب گاز ۲۷ و ۱۹ درصد افزایش می یابد. با اضافه کردن ۱ و ۲۵ گرم در لیتر از نانوذره های آلومینا در سیال پایهٔ آب نرخ جذب گاز ۲۷ و ۱۹ درصد افزایش می یابد. با نصافه کردن ۱ ماله بدست آمده افزایش غلظت نانوذره ها و شدت جریان سیال بیشترین تاثیر را

كلمات كليدى: نانوسيال، نانوذرهما آلومينا، جذب، ضريب انتقال جرم

KEYWORDS: Nanofluid, Alumina Nanoparticle, Absorption, Mass Transfer Coefficient.

#### مقدمه

ای خود جذب قابل توجه ای دارند. این نانوذره ها را می توان از مواد گوناگون
بلی از جمله: روی اکسید ، تیتانیم اکسید ، مس اکسید ، آلومینا اکسید ،
نی سیلیس اکسید انتخاب نمود. مطالعات اخیر بهبود جذب کربن دی اکسید ،
بود با استفاده از نانوسیال ها را نشان می دهد [۴, ۵]. ر*شیدی و سهرابی* ش به بررسی اثر حضور نانوذره های تیتانیم دی اکسید در فرایند جذب 
۳]. کربن دی اکسید در برج دیواره مرطوب پرداختند. نتیجه های این مطالعه فرد های در خضور نانو ذره های می دو از مایع در حضور نانو ذره های فرا می در خور نانو ذره های فرد نشان می دهد که ضریب انتقال جرم فاز مایع در حضور نانو ذره های فرد نشان می دهد که ضریب انتقال جرم فاز مایع در حضور نانو ذره های فرد می ما در خور نانو دره های می دود که ضریب انتقال جرم فاز مایع در حضور نانو ذره های فرد می در خور نانو دره های می دود که ضریب انتقال جرم فاز مایع در حضور نانو ذره های فرد می می دود که خور نانو دره های می دود که ضریب انتقال جرم فاز مایع در حضور نانو ذره های در خور کنو در موا در موا می در خور نانو دره های در می در خور نانو دره های می در خور نانو دره های در خور می در خور نانو دره های در خور نانو در می خور نانو دره های در خور نانو در می می در خور نانو در موا در خور نانو در می خور نانو در می خور نانو در می در خور نانو در می خور خور نانو در می در خور نانو در می خور نانو در می در خور نانو در می در خور خور خور نانو در می در خور در خور نانو در می در خور در در خور در نانو در می در در خور در در خور در در خور در خور در خور در خور در خور در خور در در خور در

+E- mail: h\_rashidi@kut.ac.ir

افزایش دمای کره زمین در اثر انتشار گازهای گلخانهای و غلظت رو به افزایش آنها از مهمترین مسائل زیست محیطی به شمار میرود که سبب بروز تغییراتی در شرایط آب و هوایی جهانی شده است. در این میان گاز کربن دیاکسید بیشترین تاثیر را به خود اختصاص میدهد. در سالهای اخیر، فناوری نانو به یک روش قابل توجه برای افزایش انتقال جرم و گرما تبدیل شده است [۱–۳]. نانوذرههای اکسید فلزی بهدلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر بهفرد

\* عهدهدار مکاتبات

علمی \_ پژوهشی

نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران

حامد رشیدی و سجاد ممیوند

دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲

تیتانیم دیاکسید افزایش چشمگیری دارد [۶]. پریاسامی و همکار عملكرد انتقال جرم نانوسيال ألومينا با كسر حجمي ۱-۲/۰درصد از نانوذره آلومینا را برای جذب کربن دی کسید در یک برج دیواره مرطوب٬ را بررسی کردند. گزارش آنها نشان میدهد که کسر حجمی ۰/۶ بیشترین تاثیر درافزایش شار انتقال جرم دارند [۲]. دواکی و توماس گزارش دادند که افزودن ۰/۰۱ درصد حجمی از نانوذره آلومينا به سيال پايهٔ آب منجر به افزايش ۲۲/۳ درصدي ظرفیت جذب کربن دی اکسید در آب می شود [۸]. پیندا و همکاران با استفاده از نانوذرههای اکسید آلومینا، یک تحقیق آزمایشگاهی برای حذف کربن دیاکسید در یک ستون سینی دار انجام دادند. در این پژوهش با استفاده از نانوسیال متانول/اَلومینا افزایش ۱۰ درصد در میزان جذب کربن دی کسید مشاهده شد [۹]. لو و همکاران نشان دادند که افزایش غلظت نانوذرههای آلومینا به سیال پایهٔ آب تاثیر معناداری در افزایش نرخ جذب کربن دی کسید و افزایش ضریب انتقال جرم دارد [۱۰]. لی و همکاران نرخ جذب کربن دی اکسید را در محلول آبی سدیم کلراید که حاوی نانوذرههای آلومینا بود بررسی کردند. آزمایشات آنها در غلظتهای ۰/۱–۰/۰۰ و در دمای ۲۰°C صورت گرفت و در غلظت ۰/۰۱ درصد حجمی به افزایش ۱۱ درصدی از نرخ جذب رسیدند [۱۱]. سرانجام، صمدی و همکاران تاثیر غلظت نانوذرههای آلومینا و شدت جریان مایع را در میزان جذب کربن دی کسید در آب را در یک برج دیواره مرطوب بررسی کردند. نتیجهها نشان میدهد افزودن ۱ درصد حجمی از نانوذرههای آلومینا به آب منجر به افزایش ۵۸ درصدی ظرفیت جذب کربن دی کسید در آب می شود [۱۲].

