

Removal of Carbon Dioxide from Indoor Air Using Nanofluid Absorption Solution

Ramazan Ali Dianati Tilaki¹,
Saeedeh Shabantabar Shouraki²,
Esmail Babanejad Arimi³,
Bizhan Shabankhani⁴

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)

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

رضانعلی دیانتهی تیلکی¹

سعیده شعبان تبار شورکی²

اسماعیل بابانژاد آرمی³

بیژن شعبانخانی⁴

چکیده

سابقه و هدف: افزایش غلظت دی اکسید کربن در هوای محیط‌های داخلی به دلیل عدم وجود تهویه مناسب موجب ایجاد اثرات سوء بر سلامت انسان می‌شود. هدف از این مطالعه حذف دی اکسید کربن از یک فضای بسته با استفاده از محلول جاذب نانوسیال هیدروکسید سدیم و تعیین تاثیر غلظت جاذب، غلظت دی اکسید کربن و نانوذرات دی اکسید 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 غلظت‌های محدود 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 دی اکسید 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 دی اکسید کربن اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: با استفاده از محلول جاذب هیدروکسید سدیم 0/4 درصد حاوی 0/008 درصد نانوذرات دی اکسید تیتانیوم راندمان حذف دی اکسید کربن برای غلظت‌های 500 و 5000 پی‌پی‌ام به ترتیب 72 و 44 درصد به دست آمد که به ترتیب 20 و 10 درصد بیش‌تر از محلول جاذب فاقد نانوذرات بود. برای 5000 پی‌پی‌ام دی اکسید کربن، 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 20 درصد افزایش بیشتری داشت. میانگین کاهش EC در نانوسیال نسبت به سیال پایه 25 درصد بیش‌تر بود. میانگین کاهش pH ناشی از جذب دی اکسید کربن کم‌تر از یک واحد بود.

استنتاج: نانوسیال هیدروکسید سدیم حاوی 0/008 درصد نانوذرات دی اکسید تیتانیوم برای حذف دی اکسید کربن 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 این که جمعیت مدرن تقریباً 90 درصد از زمان خود را در محیط‌های داخلی سپری می‌کنند و

مؤلف مسئول: رضانعلی دیانتهی 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

روش‌های جدیدی که امروزه در حال بررسی و گسترش است، استفاده از نانو سیال به منظور جذب بیش تر گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد. استفاده از نانو سیالات برای جذب دی‌اکسید کربن می‌تواند میزان جذب این گاز را بهبود بخشد و منجر به کاهش مصرف انرژی شود. معمولاً تهیه نانو سیالات 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 به صورت یکنواخت پخش می‌شود (12). به منظور پایدار نمودن نانو سیال معمولاً سورفکتانت به آن اضافه شده و جهت پخش یکنواخت نانو ذرات در سیال از سونیکاتور استفاده می‌شود (15-13). مطالعات متعددی در زمینه استفاده از نانو ذرات در جذب دی‌اکسید کربن انجام شد (12، 16، 17). در تحقیقات انجام شده توسط محققان انواع مختلف نانو سیال برای جذب دی‌اکسید کربن مورد مطالعه قرار گرفت که شامل استفاده از نانو سیال بر پایه متانول (18)، بر پایه محلول‌های آمین (19)، نانو سیال با کاربرد نانو ذرات Fe_3O_4 ، Al_2O_3 ، SiO_2 در آب و آمین (20)، نانو سیال بر پایه آمین با نانو ذرات F_2O_3 (21)، متیل دی اتانول آمین و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) (22)، متانول (23)، نانو ذرات Al_2O_3 در آب و $NaCl$ (24) می‌باشند. با توجه به این که محلول هیدروکسید سدیم ($NaOH$) با دارا بودن خاصیت قلیائی می‌تواند دی‌اکسید کربن را جذب نماید و مطالعاتی در این زمینه نیز انجام شده است (25، 26). بر اساس بررسی به عمل آمده درباره جذب دی‌اکسید کربن از محیط داخلی با استفاده از نانو سیال، تا کنون مطالعه‌ای یافت نشده است. بنابراین هدف از این مطالعه تعیین میزان جذب دی‌اکسید کربن از هوای یک فضای بسته با استفاده از نانو سیال متشکل از محلول آبی هیدروکسید سدیم و نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم و تعیین عوامل موثر بر میزان جذب دی‌اکسید کربن بود.

