

اندازه گیری ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیال آب - گاما آلومینا در دمای ثابت

منوچهر منوچهریان فرد، حسین بیکی*⁺

فوجان، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین فوجان، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۶۷۳۳۵ - ۹۴۷۷۱

چکیده: در این مطالعه تجربی، اندازه گیری ضریب نفوذ مولکولی بنزوئیک اسید در نانوسیال‌ها پایه آبی دارای نانوذره‌های گاما آلومینا انجام شد. قطر نانوذره‌های مورد استفاده بین ۱۰ nm تا ۲۰ nm بود. دامنه نسبت‌های حجمی نانوذره‌ها به کار گرفته شده از ۰/۲۵٪ تا ۰/۸٪ بود. آزمایش‌ها در دمای ثابت ۲۰ °C انجام شد. نتیجه‌ها نشان دادند که نانوذره‌های گاما آلومینا بر نفوذ جرم در نانوسیال‌ها بی‌اثرند و هیچ گونه تغییر چشمگیری در ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیال‌های آب - گاما آلومینا نسبت به ضریب نفوذ آن در آب دیده نشد.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال‌ها؛ بنزوئیک اسید؛ ضریب نفوذ؛ نانوذره‌های گاما آلومینا.

KEY WORDS: Nanofluids; Benzoic acid; Diffusion coefficient; γ -Al₂O₃ nanoparticles.

مقدمه

بهینه از نانوذره‌ها در سیال پایه که در آن بیش‌ترین نرخ انتقال جرم صورت می‌گیرد را گزارش داده‌اند [۹ - ۶]. الی^(۱) و همکاران به صورت آزمایشگاهی جذب اکسیژن در نانوسیال‌ها پایه آبی را بررسی کردند [۱۰]. آن‌ها گزارش دادند که وجود نانوذره‌های آهن اکسید، انتقال گاز اکسیژن به مایع را تا ۶ برابر افزایش می‌دهد. جونگ^(۲) و همکاران جذب کربن دی اکسید در نانوسیال‌های متانول - آلومینا را برای نسبت‌های حجمی زیر ۰/۱٪ نانوذره‌های مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. بر اساس نتیجه‌های آن‌ها با افزایش نسبت حجمی نانوذره‌ها مقدار جذب بیشتر شده و بیش‌ترین مقدار افزایش تا ۱/۰۸۳ برابر می‌باشد. به طور همانند، لی^(۳) و همکاران نیز با بررسی آزمایشگاهی جذب کربن دی اکسید در متانول، افزایش در نرخ انتقال جرم در حضور نانوذره‌های آلومینا و سیلیکا را اعلام کردند [۱۲].

به سوسپانسیون مایعات رقیق دارای نانومواد، نانوسیال گفته می‌شود. بیش‌تر پژوهش‌های پیشین در زمینه نانوسیال‌ها مربوط به انتقال گرما در آن‌ها بوده و نتیجه‌های به دست آمده از آن‌ها افزایش ویژگی‌های گرمایی در نانوسیال‌ها را نسبت به سیال پایه نشان می‌دهند [۱]. با توجه به نتیجه‌های دلخواه اثر نانوذره‌ها بر فرایند انتقال گرما [۵ - ۲]، و نیز همانندی مکانیسم‌های آن با انتقال جرم، پژوهش‌ها در زمینه انتقال جرم در نانوسیال‌ها نیز صورت گرفته است. مطالعه‌ها بر روی اثر نانوذره‌ها بر فرایند انتقال جرم در دو بخش عمده تعیین ضریب انتقال جرم و تعیین ضریب نفوذ جرم طبقه بندی می‌شوند. بخش اول مطالعه‌ها مربوط به ضریب انتقال جرم در نانوسیال‌ها است. در زمینه ضریب انتقال جرم بیشتر مطالعه‌ها، افزایش در نرخ انتقال جرم در نانوسیال‌ها و نیز وجود یک کسر حجمی

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: hbeiki@qiet.ac.ir

(۱) Olle et al.

(۳) Lee et al.

(۲) Jung et al.