مروری بر مطالعات انجام شده نشان میدهد که افزودن نانوذرههای سیال پایهٔ می تواند تاثیر چشم گیری در بهبود افزایش نرخ جذب داشته باشد. اگرچه، رفتار نانوذرهها در سیال ممکن است تحت تاثیر پارامترهای عملیاتی دیگر قرار بگیرد.

بررسي مطالعات قبلي نشان ميدهد كه اصلي ترين روش أزمايشگاهي برای ارزیابی تأثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد نانوسیال بر پایه آلومینا در برج دیواره مرطوب، روش کلاسیک است که میزان تأثیر هر یک از متغیرهای عملیاتی را به صورت جداگانه اندازه گیری می کند. یعنی در آزمایشهای گوناگون تنها یک پارامتر تغییر داده میشود درحالی که پارامترهای دیگر ثابت است. بدین ترتیب بررسی هر گونه تعامل احتمالي بين متغيرها امكان پذير نخواهد بود [١٣]. از طرف ديگر تاثیر دما بر عملکرد نانوسیال بر پایه آلومینا در برج دیواره مرطوب

تا به حال بررسی نشده است.

هدف از این مطالعه بررسی جامع فرایند جذب کربن دی کسید توسط نانوسیال آب – آلومینا در برج دیواره مرطوب با استفاده از روش سطح - پاسخ و مطالعه دقيق ضريب انتقال جرم فاز مايع مي باشد. در این تحقیق، علاوه بر اثر غلظت نانوذرهها، اثر پارامترهای عملیاتی از جمله شدت جریان نانوسیال و دما نیز در نظر گرفته شده است. سپس یک مدل جهت تخمین ضریب انتقال جرم با استفاده از تحلیل واریانس و روش سطح – پاسخ مرکزی جهت تحلیل بهتر نتیجهها و برهمکنشهای بین پارامترها ارائه شده است.

#### مواد و آزمایشها شرح دستگاه

در این مطالعه جذب گاز کربن دی کسید خالص در جاذب نانوسیال به وسیلهی برج دیواره مرطوب بررسی شده است. شکل ۱ نمایی از برج دیواره مرطوب ساخته شده را نمایش میدهد. قطر بیرونی برج ۰/۹۵ سانتیمتر، ارتفاع سطح تماس گاز-مایع ۱۱/۵ سانتیمتر و سطح تماس مشترک گاز – مایع برای تشکیل فیلم مایع برابر با سطح جانبی استوانه و براساس قطر و طول استوانه برابر ۳۲/۳ سانتی مترمربع می باشد. مشخصات و نحوه عملکرد دستگاه در پژوهش قبلی انجام شده، شرح داده شده است [۶]. مطابق شکل ۱، ابتدا یک کیسه ازمایشگاهی گاز<sup>۲</sup> با فشار اتمسفریک از گاز کربن دی کسید پر می شود. سپس، خروجی کیسه با عبور از کالیبراتور حباب صابون به برج وصل می شود تا برج عاری از هوا شود. در مرحله بعد، با جریان یافتن سیال بر روى سطح برج و تشكيل فيلم و با ايجاد جريان يكنواختي از سیال و توزیع گاز کربن دی اکسید انتقال جرم صورت می گیرد. مایع خروجی از برج وارد مخزن شده و دوباره در سیستم گردش پیدا می کند. برای اندازه گیری جریان گاز جذب شده از یک کالیبراتور حباب صابون استفاده شده است. کالیبراتور حباب صابون از یک ستون شیشهای مدرج و یک حبابساز تشکیل شده است. حبابساز وظيفه توليد حباب در داخل ستون را دارد. با عبور جريان گاز با فشار اتمسفریک از درون ستون شیشهای کالیبراتور، حباب صابون شروع به حرکت در داخل ستون می کند. با اندازه گیری زمان و مقدار حرکت حباب، سرعت حرکت حباب در داخل ستون مشخص و نرخ حجمی جذب گاز بدست میآید. قابل ذکر است که محفظه شماره ۱ فاقد خروجی گاز است و گاز در آن محبوس است. در این تحقیق، هدف اصلى بررسى ضريب انتقال جرم فاز مايع يا همان نانوسيال مىباشد.

علمی \_ پژوهشی

<sup>(</sup>Y) Gas Sampling Bag

<sup>(1)</sup> Wetted wall column

بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان جذب کربن دیاکسید ... دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲



شکل۲- تصویر SEM از نانوذرههای آلومینا.



به مدت ۱ ساعت در دمای ۲۵°۲ در داخل ۲۰۰ میلیلیتر سیال پایهٔ آب دو بار تقطیر با دستگاه اولتراسونیک شرکت ROHS (مدل DSA1000SK2) با فرکانس ۴۰ KHz، معلق شدند. شکل ۲ تصویر SEM از نانوذرههای آلومینیوم اکسید را نشان میدهد. آلومینا اکسید یکی از مهمترین مواد سرامیکی با ویژگیهای از قبیل سختی بالا، پایداری بالا، مقاومت به سایش بالا، میزان آبدوستی بالا و شفاف بودن پایداری بالا، مقاومت به طور گستردهای در ضد حریق، کاتالیست، است. آلومینا همچنین به طور گستردهای در ضد حریق، کاتالیست، عایق، پوشش محافظ سطح و مواد کامپوزیتی استفاده می شود [۱۴]. همانطور که از شکل ۲ مشخص است اندازه میانگین ذرهها تقریبا

