ORIGINAL ARTICLE

Removal of Carbon Dioxide from Indoor Air Using Nanofluid Absorption Solution

Ramazan Ali Dianati Tilaki[1],
Saeedeh Shabantabar Shouraki[2],
Esmaeil Babanejad Arimi[3],
Bizhan Shabankhani[4]

[1] Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[2] MSc Student in Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[4] Assistant Professor, Department of Epidemiology and Biostatistics, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received February 15, 2023 ; Accepted June 25, 2023)

Abstract

Background and purpose: Human health is negatively affected by increase in concentration of carbon dioxide in indoor air due to the lack of proper ventilation. The aim of this study was to remove carbon dioxide from a closed space using sodium hydroxide nanofluid and determining the effect of absorbent concentration, carbon dioxide concentration, and titanium dioxide nanoparticles.

Materials and methods: The experiments were conducted in a closed chamber on a laboratory scale. An air suction pump was connected to the absorption reactor and the carbon dioxide measuring device was installed inside the chamber. By injecting carbon dioxide gas inside the chamber, different concentrations in the range of 500, 2000 and 5000 ppm were created. Sodium hydroxide absorbent solution at 0.1, 0.2, and 0.4% were examined. Titanium dioxide nanoparticles (0.008%) and surfactant (0.003%) were used to prepare nanofluids. The absorption fluids' pH, electrical conductivity, and total inorganic carbon (TIC) were measured before and after carbon dioxide absorption.

Results: By using 0.4% sodium hydroxide solution containing 0.008% titanium dioxide nanoparticles, the carbon dioxide removal efficiency at 500 and 5000 ppm were 72% and 44%, respectively, that were higher than the solution without nanoparticles (20% and 10%, respectively). At 5000 ppm carbon dioxide, increasing the concentration of absorption solution from 0.1 to 0.4% doubled the removal efficiency. The average amount of total inorganic carbon (TIC) in nanofluids increased by about 20% compared to the base fluids. The average reduction of EC in nanofluid was about 25% higher than the base fluid. The average reduction in pH value was less than one unit.

Conclusion: Sodium hydroxide nanofluid containing 0.008% of titanium dioxide nanoparticles is effective in removing carbon dioxide from the air.

Keywords: nanofluid, sodium hydroxide, indoor air, carbon dioxide

J Mazandaran Univ Med Sci 2023; 33(224): 117-128 (Persian).

Corresponding Author: Ramazan Ali Dianati Tilaki - Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran. (E-mail: dianati.tilaki@gmail.com)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره سی و سوم شماره 224 شهریور سال 1402 (128-117)

حذف دی اکسید کربن از هوای محیط داخلی با استفاده از محلول جاذب نانوسیال

رمضانعلی دیانتی تیلکی[1]
سعیده شعبان تبار شورکی[2]
اسماعیل بابانژاد آریمی[3]
بیژن شعبانخانی[4]

چکیده

سابقه و هدف: افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در هوای محیط‌های داخلی به دلیل عدم وجود تهویه مناسب موجب ایجاد اثرات سوء بر سلامت انسان می‌شود. هدف از این مطالعه حذف دی‌اکسیدکربن از یک فضای بسته با استفاده از محلول جاذب نانوسیال هیدروکسید سدیم و تعیین تاثیر غلظت جاذب، غلظت دی‌اکسیدکربن و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بود.

مواد و روش‌ها: آزمایشات در یک محفظه بسته در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. پمپ مکش هوا متصل به راکتور جذب و دستگاه سنجش غلظت دی اکسید کربن در داخل محفظه نصب شدند. با تزریق گاز دی اکسید کربن در داخل محفظه غلظت های محدوده 500، 2000 و 5000 پی‌پی‌ام از این گاز ایجاد شد. محلول جاذب هیدروکسید سدیم با غلظت‌های 0/1 ، 0/2 و 0/4 درصد بود. نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با غلظت 0/008 درصد و سورفکتانت کاتیونی با غلظت 0/003 درصد در ساخت نانوسیال مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر pH، هدایت الکتریکی (EC) و کربن غیرآلی (TIC) محلول‌های جاذب قبل و بعد از جذب دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: با استفاده از محلول جاذب هیدروکسید سدیم 0/4 درصد حاوی 0/008 درصد نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم راندمان حذف دی اکسید کربن برای غلظت‌های 500 و 5000 پی پی ام به‌ترتیب 72 و 44 درصد به‌دست آمد که به‌ترتیب 20 و 10 درصد بیش‌تر از محلول جاذب فاقد نانوذرات بود. برای 5000 پی‌پی‌ام دی‌اکسیدکربن، افزایش غلظت محلول جاذب از 0/1 به 0/4 درصد موجب دو برابر شدن راندمان حذف شد. میانگین TIC در نانوسیال نسبت به سیال پایه 20درصد افزایش بیشتری داشت. میانگین کاهش EC در نانوسیال نسبت به سیال پایه 25 درصد بیش‌تر بود. میانگین کاهش pH ناشی از جذب دی‌اکسیدکربن کم‌تر از یک واحد بود.

استنتاج: نانوسیال هیدروکسید سدیم حاوی 0/008 درصد نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم برای حذف دی‌اکسیدکربن از هوا کارآئی مناسبی دارد.

