

بهبود ضریب انتقال جرم کربن دی اکسید در آب توسط به کارگیری موج فراصوت

محمود محمودی مرجانیان، شاهرخ شاه حسینی*، امین رضا انصاری

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: در فناوری‌های مرسوم جذب کربن دی اکسید، برخی اشکال‌ها و محدودیت‌ها از جمله پایین بودن سطح انتقال جرم وجود دارد. بنابراین ضروری است که یک فناوری نوین برای جذب آرایه شود که این محدودیت را نداشته باشد. استفاده از موج فراصوت فرکانس بالا، روشی است که با اتمیزه کردن حلال قطره‌های بسیار ریزی را تولید می‌کند. این قطره‌ها سطح بیش‌تری برای فرایند انتقال جرم فراهم می‌کنند. به همین منظور در این پژوهش، جذب به کمک موج فراصوت با فرکانس بالا انجام گرفت. نتیجه‌ها بیانگر آن بود که نرخ جذب کربن دی اکسید در آب در توان ۸/۶۴ وات، در مقایسه با حالت بدون تابش موج فراصوت تا ۲۰ برابر افزایش یافت. همچنین برای مقایسه با سایر روش‌ها، یک همزن مغناطیسی جایگزین مبدل فراصوت شد. در این شرایط ضریب انتقال جرم به کمک فراصوت به تقریب ۴/۴ برابر بیش‌تر از همزن مغناطیسی شد که نشانگر عملکرد بهتر موج فراصوت نسبت به همزن است.

واژگان کلیدی: کربن دی اکسید، جذب، موج فراصوت فرکانس بالا، همزن مغناطیسی.

KEYWORDS: Carbon dioxide, Absorption, High-frequency ultrasonic waves, Magnetic stirrer.

مقدمه

انرژی جهان توسط این سوخت‌ها تأمین می‌شود. افزون بر این، جایگزین کردن سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی سبز در مقیاس صنعتی مدت زمان زیادی طول می‌کشد یا به دلیل مشکل‌هایی که دارند در کاربردهای گسترده قابل استفاده نیستند. پیش‌بینی می‌شود طی ۲۰ سال آینده از سوخت‌های فسیلی استفاده شود و انتشار CO₂ به جو ادامه یابد [۴-۴۶]. در سال‌های اخیر مطالعه‌های زیادی برای بهبود جذب کربن دی اکسید به صورت خالص یا همراه گازهای دیگر (مانند هوا و نیتروژن) صورت گرفته است تا همراه به کارگیری حلال‌های گوناگون از فناوری‌های بسیاری برای بهبود سطح تماس فرایند جذب گاز-مایع استفاده شود. این روش‌ها شامل همزن‌های

کاهش اثرهای زیست‌محیطی به علت آلودگی‌های رشد صنعتی‌تر شدن دنیا، طی سالیان اخیر، مورد مطالعه و پژوهش بسیاری از سازمان‌ها و مؤسسه‌های جهانی بوده است؛ که علت اصلی این امر را می‌توان، کنترل افزایش دمای جو زمین و کاهش گازهای گلخانه‌ای در جو زمین بیان نمود. در بین گازهای گلخانه‌ای، کربن دی اکسید بیش‌ترین سهم را از نظر مقدار در جو دارد و از این رو مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای محسوب می‌شود. این گاز به وسیله فرایندهای بسیاری از جمله احتراق سوخت‌های فسیلی مانند نفت، زغال‌سنگ و گاز طبیعی تولید می‌شود و آسیب جدی به محیط زیست وارد می‌کند [۳-۱]. امروزه به تقریب ۸۵ درصد از

* عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: shahrokh@iust.ac.ir

در روند جذب گاز-مایع به ندرت گزارش شده است. تا به امروز، بسیاری از مطالعه‌های در فرکانس پایین از موج فراصوت برای هدف دفع انجام شده است؛ که به خاطر این است که تشکیل کایتاسیون توسط تابش فراصوت، برای افزایش فرایند دفع بسیار دلخواه است؛ در نتیجه برای فرایندهای جذب بی‌اثر شده است. با وجود این چندین پژوهشگر به مطالعه جذب با استفاده از فناوری فرکانس پایین فراصوت پرداختند.

ژنگ^۴ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۷ میلادی به بررسی اثر موج فراصوت در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۲۰۰ وات برای پخش و تخریب ازن در آب پرداختند و نتیجه‌های آن‌ها بیانگر بهبود نرخ تجزیه ازن با تابش فراصوت بود. حضور فراصوت، نرخ انتقال جرم را افزایش داد ولی در همان حال، این حد از بهبود به ازای یک سامانه ۲۰۰ وات، چشمگیر نبود. لاگیر^۵ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۸ میلادی گزارش دادند که جذب نیتروژن در آب با استفاده از فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به همراه همزن مکانیکی تا ۱۱ برابر افزایش یافت؛ ولی در کل تأثیر فراصوت بر روی دفع نسبت به جذب گاز، در شرایط همانند بسیار بیش‌تر بود. سمنو^۶ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۱ میلادی به مطالعه تجربی تأثیر موج فراصوت برای جذب CO₂ در آب پرداختند. برای این پژوهش از فرکانس ۲۲ کیلوهرتز و توان ۱ کیلووات استفاده شد. آن‌ها افزایش چند برابری ضریب انتقال جرم را گزارش کردند. دلیل این اتفاق، افزایش سطح تماس حباب با مایع و جریان همرفتی عنوان شد؛ ولی توان مصرفی بسیار بالا بود. هران^۷ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۲ میلادی یک مطالعه با استفاده از تابش فراصوت ۲۰ کیلوهرتز در یک ستون حباب گزارش کردند. نتیجه‌ها نشان داد که ضریب انتقال جرم تنها در توان‌های بسیار بالا افزایش می‌یابد که قابل استفاده برای مصرف‌های صنعتی نبود. تلاش برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و تجهیزهای پروژه‌های جذب CO₂ نشر یافته به اتمسفر، انگیزه مناسبی برای مطالعه‌های علمی و توسعه فناوری‌های نوین ایجاد کرده بود به همین منظور در سال ۲۰۱۷ میلادی تای^۸ و همکاران [۱۷]، به بررسی جذب CO₂ در فرکانس ۱/۷ مگاهرتز در محلول مونو اتانول آمین پرداختند. آن‌ها از افزایش چشمگیر نرخ جذب، گزارش دادند. این مطالعه بیش‌تری را نسبت به کارایی موج