دی‌اکسید کربن (CO_2) در محیط‌های داخلی می‌تواند به میزان بسیار بیش تری نسبت به هوای آزاد انباشته شود، لذا پائین آمدن کیفیت هوا بر سلامت ساکنان تاثیر سوء زیادی دارد (1). عمده ترین دلیل آلودگی هوای محیط‌های داخلی وجود منابع انتشار و عدم وجود تهویه می‌باشد. پدیده معروف به سندرم ساختمان بیمار (SBS) سال‌هاست که مورد توجه قرار گرفته است. دی‌اکسید کربن یکی از گازهایی است که غلظت آن در هوای محیط‌های داخلی بیش تر از هوای آزاد می‌باشد. در نواحی غیر صنعتی غلظت دی‌اکسید کربن در هوای داخل ساختمان‌ها می‌تواند تا 5000 قسمت در میلیون (پی‌پی‌ام) و یا بیش تر افزایش یابد. حد مطلوب غلظت دی‌اکسید کربن در هوای محیط‌های داخلی کم تر از 500 پی‌پی‌ام است و بهتر است از 1000 پی‌پی‌ام تجاوز ننماید. هم چنین حداکثر غلظت مجاز دی‌اکسید کربن در هوای محیط‌های صنعتی 5000 پی‌پی‌ام توصیه شده است (2). افزایش غلظت دی‌اکسید کربن می‌تواند بر سلامت انسان اثرات سوء ایجاد نماید. یافته‌های یک مطالعه نشان می‌دهد که غلظت دی‌اکسید کربن با ایجاد علائم سندرم ساختمان بیمار در دانش آموزان ارتباط معنی داری دارد (3، 4). هم چنین در ایستگاه‌های فضایی، زیر دریایی‌ها، معادن و غیره غلظت دی‌اکسید کربن افزایش می‌یابد (5). با توجه به این که در بازدم تنفسی انسان حدود 4 درصد دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن موجب ایجاد مشکلات تنفسی، اختلال در سطح هوشیاری، و ایجاد اثرات سوء متعدد بر سلامت انسان می‌شود (7). روش‌های مختلفی برای حذف دی‌اکسید کربن در محدوده غلظتی کم تر از 5000 پی‌پی‌ام مورد بررسی قرار گرفته اند که از آن جمله می‌توان به جذب دی‌اکسید کربن با کشت میکرو جلبک (8، 9)، استفاده از روش‌های غشائی (10) و استفاده از جاذب چارچوب آلی فلزی (11) اشاره نمود. یکی از

مواد و روش‌ها

مشخصات پیلوت 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 جاب‌ساز به‌عنوان راکتور جذب دی‌اکسید کربن در داخل محفظه قرار گرفت. پمپ مکش هوا مدل skc standard با دبی 3 لیتر بر دقیقه در داخل محفظه قرار داده شد و به خروجی ایمپینجر متصل شد. دستگاه سنجش دی‌اکسید کربن مدل TES 1370 ND IR متصل به کامپیوتر، در داخل 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 ستیل تری متیل آمونیوم کلراید (CTAC) شرکت مرک، به میزان 0/003 درصد وزنی به هر کدام 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).