واژه های کلیدی: نانوسیال، هیدروکسید سدیم، هوای داخلی، دی اکسید کربن

مقدمه

غلظت دی اکسید کربن در موضوع تهویه و کیفیت هوای محیط داخلی (Indoor) نقش برجسته‌ای دارد. با توجه به این‌که جمعیت مدرن تقریباً 90 درصد از زمان خود را در محیط‌های داخلی سپری می‌کنند و

مولف مسئول: رمضانعلی دیانتی تیلکی - ساری: کیلومتر 17 جاده فرح‌آباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت E-mail: dianati.tilaki@gmail.com
1. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
2. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
3. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
4. استادیار، گروه اپیدمیولوژی و آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
تاریخ دریافت : 1401/11/26 تاریخ ارجاع جهت اصلاحات : 1402/2/27 تاریخ تصویب : 1402/4/4

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

دی‌اکسیدکربن(CO_2) در محیط‌های داخلی می‌تواند به میزان بسیار بیش‌تری نسبت به هوای آزاد انباشته شود، لذا پائین آمدن کیفیت هوا بر سلامت ساکنان تاثیر سوء زیادی دارد(1). عمده‌ترین دلیل آلودگی هوای محیط‌های داخلی وجود منابع انتشار و عدم وجود تهویه می‌باشد. پدیده معروف به‌سندرم ساختمان بیمار(SBS) سال‌هاست که مورد توجه قرار گرفته است. دی‌اکسیدکربن یکی از گازهائی است که غلظت آن در هوای محیط‌های داخلی بیش‌تر از هوای آزاد می‌باشد. در نواحی غیر صنعتی غلظت دی‌اکسیدکربن در هوای داخل ساختمان‌ها می‌تواند تا 5000 قسمت درمیلیون (پی‌پی‌ام) و یا بیش‌تر افزایش یابد. حد مطلوب غلظت دی‌اکسیدکربن در هوای محیط‌های داخلی کم‌تر از 500 پی‌پی‌ام است و بهتر است از 1000 پی‌پی‌ام تجاوز ننماید. هم‌چنین حداکثر غلظت مجاز دی‌اکسیدکربن در هوای محیط‌های صنعتی 5000 پی‌پی‌ام توصیه شده است(2). افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن می‌تواند بر سلامت انسان اثرات سوء ایجاد نماید. یافته‌های یک مطالعه نشان می‌دهد که غلظت دی‌اکسیدکربن با ایجاد علائم سندرم ساختمان بیمار در دانش‌آموزان ارتباط معنی‌داری دارد(4،3). هم‌چنین در ایستگاه‌های فضایی، زیردریایی‌ها، معادن و غیره غلظت دی‌اکسیدکربن افزایش می‌یابد(5). با توجه به این‌که در بازدم تنفسی انسان حدود 4 درصد دی‌اکسیدکربن وجود دارد، در صورت قرار گرفتن انسان در یک فضای بسته غلظت این گاز افزایش می‌یابد(6). مطالعات مختلف نشان می‌دهد که غلظت 1000 تا 5000 پی‌پی‌ام دی‌اکسیدکربن موجب ایجاد مشکلات تنفسی، اختلال در سطح هوشیاری، و ایجاد اثرات سوء متعدد بر سلامت انسان می‌شود(7). روش‌های مختلفی برای حذف دی‌اکسیدکربن در محدوده غلظتی کم‌تر از 5000 پی‌پیام مورد بررسی قرار گرفته اند که از آن جمله می‌توان به جذب دی اکسید کربن با کشت میکرو جلبک(8،9)، استفاده از روش‌های غشائی(10) و استفاده ازجاذب چارچوب آلی فلزی(11) اشاره نمود. یکی از روش‌های جدیدی که امروزه در حال بررسی و گسترش است، استفاده از نانو سیال به منظور جذب بیش‌تر گاز دی‌اکسیدکربن می‌باشد. استفاده از نانوسیالات برای جذب دی‌اکسیدکربن می‌تواند میزان جذب این گاز را بهبود بخشد و منجر به کاهش مصرف انرژی شود. معمولا تهیه نانوسیالات به دو روش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای انجام می‌شود در روش یک مرحله‌ای نانو ذرات در داخل سیال پایه سنتز می‌شود و در روش دو مرحله‌ای نانو ذرات به سیال پایه اضافه و به‌صورت یکنواخت پخش می‌شود(12). به منظور پایدار نمودن نانو سیال معمولا سورفکتانت به آن اضافه شده و جهت پخش یکنواخت نانوذرات در سیال از سونیکاتور استفاده می‌شود(15-13). مطالعات متعددی در زمینه استفاده از نانوذرات در جذب دی‌اکسیدکربن انجام شد(12،16،17). در تحقیقات انجام شده توسط محققان انواع مختلف نانو سیال برای جذب دی‌اکسیدکربن مورد مطالعه قرار گرفت که شامل استفاده از نانو سیال بر پایه متانول(18)، بر پایه محلول‌های آمین(19)، نانوسیال با کاربرد نانوذرات SiO_2،Al_2O_3،Fe_3O_4 در آب و آمین(20)، نانو سیال بر پایه آمین با نانوذرات F_2O_3(21)، متیل دی‌اتانول آمین و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)(22)، متانول(23)، نانوذرات Al2O3 در آب و NaCl (24)، می‌باشند. با توجه به این‌که محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) با دارا بودن خاصیت قلیائی می‌تواند دی‌اکسیدکربن را جذب نماید و مطالعاتی در این زمینه نیز انجام شده است(26،25). براساس بررسی به‌عمل آمده درباره جذب دی‌اکسیدکربن از محیط داخلی با استفاده از نانوسیال، تا کنون مطالعه‌ای یافت نشده است. بنابراین هدف از این مطالعه تعیین میزان جذب دی‌اکسیدکربن از هوای یک فضای بسته با استفاده از نانوسیال متشکل از محلول آبی هیدروکسید سدیم و نانوذره دی‌اکسیدتیتانیوم و تعیین عوامل موثر بر میزان جذب دی‌اکسیدکربن بود.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

مواد و روش‌ها

مشخصات پایلوت به منظور شبیه‌سازی فضای بسته از یک محفظه شیشه‌ای مکعب مستطیلی درپوش دار به طول 50، عرض 40 و ارتفاع 50 سانتی‌متر به حجم 100 لیتر استفاده شد. بطری گاز شوی یا ایمپینجر(Impinger) به حجم 500 میلی‌لیتر دارای حباب‌ساز به‌عنوان راکتور جذب دی‌اکسیدکربن در داخل محفظه قرار گرفت. پمپ مکش هوا مدل skc standard با دبی3 لیتر بر دقیقه در داخل محفظه قرار داده شد و به خروجی ایمپینجر متصل شد. دستگاه سنجش دی‌اکسیدکربن مدل TES 1370 ND IR متصل به کامپیوتر، درداخل محفظه نصب شد.