مکانیکی^۱، ستون‌های پرشده^۲، تماس‌دهنده‌های غشایی^۳ و غیره می‌شود [۷]. فن‌آوری جذب به وسیله ستون‌های پرشده محدود به شرایط عملیاتی و مسائلی چون رسوب، اتصال‌ها، کف و محدودیت گرانشی حلال می‌باشد. همزن مکانیکی محدود به ناخالصی‌های جامد و گرانشی حلال است. تماس‌دهنده غشاء و فرایندهای غشایی نیاز به انرژی زیاد برای ایجاد اختلاف فشار در سراسر غشاء، محدودیت‌های دمایی در عملکرد و تحمل کمی در برابر ناخالصی‌های گاز دودکش (تقاضای تجهیزهای اضافی به منظور حذف ناخالصی) دارند [۹-۷].

روش‌های مرسوم به دلیل وجود تجهیزهای جانبی زیاد و هزینه سرمایه‌گذاری ثابت و در گردش زیاد، با رغبت مناسبی روبه‌رو نبوده است. در نتیجه، مطالعه‌های علمی و توسعه فناوری‌های نوین برای به صرفه‌تر نمودن هزینه‌های فرایند، کاهش استهلاک و هزینه‌های نگهداری ادامه دارد. موج فراصوت نیز به واسطه اثرهای چشمگیر در صنایع پزشکی و بازرسی فنی، برای فرایندهای گاز-مایع مورد بررسی قرار گرفته است. بسیاری از اثرهای بهبودبخش شیمی صوت به دلیل کایتاسیون و متلاشی شدن حباب کایتاسیون گزارش شده است. حباب کایتاسیون در طول فشار منفی موج صوتی ایجاد می‌شود. در طول دوره فشار منفی موج صوتی سیال مایع در نقطه‌هایی که ناخالصی گازی دارد کنار زده شده و یک حباب خالی ایجاد می‌شود. یک نمونه ملموس از حباب‌سازی شبیه به آن چه در شیمی صوت اتفاق می‌افتد، حباب‌هایی هستند که بین یک نوشابه گازدار و خراش‌های دیواره شیشه‌ای لیوان تشکیل می‌شود. در ناحیه‌های دارای خراش دیواره لیوان، مولکول‌های هوا حبس شده‌اند و به‌عنوان منطقه‌های هسته‌سازی حباب کایتاسیون عمل می‌کنند. اثرهای شیمیایی فراصوت تنها در سامانه‌هایی دیده می‌شود که ذره‌ها در آن موجود بوده یا شدت موج صوتی برای تشکیل کایتاسیون به اندازه کافی بزرگ بوده و همچنین واکنش‌دهنده‌ها دارای کم‌ترین فراریت برای تشکیل حباب کایتاسیون باشند [۱۰، ۱۱]. فراصوت به طور گسترده در صنایعی مانند کشاورزی، حفاری، جوشکاری، پلیمریزاسیون، تصفیه آب، انتقال دارو، تجهیزهای اندازه‌گیری و غیره، کاربردهای وسیعی دارد [۱۰، ۱۲]. بنابراین مطالعه‌های بسیاری برای فرایند انتقال جرم به کمک فراصوت انجام شده است. با این حال، استفاده از فراصوت