۲۰ نانومتر است. برای بررسی نحوه توزیع نانو ذرهها در سیال و پایداری محلول از دستگاه زتاسایزر (Malvern Instruments, Nano series, توزیع اندازه خوشه استفاده شده است. شکل ۳ توزیع اندازه خوشه نانوذرهها در نانوسیال آب – آلومینا با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر را نشان میدهد میانگین اندازه خوشههای توزیع شده در نانوسیال ۱۵۴۰ نانومتر میباشد. به طور کلی، در محلولهای کلوئیدی، برخورد ناپایدار بین ذرهها باعث ایجاد خوشه می شود. بنابراین، اندازه نانوذرهها در حالت جامد در مقایسه با نانوسیال آلومینا افزایش مییابد. مقدار IOP آن ۱۵۴۷ میباشد که نشان دهنده توزیع نسبتا مناسب اندازه ذرهها است [۱۵].

آزمایشات در محدوده دمایی C° ۴۵–۲۵ با غلظتهای گوناگونی از ذرههای نانو از ۱–۰ گرم بر لیتر محلول با جریان سیال از ۳۰۰–۱۰۰



شکل ۱- طرحواره کلی از برج دیواره مرطوب: ۱: WWC، ۲: کویل، ۳: هیتر، ۴: پمپ.

برای همین منظور در فاز گاز از کربن دی اکسید خالص استفاده شده است تا مقاومت انتقال جرم در فاز گاز حذف شود. تنها راه خروج گاز کربن دی اکسید از محفظه شماره ۱، جذب توسط نانوسیال است. بنابراین با اندازه گیری حجم گاز جذب شده و تبدیل آن به مول با استفاده از قانون گاز ایده آل می توان تعداد مولهای جذب شده در واحد زمان را بدست آورد. در نهایت، با تقسیم تعداد مولهای جذب شده در واحد زمان بر سطح انتقال جرم (سطح جانبی استوانه) شار انتقال جرم بصورت آزمایشگاهی از رابطه ۱ بدست می آید:

$$N_A = \frac{PQ_g}{RTA} \tag{1}$$

که P فشار محیط،  $Q_{g}$  نرخ حجمی جریان گاز، R ثابت جهانی گازها، T دما و A سطح جانبی استوانه است.

#### آماده سازي نانوسيال

یکی از عوامل مهم در بهینه شدن خواص نانوسیالات مسئله پایداری آنها است. تهیه سوسپانسیون یکنواخت و پایدار تاثیر بهسزایی در بهبود خواص حرارتی و سطح تماس نانوسیالها دارد. یکی از مواردی که بر پایداری نانوسیال تاثیر میگذارد پدیده تشکیل خوشه یا تجمع است. عوامل گوناگونی بر این پدیده تاثیرگذارند؛ اندازه ذرهها، نوع ذرهها، ویژگیهای سیال پایه، و روش تهیه نانوسیال از جمله این عوامل هستند. برای ایجاد محلول پایدار روشهای گوناگونی وجود دارد. استفاده از هر کدام از این روشها باید با دقت خاصی انجام شود تا بهترین نتیجهها به دست آید [۱۸]. در این مطالعه برای کاهش تجمع ذرهها در سیال پایهٔ، نانوذرهها

علمی \_ پژوهشی

نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران

حامد رشیدی و سجاد ممیوند

دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲

١

٠

میلی لیتر بر دقیقه انجام گرفت. کربن دی کسید استفاده شده ۹۹/۹۹ درصد از شهرک صنعتی فرامان تامین گردید.

#### بررسیهای تئوری برج دیواره مرطوب

قبل از اندازه گیری نرخ انتقال جرم کربن دی اکسید در نانوسیال، لازم است برج دیواره مرطوب با آب خالص اعتبار سنجی شود و ضریب انتقال جرم تجربی مایع را با ضریب انتقال جرم بدست آمده از رابطه تئوری هیگبی [۱۶] مقایسه کرد. ضریب نفوذ کربن دی اکسید در آب خالص و حلالیت کربن دی اکسید در آب خالص از طریق روابط ورستیگ، طبق معادلات ۲ و ۳ بدست آمده است [۱۷].

$$D_{CO_2}^{H_2O}(m/s^2) = 2.35 \times 10^{-6} \exp(-\frac{2119}{T_{H_2O}(K)})$$
 (Y)

 $C_{CO_2-H_2O}$  (mole/m<sup>3</sup>.pa)

$$= 3.54 \times 10^{-7} \times \exp(\frac{2044}{T_{\rm CO_2}(\rm K)})$$
 (°)

بررسی نرخ جذب کربن دی کسید در آب نیازمند یکسری خواص فیزیکی از سیال شامل دانسیته، ویسکوزیته، انحلال پذیری، ضریب نفوذ در دماهای گوناگون و در فشار محیط می باشد.

#### ضريب محلي انتقال جرم

بر اساس تئوری هیگبی ضریب انتقال جرم فاز مایع برابر است با :

$$k_{L}^{\text{Theoretica}} = 2\sqrt{\frac{D_{CO_2 - H_2O}}{\pi \times \tau}} \tag{(f)}$$

که زمان تماس، ۲، از رابطه برد [۱۸] بدست می آید.

$$\tau = 3h \left(\frac{\rho_l g}{\mu_l}\right)^{-1/3} \left(\frac{3Q_l}{W}\right)^{-2/3}$$
( $\Delta$ )

که w و h به ترتیب طول و محیطی از برج دیواره مرطوب، ρ و μ به ترتیب چگالی و ویسکوزیته نانوسیال هستند. با توجه به کم بودن غلظت نانوذرهها در سیال پایهٔ آب، میتوان پارامترهای فیزیکی نانوسیال را پارامترهای سیال پایهٔ آب را در نظر گرفت.