سنتز نانوسیال

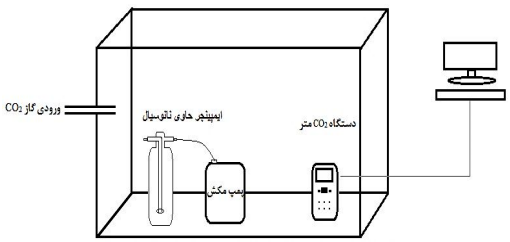
برای تهیه نانوسیال مقدار 0/025 گرم از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تولید داخل کشور به‌صورت جداگانه به داخل 300 میلی‌لیتر از محلول‌های هیدروکسید سدیم 0/1، 0/2 و 0/4 درصد اضافه شد و به‌مدت 30 دقیقه روی هم زن مغناطیسی با سرعت 200 دور بر دقیقه قرار گرفت. غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در نانوسیال برابر با 0/008 درصد بود. به‌منظور افزایش پایداری محلول نانوسیال سورفکتانت کاتیونی ستیل‌تری متیل آمونیوم کلراید (CTAC) شرکت مرک، به میزان 0/003 درصد وزنی به هرکدام از محلول‌ها اضافه شد. سپس برای ایجاد پراکندگی یکنواخت، محلول به مدت یک ساعت در حمام اولتراسونیک SIBATA مدل S3 (240/230 ولت، 60/50 هرتز) قرار داده شد(27).

روش آزمایش

در هر مرحله از آزمایش حجم 300 میلی‌لیتر از نانو سیال به داخل ایمپینجر اضافه شد. درپوش روی محفظه قرار گرفت و تست عدم نشتی گاز از محفظه انجام شد. با استفاده از پمپ پیستونی GASTEC مدل GV-100 حجم‌های معین از گاز دی‌اکسیدکربن خالص به داخل محفظه فوق تزریق و غلظت‌های دی‌کسیدکربن در محدوده‌های500، 2000 و 5000 پی‌پی‌ام در محفظه ایجاد شد. با روشن شدن پمپ مکش، هوای داخل محفظه از درون محلول جاذب عبور نموده و دی‌اکسیدکربن جذب نانو سیال شده و از غلظت دی‌اکسیدکربن در محفظ کاسته می‌شد و دستگاه آنالیزور دی‌اکسیدکربن مقدار غلظت آن را نشان می‌داد. میزان فلوی جریان هوای عبوری از محلول جاذب 3 لیتر بر دقیقه بود. مدت زمان تماس مورد آزمایش 60 دقیقه و هر 10 دقیقه غلظت دی‌اکسید کربن موجود در محفظه ثبت شد. دمای هوا (2 ± 23) و فشار یک اتمسفر بود. مقادیر pH محلول جاذب با استفاده از pH متر HANNA مدل H12211، هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه هدایت سنج الکتریکی AQUALYTIC مدل Senso Direct Con 200 و کربن غیرآلی محلول (IOC) با دستگاه TOC آنالیزور SHIMADZU مدل TOC-L CSH قبل و بعد از فرایند جذب دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری شد(26). آب مقطر تازه به حجم 300 میلی‌لیتر به‌عنوان شاهد مورد استفاده قرار گرفت. کلیه آزمایشات با سه بار تکرار انجام شد و داده‌های ارائه شده میانگین داده‌های به‌دست آمده می‌باشد. تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS به روش آنالیز واریانس با نمونه‌های تکراری انجام شد. در تصویر شماره 1 پایلوت مورد آزمایش نشان داده شده است.

جدول شماره 1: مشخصات دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده (براساس کاتالوگ محصول)

نام نانوذره	CAS	شکل	رنگ	ساختار کریستالی	محدوده اندازه (nm)	چگالی (g/cm^3)	ناخالصی کلی
TiO2	1317-80-2	پودر	سفید	آناتاز	50>	3/78	2>



[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

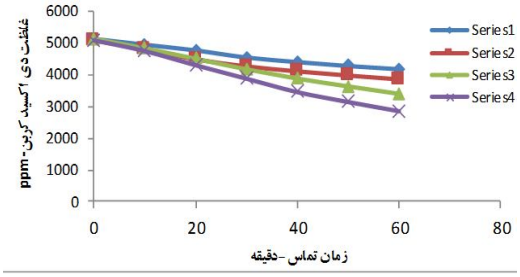


تصویر شماره 1: تصویر پایلوت مورد استفاده

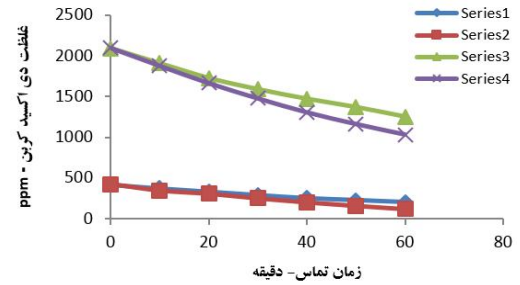
یافته‌ها

در تصویر شماره 2 حذف دی‌اکسیدکربن با غلظت اولیه 5000 پی‌پی‌ام با استفاده از محلول جاذب هیدروکسید سدیم در دو غلظت 0/1 و 0/4 درصد در دو حالت بدون حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (سیال پایه) و با حضور این نانوذرات (نانوسیال) در زمان تماس‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود میزان جذب دی‌اکسیدکربن در نانوسیال بیش‌تر از سیال پایه بود. با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از 0/1 به 0/4 درصد اثر حضور نانوذرات بر بهبود جذب دی‌اکسیدکربن از 5 درصد به 10 درصد افزایش یافت. در سیال پایه و زمان 60 دقیقه با افزایش غلظت محلول جاذب از 0/1 به 0/4 درصد، راندمان حذف دی‌اکسیدکربن از 18 به 34 درصد افزایش یافت. در نانوسیال و شرایط مشابه راندمان حذف دی‌اکسیدکربن از 23 به 44 درصد افزایش نشان داد.