(۱) Mechanically agitated contactors

(۳) Membrane Contactor

(۵) Laugier

(۷) Herran

(۲) Packed-bed columns

(۴) Zhang

(۶) Semenov

(۸) Tay

روش کار

برای اندازه‌گیری میزان حلالیت گاز در مایع (حلال)، دستگاه‌های زیاد طراحی شده است که تفاوت آن‌ها در چگونگی اندازه‌گیری می‌باشد. پرکاربردترین روشی که به طور گسترده در جامعه علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد به عنوان روش حجم ثابت یا افت فشار شناخته می‌شود. در این دستگاه‌ها گاز و حلال مورد نظر در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند که در این تماس مقداری از مولکول‌های گاز، جذب حلال می‌شوند و این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که فشار گاز درون مخزن ثابت باقی بماند و تعادل برقرار شده باشد. در این روش دما و حجم سامانه ثابت نگه‌داشته می‌شوند [۲۱]. در این مطالعه نیز از این روش استفاده شد. شمای کلی دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصه‌های نشانه‌های نقشه ترسیم شده نیز در جدول ۱ آورده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد فرکانس بالا و چگونگی تشکیل چشمه صوتی، نخست، اثر فرکانس ۱/۷ مگاهرتز با توان‌های گوناگون بر سطح مایع آب به صورت چشمی تحت آزمون عملیاتی قرار گرفت. این دستگاه شامل یک محفظه از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶ و دارای دیواره دوجداره است که با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر ساخته شد. با گردش جریان آب درون دیواره توسط حمام آب، دمای آن تنظیم شد. یک محفظه میانی به شکل استوانه که محفظه بارگیری نام دارد با حجم ۸۵۰ میلی‌لیتر از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶ میان سیلندر گاز CO₂ و محفظه جذب فراصوت قرار گرفت. چگونگی کار با این دستگاه به این صورت بود که نخست فشارسنج با فشار محیط برسنجی شد؛ به گونه‌ای که فشار محیط را صفر نشان دهد. حسگر دما و حمام آب نیز با یک دماسنج برسنجی شدند. پس از برسنجی دستگاه، محلول جاذب در حجم ۸۰ میلی‌لیتر به راکتور فراصوت تزریق شد. سپس هوای درون مخزن به‌وسیله پمپ خلا تخلیه شد. محفظه فراصوت شامل یک مبدل فراصوت فرکانس بالا بود که در کف آن تعبیه شد. در ادامه CO₂ به محفظه بارگیری با فشار بیش‌تر از فشار طراحی شده برای انجام آزمایش‌ها تزریق شد. سپس شیرها باز شدند تا فشار به مقدار تعیین شده در محفظه فراصوت برسد. زمانی که به فشار مدنظر رسید شیرها بسته شدند. همزمان مبدل فراصوت شروع به کار کرد. در همان لحظه با آغاز جذب CO₂ توسط محلول، فشار به تدریج کم و افت فشار محفظه فراصوت هر ثانیه توسط دیتالاگر ثبت شد. روند افت فشار تا هنگامی که سامانه به تعادل برسد ادامه یافت. با داشتن فشار تعادلی و سایر پارامترها محاسبه‌های مدنظر انجام شد. ضریب انتقال جرم CO₂ خالص

فراصوت در جذب فراهم کرد. بر اساس مطالعه‌های صورت گرفته، فرکانس بالا و قوی موج فراصوت منجر به ایجاد چشمه فراصوت و اتمیزاسیون می‌شود. اتمیزاسیون پدیده‌ای است که در آن قطره‌های مایع توسط لرزش قوی منبع تولید صوت از سطح گاز - مایع، کنده می‌شوند. قطره‌های تولید شده، سطح بزرگی را برای فرایند انتقال جرم فراهم می‌کند که اندازه قطره‌ها با توجه به فرکانس فراصوت می‌تواند گوناگون باشد. شایان ذکر است، فرکانس‌های بالاتر تولید قطره‌های کوچک‌تر و در نتیجه افزایش سطح برای انتقال جرم را فراهم می‌کند [۲۰-۱۷]. از مهم‌ترین برتری‌های سامانه جذب به کمک موج فراصوت می‌توان به موردهای زیر اشاره کرد:

- کاهش اندازه‌های فیزیکی این دستگاه در مقایسه با سامانه‌های جذب دیگر مانند ستون حباب، بسترهای پرشده و غیره.
- افزایش سطح به صورت چشمگیر بدون نیاز به سینی، پرکن و یا همزن.

- از انباشتگی ذره‌های جامد در مقیاس صنعتی (به دست آمده از خوردگی و ذره‌های سیلیس در خط گاز) می‌تواند جلوگیری کند.
- نرخ جذب بالای به دست آمده می‌تواند ارتفاع برج‌های جذب را کاهش دهد.

البته، از عیب‌های احتمالی این سامانه می‌توان به موردهای زیر اشاره نمود: ناشناخته بودن اثرهای احتمالی موج فرکانس بالای فراصوت بر محیط‌زیست و موجودهای زنده، احتمال عبور فاز مایع به صورت ذره‌های ریز همراه فاز گاز در سامانه پیوسته، پیچیدگی برهمکش پارامترهای فشار، توان فراصوت و دما در شرایط جذب پیوسته، شکننده بودن پیزوالکتریک‌های مولد فراصوت در محیط‌های فشار بالا. در این مطالعه تلاش شد با ساخت دستگاه، شرایط مناسبی برای اثربخشی موج فراصوت بر عملیات جذب گاز مایع، ارایه شود. به همین منظور از موج فراصوت با فرکانس ۱/۷ مگاهرتز برای جذب گاز کربن دی‌اکسید استفاده شد. طی آزمایش‌های گوناگون، کاهش فشار جزئی ثبت و بررسی شد. در ادامه، با محاسبه ضریب انتقال جرم و مقایسه با یک همزن مغناطیسی، کارایی این روش مورد ارزیابی قرار گرفت.

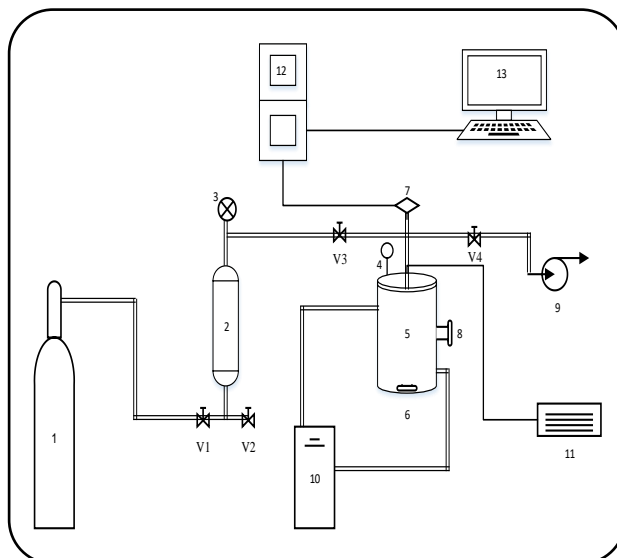
بخش تجربی

مواد

گاز کربن دی‌اکسید با خلوص ۹۹/۹۹ درصد مولی، از شرکت سبلان گاز تهران تهیه شد. در این پژوهش آب مقطر برای اندازه‌گیری حلالیت کربن دی‌اکسید مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱ - مشخصه‌های نشانه‌های راهنمای شکل ۱