شار انتقال جرم در واقع همان میزان کربن دی کسید جذب شده در واحد سطح برج جذب می می توان شار انتقال جرم در نیرو محرکه شار انتقال را برابر حاصل ضریب انتقال جرم در نیرو محرکه (اختلاف غلظت) تعریف کرد. شار انتقال جرم (NA) و ضریب انتقال جرم محلی (kL) و مراه می گردد.

جدول ۱- مقادیر واقعی و کدگذاری شده متغیرهای مستقل طراحی أزمایش. سطح بالا سطح پايين واحد کد متغيرهاي مستقل دما ۲۵ ۴۵ °C A:T ۱۰۰ ۳.. ml/min B:QL شدت جريان مايع

C:C

$$N_A = k_L^{\text{experimental}}(C_{A_i} - C_{A_i}) \tag{(7)}$$

g/1

 $C_{A,L}$  علظت کربن دی کسید در فصل مشترک و  $C_{A,L}$  علظت در حلال است. همانطور که اشاره شد، سیال پایهٔ آب دیونیزه است؛ بنابراین مقدار کربن دی اکسید  $_2$  در نانوسیال آب/آلومینا در لحظههای ابتدایی انجام آزمایش صفر می باشد. با اندازه گیری مقدار حجمی گاز جذب شده ( $Q_2$ ) از طریق کالیبراتور حباب صابون و با استفاده از معادله (۱) می توان شار انتقال جرم را در هر آزمایش بدست آورد. سپس، با استفاده از معادله (۶) می توان ضریب انتقال جرم را در لحظههای ابتدایی محاسبه نمود.

#### طراحی آزمایش

غلظت نانوذرهها

در تحقیق حاضر، از روش سطح – پاسخ بر اساس طراحی مرکب مرکزی برای مدل سازی سیستم استفاده شد. همچنین اثر ۳ متغیر مستقل، هر کدام در ۳ سطح مورد بررسی قرار گرفت. جهت تحلیل و تجزیه نتیجهها از روش سطح – پاسخ استفاده شد. بر اساس طرح مرکب مرکزی k به عنوان تنها پاسخ آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. اطلاعاتی که به عنوان پاسخ اولیه از آزمایشها جمع آوری گردید، دمای محیط، دمای سیال، دبی حلال، تغییرات حجمی گاز هستند. سه متغیر مستقل طراحی، یعنی دما، شدت جریان حلال و غلظت نانوذرهها، با مقادیر واقعی و کدگذاری شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

#### **نتیجهها و بحث** اعتبار سنجی

در شکل ۴ مقایسه بین دادههای تجربی ضریب انتقال جرم فاز مایع بدست آمده از رابطه (۶) با مقادیر پیش بینی شده توسط تئوری نفوذ هیگبی از رابطه (۳) برای آب خالص نشان داده شده است. این شکل نشان میدهد که تطابق خوبی بین نتیجههای آزمایشات جذب کربن ی اکسید در برج دیواره مرطوب با تئوری نفوذ وجود دارد. به این ترتیب، اعتبار نتیجههای بدست آمده در برج جذب دیواره مرطوب آزمایشگاهی مورد استفاده برای جذب کربن دی اکسید تایید شده و می توان برای محاسبات ضریب انتقال جرم از آن استفاده کرد.

علمی \_ پژوهشی

### Archive of SID.ir

۱۸+

بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان جذب کربن دی اکسید ... دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲



شکل ۵- نرخ جذب کربن دی اکسید در آب و نانوسیال در دمای ℃ ۳۵ و شدت جریان ۲۰۰۰ ml/min

دول ۲- نتیجههای حاصل از جذب کربن دی اکسید در نانوسیال	جد
أب/ألومينا در كليه أزمايشات	

پاسخ	شرايط عملياتي				
ضريب انتقال جرم فاز مايع	غلظت نانوذرهها	شدت جريان سيال	دما		
(m/s)	(g/l)	(ml/min)	(°C)		
۰/۰۰۰۴۰۳۶	*	۲۰۰	۳۵		
•/••••4808	۰/۲۵	10+	۳۵		
۰/۰۰۰۰۹۸۲۱	۰/۲۵	۲۵۰	۳۰		
•/••••\$974	۰/۲۵	۱۵۰	۳۰		
•/••••٩٢•٣	۰/۲۵	۲۵۰	۴۰		
٠/٠٠٠١١٠٨٩	۰/۵	7	۴۰		
•/••••۶۴٧	۰/۵	١٠٠	۲۵		
•/••••٧۴۶	۰/۵	7	۳۵		
۰/۰۰۰۱۴	۰/۵	۳۰۰	۳۵		
۰/۰۰۰ ۲۰۰۸	۰/۵	7	۳۵		
•/••••	۰/۷۵	۱۵۰	۴۵		
٠/٠٠٠١١٩	۰/۷۵	۲۵۰	۳۰		
٠/٠٠٠١٠٨٩	۰/۷۵	۱۵۰	۳۰		
•/••• ١٢٩٣	۰/۷۵	۲۵۰	۴۰		
./)۵	١	۲۰۰	۴۰		