با ملاحظه یافته‌های نشان داده شده در تصاویر شماره 2 و 3 مشخص می‌شود که با افزایش غلظت اولیه CO_2 میزان جذب آن در محلول‌های جاذب افزایش می‌یابد و تحلیل آماری نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین غلظت اولیه CO_2 و میزان جذب آن در محلول جاذب وجود دارد (P=0). محاسبه میزان CO_2 جذب شده در 300 میلی‌لیتر از محلول جاذب در غلظت‌های 500، 2000 و 5000 پی‌پی‌ام به‌ترتیب 0/945 ، 3/31 و 6/26 میلی‌مول بود که نشان داد با افزایش غلظت اولیه CO_2 میزان جذب آن در محلول جاذب زیاد می‌شود اما راندمان جذب CO_2 با افزایش غلظت اولیه آن کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که برای غلظت اولیه 500 پی‌پی‌ام راندمان جذب 55 درصد بود که برای غلظت 5000 پی‌پی‌ام به 30 درصد کاهش یافت.



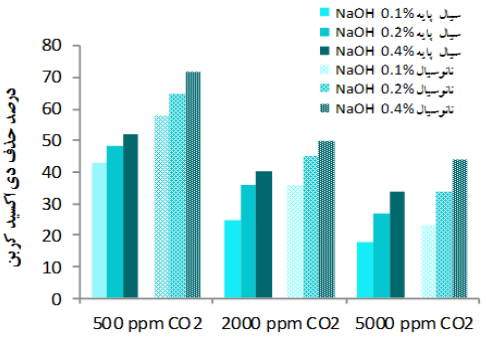
تصویر شماره 2: تغییرات میزان جذب دی اکسید کربن بر حسب زمان در محلول‌های جاذب هیدروکسید سدیم در حضور و غیاب نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم



تصویر شماره 3: تغییرات میزان جذب دی‌اکسیدکربن با غلظت‌های اولیه متفاوت در محلول جاذب هیدروکسید سدیم در حضور و غیاب نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم

در تصویر شماره 4 ملاحظه می‌شود که با افزایش غلظت اولیه دی‌اکسیدکربن راندمان حذف آن کاهش می‌یابد. هم‌چنین یافته‌ها نشان داد که با افزایش چهار برابری غلظت محلول جاذبه، میزان افزایش راندمان حذف حدود 15 تا 30 درصد می‌باشد. به‌عنوان مثال برای غلظت 2000 پی‌پی‌ام دی‌اکسیدکربن با افزایش غلظت محلول جاذب از 0/1 به 0/4 درصد، راندمان حذف از 25 درصد به 40 درصد افزایش یافت. هم‌چنین یافته‌ها نشان داد که راندمان حذف برای غلظت اولیه 500 پی‌پی‌ام در مقایسه با غلظت 5000 پی‌پی‌ام حدود 30 درصد بیش‌تر است.

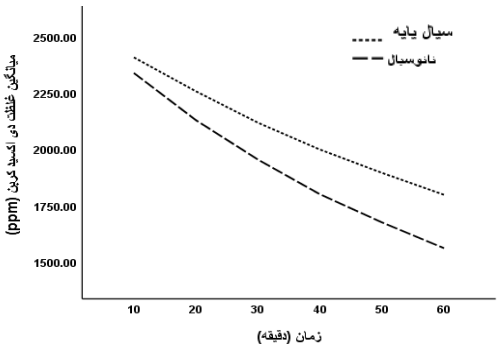
[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]



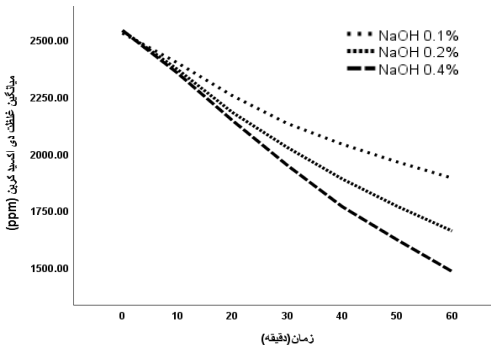
تصویر شماره 4: تغییرات درصد حذف دی‌اکسیدکربن در غلظت‌های مختلف سیال پایه و نانوسیال

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و وارد نمودن میانگین کلیه غلظت‌های ثانویه دی‌اکسیدکربن در دو حالت استفاده از سیال پایه و نانوسیال به‌عنوان محلول جاذب نمودار شماره 5 رسم شد، که در آن تاثیر نانو سیال بر افزایش میزان جذب دی‌اکسیدکربن نشان داده شده است. تحلیل آماری تائیدکننده وجود تفاوت معنی‌دار بین سیال پایه و نانو سیال در جذب دی‌اکسیدکربن می‌باشد(P=0).

نمودار شماره 6 نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS و وارد نمودن میانگین کلیه داده‌های مربوط به غلظت ثانویه دی‌اکسیدکربن در زمان تماس‌های مختلف مربوط به سیال پایه و نانو سیال در غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم رسم شده است. تحلیل آماری نشان داد که بین غلظت هیدروکسید سدیم (0/1، 0/2 و 0/4 درصد) و میزان جذب دی‌اکسیدکربن ارتباط معنی‌داری وجود دارد (P=0).