علائم	توضیحات	علائم	توضیحات
۱	سیلندر گاز CO ₂	۸	شیشه رویت
۲	محفظه بارگیری	۹	پمپ خلا
۳	گیج فشار ۲۵ بار WIKA	۱۰	حمام آب تمام دیجیتال با دقت ۰/۱ درجه
۴	سنسور دما مدل PT100 با دقت ۰/۱ ± درجه	۱۱	منبع تغذیه فراصوت مدل PS-303D
۵	محفظه جذب فراصوت	۱۲	نمایشگر دما و فشار به همراه دیتالاگر PCI-6503
۶	مبدل فراصوت فرکانس ۱/۷ مگاهرتز AGPTEK	۱۳	سامانه ثبت داده‌ها
۷	ترنسمیتر فشار ۱۶ بار WIKA مدل A-10	V	شیر



شکل ۱ - شمای دستگاه مورد استفاده برای جذب کربن دی اکسید با استفاده از موج فراصوت

گوناگون در محلول آب را نشان می‌دهد. مشاهده‌ها بیانگر این است که در فرایند اتمیزه شدن، وضعیت قطره‌ها بر روی سطح مایع در موردهای گوناگون متفاوت است. برای تشکیل چشمه فراصوت و شروع اتمیزاسیون نیاز به کم‌ترین توانی است که به آن نقطه شکست مایع یا نقطه آستانه گفته می‌شود. با توجه به شکل ۵ (الف و ب) وقتی که توان فراصوت زیر ۲/۱۶ وات (آستانه) است، نرخ اتمیزاسیون به تقریب صفر است. در این حالت هیچ چشمه قابل دیدن تولید نمی‌شود و تنها یک اغتشاش کم در سطح مایع ایجاد می‌شود. با افزایش توان به ۴/۳۲ وات (ب)، مقدار کمی از مایع اتمیزه می‌شود و ناحیه چشمه فراصوت به وجود می‌آید. پس از آن با افزایش بیش‌تر توان و دامنه ارتعاش (ت) نرخ تولید قطره‌های ریز بیش‌تر می‌شود و شرایط مناسبی را برای بهبود فرایند انتقال جرم می‌سازد.

اثر توان موج فراصوت بر فرایند جذب کربن دی اکسید

شکل ۳ پروفیل افت فشار جذب در سامانه انتقال جرم گاز - مایع با توان‌های گوناگون فراصوت فرکانس بالا (۱.۷ مگاهرتز) با فشار اولیه ۸ بار، دمای ۲۵ سلسیوس و با حجم ۸۰ میلی‌لیتر آب را نشان می‌دهد. افت فشار در توان‌های بالای فراصوت به طور چشمگیری سریع‌تر از توان‌های پایین‌تر است. این نتیجه‌ها بیانگر آن است که توان فراصوت بالاتر منجر به تشکیل چشمه فراصوت می‌شود. در این منطقه یک مقدار مشخصی از مایع اتمیزه می‌شود و قطره‌های بسیار ریزی تشکیل می‌شود؛ که این قطره‌ها سطح بزرگی را برای فرایند انتقال جرم فراهم می‌کنند. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود در توان‌های پایین‌تر افزایش ناچیزی در نرخ

در آب به روش جذب فیزیکی به وسیله معادله (۱) به دست آمد [۲۲]. در معادله زیر، پروفیل افت فشار مدنظر گرفته شد که در آن P_{eq} فشار تعادلی پایانی، P_0 فشار اولیه و P'_{eq} فشار تعادلی پیش از فشرده‌گی بود. منظور از فشار تعادلی پیش از فشرده‌گی، فشار اشباع پیش از تزریق کربن دی اکسید به محفظه جذب و آغاز آزمایش است که در این معادله صفر در نظر گرفته شده است.

$$\ln \left(\frac{P_0 - P_{eq}}{P(t) - P_{eq}} \right) = \left(\frac{P_0 - P'_{eq}}{P_{eq} - P'_{eq}} \right) (K_L a)^{US} (t - t_0) \quad (1)$$

برای یافتن ضریب انتقال جرم، نمودار معادله (۱) رسم شد و با استفاده از شیب نمودار مقدار $(K_L a)^{US}$ به دست آمد. فاکتور افزایشی نیز به وسیله معادله (۲) محاسبه شد.