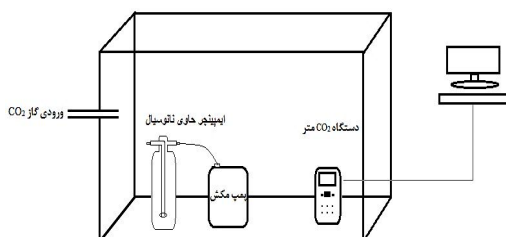
روش آزمایش

در هر مرحله از آزمایش حجم 300 میلی‌لیتر از نانوسیال 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 دی‌اکسید کربن خالص به داخل

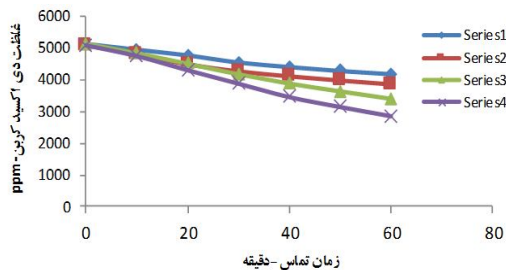
محفظه فوق تزریق و غلظت‌های دی‌اکسید کربن در محدوده‌های 500، 2000 و 5000 پی‌پی‌ام در محفظه ایجاد شد. با روشن شدن پمپ مکش، هوای داخل محفظه از درون محلول جاذب عبور نموده و دی‌اکسید کربن جذب نانو سیال شده و از غلظت دی‌اکسید کربن در محفظه کاسته می‌شد و دستگاه آنالیزور دی‌اکسید کربن مقدار غلظت آن را نشان می‌داد. 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 (23 ± 2) و فشار یک اتمسفر بود. مقادیر pH محلول جاذب با استفاده از pH متر HANNA مدل HI2211، هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه هدایت سنج الکتریکی AQUALYTIC مدل Senso Direct Con 200 و کربن غیر آلی محلول (IOC) با دستگاه TOC آنالیزور SHIMADZU مدل TOC-L CSH قبل و بعد از فرایند جذب دی‌اکسید کربن 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 پیلوت مورد آزمایش نشان داده شده است.

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

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



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.



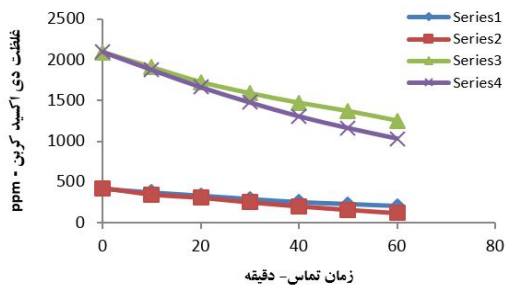
تصویر شماره 1: تصویر پابلوت مورد استفاده

یافته‌ها

در تصویر شماره 2 حذف دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن از 18 به 34 درصد افزایش یافت. در نانوسیال و شرایط مشابه راندمان حذف دی‌اکسید کربن 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 به ترتیب 0/945، 3/31 و 6/26 میلی‌مول بود که نشان داد با افزایش غلظت اولیه CO_2 میزان جذب آن در محلول

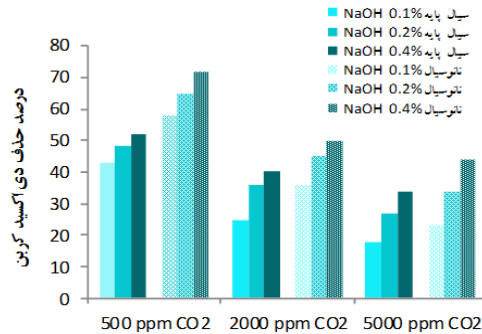
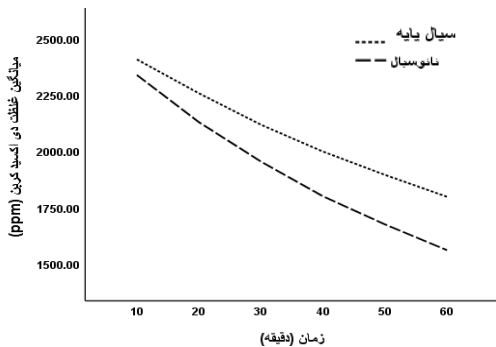
تصویر شماره 2: تغییرات میزان جذب دی‌اکسید کربن بر حسب زمان در محلول‌های جاذب هیدروکسید سدیم در حضور و غیاب نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم



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

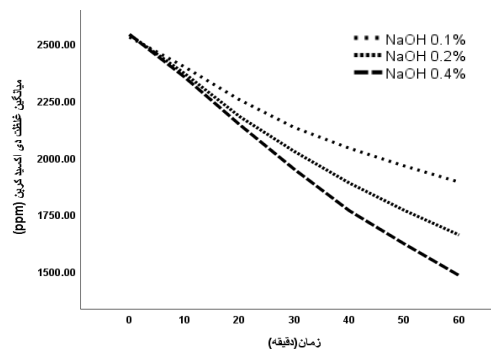
در تصویر شماره 4 ملاحظه می‌شود که با افزایش غلظت اولیه دی‌اکسید کربن راندمان حذف آن کاهش می‌یابد. هم‌چنین یافته‌ها نشان داد که با افزایش چهار برابری غلظت محلول جاذب، میزان افزایش راندمان حذف حدود 15 تا 30 درصد می‌باشد. به‌عنوان مثال برای غلظت 2000 پی‌پی‌ام دی‌اکسید کربن با افزایش غلظت محلول جاذب از 0/1 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.

داد که بین غلظت هیدروکسید سدیم (0/1، 0/2 و 0/4 درصد) و میزان جذب دی اکسید کربن ارتباط معنی داری وجود دارد (P=0).



تصویر شماره 4: تغییرات درصد حذف دی اکسید کربن در غلظت‌های مختلف سیال پایه و نانوسیال

تصویر شماره 5: ارتباط بین سیال پایه و نانوسیال با میزان جذب دی اکسید کربن



تصویر شماره 6: ارتباط بین غلظت هیدروکسید سدیم با میزان جذب دی اکسید کربن

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

نمودار شماره 6 نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS و وارد نمودن میانگین کلیه داده‌های مربوط به غلظت ثانویه دی اکسید کربن در زمان تماس‌های مختلف مربوط به سیال پایه و نانو سیال در غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم رسم شده است. تحلیل آماری نشان

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 (µS/cm)	EC بعد جذب (µS/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

بحث

اثر بر کربن غیرآلی (TIC)

همان گونه که در جدول 2 ملاحظه می شود در حضور نانوذره (نانوسیال)، میزان کل کربن غیرآلی (TIC) افزایش یافت که نشان دهنده افزایش میزان جذب دی اکسید کربن در نانوسیال می باشد. این الگو برای سایر غلظت های هیدروکسید سدیم و دی اکسید کربن نیز تکرار شده است به گونه ای که در همه حالت های آزمایش، میزان کل کربن غیرآلی (TIC) در نانوسیال نسبت به سیال پایه حدود 30 درصد افزایش بیش تری داشت که نشان دهنده جذب بیش تر دی اکسید کربن در نانوسیال می باشد. با افزایش جذب دی اکسید کربن در نانوسیال و واکنش دی اکسید کربن با هیدروکسید سدیم و تشکیل کربنات سدیم (Na_2CO_3) و بیکربنات سدیم (NaHCO_3)، غلظت کربن غیرآلی (TIC) در محلول افزایش یافت که به دلیل افزایش غلظت یون های کربنات (CO_3^{2-}) و بیکربنات (HCO_3^-) می باشد. هم چنین با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم میزان غلظت کربن غیرآلی افزایش یافت که تأیید کننده افزایش جذب دی اکسید کربن می باشد.

مطالعه ای توسط Dasaard و همکاران (2016) به منظور تعیین اثر تزریق غلظت های مختلف دی اکسید کربن بر میزان TIC در آب خالص RO و آب RO+ (به اضافه 0/01 درصد NaOH) انجام شد. با تزریق دی اکسید کربن، میزان TIC در آب RO+ افزایش یافت که با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر مطابقت دارد (28).