نانوذره‌ها بیشتر می‌شود [۲۶]. بر خلاف افزایش‌های چشمگیر گزارش شده برای ضریب نفوذ در نانوسیال‌ها، *تورانو* و *تولماچیو*^(۸) [۲۷] و همچنین *جراردی* و *همکاران*^(۹) [۲۸] ضریب خود نفوذی آب را در سوسپانسیون بر پایه آب نانوذره‌های سیلیکا و آلومینا را اندازه‌گیری کردند. بر اساس گزارش‌های آن‌ها ضریب خود نفوذی در حضور نانوذره‌ها به ترتیب تا ۰/۷ و ۰/۹ برابر کاهش می‌یابد. در ادامه نتیجه‌های متضاد گزارش شده برای ضریب نفوذ در حضور نانوذره‌ها، *اوزتورک* و *همکاران*^(۱۰) نتیجه‌های خود را مبنی بر بی‌اثر بودن نانوذره‌ها بر ضریب نفوذ گزارش دادند. آن‌ها ضریب نفوذ رنگ را در نانوسیال آب - آلومینا برای نسبت‌های حجمی زیر ۱٪ اندازه‌گیری کرده و هیچ‌گونه تغییر در ضریب نفوذ را مشاهده نکردند [۲۹]. در سال ۲۰۱۰ میلادی *ویلیوکس* و *کولومب*^(۱۱) به صورت تجربی ضریب نفوذ رودامین را در نانوسیال آب - آلومینا را برای نسبت‌های حجمی زیر ۴٪ نانوذره‌ها مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتیجه‌های آن‌ها ضریب نفوذ در ابتدا با افزایش نسبت حجمی نانوذره‌ها بیشتر شده و سپس با افزایش کسر حجمی نانوذره‌ها رفتار وارون دیده می‌شود. در آزمایش آن‌ها ضریب نفوذ رودامین در کسر حجمی ۲٪ تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد [۳۰]. در سال ۲۰۱۱ میلادی، *سویا* و *همکاران*^(۱۲) در بررسی اثر نانوذره‌های گوناگون بر ضریب نفوذ، هیچ‌گونه تغییر چشمگیری در دامنه غلظت‌های استفاده شده ندیدند. آن‌ها در آزمایش‌های خود دو نانوسیال پایه آبی آلومینا و سیلیکا را با نسبت‌های حجمی به ترتیب زیر ۱٪ و ۱/۷٪ به کار گرفتند [۳۱]. به تازگی *اشرف منصوری* و *همکاران*^(۱۳) اثر نانوذره‌های سیلیکا بر ضریب خود نفوذی آب و ضریب نفوذ ترشیو بوتانول در آب را برای نسبت‌های حجمی زیر ۱٪ و دماهای گوناگون مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها افزایش ناچیزی کمتر از ۱۰٪ برای ضریب خود نفوذی و نیز ضریب نفوذ در دامنه نسبت‌های حجمی به کار گرفته در کار خود گزارش دادند [۳۲].

همچنین برخی از پژوهش‌ها در مورد فرآیند جذب، نشان داده‌اند که وجود نانوذره‌های گوناگون جذب را در نانوسیال‌ها افزایش می‌دهد [۱۲-۲۰]. *سارا* و *همکاران*^(۱) در بررسی اثر نانوذره‌های مس اکسید بر انتقال جرم با استفاده از فناوری نفوذ جریان محدود الکتروشیمیایی^(۲) یافتند که افزودن نانوذره‌ها، انتقال جرم را تا ۵۰٪ نسبت به سیال پایه افزایش می‌دهد [۲۱]. با استفاده از فناوری نفوذ جریان محدود الکتروشیمیایی چند پژوهش دیگر نیز انجام شده است که همگی افزایش انتقال جرم در حضور نانوذره‌ها را گزارش داده‌اند [۷-۹].

بر خلاف افزایش‌های گزارش شده برای ضریب انتقال جرم در نانوسیال‌ها نسبت به آن در سیال پایه، تعدادی از پژوهشگران گزارش داده‌اند که ضریب انتقال جرم در نانوسیال‌ها کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش نسبت حجمی نانوذره‌ها بیش‌تر می‌شود. *ون* و *همکاران*^(۳) [۲۲] و نیز *فنگ* و *همکاران*^(۴) [۲۳] دیدند که ضریب انتقال جرم در جذب اکسیژن در آب در حضور نانوذره‌های تیتانیوم اکسید به میزان ۲۰٪ کاهش می‌یابد. *پارک* و *همکاران*^(۵) [۲۴] نیز به صورت تجربی جذب کربن دی‌اکسید در نانوسیال‌های آب - سیلیکا را برای آمین‌های گوناگون بررسی کردند. بر اساس مشاهده‌های آن‌ها ضریب انتقال جرم در حضور نانوذره‌های سیلیکا به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد.

بخش دوم مطالعه‌ها بر روی ضریب نفوذ مولکولی در نانوسیال‌ها متمرکز است. *کریشنامورتی* و *همکاران*^(۶) پیشگامان پژوهش در زمینه نفوذ جرم در نانوسیال‌ها هستند. آن‌ها ضریب نفوذ رنگ فلئوئورسان در نانوسیال‌های آب - آلومینا را برای نسبت‌های حجمی زیر ۱٪ اندازه‌گیری کردند. بر اساس نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش آن‌ها ضریب نفوذ رنگ در نسبت حجمی ۰/۵٪ تا ۱۴ برابر نسبت به آن در آب خالص افزایش می‌یابد [۲۵]. *فانگ* و *همکاران*^(۷) نیز نشان دادند که ضریب نفوذ رودامین در نانوسیال آب - مس تا ۲۶ برابر بزرگتر از آن در سیال پایه است. آن‌ها دیدند که افزایش در ضریب نفوذ با افزایش در نسبت حجمی

(۱) Sara et al.