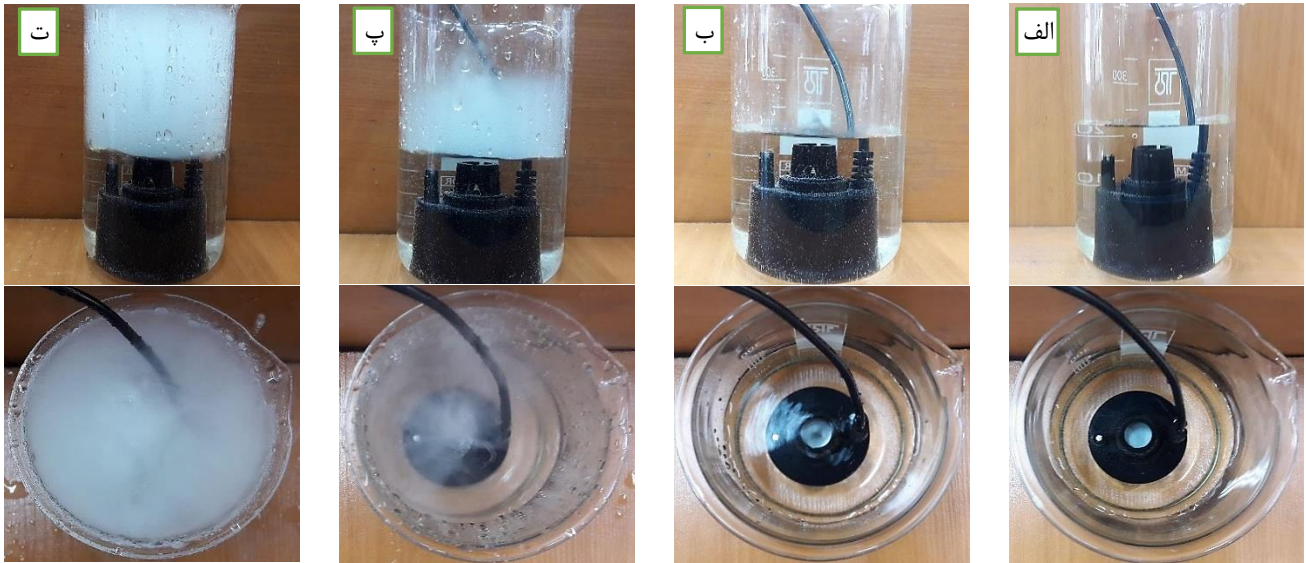
$$E = \frac{(K_L a)^{US}}{(K_L a)^0} \quad (2)$$

E فاکتور افزایشی است که در آن $(K_L a)^{US}$ ضریب انتقال جرم به کمک تابش موج فراصوت و $(K_L a)^0$ ضریب انتقال جرم بدون تابش موج فراصوت می‌باشد.

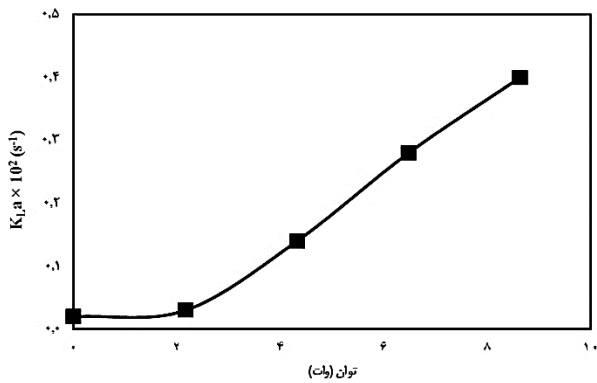
نتیجه‌ها و بحث

ارزیابی تشکیل چشمه صوتی

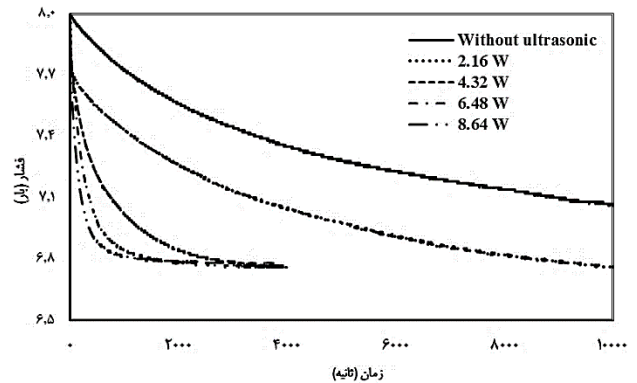
توان اعمال شده به مبدل فراصوت تأثیر زیادی بر نرخ تولید قطره‌های مایع دارد بنابراین اثرهای آن بر اتمیزاسیون مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ تصویرهای اتمیزاسیون فراصوت را در توان‌های



شکل ۲ - عکس‌های اتمیزاسیون به کمک موج فراصوت برای توان‌های گوناگون در محلول آب: (الف) ۰ وات، (ب) ۲/۱۶ وات، (پ) ۴/۳۲ وات، و (ت) ۶/۴۸ وات در دمای محیط



شکل ۴ - نمودار ضریب انتقال جرم برحسب توان در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس



شکل ۳ - نمودار افت فشار برحسب زمان در طی فرایند جذب با استفاده از موج فراصوت فرکانس بالا در توان‌های گوناگون، در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس

۸/۶۴ وات، افزایش می‌یابد. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد چشمه فراصوت و اتمیزاسیون در توان‌های پایین‌تر تشکیل نمی‌شود بنابراین در توان‌های پایین شاهد افزایش چندانی در ضریب افزایشی نیستیم؛ بنابراین می‌توان یک معادله مستقیم بین توان فراصوت با افزایش انتقال جرم را پس از شروع شکل‌گیری چشمه نتیجه گرفت.

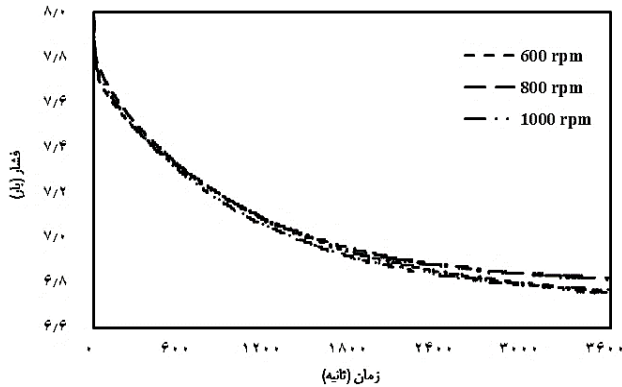
مقایسه اثرگذاری موج فراصوت با همزن مغناطیسی

برای بررسی بهتر اثرگذاری موج فراصوت فرکانس بالا در جذب و مقایسه با سایر روش‌ها، یک همزن مغناطیسی جایگزین مبدل فراصوت شد. اثر همزن مغناطیسی بر جذب کربن دی‌اکسید مطابق