#### نرخ جذب کربن دیاکسید در نانوسیال

شکل ۵-الف یک نمونه از نتیجههای بدست آمده آزمایش جذب کربن دی اکسید در دمای ۲۵°۳۵ و شدت جریان حلال ۲۰۰ ml/min در سه غلظت متفاوت نانوسیال را نشان میدهد. نرخ جذب بدست آمده در این شکل حاصل ضرب سطح در شار انتقال جرم از رابطه (۵) می باشد. منحنی جذب در شکل ۵-الف نشان می دهد که جذب کربن دی کسید با گذشت زمان در یک سیستم بسته کاهش پیدا می کند. این امر به دلیل افزایش غلظت کربن دی اکسید در حلال و اشباع شدن مایع با گذشت زمان می باشد. برای محاسبه ضریب انتقال جرم از اطلاعات بدست آمده در لحظههای ابتدایی آزمایش و رابطه (۶) استفاده می شود. نرخ جذب در نانوسیال آب –آلومینا در ۴ دقیقهی اول بطور متوسط برای غلظت ۱ و ۰/۵ گرم بر لیتر به ترتیب ۰/۰۳۹ و ۰/۰۳۱ گرم بر دقیقه است. در صورتی که برای آب خالص ۰/۰۲۶ گرم بر دقیقه است. این بدان معناست که ضریب انتقال جرم کربن دیاکسید در نانوسیال به ترتیب ۴۷ و ۱۹ درصد افزایش پیدا می کند. همچنین شکل ۵–ب مقدار کربن دیاکسید جذب شده در سیال پایهٔ آب را در طول ۹۰ دقیقه آزمایش را نشان میدهد. همانطور که در شکل ۵–ب مشاهده می شود با اضافه کردن ۵/۰ و ۱ گرم بر لیتر از نانوذرههای آلومینا به آب؛ میزان جذب کربن دی اکسید به ترتیب از ۲۵/۵۵ به ۵۲/۸۲ و ۸۲/۴۲ افزایش پيدا مي کند.

نتیجههای بدست آمده ضریب انتقال جرم برای کلیه آزمایشها در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر ضریب انتقال جرم بدست آمده در این جدول در محدوده مقادیر گزارش شده در فرایند جذب کربن دی اکسید با نانوسیال آب – تیتانیم دی اکسید می باشد [۶].

علمی \_ پژوهشی

نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران

دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲

#### تحليل واريانس

به منظور مدل سازی نتیجهها از معادله درجهی دوم استفاده شده است. مقادیر آنالیز واریانس برای مدل درجه دوم به دست آمده جهت تخمین ضريب انتقال جرم در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به اين جدول، مقدارF، ۴۱۳/۶۱ می باشد. که از لحاظ آماری معنی دار می باشد. همچنین مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای p-value نشان دهنده معیار مناسب مدل است. در مورد اثر گذاری پارامترها و نوع اثر گذاری پارامترها بر روی فرایند نتیجهها نشان میدهد غلظت نانوذرهها و شدت جریان مایع به ترتیب بیشترین تاثیر را بر ضریب انتقال جرم دارند. R<sup>2</sup> کیفیت برازش دادههای آزمایشی را با مدل مشخص میکند. مقدار این پارامتر آماری برای تخمین ضریب انتقال جرم ۰/۹۷۷۲ است. با این حال، مشکل این پارامتر آماری این است که برای تعیین مدل، تعداد درجه آزادی را در نظر نمی گیرد. برای رفع این نقص، ضریب اصلاح شده (R<sup>2</sup>-Adjusted)، برای تعدیل تعداد گوناگون درجه آزادی در مدلها مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر نشان میدهد که  $R^2$  و  $R^2$ -adjusted برای مدل تفاوت چندانی ندارد و مدل پارامترهای بی اثر را پوشش نداده است. مقادیر پیش بینی شده R<sup>2</sup> برای ضریب انتقال جرم ۰/۹۷۷۲ است که در مقایسه با R<sup>2</sup> تنظیم شده ۰/۹۷۵۴ مطابقت قابل قبولی را دارا هستند.

با استفاده از روش آماری سطح-پاسخ، معادله برازش شدهٔ بین ضریب انتقال جرم فاز مایع با مدل بدست میآید که یک رابطه تجربی بین ضریب انتقال جرم و متغیرهای مستقل را نشان میدهد. همان طور که از معادله (۲) مشخص است فاکتورهای کد گذاری شده به عنوان متغیر مستقل، و پاسخ طراحی به عنوان متغیر وابسته گزارش شده است.

$$k_{L} = 5.25 \times 10^{-4} - 2.87 \times 10^{-5}T$$
  
- 2.3 × 10<sup>-7</sup>Q<sub>L</sub>  
+ 3.75 × 10<sup>-5</sup>C  
- 8.11 × 10<sup>-9</sup>TQ<sub>L</sub>  
+ 3.65 × 10<sup>-6</sup>TC  
- 4.71 × 10<sup>-7</sup>CQ<sub>L</sub>  
+ 4.15 × 10<sup>-7</sup>C<sup>2</sup>  
+ 2.78 × 10<sup>-9</sup>Q<sub>L</sub><sup>2</sup>  
+ 4.43 × 10<sup>-6</sup>C<sup>2</sup>

توزیعهای آماری باقیماندهها در مقابل متغیرهای مستقل نقش مهمی را در تایید توزیع خطای نرمال و ارزیابی مدل نهایی ایفا می کند. در این راستا، توزیع آماری دادهها و باقی ماندهها در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نقاط باقیمانده نشان میدهد که توزیع خطا طبیعی بوده و هیچ تغییری در پاسخ نیاز نیست.