اثر بر هدایت الکتریکی (EC) و pH

در جدول شماره 2 مشاهده می شود که با جذب دی اکسید کربن در محلول جاذب هیدروکسید سدیم از میزان هدایت الکتریکی کاسته می شود. با جذب دی اکسید کربن در محلول جاذب از غلظت هیدروکسید سدیم کاسته می شود و به همین دلیل میزان هدایت الکتریکی کاهش می یابد. در نانوسیال به دلیل افزایش میزان جذب دی اکسید کربن به همان نسبت کاهش

بیش تری در میزان هدایت الکتریکی اتفاق می افتد. در جدول شماره 2 هم چنین با افزایش غلظت دی اکسید کربن کاهش بیش تری در میزان هدایت الکتریکی مشاهده می شود. در خصوص کاهش pH محلول جاذب قبل و بعد از جذب دی اکسید کربن نیز دلیل مشابهی وجود دارد. با جذب دی اکسید کربن در محلول و مصرف شدن هیدروکسید سدیم از غلظت آن کاسته شده و به همان نسبت کاهش pH رخ می دهد. به طور کلی هدایت الکتریکی محلول هیدروکسید سدیم بیش تر از محلول های بیکربنات سدیم و کربنات سدیم در غلظت های مشابه است (29).

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

اثر غلظت محلول جاذب و غلظت دی اکسید کربن بر میزان جذب

یافته های مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش غلظت محلول جاذب میزان جذب دی اکسید کربن افزایش می یابد. در مطالعه ای Salur و Rachakonda جذب دی اکسید کربن در هیدروکسید پتاسیم مورد بررسی قرار

گرفت که در آن غلظت دی اکسید کربن بسیار زیادتر از مطالعه حاضر و 15 درصد بود که در زمان 20 دقیقه و جاذب 0/84 درصد راندمان جذب 41 درصد گزارش شد (31). در مطالعه حاضر برای دی اکسید کربن 0/5 درصد و زمان 20 دقیقه در محلول جاذب 0/4 درصد، راندمان جذب 12 درصد به دست آمد که با توجه به کم بودن غلظت دی اکسید کربن و هم چنین کم بودن غلظت جاذب راندمان جذب کم تری به دست آمد.

در مطالعه Baena-Moreno و همکاران (2022)، ظرفیت جذب دی اکسید کربن در محلول های جاذب هیدروکسید سدیم در محدوده غلظت 1 تا 8 درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب گاز تزریق شده به محلول های جاذب (دی اکسید کربن 30 درصد و نیتروژن 70 درصد حجمی) بود. در محلول های جاذب 5 درصد و بالاتر، واکنش منجر به ته نشینی شد. ظرفیت جذب دی اکسید کربن در محلول های 1 تا 8 درصد در محدوده 9/5 تا 78/9 گرم بر لیتر به دست آمد. برای جاذب 4 درصد در ابتدا سرعت جذب بالا بود و تمام دی اکسید کربن 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 دی اکسید کربن افزایش پیدا کرد (32). همان گونه که مشاهده می شود در مطالعه Baena-Moreno و همکاران هم غلظت دی اکسید کربن و هم غلظت محلول های جاذب از مطالعه حاضر بیش تر بود با این حال میزان کاهش pH به میزان 2 واحد بود. در مطالعه حاضر برای دی اکسید کربن 0/5 درصد و جاذب 0/4 درصد میزان کاهش pH به میزان 0/7 واحد بود که نشان می دهد با مطالعه فوق مطابقت دارد.

در مطالعه Kordylewski و همکاران کارایی جذب دی اکسید کربن 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 حاضر استفاده شد. غلظت دی اکسید کربن 15 درصد و غلظت محلول های جاذب 5، 10، 20، 30، 40 و 50 درصد بود. در محلول جاذب 50 درصد راندمان جذب 85 درصد به دست آمد. با افزایش زمان تماس از 3 به 25 دقیقه میزان دی اکسید کربن جذب شده از 0/12 به 0/43 مول بر لیتر افزایش یافت که با یافته های مطالعه حاضر مطابقت دارد (33).