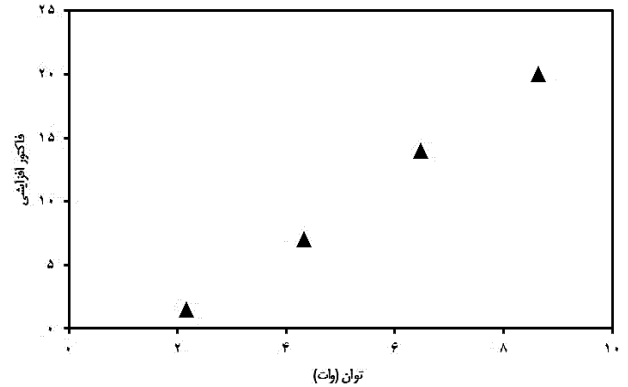
جذب دیده می‌شود زیرا نیروی جریان^۱ برای غلبه بر کشش سطحی لایه مایع کافی نیست و چشمه فراصوت تشکیل نمی‌شود؛ بنابراین نیروی جریان و نرخ جریان چشمه فراصوت به طور مستقیم با توان متناسب هستند.

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب ضریب انتقال جرم و ضریب افزایشی در توان‌های گوناگون فراصوت در فشار جذب اولیه ۸ بار را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۴ با افزایش توان فراصوت افزایش چشمگیری در ضریب انتقال جرم دیده می‌شود. نتیجه‌های شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که روند انتقال جرم جذب تا ۲۰ برابر در توان

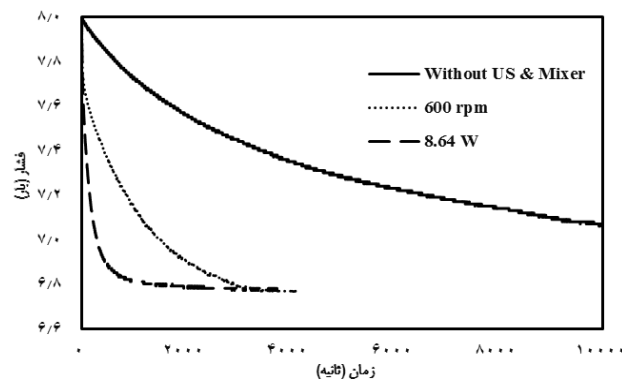
(۱) Ultrasonic streaming force



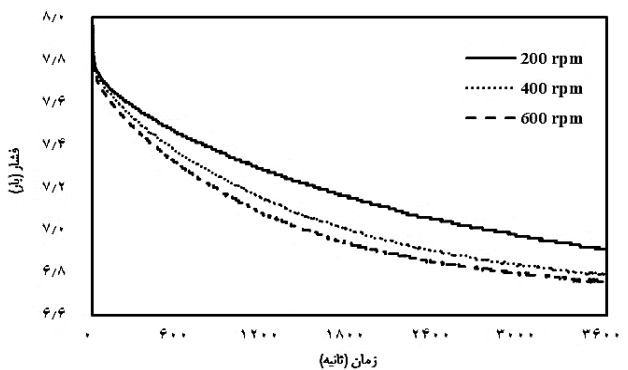
شکل ۷ - نمودار افت فشار برحسب زمان تحت دورهای ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ rpm در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس



شکل ۵ - نمودار فاکتور افزایشی برحسب توان در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس



شکل ۸ - نمودار افت فشار برحسب زمان در طی فرایند جذب با استفاده از موج فراصوت فرکانس بالا، همزن مغناطیسی و بدون همزن و موج فراصوت در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس

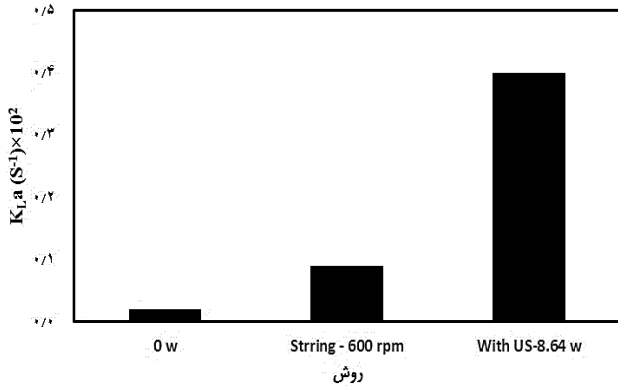


شکل ۶ - نمودار افت فشار برحسب زمان تحت دورهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ rpm در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس

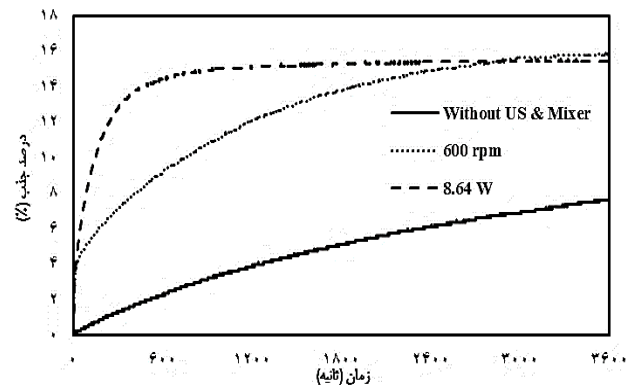
شکل ۸ پروفیل افت فشار برای سه حالت بدون استفاده از موج فراصوت و همزن، استفاده از همزن و استفاده از موج فراصوت با توان ۸/۶۴ وات را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، افت فشار زیر تابش موج فراصوت به طور چشمگیری سریع‌تر از سایر شرایط اتفاق می‌افتد. همچنین بر اساس نتیجه‌های به دست آمده استفاده از موج فراصوت تأثیری در بهبود میزان جذب نداشت و به تقریب میزان افت فشار و جذب یکسانی نسبت به همزن به دست آمد.