تصویر شماره 5: ارتباط بین سیال پایه و نانوسیال با میزان جذب دی‌اکسیدکربن



تصویر شماره 6: ارتباط بین غلظت هیدروکسید سدیم با میزان جذب دی‌اکسیدکربن

جدول شماره 2: داده های pH، EC و TIC قبل و بعد از جذب دی اکسید کربن در نانوسیال هیدروکسید سدیم

غلظت CO_2 (ppm)	محلول جاذب	pH قبل جذب	pH بعد جذب	EC قبل جذب ($\frac{ms}{cm}$)	EC بعد جذب ($\frac{ms}{cm}$)	میزان افزایش TIC بعد جذب (mg/l)
500	NaOH 0.1 %	12/22	12/18	3680	3520	32/5
500	NaOH 0.2 %	12/56	12/48	6730	6370	45/37
500	NaOH 0.4 %	12/76	12/67	11830	11450	57
500	NaOH 0.1 % + TiO_2	12/22	12/15	3680	3490	51/1
500	NaOH 0.2 % + TiO_2	12/56	12/40	6730	6300	62/4
500	NaOH 0.4 % + TiO_2	12/76	12/57	11830	11360	80/61
2000	NaOH 0.1 %	12/22	11/96	3680	2600	121/33
2000	NaOH 0.2 %	12/56	12/32	6730	5720	161/5
2000	NaOH 0.4 %	12/76	12/49	11830	10700	230/8
2000	NaOH 0.1 % + TiO_2	12/22	11/68	3680	2160	200
2000	NaOH 0.2 % + TiO_2	12/56	12/08	6730	5050	240/56
2000	NaOH 0.4 % + TiO_2	12/76	11/78	11830	10230	317/8
5000	NaOH 0.1 %	12/22	10/58	3680	2200	398
5000	NaOH 0.2 %	12/56	12	6730	3800	559
5000	NaOH 0.4 %	12/76	12/35	11830	9630	826/1
5000	NaOH 0.1 % + TiO_2	12/22	10/09	3680	1992	469/7
5000	NaOH 0.2 % + TiO_2	12/56	11/15	6730	3480	653
5000	NaOH 0.4 % + TiO_2	12/76	12/05	11830	8600	905/7

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

بحث

اثر بر کربن غیرآلی (TIC)

همان‌گونه که در جدول 2 ملاحظه می‌شود در حضور نانوذره (نانوسیال)، میزان کل کربن غیرآلی (TIC) افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش میزان جذب دی‌اکسیدکربن در نانوسیال می‌باشد. این الگو برای سایر غلظت‌های هیدروکسید سدیم و دی‌اکسیدکربن نیز تکرار شده است به‌گونه‌ای که درهمه حالت‌های آزمایش، میزان کل کربن غیرآلی(TIC) در نانوسیال نسبت به سیال پایه حدود 30 درصد افزایش بیش‌تری داشت که نشان دهنده جذب بیش‌تر دی‌اکسیدکربن در نانوسیال می‌باشد. با افزایش جذب دی‌اکسیدکربن در نانوسیال و واکنش دی‌اکسیدکربن با هیدروکسید سدیم و تشکیل کربنات سدیم (Na_2CO_3) و بیکربنات‌سدیم($NaHCO_3$)، غلظت کربن غیرآلی(TIC) در محلول افزایش یافت که به‌دلیل افزایش غلظت یون‌های کربنات(CO_3^{2-}) و بیکربنات (HCO_3) می‌باشد. هم‌چنین با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم میزان غلظت کربن غیرآلی افزایش یافت که تائیدکننده افزایش جذب دی‌اکسیدکربن می‌باشد.

مطالعه‌ای توسط Dasaard و همکاران (2016) به منظور تعیین اثر تزریق غلظت‌های مختلف دی اکسید کربن بر میزان TIC در آب خالص RO و آب +RO (به اضافه 0/01 درصد NaOH) انجام شد. با تزریق دی‌اکسیدکربن، میزان TIC در آب +RO افزایش یافت‌که با نتایج به‌دست آمده در مطالعه حاضر مطابقت دارد(28).

اثر بر هدایت الکتریکی (EC) و pH

در جدول شماره 2 مشاهده می‌شود که با جذب دی‌اکسیدکربن در محلول جاذب هیدروکسید سدیم از میزان هدایت الکتریکی کاسته می‌شود. با جذب دی‌اکسیدکربن در محلول جاذب از غلظت هیدروکسید سدیم کاسته می‌شود و به‌همین دلیل میزان هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. در نانوسیال به‌دلیل افزایش میزان جذب دی‌اکسیدکربن به همان نسبت کاهش بیش‌تری در میزان هدایت الکتریکی اتفاق می‌افتد. در جدول شماره 2 هم‌چنین با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن کاهش بیش‌تری در میزان هدایت الکتریکی مشاهده می‌شود. در خصوص کاهشpH محلول جاذب قبل و بعد از جذب دی اکسیدکربن نیز دلیل مشابهی وجود دارد. با جذب دی‌اکسیدکربن در محلول و مصرف شدن هیدروکسید سدیم از غلظت آن کاسته شده و به همان نسبت کاهش pH رخ می‌دهد. به‌طور کلی هدایت الکتریکی محلول هیدروکسید سدیم بیش‌تر از محلول‌های بیکربنات سدیم و کربنات سدیم در غلظت‌های مشابه است(29).

مطالعه‌ای توسط Wee و همکاران به منظور تعیین ظرفیت جذب محلول آبی هیدروکسید سدیم در جذب دی‌اکسیدکربن با غلظت 15 درصد حجمی خروجی از دودکش انجام شد. در غلظت 1 درصد هیدروکسید سدیم، pH و EC اولیه به‌ترتیب 12/83 و 60 میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر بود که مقادیر ثانویه این پارامترها (بعد از جذب) در دقیقه 25 به‌ترتیب به 7/33 و 25 میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر کاهش یافت. در غلظت 3 درصد هیدروکسید سدیم، pH و EC اولیه به‌ترتیب 14/39 و 140 میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر بود که مقادیر ثانویه این پارامترها در دقیقه 70 به‌ترتیب به 7/99 و 50 میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر کاهش یافت(30). در مطالعه حاضر غلظت محلول جاذب حداقل 0/1 و حداکثر 0/4 درصد و غلظت دی‌اکسیدکربن حداقل 0/05 و حداکثر 0/5 درصد بود به همین دلیل میزان کاهش pH و EC در مقایسه با مطالعات دیگران کم‌تر بود.