نانوسيال	<b>ی جرم فاز مایع</b>	ضريب انتقال	دل تخمين	اریانس م	- تحليل و	جدول ۳
			مانگرز		60070	

	مقدارP	مقدارF	میانگین مربعات (۱۰۹)	درجه آزادی	مجموع مربعات (۱۰۹)	منبع
معنىدار	< •/••• <b>\</b>	414/21	۱۵/۴	٩	۱۵/۴	مدل
	•/•••٣	77/22	٠/١١٨	١	•/\\\	А
	< •/••• <b>\</b>	1744/•4	۵/۵۶	١	۵/۵۶	В
	< •/••• \	ነፖለፖ/ዮዮ	۵/۷۳	١	۵/۷۳	С
	•/• ١٨٢	٧/٩۴	•/•٣٣	١	•/•٣٣	AB
	< •/••• <b>\</b>	4./77	•/184	١	•/184	AC
	< •/••• <b>\</b>	۶۲/۰۶	•/778	١	•/778	BC
	< •/••• <b>`</b>	800/78	۲/۷۱	١	۲/۷۱	A <sup>2</sup>
	< •/•••\	۲۹۸/۳۷	1/74	١	1/74	$B^2$
	۰/۵۱	•/۴٧	•/•• ١	١	•/•• ١	$C^2$
بىمعنى	۰/۰۵	۵/۰۵	•/••¥	۵	•/•٣۴	عدم برازش



در شکل ۷ نمودار مقدار ماندهها در برابر مقادیر پیشبینی شده مدل آورده شده است. نمودار باید دارای پراکندگی تصادفی باشد که نشاندهنده طیف ثابت ماندهها در سراسر نمودار است.

#### اثر متغيرهاي مستقل بر روى ضريب انتقال جرم فاز مايع

شکل ۸ اثر دما و غلظت ذرههای نانو را بر ضریب انتقال جرم نشان میدهد. مطابق با این شکل، افزایش غلظت نانو ذرهها باعث

Archive of SID.ir

نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران

بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان جذب کربن دیاکسید...

دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲



شکل ۷- نمودار باقی ماندهها نسبت به پاسخهای پیش بینی شده ضریب انتقال جرم کربن دی اکسید در نانوسیال آلومینا - آب



شکل ۸- اثر دما و غلظت نانو ذرهها بر ضریب انتقال جرم فاز مایع در شدت جریان ۲۰۰ ml/min

افزایش ضریب انتقال جرم می شود. به طوری که به عنوان مثال برای دمای ۲۰۰۵ با افزایش غلظت نانو ذره ها از ۲۰/۲۵ تا ۲۰/۷۵ گرم بر لیتر، ضریب انتقال جرم ۰/۴۲ افزایش یافته است. مکانیسم اثر گرزینگ<sup>۱</sup>

(Y) Brownian motion

علمی \_ پژوهشی

یا شاتل در طول فرایند انتقال جرم گاز در نانو سیال موثر میباشد [۱۹]. در مکانیسم اثر شاتل، نانوذرههای پراکنده در سیال در فصل مشترک گاز – مایع مولکولهای گاز را جذب کرده و در محیط مایع آن را دفع می کند. در واقع جذب سطحی و واجذب مولکولهای گاز در سطح نانو ذرهها باعث افزایش انتقال جرم میباشد. بیشتر مشاهدات تجربی از سیستمهای نانوسیال نشان میدهد که ضریب انتقال جرم با افزایش درصد ذرهها به نسبت چشمگیری افزایش مییابد [۲۰].

مطابق شکل ۹ مشاهده می شود با افزایش جریان سیال، ضریب انتقال جرم افزایش می یابد. هرچه جریان سیال افزایش پیدا کند حلال، سرعت بیشتری جریان پیدا می کند که منجر به افزایش ضریب انتقال جرم، میزان جذب و شار انتقال جرم می شود.

در دماهای پایین شیب افزایش انتقال جرم با افزایش شدت جریان بیشتر است. بطور کلی دما یک پارامتر مهم در جذب کربن دی اکسید می باشد. در جذب فیزیکی، افزایش دما موجب کاهش جذب می شود. افزایش دما، افزایش ضریب هنری را در پی دارد که این افزایش موجب کاهش انحلال پذیری کربن دی اکسید در حلال می گردد و مانع از انتقال کربن دی اکسید از فاز گاز به مایع می شود. با توجه به شکل ۸ و ۹ به نظر می سد که در محدوده دمایی مورد مطالعه اثر دما نسبت به سایر متغیرهای مورد مطالعه ضعیف تر است. البته مقادیر F گزارش شده در جدول ۳ نیز مؤید این مطلب می باشد. اثر تغییرات غلظت نانو ذرهها در جریان حلال در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است سرعت انتقال جرم با افزایش غلظت ذرههای نانو و شدت جریان سیال بهطور مداوم افزایش مییابد. در غلظتهای پایین نانوذرهها، با افزایش جریان نانوسیال، ضریب انتقال جرم با شیب بیشتری افزایش پیدا میکند. نتیجهها نشان میدهد که با افزایش جریان حلال از ۱۵۰ ml/min به ۲۵۰، در غلظتهای پایین نانوسیال، مقدار ضریب انتقال جرم از ۰۰۰۰۳۸۱ به ۰/۰۰۰۰۸۶۸ متر بر ثانیه میرسد. در واقع حرکت براونی<sup>۲</sup> مولکول های مایع و برخورد با نانوذرهها، باعث شده که نانوذرهها حرکت زیگزاگی پیدا کرده و با سرعت حرکت کنند که منجر به ایجاد اغتشاش لایههای اطراف ذرههای نانو می شود و یک حرکت همزنی در مقیاس کوچک ایجاد می شود و ریز همرفتها به بهبود نفوذ كمك مي كنند [٢١]. همان طور كه قبلا ذكر شد، اثر شاتل و حركت براونى نانوذرهها دو مكانيزم برجسته هستند كه باعث افزايش جذب گاز در نانوسیالها می شود [۱۹]. در جریان های پایین، با افزایش غلظت نانوذرهها سرعت افزايشي ضريب انتقال بيشتر خواهد شد.