(۲) Electrochemical limiting diffusion current technique (ELDCT)

(۳) Wen et al.

(۴) Feng et al.

(۵) Park et al.

(۶) Krishnamurthy et al.

(۷) Fang et al.

(۸) Turanov & Tolmachev

(۹) Gerardi et al.

(۱۰) Ozturk et al.

(۱۱) Veilleux & Coulombe

(۱۲) Subba et al.

(۱۳) Ashrafmansouri et al.

جدول ۱- ویژگی‌های مورد استفاده در محاسبه‌ها.

ویژگی	مقدار
دانسیتته نانوذره‌ها (g/cm^3)	۳/۶۵
دانسیتته سیال پایه در دمای آزمایش (g/cm^3)	۰/۹۷
قطر نانوذره‌ها (nm)	۱۰-۲۰

که در آن M_w وزن مولکولی جسم جامد (بنزوئیک اسید)، Δt زمان لازم برای نفوذ، m_0 و m_t جرم کره جامد به ترتیب در لحظه شروع و پایان آزمایش نفوذ می باشد. با انتگرال گیری از معادله (۱) و با در نظر گرفتن شرط غلظت تعادلی در سطح کره بنزوئیک اسید نرخ انتقال جرم به صورت زیر ساده می شود.

$$\frac{m_0 - m_t}{M_w \Delta t} = \frac{4\pi D_{AB} \Gamma R}{r - R} (C_s - C_b) \quad (3)$$

که در آن C_s غلظت اشباع (میزان حلالیت) بنزوئیک اسید در سیال، C_b غلظت بنزوئیک اسید در توده سیال و R شعاع کره بنزوئیک اسید می باشد.

از آنجا که بیشترین مقدار شعاع معادل با شعاع ظرف آزمایش است، غلظت بنزوئیک اسید در این شعاع معادل با غلظت توده برای انجام محاسبه‌ها در نظر گرفته می شود. بنابراین در معادله (۳) به جای r شعاع ظرف آزمایش و به جای C_b غلظت توده سیال قرار داده می شود.

سرانجام می توان ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در سیال را با استفاده از معادله (۴) محاسبه کرد.

$$D_{AB} = \frac{(m_0 - m_t)(r - R)}{4\pi r R M_w \Delta t (C_s - C_b)} \quad (4)$$

بخش تجربی

تهیه نانوسیال

در این پژوهش نانوسیال‌ها به روش دو مرحله ای تهیه شده‌اند. در این روش نانوذره‌های $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ با خلوص ۹۹/۹۹٪ (Tecnan, Spain) به صورت تدریجی به آب بدون یون افزوده شدند. سپس برای ایجاد سوسپانسیون همگن و پایدار، ابتدا نانوذره‌ها

با توجه به مطالب گفته شده، در زمینه انتقال جرم در نانوسیال‌ها نتیجه‌ها متناقض است. این تناقض برای ضریب نفوذ، با توجه به پژوهش‌های کم‌تر صورت گرفته در این زمینه، بیش‌تر است. بنابراین برای درک بهتر اثر نانوذره‌ها بر ضریب نفوذ به پژوهش‌های بیش‌تری نیاز است. در این پژوهش با استفاده از یک روش پایه‌ای و نتیجه شده از رابطه‌های ریاضی حاکم بر انتقال جرم، به صورت آزمایشگاهی اثر نانوذره‌های گاما آلومینا بر نفوذ بنزوئیک اسید در آب بررسی شده است. روش مورد استفاده در آزمایش‌ها به مراتب کم هزینه تر و ساده تر از کارهای همانند در این زمینه می باشد [۳۲ - ۲۵]. از آنجا که هندسه سامانه مورد استفاده در آزمایش‌ها نفوذ جرم از سطح کره است، این موضوع تحلیل ریاضی مساله را آسان تر می کند. در واقع به دلیل خاص بودن شکل هندسی نمونه مورد آزمایش تحلیل ریاضی برای نتیجه‌های آزمایش آسان تر است.

بخش نظری

هنگامی که یک کره جامد در یک سیال ساکن و به دور از هر نوع جابه‌جایی در سطح و درون سیال، قرار می‌گیرد، انتقال جرم از سطح کره در اثر نفوذ مولکولی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت نرخ نفوذ از کره جامد با استفاده از قانون اول فیک محاسبه می‌شود.

$$n_A = -D_{AB} 4\pi r^2 \frac{dC_A}{dr} \quad (1)$$

که در آن D_{AB} ضریب نفوذ مولکولی، r شعاع انتقال جرم و n_A نرخ انتقال جرم بر حسب مول بر ثانیه می باشد. نرخ انتقال جرم به کمک معادله (۲) محاسبه می شود.

$$n_A = \frac{m_0 - m_t}{M_w \Delta t} \quad (2)$$

(1) Transmission electron microscopy (TEM)

مقدار ضریب نفوذ به دست آمد. تمامی آزمایش‌ها در دمای ثابت 20°C انجام شد. از آنجا که در هر آزمایش از سیال و نانوسیال تازه استفاده شد، غلظت بنزوئیک اسید در توده آن‌ها معادل با صفر در نظر گرفته شد. مقدارهای غلظت حد اشباع بنزوئیک اسید در آب، در مراجع موجود است [۳۹ - ۳۳]. در محاسبه غلظت تعادلی بنزوئیک اسید در دمای آزمایش معادل 24 mol/m^3 در نظر گرفته شد.