برای ارزیابی تأثیر موج فراصوت فرکانس بالا بر میزان جذب CO_2 ، سه حالت بدون استفاده از موج فراصوت و همزن، استفاده از همزن و موج فراصوت در توان ۸/۶۴ وات و فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس بررسی شدند. شکل ۹ درصد جذب CO_2 در برابر زمان را نشان می‌دهد. طبق نتیجه‌های به دست آمده درصد جذب برای هر دو حالت فراصوت و همزن به تقریب یکسان (حدود ۱۵ درصد)

شکل‌های ۶ و ۷ در دمای ۲۵ سلسیوس، فشار ۸ بار و حجم ۸۰ میلی‌لیتر برای آب در دورهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ rpm بررسی شد. در همه آزمایش‌ها توجه به این نکته ضروری است که سرعت همزن به قدری بالا نباشد که باعث شود سطح تماس دو فاز گاز و مایع تشکیل گرداد دهد. دلیل این امر را می‌توان به علت دفع گاز کربن دی‌اکسید جذب شده به صورت فیزیکی در اثر شدت تلاطم ایجاد شده دانست. مطابق شکل ۶ افزایش دور همزن تا ۶۰۰ rpm باعث اختلاط بهتر و افزایش انتقال جرم شد ولی همان‌گونه که از شکل ۷ دیده می‌شود افزایش دور بیش از این مقدار بهبود چشمگیری بر روی جذب نداشت. دورهای بالای همزن باعث حرکت گردابی محلول درون مخزن و کاهش زمان تماس دو فاز می‌شود. از سویی همان‌گونه که اشاره شد در اثر درهمی ایجاد شده در دورهای بالا هم‌زمان دفع فیزیکی نیز صورت می‌گیرد، به همین دلیل در مرحله بعدی دور همزن مغناطیسی بر ۶۰۰ rpm برای مقایسه با موج فراصوت تنظیم شد.



شکل ۱۰ - مقایسه بین همزن مغناطیسی (۶۰۰ rpm)، موج فراصوت (۸/۶۴ وات) و بدون همزن و موج فراصوت (۰ وات) در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس



شکل ۹ - نمودار درصد جذب برحسب زمان در طی فرایند جذب با استفاده از موج فراصوت فرکانس بالا، همزن مغناطیسی و بدون همزن و موج فراصوت در فشار اولیه ۸ بار و دمای ۲۵ سلسیوس

چشمه فراصوت وجود داشته باشد. بدین ترتیب نرخ جذب در توان ۸/۶۴ وات نسبت به عدم تابش فراصوت ۲۰ برابر افزایش یافت. همچنین مقایسه بین سامانه‌های فراصوت فرکانس بالا و همزن مغناطیسی نشان داد که ضریب انتقال جرم با استفاده از موج فراصوت به تقریب ۴/۴ برابر بیش‌تر از همزن مغناطیسی شد که نشانگر عملکرد بهتر این سامانه بود. در پایان با توجه به نتیجه‌ها و برتری‌های چشمگیری که به دست آمد، می‌توان پذیرفت که استفاده از موج فراصوت فرکانس بالا در فرایندهای جذب گاز - مایع، روز به روز بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد و زمینه‌ای برای مطالعه‌های گسترده‌تر می‌باشد.

فهرست نمادها

P_0	فشار اولیه
P_{eq}	فشار تعادلی نهایی
P'_{eq}	فشار تعادلی پیش از فشردگی
$(K_L a)^{US}$	ضریب انتقال جرم با تابش موج فراصوت
$(K_L a)^0$	ضریب انتقال جرم بدون تابش موج فراصوت
E	فاکتور افزایشی

است. با این وجود زمان رسیدن به بیش‌ترین میزان جذب در حالت فراصوت، یک چهارم حالت همزن می‌باشد. روشن است که موج فراصوت تأثیر مثبتی بر میزان جذب CO₂ ندارد. در حقیقت موج فراصوت تنها تأثیر فیزیکی بر روی محلول گذاشته و با افزایش سطح تماس تنها باعث افزایش نرخ جذب می‌شود. شایان ذکر است که توان مصرفی سامانه فراصوت یادشده و همزن مغناطیسی، در این پروژه به ترتیب حدود ۸/۶۴ و ۸/۹۷ وات به دست آمده است که نشان‌دهنده برابر بودن تقریبی انرژی مصرفی هر دو سامانه می‌باشد. در نتیجه، به طور کلی برتری روش فراصوت در این پژوهش، از دیدگاه سرعت جذب، چشمگیر بوده است و پارامتر مقدار جذب و انرژی مصرفی در مقایسه با روش همزن، تفاوت چندانی نداشته است.