(1) Grazing Effect

دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲

حامد رشیدی و سجاد ممیوند

مرجع	ضريب انتقال جرم	شرايط عملياتي	راكتور	حلال				
[77]	۲۶٪ افزایش ضریب انتقال جرم با ۰/۰۱ درصد حجمی از نانوذرههای آلومینا	۴۰ و ۲۰۰ میلیلیتر مخزن تحت تست از متانول خالص تحت غلظتهای ۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۵، ۰/۰۰۱، درصد حجمی	برج حبابی	متانول- ألومينا				
[7٣]	۱۱۷٪ افزایش ضریب انتقال جرم با افزودن نانوذرههای آلومینا	۱۰۰۰ میلیلیتر آب خالص تحت غلظتهای ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ ، ۰/۰۱ و ۵ درصد وزنی از نانوذره	برج حبابی	آب - ألومينا				
[17]	۵۸٪ افزایش ضریب انتقال جرم در ۱ درصد حجمی از نانوسیال آلومینا	نرخ جریان مایع و گاز به ترتیب در محدوه ۴۰۰–۱۸۰ و ۱۰۰۰-۵۰۰۰ میلیلیتر بر دقیقه؛ تحت غلظتهای ۱/۰۱، ۱/۰۵، ۱/۰، ۵/۰ و ۱ درصد حجمی از نانوذره	برج ديواره مرطوب	أب–ألومينا				
این مطالعه	۴۷ و ۱۹٪ افزایش ضریب انتقال جرم با افزودن به ترتیب ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر از نانوذره آلومینا	نرخ جریان مایع ۳۰۰–۱۰۰ میلی لیتر بر دقیقه؛ تحت غلظتهای ۰۰ ۲۵/۰۰، ۰۵/۵۰، ۷۵/۰ و ۱ گرم بر لیتر از نانوذره با دمای بین C° ۲۵–۴۵	برج ديواره مرطوب	آب-آلومينا				

مطالعات	ساير	مطالعه با	اين	آمده در	جرم بدست	ب انتقال	ضريب	- مقايسه	ول۴-	جدو
---------	------	-----------	-----	---------	----------	----------	------	----------	------	-----





بهطوری که در جریان ثابت ۱۵۰ ml/min با افزایش غلظت نانو ذره از ۲/۲۵ به ۲/۷۵ گرم بر لیتر مقدار ضریب انتقال جرم ۱/۳ برابر می شود. انتظار می رود که افزایش غلظت نانوذرهها اثر شاتل را افزایش دهد که منجر به افزایش میزان انتقال جرم می شود.

تعدای از تحقیقات نشان میدهد که افزودن نانوذرهها به سیال پایهٔ منجر به افزایش ضریب انتقال جرم می شود. جدول ۴ مقایسه از ضریب انتقال جرم بدست آمده در این مطالعه و سایر کاراهای



شکل ۱۰ - اثر جریان و غلظت ذرههای نانو بر ضریب انتقال جرم

مشابه را نشان میدهد. مطابق جدول ۴ غلظت نانوذرهها تحت شرایط عملیاتی گوناگون میتواند نقش مهمی در افزایش ضریب انتقال جرم داشته باشد.

#### نتيجهگيري

در این مطالعه بررسی جامع و عملیاتی اثر نانوذرههای آلومینا بر میزان جذب کربن دی اکسید نسبت به سیال پایه آب و بدست آوردن

علمی \_ پژوهشی

## Archive of SID.ir

بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان جذب کربن دیاکسید ... دوره ۴۲، شماره ۱، ۱۴۰۲ نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران

۲) تمام عوامل موثر، اثرات متقابل متغیرهای عملیاتی با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه جریان سیال نیز در این آزمایشات بررسی شد. نتیجههای حاصل از 🦳 مشخص گردید که افزایش غلظت نانوذرهها و افزایش شدت جریان مايع بيشترين تاثير را بر ضريب انتقال جرم دارند.

ضریب انتقال جرم در برج دیواره مرطوب انجام گردید. علاوه بر تاثیر غلظت نانوذرههای آلومینا در میزان جذب گاز، اثر دما و شدت تحقيق به صورت زير است:

 نتیجهها نشان میدهد که افزودن نانو ذرههای آلومینا با غلظت ۱ و ۵/۵ گرم بر لیتر به سیال پایه آب در دمای ۲۵°C به ترتیب باعث افزایش ۴۷ درصدی و ۱۹ درصدی نرخ جذب در ۴ دقيقه اول نسبت به سيال پايهٔ آب مي شود. مكانيزم دقيقي براي این افزایش جذب در نانوسیالها وجود ندارد اما می توان این افزایش را با مکانیزم حرکت براونی و اثر شاتل تفسیر کرد.