نتیجه‌ها و بحث

برای تعیین صحت کار دستگاه آزمایشگاهی، نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش برای تعیین ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در آب با معادله تجربی موجود در مرجع [۴۰] و مقدار گزارش شده در مرجع [۳۳] مقایسه شد. معادله تجربی *لوزار* و *همکاران*^(۱) به صورت زیر می‌باشد [۴۰]:

$$D_{AB} = 2,2 \times 10^{-6} \times \exp\left(\frac{-2295}{T}\right) \quad (5)$$

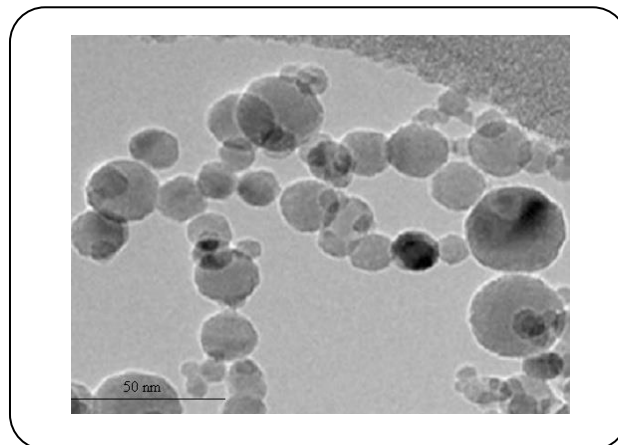
که در آن ضریب نفوذ برحسب m^2/s و دما بر حسب K (درجه کلونین) می‌باشد.

در جدول ۲ مقدار ضریب نفوذ اندازه‌گیری شده برای بنزوئیک اسید در این پژوهش با مقدارهای گزارش شده در مرجع [۳۳] و محاسبه شده با معادله (۵) درون آب با یکدیگر مقایسه شده اند.

میزان انحراف نتیجه‌های آزمایش گزارش شده در جدول ۲ می‌تواند به دلیل کوتاه بودن مدت زمان انتقال جرم و یا کوچک بودن اندازه ظرف باشد.

جهت کاهش خطای تصادفی، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شد. آزمایش تعیین ضریب نفوذ در نانوسیال‌ها با نسبت‌های حجمی گوناگون از نانوذره‌ها به صورت مشابه تکرار شد.

نتیجه‌های اندازه‌گیری ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیال‌ها برای نسبت‌های حجمی نانوذره‌ها به کار گرفته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ برای ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیال‌های آب - گاما آلومینا در دمای 20°C ، بیشترین مقدار افزایش تا ۳٪ نسبت به ضریب نفوذ در آب خالص می‌رسد. این مقدار افزایش برای ضریب نفوذ در نسبت حجمی ۰/۱٪ از نانوذره‌ها قابل دیدن است. در ادامه با افزایش غلظت نانوذره‌ها دامنه تغییرهای ضریب نفوذ کمتر می‌شود.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ عبور الکترونی نانوذره‌های گاما آلومینا.

با استفاده از یک همزن مکانیکی و بعد از آن به کمک دستگاه تولید کننده امواج فراصوت (پارس نهند، ایران)، درون سیال پایه پراکنده شدند. حجم نانوسیال تولیدی در هر مرحله ۵۰۰ میلی‌لیتر بود. در شکل ۱ تصویر میکروسکوپ عبور الکترونی^(۱) نانوذره‌های آلومینا نشان داده شده است. ویژگی‌های فیزیکی مورد استفاده در محاسبه‌ها در جدول ۱ ارایه شده است.

دستگاه آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در سیال در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ دستگاه شامل: ۱- حمام آب گرم جهت ایجاد شرایط دما ثابت، ۲- سیال کاری مورد آزمایش که کره بنزوئیک اسید در مرکز آن قرار می‌گیرد، ۳- کره بنزوئیک اسید، ۴- گیره برای جلوگیری از ایجاد لرزش در ظرف آزمایش درون حمام آب، ۵- ظرف آزمایش که سیال کاری در آن قرار می‌گیرد، ۶- سیم رابط، ۷- سیم مغتول برای قرار دادن کره اسد بنزوئیک درون سیال، می‌باشد.