شکل ۱۰ ضریب انتقال جرم تحت سه حالت ذکر شده و با شرایط یکسان را نشان می‌دهد. بر اساس نتیجه‌ها ضریب انتقال جذب به کمک سامانه فراصوت به تقریب ۴/۴ برابر بیش‌تر از همزن مغناطیسی با دور ۶۰۰ rpm شد (با استفاده از معادله (۱)) که نشانگر عملکرد بهتر سامانه فراصوت نسبت به همزن مغناطیسی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چگونگی تشکیل چشمه صوتی و اثرگذاری آن به منظور جذب گاز کربن دی اکسید با به کارگیری موج فراصوت فرکانس بالا مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از محلول آب استفاده شد و مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در سامانه‌های فراصوت یعنی توان در بازه ۲/۱۶ تا ۸/۶۴ وات مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ها بیانگر افزایش نرخ جذب با افزایش توان داشت؛ در نتیجه توان باید به گونه‌ای تنظیم شود که قدرت کافی برای اتمیزاسیون و تشکیل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

مراجع

- [1] Irani V., Maleki A., Tavasoli A., [CO₂ Absorption Enhancement in Graphene-Oxide/MDEA Nanofluid](#), *J. Environ. Chem. Eng.*, **7**: 102782 (2019).
- [2] Kenarsari, S. D., Yang D., Jiang G., Zhang S., Wang J., Russell A. G., Wei Q., Fan M., [Review of Recent Advances in Carbon Dioxide Separation and Capture](#), *Rsc Adv.*, **3**: 22739–22773 (2013).
- [3] Nazari Kudahi S., Noorpoor A., Mahmoodi N.M., [Adsorption Performance Indicator for Power Plant CO₂ Capture on Graphene Oxide/TiO₂ Nanocomposite](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng (IJCCE)*, **38(3)**: 293–307 (2019).
- [4] Aghel B., Heidaryan E., Sahraie S., Nazari M., [Optimization of Monoethanolamine for CO₂ Absorption in a Microchannel Reactor](#), *J. CO₂ Util.*, **28**: 264–273 (2018).
- [5] Dharmalingam S., Park K.T., Lee J.-Y., Park I.-G., Jeong S. K., [Catalytic Effect of Metal Oxides on CO₂ Absorption in an Aqueous Potassium Salt of Lysine](#), *J. Ind. Eng. Chem.*, **68**: 335–341 (2018).
- [6] Rahbari-Sisakht M., Emadzadeh D., Fauzi Ismail A., Korminouri F., Matsuura T., Mayahi A.R., [Influence of Air-Gap Length on CO₂ Stripping from Diethanolamine Solution and Water Performance of Surface Modified PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng., (IJCCE)*, **37(4)**: 117–129 (2018).
- [7] Elhajj J., Al-Hindi M., Azizi F., [A Review of the Absorption and Desorption Processes of carbon Dioxide in Water Systems](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**: 2–22 (2013).
- [8] Tan L.S., Lau K.K., Bustam M.A. Shariff A.M., [Removal of High Concentration CO₂ from Natural Gas at Elevated Pressure via Absorption Process in Packed Column](#), *J. Nat. Gas Chem.*, **21**: 7–10 (2012).
- [9] Wang Y., Zhao L., Otto A., Robinius M., Stolten D., [A Review of Post-combustion CO₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants](#), *Energy Procedia*, **114**: 650–665 (2017).
- [10] Ensminger D., Bond L.J., “[Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications](#)”, CRC Press, (2011).
- [11] Sancheti S.V., Gogate P.R., [A Review of Engineering Aspects of Intensification of Chemical Synthesis using Ultrasound](#), *Ultrasonics Sonochemistry*, **36**: 527–543 (2017).
- [12] Sharma S.K., Sanghi R., [Advances in Water Treatment and Pollution Prevention](#), Springer Science & Business Media, (2012).
- [13] Zhang H., Duan L., Zhang D., [Absorption Kinetics of Ozone in Water with Ultrasonic Radiation](#), *Ultrason. Sonochem.*, **14**: 552–556 (2007).
- [14] Laugier F., Andriantsiferana C., Wilhelm A.-M., Delmas H., [Ultrasound in Gas–Liquid Systems: Effects on Solubility and Mass Transfer](#), *Ultrason. Sonochem.*, **15**: 965–972 (2008).
- [15] Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N., [Effect of Ultrasound on the Dissolution of Carbon Dioxide in Water](#), *Theor. Found. Chem. Eng.*, **45**: 21–25 (2011).

- [16] Sainz Herrán N., Casas López, J.L., Sánchez Pérez J.A., [Gas-Liquid Mass Transfer in Sonicated Bubble Columns. Effect of Reactor Diameter and Liquid Height](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**: 2769–2774 (2012).
- [17] Tay W.H., Lau K.K. Shariff A.M., [High Frequency Ultrasonic-Assisted Chemical Absorption of CO₂ using Monoethanolamine \(MEA\)](#), *Sep. Purif. Technol.*, **183**: 136–144 (2017).
- [18] Kudo T., Sekiguchi K., Sankoda K., Namiki N., Nii S., [Effect of Ultrasonic Frequency on Size Distributions of Nanosized Mist Generated by Ultrasonic Atomization](#), *Ultrason. Sonochem.*, **37**: 16–22 (2017).
- [19] Yasuda K., Honma H., Xu Z., Asakura Y., Koda S., [Ultrasonic Atomization Amount for Different Frequencies](#), *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50(7S)**: 07HE23 (2011).
- [20] Yasuda K., Bando Y., Yamaguchi S., Nakamura M., Oda A., Kawase Y., [Analysis of Concentration Characteristics in Ultrasonic Atomization by Droplet Diameter Distribution](#), *Ultrason. Sonochem.*, **15**: 37–41 (2005).
- [21] Torralba-Calleja E., Skinner J., Gutiérrez-Tauste D., [CO₂ Capture in Ionic Liquids: A Review of Solubilities and Experimental Methods](#), *J. Chem.*, **2013**: 1-16 (2013).
- [22] Zieverink M.M.P., Kreutzer M.T., Kapteijn F., Moulijn J.A., [Gas-Liquid Mass Transfer in Benchscale Stirred Tanks Fluid Properties and Critical Impeller Speed for Gas Induction](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**: 4574–4581 (2006).