اثر غلظت محلول جاذب و غلظت دی‌اکسیدکربن بر میزان جذب

یافته‌های مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش غلظت محلول جاذب میزان جذب دی‌اکسیدکربن افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ی Salur و Rachakonda جذب دی‌اکسیدکربن در هیدروکسید پتاسیم مورد بررسی قرار

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

گرفت که در آن غلظت دی‌اکسیدکربن بسیار زیادتر از مطالعه حاضر و 15درصد بودکه در زمان 20دقیقه و جاذب 0/84 درصد راندمان جذب 41 درصد گزارش شد(31).

در مطالعه حاضر برای دی‌اکسیدکربن 0/5 درصد و زمان 20 دقیقه در محلول جاذب 0/4 درصد، راندمان جذب 12 درصد به‌دست آمد که با توجه به کم بودن غلظت دی‌اکسیدکربن و هم‌چنین کم بودن غلظت جاذب راندمان جذب کم‌تری به‌دست آمد.

در مطالعه Baena-Moreno و همکاران (2022)، ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن در محلول‌های جاذب هیدروکسید سدیم در محدوده غلظت 1 تا 8 درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب گاز تزریق شده به محلول‌های جاذب(دی‌اکسیدکربن 30 درصد و نیتروژن 70 درصد حجمی) بود. در محلول‌های جاذب 5 درصد و بالاتر، واکنش منجر به ته‌نشینی شد. ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن در محلول‌های 1 تا 8 درصد در محدوده 9/5 تا 78/9 گرم بر لیتر به‌دست آمد. برای جاذب 4 درصد در ابتدا سرعت جذب بالا بود و تمام دی‌اکسیدکربن جذب شده به یون کربنات تبدیل شد. بالاترین میزان جذب در 6 دقیقه اول تا مقدار pH 12/9 رخ داد. پس از تقریباً 11 دقیقه، pH از 12/3 به 10/2 کاهش یافت. با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از 1 تا 8 درصد وزنی، ظرفیت جذب دی‌اکسیدکربن افزایش پیدا کرد(32). همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مطالعه Baena-Moreno و همکاران هم غلظت دی‌اکسیدکربن و هم غلظت محلول‌های جاذب از مطالعه حاضر بیش‌تر بود با این حال میزان کاهش pH به میزان2 واحد بود. درمطالعه حاضر برای دی‌اکسیدکربن 0/5 درصد و جاذب 0/4 درصد میزان کاهش pH به میزان 0/7 واحد بود که نشان می‌دهد با مطالعه فوق مطابقت دارد.

در مطالعه Kordylewski و همکاران کارایی جذب دی‌اکسیدکربن در محلول جاذب هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گرفت که در آن از بطری شستشوی درشل (Dreschel washer bottle) حاوی هیدروکسید سدیم مشابه با مطالعه حاضراستفاده شد. غلظت دی‌اکسیدکربن 15 درصد و غلظت محلول‌های جاذب 5، 10، 20، 30، 40 و 50 درصد بود. در محلول جاذب 50 درصد راندمان جذب 85 درصد به‌دست آمد. با افزایش زمان تماس از 3 به 25 دقیقه میزان دی‌اکسید کربن جذب شده از 0/12 به 0/43 مول بر لیتر افزایش یافت که با یافته‌های مطالعه حاضر مطابقت دارد(33).

اثر غلظت نانوذرات و سورفکتانت

مطالعه‌ای توسط Devakki و Thomas در سال 2020 با عنوان بررسی عملکرد نانوسیال در جذب دی‌اکسیدکربن انجام شد. نانوذرات TiO_2 و Al_2O_3 در غلظت‌های 0/02 تا 0/14 درصد وزنی در آب دیونیزه تهیه شدند. نانو سیال‌های حاوی TiO_2 و Al_2O_3 در 0/1 و 0/14 درصد وزنی بیش‌ترین کارآئی جذب CO_2 را نشان دادند که به‌ترتیب 39/81 درصد و 22/3 درصد افزایش جذب CO_2 نسبت به سیال پایه به‌دست آمد. با افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم میزان جذب دی‌اکسیدکربن کاهش یافت. در مطالعه حاضر تنها یک غلظت (0/008 درصد) از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد آزمایش قرار گرفت که با توجه به غلظت اولیه دی‌اکسیدکربن افزایش جذب در محدوده 10 تا 20 درصد در نانوسیال مشاهده شد که با توجه به شرایط آزمایش از نظر انتخاب غلظت‌های کم در مقایسه با دیگر مطالعات در این زمینه مطابقت دارد(27). یکی از ویژگی‌های مطالعه حاضر استفاده از سورفکتانت کاتیونی ستیل تری متیل آمونیوم کلراید (CTAC) در تهیه نانوسیال می‌باشد که با توجه به بررسی‌های به عمل آمده از این سورفکتانت تاکنون برای تهیه نانوسیال استفاده نشده بود. گرچه در بعضی مطالعات از سورفکتانت برای پایداری استفاده نشده اما در بعضی دیگر نیز از سورفکتانت برای پایداری نانوسیال استفاده شده است(34،12).

در مطالعه‌ای کیونگ کیم و همکارانش در سال 2006 تأثیر نانوسیال‌های دوتایی (binary nanofluid) و

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

سورفکتانت را بر عملکرد جذب آمونیاک در آب مورد بررسی قرار دادند. نانوذرات Cu، CuO و Al_2O_3 برای ساختن نانوسیال‌های دوتایی به محلول آمونیاک/آب اضافه شدند و از سه نوع الکل چرب به‌عنوان سورفکتانت استفاده شد. افزودن سورفکتانت‌ها و نانوذرات عملکرد جذب را تا 5/32 برابر بهبود بخشید. هم‌چنین در تاثیر اضافه کردن سورفکتانت گزارش شده است که در نتیجه کاهش کشش سطحی بعد از اضافه کردن سورفکتانت، اندازه حباب‌ها بزرگتر از زمانی است که سورفکتانت به سیستم اضافه نشده است(35).