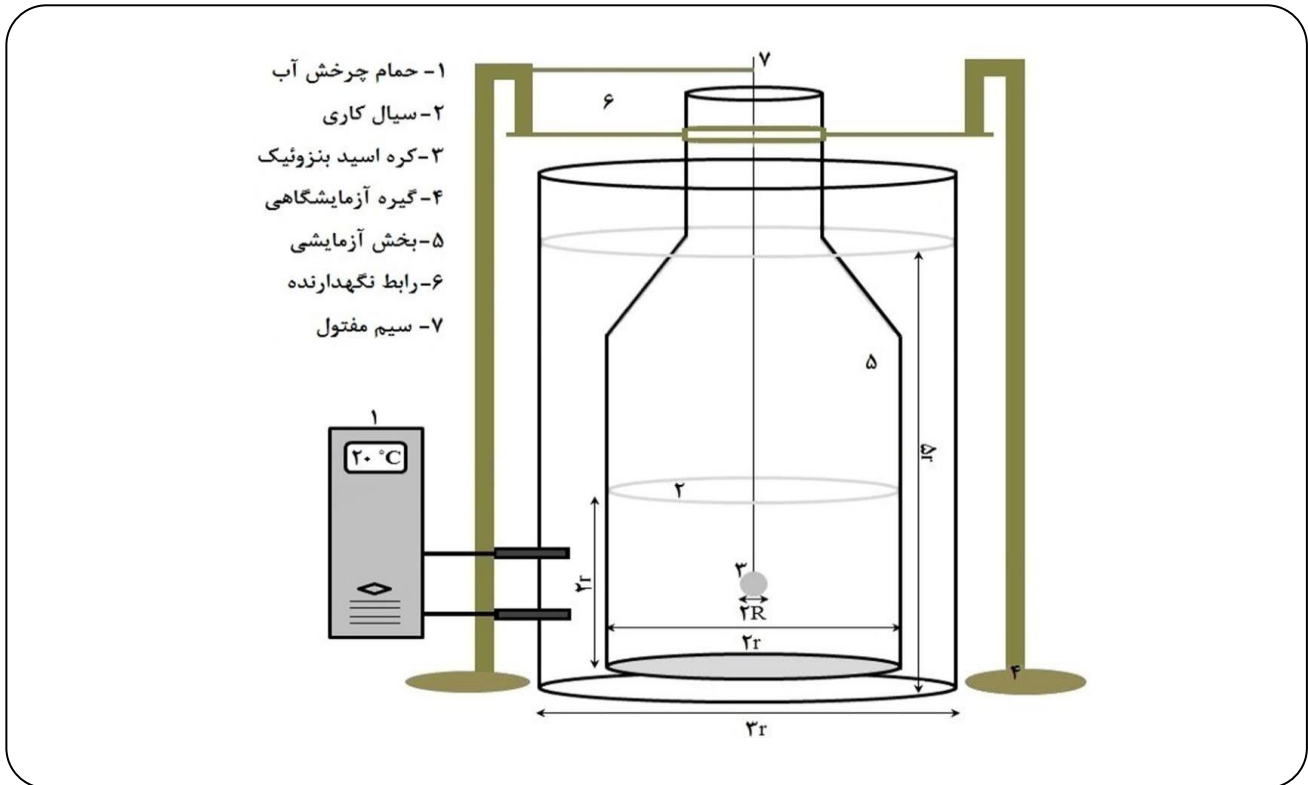
روش انجام آزمایش

در ابتدا کره ای از جنس بنزوئیک اسید با شعاع ۴ mm ساخته شد و سپس درون ظرف آزمایش با شعاع ۴۵ mm قرار گرفت. پس از گذشت زمان ۷۰ min گلوله بنزوئیک اسید از ظرف آزمایش خارج شد. پس از آن سیال کاری با استفاده از همزن مکانیکی به طور کامل همگن شده و با استفاده از آزمون UV غلظت اسید حل شده درون سیال کاری تعیین شد. از روی غلظت اسید مقدار جرم انتقال یافته کره اسیدی به دست آمد. با توجه به معادله (۴) با داشتن مقدار تغییرهای جرم جامد کروی و نیز مقدار $(C_s - C_{bulk})$ ،

(۱) Lozar et al.

جدول ۲- بررسی صحت نتیجه‌های آزمایش.

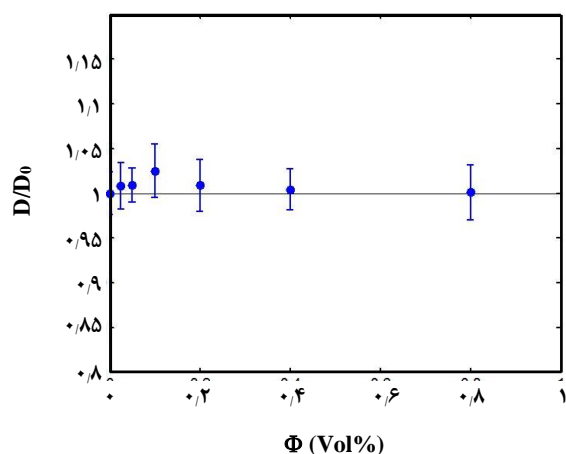
میزان انحراف نتایج آزمایش (%)		$D_{AB} \times 10^{-9} (m^2/s)$			دما (°C)
از رابطه (۵)	از مرجع [۳۳]	رابطه (۵)	مرجع [۳۳]	در این پژوهش	۲۰
۲۰/۵٪	۱۵/۶٪	۰/۸۷۳	۰/۹۱	۱/۰۵۲	