اثر غلظت نانوذرات و سورفکتانت

مطالعه ای توسط Devakki و Thomas در سال 2020 با عنوان بررسی عملکرد نانوسیال در جذب دی اکسید کربن انجام شد. نانوذرات TiO_2 و Al_2O_3 در غلظت های 0/02 تا 0/14 درصد وزنی در آب دیونیزه تهیه شدند. نانو سیال های حاوی TiO_2 و Al_2O_3 در 0/1 و 0/14 درصد وزنی بیش ترین کارایی جذب CO_2 را نشان دادند که به ترتیب 39/81 درصد و 22/3 درصد افزایش جذب CO_2 نسبت به سیال پایه به دست آمد. با افزایش غلظت نانوذرات دی اکسید تیتانیوم میزان جذب دی اکسید کربن کاهش یافت. در مطالعه حاضر تنها یک غلظت (0/008 درصد) از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم مورد آزمایش قرار گرفت که با توجه به غلظت اولیه دی اکسید کربن افزایش جذب در محدوده 10 تا 20 درصد در نانوسیال مشاهده شد که با توجه به شرایط آزمایش از نظر انتخاب غلظت های کم در مقایسه با دیگر مطالعات در این زمینه مطابقت دارد (27). یکی از ویژگی های مطالعه حاضر استفاده از سورفکتانت کاتیونی ستیل تری متیل آمونیوم کلراید (CTAC) در تهیه نانوسیال می باشد که با توجه به بررسی های 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 (12، 34).

در مطالعه ای کیونگ کیم و همکارانش در سال 2006 تأثیر نانوسیال های دو تایی (binary nanofluid) و

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 کروی‌تر 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 دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن از فضای بسته انجام شد غلظت‌های دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید تیتانیوم (0/008 درصد وزنی) در تهیه نانو سیال استفاده شد که بهبود جذب دی‌اکسید کربن در نانوسیال هیدروکسید سدیم حدود 15 تا 20 درصد به دست 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 بدین وسیله نویسندگان مراتب قدردانی خود را از همکاری ابراز می‌دارند.

سورفکتانت را بر عملکرد جذب آمونیاک در آب مورد بررسی قرار دادند. نانوذرات Cu، CuO و Al_2O_3 برای ساختن نانوسیال‌های دو تایی 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 دی‌اکسید کربن یافته‌های مطالعات مختلف نشان می‌دهد که میزان جذب دی‌اکسید کربن در نانوسیال در مقایسه با سیال فاقد نانوذرات بیش‌تر است. مکانیسم افزایش جذب دی‌اکسید کربن به پدیده‌هایی 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 جذب 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

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 CO₂ 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-2KkNaAxWKVvEDHQikDKMQFnoECAUQAq&usq=A0Vvaw0tNvI6A0PhwxbVth2DFgn. 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 CO₂ absorption by nanofluids: A mini review of mechanisms and current status. *Renewable Energy* 2018; 118: 527-535.
13. Nakayama N, Hayashi T. Preparation of TiO₂ 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 Al₂O₃-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).

16. Lee JS, Lee JW, Kang YT. CO₂ 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 CO₂ absorption: a review. *Appl Sci* 2022; 12(6): 3200.
18. Lee JW, Jung J-Y, Lee S-G, Kang YT. CO₂ 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 CO₂ by SiO₂, Al₂O₃, CNT, and Fe₃O₄ nanoparticles in water and amine solutions. *J Chem Eng Data* 2016; 61(4): 1378-1387.
21. Komati S, Suresh AK. CO₂ 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 CO₂ bubble absorption in MDEA solution by TiO₂ nanoparticles. *Adv Mat Res* 2013; 631-632: 127-134.
23. Jung J-Y, Lee JW, Kang YT. CO₂ absorption characteristics of nanoparticle suspensions in methanol. *J Mech Sci Technol* 2012; 26(8): 2285-2290.
24. Lee JW, Kang YT. CO₂ absorption enhancement by Al₂O₃ 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.

- 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.