مکانیسم اثر نانوذرات بر افزایش جذب دی‌اکسیدکربن

یافته های مطالعات مختلف نشان می‌دهد که میزان جذب دی اکسید کربن در نانوسیال در مقایسه با سیال فاقد نانوذرات بیش‌تر است. مکانیسم افزایش جذب دی‌اکسیدکربن به پدیده‌هائی مانند حرکت براونی، اثر شاتل، اثرات هیدرودینامیکی و اثر ریزهمرفتی (micro-convection) نسبت داده شده است(38). با تزریق گاز به نانو سیال حباب‌های ریز زیادی از گاز در مایع تشکیل می‌شود. طی پدیده‌ای به نام اثر شاتل یا (grazing)، ابتدا مولکول‌های گاز به نانوذرات جذب سطحی (adsorption) می‌شوند سپس مولکول‌های گاز از سطح نانوذرات جدا شده و در محلول جذب شیمیائی (absorption) شده و نانوذرات مانند کاتالیست مجدداً احیا می‌شوند که به این صورت انتقال جرم گاز به مایع جاذب افزایش می‌یابد(36). یکی دیگر از مکانیسم‌های بهبود جذب گاز در نانو سیال اثر هیدرودینامیک یا مخلوط شدن لایه مرزی مایع-گاز می‌باشد. نانوذرات احاطه‌کننده حباب‌ها موجب شکسته شدن لایه نفوذ مرزی شده که موجب می‌شود لایه مرزی نازک‌تر شود. در واقع حضور نانوذرات در لایه مرزی با افزایش توربولانس باعث افزایش ضریب انتقال جرم و در نتیجه افزایش میزان جذب گاز در مایع می‌شود(15،37).

در مطالعه دیگر گزارش شده است که حباب‌های تشکیل شده در آب (بدون نانوذره) تا حدود 7/5 میلی‌متر بالا می‌روند در حالی که در نانوسیال (حاوی مس 0/1 درصد) حباب‌ها تا ارتفاع 5/83 میلی‌متر بالا می‌روند که نشان‌دهنده پخش بیش‌تر حباب‌ها در نانوسیال می‌باشد. بررسی‌ها هم‌چنین نشان‌دهنده تشکیل حباب‌های کوچکتر و کروی تر در نانوسیال می‌باشند(38). در مطالعه Manikandan و همکاران (2020) مکانیسم افزایش جذب در نانوسیال، افزایش سرعت حرکت مولکول‌ها به دلیل حرکت براونی، به واسطه افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال بیان شده است(39).

نانوسیالات به‌منظور استفاده در کاربردهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از موضوعاتی که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است جذب دی‌اکسیدکربن با استفاده از نانوسیالات می‌باشد. بررسی مقالات منتشر شده در این زمینه نشان می‌دهد که با استفاده از نانوسیالات میزان جذب دی‌اکسید کربن بهبود می‌یابد. در مطالعه حاضر که با هدف جذب دی‌اکسیدکربن از فضای بسته انجام شد غلظت‌های دی‌اکسیدکربن مورد آزمایش در محدوده غلظت‌های موجود در هوای محیط‌های داخلی انتخاب شد که از نوآوری‌های این مطالعه محسوب می‌شود. به علاوه در این مطالعه از غلظت بسیار کم نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (0/008 درصد وزنی) در تهیه نانو سیال استفاده شد که بهبود جذب دی‌اکسیدکربن در نانوسیال هیدروکسید سدیم حدود 15 تا 20 درصد به‌دست آمد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر حاصل بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط و طرح تحقیقاتی مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران با کد اخلاق IR.MAZUMS.REC.1401.13732 است که در آزمایشگاه‌های گروه مهندسی بهداشت محیط انجام شد که بدین‌وسیله نویسندگان مراتب قدردانی خود را از همکاری ابراز می‌دارند.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

References

1. Cincinelli A, Martellini T. Indoor air quality and health. Int J Environ Res 2017; 14(11): 1286.
2. Lowther SD, Dimitroulopoulou S, Foxall K, Shrubsole C, Cheek E, Gadeberg B, et al. Low Level Carbon Dioxide Indoors—A Pollution Indicator or a Pollutant? A Health-Based Perspective. Environments 2021; 8(11): 125.
3. Aghalari Z, Amouei A, Zarei A, Afsharnia M, Graili Z, Qasemi M. Relationship between CO2 Concentration and Environmental Parameters with Sick Building Syndrome in School and House Settings in Babol, Iran. J Mazandaran Univ Med Sci 2019; 29(171): 31-44 (Persian).
4. Persily A. Indoor carbon dioxide concentrations in ventilation and indoor air quality standards. Proceeding of the 36th Conference of Air Infiltration and Ventilation Centre. 2015 Sep 23-24; Madrid: 2015.
5. Li B, Duan Y, Luebke D, Morreale B. Advances in CO2 capture technology: A patent review. Appl Energy 2013; 102: 1439-1447.
6. Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, et al. Is CO_2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance. Environ Health Perspect 2012; 120(12): 1671-1677.
7. Persily AK. Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Vol 103, Part 2, 1997, Report No.: 0001-2505, Available from: https://www.google.com/url?esrc=s&q=&rct=j&sa=U&url=https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_10530.pdf&ved=2ahUKEwiLv-2KkNaAAxWKVvEDHQikDKMQFnoECAUQAg&usg=AOvVaw0tNvI6A0PhwxrbVth2DFgn. Accessed March 2, 2023.
8. Cheng L, Zhang L, Chen H, Gao C. Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor. Sep Purif Technol 2006; 50(3): 324-329.
9. Dianati Tilaki R, Jafarsalehi M, Movahedi A. Biofixation of Carbon Dioxide from Kerosene Combustion and Biomass Production by Spirulina. J Mazandaran Univ Med Sci 2019; 29(172): 67-79 (Persian).
10. Zhang Y, Fan L, Zhang L, Chen H. Research progress in removal of trace carbon dioxide from closed spaces. Front Chem Eng China 2007; 1(3): 310-316.
11. Liu J, Wei Y, Zhao Y. Trace carbon dioxide capture by metal–organic frameworks. ACS Sustain Chem Eng 2018; 7(1): 82-93.
12. Zhang Z, Cai J, Chen F, Li H, Zhang W, Qi W. Progress in enhancement of CO_2 absorption by nanofluids: A mini review of mechanisms and current status. Renewable Energy 2018; 118: 527-535.
13. Nakayama N, Hayashi T. Preparation of TiO_2 nanoparticles surface-modified by both carboxylic acid and amine: Dispersibility and stabilization in organic solvents. Colloids Surf 2008; 317(1-3): 543-550.
14. Suresh S, Venkitaraj K, Selvakumar P, Chandrasekar M. Synthesis of Al_2O_3–Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties. Colloids Surf 2011; 388(1-3): 41-48.
15. Hematzadeh Dastgerdi A. Application of nanofluids in absorbing carbon dioxide gas. Jahangostar 2020; 186: 24 (Persian).