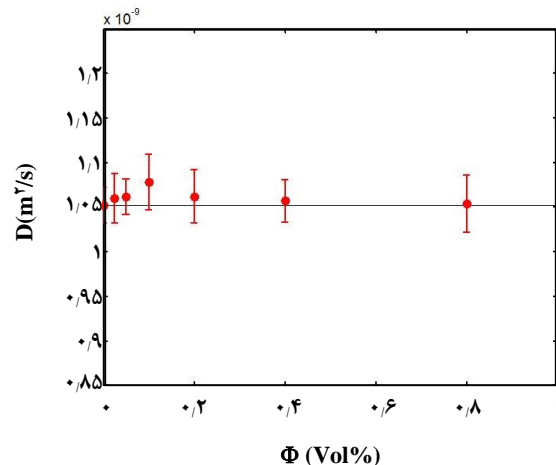
شکل ۲- دستگاه آزمایش برای اندازه گیری ضریب نفوذ.

مولکول‌های آزاد حلال دارند حرکت می‌کنند. این مکانیسم موجب کاهش شدت انتقال جرم می‌شود [۲۸].
 ضریب نفوذ افزایش یافته بنزوئیک اسید که به صورت نسبت ضریب نفوذ آن در نانوسیال‌ها به ضریب نفوذش در سیال پایه تعریف می‌شود، در شکل ۴ نشان داده شده است. می‌توان غالب بودن اثر حرکت براونی نانوذره‌ها و میکرو جابه‌جایی‌های به دست آمده از حرکت آن‌ها را بر افزایش پیچیدگی مسیر نفوذ بنزوئیک اسید در غلظت حجمی ۰/۱٪ از نانوذره‌های گاما آلومینا در شکل ۴ دید. همچنین با توجه به ساکن بودن نانوسیال‌ها در محیط آزمایش به نظر می‌رسد که افزایش پیچیدگی در مسیر نفوذ در غلظت‌های بالای نانوذره‌ها، مکانیسم کنترل کننده‌ای برای نفوذ جرم باشد.

از دلیل‌های افزایش انتقال گرما و جرم در نانوسیال‌ها می‌توان به حرکت براونی نانوذره‌ها و میکرو جابه‌جایی‌های به دست آمده از حرکت چرخشی نانوذره‌ها اشاره کرد [۷، ۸، ۲۵، ۳۰، ۴۱]. اگر چه برخی از پژوهشگران معتقدند که حرکت براونی نانوذره‌ها و میکرو جابه‌جایی به دست آمده از چرخش آن‌ها نمی‌تواند مکانیسم کنترل کننده انتقال گرما و جرم در نانوسیال‌ها باشد [۲۹، ۴۲]. همچنین تجمع نانوذره‌ها در غلظت‌های بالا در نانوسیال‌ها می‌تواند موجب کاهش شدت انتقال جرم شود [۷، ۸]. افزایش در پیچیدگی مسیر نفوذ مولکول‌های ماده حل شونده به دلیل ایستادن نانوذره‌ها در سر راهشان می‌تواند موجب کاهش در نفوذ جرم شود [۲۸]. مولکول‌های حلال لایه‌ای روی سطح نانوذره‌ها تشکیل می‌دهند و با آن‌ها که سرعت نفوذ کمتری نسبت به



شکل ۴- نسبت ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیال به آن در سیال پایه.



شکل ۳- ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیالها در دمای ۲۰ درجه سلسیوس.

فهرست نمادها

C	غلظت بنزوئیک اسید، mol/m^3
D_{AB}	ضریب نفوذ، m^2/s
m	جرم، g
MW	جرم مولکولی، g/mol
n_A	نرخ انتقال جرم، mol/s
r	مختصات شعاعی و شعاع ظرف آزمایش، m
R	شعاع کره بنزوئیک اسید، m
t	زمان، s
T	دما، K

زیر نویسها

A	بنزوئیک اسید
b	توده سیال
s	غلظت اشباع

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۹

خطای معیار در شکل‌های ۳ و ۴، انحراف استاندارد از سه بار تکرار آزمایش‌ها می‌باشد.