تاريخ دريافت : ۰۲ / ۱۰ / ۱۳۹۹ ؛ تاريخ پذيرش : ۱۵ / ۰۹ / ۱۴۰۰

منابع

- [1] Zhang Z., Cai J., Chen F., Li H., Zhang W., Qi W., "Progress in Enhancement of CO2 Absorption by Nanofluids: A Mini Review of Mechanisms and Current Status," Renewable Energy, 118: 527-535 (2018).
- [۲] رمضانی پور، حمید؛ قائمی، احد؛ قنادزادہ گیلانی، حسین، مطالعہ تجربی و بھینہسازی جذب سطحی گاز کرین دی اکسید توسط جاذب پلیمری میکرو-متخلخل، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*, **۲۰(۲):** ۹۵ تا ۱۰۴ (۱۴۰۰).
- [۳] بنیادی، محمد؛ درست، مینا؛ شریفی فرد، حکیمه، بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوسیال حاوی نانوذرات کربن فعال در جذب دی اکسیدکرین، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۱۹(۱):** ۱۵۳ تا ۱۶۳ (۱۴۰۱).
- [4] Lee J.W., Torres Pineda I., Lee J.H., Kang Y.T., "Combined CO<sub>2</sub> Absorption/Regeneration Performance Enhancement by Using Nanoabsorbents," Applied Energy, 178: 164-176 (2016).
- [5] Rahmatmand B., Keshavarz P., Ayatollahi S., "Study of Absorption Enhancement of CO<sub>2</sub> by SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNT, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles in Water and Amine Solutions," Journal of Chemical & Engineering Data, 61(4): 1378-1387 (2016).
- [6] Rashidi H., Sohrabi R., "Detailed Performance Model of Carbon Dioxide Absorption Utilizing Titanium Dioxide Nanoparticles in a Wetted Wall Column," Environmental Progress & Sustainable Energy, 38(6): 13211 (2019).
- [7] Manikandan A.P., Akila S., Deepapriya N., "Mass Transfer Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids for CO<sub>2</sub> Absorption in a Wetted Wall Column," International Research Journal of Engineering and Technology, 6: 1329-1331 (2019).
- [8] Devakki B., Thomas S., "Experimental Investigation on Absorption Performance of Nanofluids for CO<sub>2</sub> Capture," International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 28(02): 2050017 (2020).
- [9] Pineda I.T., Choi C.K., Kang Y.T., "CO<sub>2</sub> Gas Absorption by CH<sub>3</sub>OH Based Nanofluids in an Annular Contactor at Low Rotational Speeds," International Journal of Greenhouse Gas Control, 23: 105-112,(2014).

علمی \_ یژوهشی

## Archive of SID.ir

- [10] Lu S., Song J., Li Y., Xing M., He Q., "Improvement of CO<sub>2</sub> Absorption Using Al2O3 Nanofluids in a Stirred Thermostatic Reactor," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(5): 935-941 (2015).
- [11] Lee J.W., Kang Y. T., "CO<sub>2</sub> Absorption Enhancement by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles in NaCl Aqueous Solution," *Energy*, **53**: 206-211 (2013).
- [12] Samadi Z., Haghshenasfard M., Moheb A., "CO<sub>2</sub> Absorption Using Nanofluids in a Wetted Wall Column With External Magnetic Field," *Chemical Engineering & Technology*, **37(3)**: 462-470 (2014).
- [13] Moradi G., Ahmadpour J., Yaripour F., "Systematic Investigation of the Effects of Operating Conditions on the Liquid-Phase Dimethyl Ether (LPDME) Process," *Energy & fuels*, 22(6): 3587-3593 (2008).
- [14] Piriyawong V., Thongpool V., Asanithi P., Limsuwan P., "Preparation and Characterization of Alumina Nanoparticles in Deionized Water Using Laser Ablation Technique," *Journal of Nanomaterials*, 2012 (2012).
- [15] Valeh-e-Sheyda P., Afshari A., "A Detailed Screening on the Mass Transfer Modeling of the CO2 Absorption Utilizing Silica Nanofluid in a Wetted Wall Column," *Process Safety and Environmental Protection*, **127**: 125-132 (2019).
- [16] Higbie R., "The Rate of Absorption of a Pure Gas Into a Still Liquid During Short Periods of Exposure," Trans. AIChE, 31: 365-389 (1935).
- [17] Versteeg G.F., Van Swaaij W.P., "Solubility and Diffusivity of Acid Gases (Carbon Dioxide, Nitrous Oxide) in Aqueous Alkanolamine Solutions," *Journal of Chemical & Engineering Data*, 33(1): 29-34 (1988).
- [18] Bird R.B., "Transport Phenomena," Appl. Mech. Rev., 55(1): R1-R4 (2002).
- [19] Esmaeili Faraj S.H., Nasr Esfahany M., Jafari-Asl M., Etesami N., "Hydrogen Sulfide Bubble Absorption Enhancement in Water-Based Nanofluids," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(43): 16851-16858 (2014).
- [20] Kim W.-g., Kang H. U., Jung K.-m., Kim S. H., "Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO<sub>2</sub> Absorption," *Separation Science and Technology*, 43(11-12): 3036-3055 (2008).
- [21] Xuan Y., Li Q., Hu W., "Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids," AIChE Journal, 49(4): 1038-1043 (2003).
- [22] Kim J. H., Jung C. W., Kang Y. T., "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*, 76: 484-491 (2014).
- [23] Karamian S., Mowla D., Esmaeilzadeh F., "The Effect of Various Nanofluids on Absorption Intensification of CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> in a Single-Bubble Column," *Processes*, 7(7): 393 (2019).

علمی \_ پژوهشی

۱۸۶