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

16. Lee JS, Lee JW, Kang YT. CO_2 absorption/ regeneration enhancement in DI water with suspended nanoparticles for energy conversion application. Appl Energy 2015; 143: 119-129.
17. Aghel B, Janati S, Alobaid F, Almoslh A, Epple B. Application of nanofluids in CO_2 absorption: a review. Appl Sci 2022; 12(6): 3200.
18. Lee JW, Jung J-Y, Lee S-G, Kang YT. CO_2 bubble absorption enhancement in methanol-based nanofluids. Int J Refrig 2011; 34(8): 1727-1733.
19. Taheri M, Mohebbi A, Hashemipour H, Rashidi AM. Simultaneous absorption of carbon dioxide (CO2) and hydrogen sulfide (H2S) from CO2–H2S–CH4 gas mixture using amine-based nanofluids in a wetted wall column. J Nat Gas Sci Eng 2016; 28: 410-417.
20. Rahmatmand B, Keshavarz P, Ayatollahi S. Study of absorption enhancement of CO_2 by SiO_2, Al_2O_3, CNT, and Fe_3O_4 nanoparticles in water and amine solutions. J Chem Eng Data 2016; 61(4): 1378-1387.
21. Komati S, Suresh AK. CO_2 absorption into amine solutions: a novel strategy for intensification based on the addition of ferrofluids. J Chem Technol Biotechnol 2008; 83(8): 1094-1100.
22. Li SH, Ding Y, Zhang XS, editors. Enhancement on CO_2 bubble absorption in MDEA solution by TiO_2 nanoparticles. Adv Mat Res 2013; 631-632: 127-134.
23. Jung J-Y, Lee JW, Kang YT. CO_2 absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol. J Mech Sci Technol 2012; 26(8): 2285-2290.
24. Lee JW, Kang YT. CO_2 absorption enhancement by Al_2O_3 nanoparticles in NaCl aqueous solution. Energy 2013; 53: 206-211.
25. Ochedi FO, Yu J, Yu H, Liu Y, Hussain A. Carbon dioxide capture using liquid absorption methods: a review. Environ Chem Lett 2021; 19: 77-109.
26. Shim J-G, Lee DW, Lee JH, Kwak N-S. Experimental study on capture of carbon dioxide and production of sodium bicarbonate from sodium hydroxide. Environ Eng Res 2016; 21(3): 297-303.
27. Devakki B, Thomas S. Experimental investigation on absorption performance of nanofluids for CO2 capture. Int J Air-Cond Refrig 2020; 28(2): 2050017.
28. Dasaard C, Bayless D, Stuart B. Experimental Measurement of Total Inorganic Carbon Concentrations from Absorption of Gas Phase CO2. IARJSET 2016; 3(10): 119-125.
29. Bernard O, Aupiais J. Conductivity of weak electrolytes for buffer solutions: Modeling within the mean spherical approximation. J Mol Liq 2018; 272: 631-637.
30. Yoo M, Han S-J, Wee J-H. Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution. J Environ Manage 2013; 114: 512-519.
31. Salur D, Rachakonda S. Experimental study on carbon dioxide absorption by caustic potash. Int J Adv Res 2016; 8(11): 42165-42173.
32. Leventaki E, Baena-Moreno FM, Sardina G, Ström H, Ghahramani E, Naserifar S, et al. In-Line Monitoring of Carbon Dioxide Capture with Sodium Hydroxide in a Customized 3D-Printed Reactor without Forced Mixing. Sustainability 2022; 14(17): 10795.
33. Kordylewski W, Sawicka D, Falkowski T. Laboratory tests on the efficiency of carbon dioxide capture from gases in NaOH solutions. Ecol Eng 2013; 14(2): 54-62.
34. Arshadi M, Taghvaei H, Abdolmaleki M, Lee M, Eskandarloo H, Abbaspourrad A.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]

Carbon dioxide absorption in water/nanofluid by a symmetric amine-based nanodendritic adsorbent. Appl Energy 2019; 242: 1562-1572.

35. Kim J-K, Jung JY, Kang YT. Absorption performance enhancement by nano-particles and chemical surfactants in binary nanofluids. Int J Refrig 2007; 30(1): 50-57.
36. Kluytmans J, Van Wachem B, Kuster B, Schouten J. Mass transfer in sparged and stirred reactors: influence of carbon particles and electrolyte. Chem Eng Sci 2003; 58(20): 4719-4728.
37. Kim JH, Jung CW, Kang YT. Mass transfer enhancement during CO2 absorption process in methanol/Al2O3 nanofluids. Int J Heat Mass Tra 2014; 76: 484-491.
38. Kim J-K, Jung JY, Kang YT. The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid. Int J Refrig 2006; 29(1): 22-29.
39. Manikandan AP, DeepanSundar G, Perumal CC, Aminudin U. Absorption of CO2 in a packed bed absorption column using TiO2 nanoparticle suspended water solvent. International Journal of Scientific & Technology Research 2020; 9(3): 5621-5624.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-01]