نتیجه گیری

ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیال آب - گاما آلومینا با استفاده از یک روش پایه و نتیجه‌گیری شده از رابطه‌های ریاضی حاکم بر انتقال جرم در دمای ۲۰ °C برای دامنه نسبت‌های حجمی به کار گرفته شده از ۰/۰۲۵٪ تا ۰/۸٪ از نانوذره‌ها اندازه‌گیری شد. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش هیچ گونه تغییر چشمگیری برای ضریب نفوذ بنزوئیک اسید در نانوسیال‌ها نسبت به آن در سیال پایه دیده نشد. همچنین بیشترین میزان تغییر جزئی برای ضریب نفوذ مولکولی در نسبت حجمی ۰/۱٪ از نانوذره‌ها صورت گرفت که می‌توان آن را در محدوده خطایی به حساب آورد. در تحلیل نتیجه‌های دیده شده، می‌توان با توجه به ساکن بودن نانوسیال‌ها در محیط آزمایش، خنثی شدن حرکت براونی نانوذره‌ها و میکرو جابه‌جایی‌های به دست آمده از آن‌ها را با افزایش در پیچیدگی مسیر نفوذ مولکول‌های بنزوئیک اسید به دلیل حضور نانوذره‌ها بیان کرد.

مراجع

- [1] Pang C., Lee J.W., Kang Y.T., Review on Combined Heat and Mass Transfer Characteristics in Nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, **87**(0): 49-67 (2015).

- [۲] برزگان، ن.، پناهی زاده، ف.، بررسی کاربرد نانوسیالات اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیوم به عنوان سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دو لوله ای، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، (۳) ۱۱: ۷۵ تا ۸۴ (۱۳۹۰).
- [۳] نظری، م.، کیهانی، م.، سلطان زاده، م.، بررسی تجربی انتقال حرارت نانوسیال آلومینا/آب داخل لوله افقی، *نشریه علمی پژوهشی مکانیک هوافضا*، (۱) ۹: ۴۵ تا ۵۲ (۱۳۹۲).
- [۴] نوعی، ح.، حریری، ف.، نوعی، م.، حسینقلی، ن.، زینالی هریس، س.، بررسی تجربی عملکرد نانوسیال مس اکسید-استون بر بازده گرمایی یک ترموسیفون دوفازی بسته، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۳) ۳۲: ۳۱ تا ۳۸ (۱۳۹۲).
- [5] Mohebbi K., Rafee R., Talebi F., Effect of Rib Shapes on Heat Transfer Characteristics of Turbulent Flow of Al₂O₃-Water Nanofluid Inside Ribbed Tubes, *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **34** (3): 61-77 (2015).
- [6] Saïen J., Bamdadi H., Mass Transfer from Nanofluid Single Drops in Liquid-Liquid Extraction Process, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **51**(14): 5157-5166 (2012).
- [7] Beiki H., Nasr Esfahany M., Etesami N., Laminar Forced Convective Mass Transfer of γ -Al₂O₃/Electrolyte Nanofluid in a Circular Tube. *International Journal of Thermal Sciences*, **64**(0): 251-256 (2013).
- [8] Beiki, H., M. Esfahany, and N. Etesami, Turbulent Mass Transfer of Al₂O₃ and TiO₂ Electrolyte Nanofluids in Circular Tube, *Microfluidics and Nanofluidics*, **15**(4): 1-8 (2013).
- [9] Keshishian N., Nasr Esfahany M., Etesami N., Experimental Investigation of Mass Transfer of Active ions in Silica Nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **46**(0): 148-153 (2013).
- [10] Olle B., Bucak S., Holmes T. C., Bromberg L., Hatton T. A., Wang D. C., Enhancement of Oxygen Mass Transfer Using Functionalized Magnetic Nanoparticles, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **45**(12): 4355-4363 (2006).
- [11] Jung J.-Y., Lee J., Kang Y., CO₂ Absorption Characteristics of Nanoparticle Suspensions in Methanol, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **26**(8): 2285-2290 (2012).
- [12] Lee J.W., Jung J. Y., Lee S. G., Kang Y. T., CO₂ Bubble Absorption Enhancement in Methanol-Based Nanofluids, *International Journal of Refrigeration*, **34**(8): 1727-1733 (2011).
- [13] Kim J.-K., Jung J.Y., Kang Y.T., The Effect of Nano-Particles on the Bubble Absorption Performance in a Binary Nanofluid, *International Journal of Refrigeration*, **29**(1): 22-29 (2006).
- [14] Ma X., Su F., Chen J., Bai T., Han Z., Enhancement of Bubble Absorption Process Using a CNTs-Ammonia Binary Nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **36**(7): 657-660 (2009).
- [15] Pang C. et al., Mass Transfer Enhancement by Binary Nanofluids (NH₃/H₂O + Ag Nanoparticles) for Bubble Absorption Process, *International Journal of Refrigeration*, **35**(8): 2240-2247 (2012).

- [16] Wu W., Chang P., Wei S., Xiang C., Runyu W., Enhancement on $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Bubble Absorption in Binary Nanofluids by Mono Nano Ag, *Huagong Xuebao/CIESC Journal*, **61**(5): 1112-1117 (2010).
- [17] Lee J.K., Koo J., Hong H., Kang T. T., The Effects of Nanoparticles on Absorption Heat and Mass Transfer Performance in $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Binary Nanofluids, *International Journal of Refrigeration*, **33**(2): 269-275 (2010).
- [18] Lee J.K., Kim H., Kim M. H., Koo J., Kang Y. T., The Effect of Additives and Nanoparticles on Falling Film Absorption Performance of Binary Nanofluids ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ + Nanoparticles), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **9**(12): 7456-7460 (2009).
- [19] Komati S., Suresh A.K., CO_2 Absorption Into Amine Solutions: A Novel Strategy for Intensification Based on the Addition of Ferrofluids. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **83**(8): 1094-1100 (2008).
- [20] Komati S., Suresh A.K., Anomalous Enhancement of Interphase Transport Rates by Nanoparticles: Effect of Magnetic Iron Oxide on Gas-Liquid Mass Transfer. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**: 390-405 (2010).
- [21] Sara O.N., Icer F., Sahin B., Effect of Suspended CuO Nanoparticles on Mass Transfer to a Rotating Disc Electrode, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **35**(3): 558-564 (2011).
- [22] Wen J.P., Jia X.Q., Feng W., Hydrodynamic and Mass Transfer of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Internal Loop Airlift Reactors with Nanometer Solid Particles, *Chemical Engineering and Technology*, **28**(1): 53-60 (2005).
- [23] Feng W., Wen J., Fan J., Yuan Q., Jia X., Sun Y., Local Hydrodynamics of Gas-Liquid-Nanoparticles Three-Phase Fluidization, *Chemical Engineering Science*, **60**(24): 6887-6898 (2005).
- [24] Park S.-W., Choi B., Kim S., Lee B., Lee J. W., Absorption of Carbon Dioxide Into Aqueous Colloidal Silica Solution with Diisopropanolamine. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **14**(2): 166-174 (2008).
- [25] Krishnamurthy S., Bhattacharya P., Phelan P.E., Enhanced Mass Transport in Nanofluids, *Nano Letters*, **6**(3): 419-423 (2006).
- [26] Fang X., Xuan Y., Li Q., Experimental Investigation on Enhanced Mass Transfer in Nanofluids. *Applied Physics Letters*, **95**(20) (2009).
- [27] Turanov A.N., Tolmachev Y.V., Heat- and Mass-Transport in Aqueous Silica Nanofluids, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, **45**(12): 1583-1588 (2009).
- [28] Gerardi C., Cory D., Bongiorno J., Hu L. W., McKrell T., Nuclear Magnetic Resonance-Based Study of Ordered Layering on the Surface of Alumina Nanoparticles in Water, *Applied Physics Letters*, **95**(25): 253104, (2009).
- [29] Ozturk S., Hassan Y.A., Ugaz V.M., Interfacial Complexation Explains Anomalous Diffusion in Nanofluids, *Nano Letters*, **10**(2): 665-671 (2010).

- [30] Veilleux J., Coulombe S., A Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy Study of Mass Diffusion Enhancement in Water-Based Alumina Nanofluids, *Journal of Applied Physics*, **108**(10): 104316-104327 (2010).
- [31] Subba-Rao V., Hoffmann P.M., Mukhopadhyay A., Tracer Diffusion in Nanofluids Measured by Fluorescence Correlation Spectroscopy, *Journal of Nanoparticle Research*, **13**(12): 6313-6319 (2011).
- [32] Ashrafmansouri S.S., Esfahany M. N., Azimi G., Etesami N., Experimental Investigation of Water Self-Diffusion Coefficient and Tracer Diffusion Coefficient of Tert-Butanol in Water-Based Silica Nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, **86**(0): 166-174 (2014).
- [33] Delgado J.M.P.Q., Molecular Diffusion Coefficients of Organic Compounds in Water at Different Temperatures. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, **28**(5): 427-432 (2007).
- [34] Delgado J.M.P.Q., Alves M.A., Guedes de Carvalho J.R.F., A Simple and Inexpensive Technique to Measure Molecular Diffusion Coefficients. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, **26**(5): 447-451 (2005).
- [35] Oliveira, A.C., Coelho M. G., Pires R. F., Franco M. R., Solubility of Benzoic Acid in Mixed Solvents. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **52**(1): 298-300, 2006.
- [36] Cussler E.L., "Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems", 3rd ed., Cambridge University Press, (2009).
- [37] Skelland A.H.P., "Diffusional Mass Transfer", John Wiley, (1974).
- [38] Treybal R.E., "Mass Transfer Operations", 3rd ed., New York: McGraw-hill, (1981).
- [39] Dunker C., "Benzoic acid, in Kirk-Othmer Encyclopaedia of Chemical Technology", Interscience. p. 422, (1964).
- [40] Lozar J., Laguerie C., Couderc J.P., Diffusivité de l'acide Benzoi'que Dans l'eau: Influence de la Température. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **53**(2): 200-203 (1975).
- [41] Buongiorno J., Convective Transport in Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, **128**(3): 240-250 (2006).
- [42] Feng X., Johnson D.W., Mass Transfer in SiO₂ Nanofluids: A Case Against Purported Nanoparticle Convection Effects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**(13-14): 3447-3453 (2012).