

مروری بر تأثیر نانوذرات در بهبود ضریب انتقال جرم سیستم (گاز- مایع)

لیلا سعیدنیا^۱، حسن هاشمی پور رفسنجانی^{۱*}، داریوش افزلی^۲

۱- کرمان، دانشگاه شهید باهنر، بخش مهندسی شیمی

۲- کرمان، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، گروه محیط زیست

پیام نگار: h-hashemipour@uk.ac.ir

چکیده

امروزه کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده هوا مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از جمله روشهای کارآمد و مؤثر حذف این گازها، جذب آنها توسط فاز مایع است. استفاده از نانوسیالات، تکنیک جدیدی است که می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال جرم در یک سیستم (گاز- مایع) و در نتیجه بهبود بازدهی در این فرایند گردد. در این مقاله استفاده از نانوسیالات در بهبود ضریب انتقال جرم، به استناد کارهای انجام شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. هرچند که مکانیسم قطعی بهبود انتقال جرم در این سیستم‌ها مشخص نیست، ولی، مکانیسمهای مختلفی خصوصاً در سیستم‌های جذبی آمونیاک ذکر شده است که مهمترین آنها ایجاد جریان‌های میکرونی در سیال به دلیل حرکات براونی نانوذرات و افزایش نگهداشت فاز گاز در نانوسیالات می‌باشد. ضمن اینکه بهبود انتقال گرمای بهتر در سطح تماس دو فاز باعث افزایش پتانسیل جذب خواهد شد. ولی غلظت و نوع نانوذرات در فاز مایع و شدت جریان حجمی گاز ورودی از پارامترهای تأثیرگذاری هستند که تغییرات آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: نانوسیال، جذب گاز، ضریب انتقال جرم، نانوذرات

۱- مقدمه

نانوسیال سریعتر از آب نفوذ می‌کند. به طور کلی، بررسی‌های انجام شده بر روی انتقال جرم در نانوسیالات، نشان‌دهنده بیشتر بودن انتقال جرم در نانوسیالات نسبت به سیال پایه است. بر طبق آزمایشات اولی [۶] استفاده از نانوسیالی شامل ۱٪ از نانوذرات Fe_2O_3 پوشش‌داده شده با اسید اولئیک، ضریب انتقال جرم را در حدود $1/6$ مرتبه و $k_L a$ را در حدود ۶ برابر افزایش می‌دهد. کیونگ‌کیم و گروهش [۷] سرعت جذب در سیستم جذبی (NH_3/H_2O) را در حضور نانوذرات مختلف (Cu, CuO, Al_2O_3) و در درصد‌های مختلف از غلظت آمونیاک در آب مورد بررسی قرار دادند. بیشترین میزان افزایش در جذب به میزان $3/21$ برابر مربوط به نانوذرات Cu بود. این گروه همچنین تأثیر اضافه کردن عوامل فعال

نانوسیال عبارت است از یک فاز مایع که نانوذرات به خوبی در آن پخش شده باشند. از زمانی که واژه نانوسیال نخستین بار توسط چویی [۱] برای افزایش انتقال گرما به کار برده شد، تلاشهای زیادی برای کاربرد عملی نانوسیالات در بهبود انتقال گرما انجام گرفته است. محققان دریافته‌اند که نانوسیالات دارای هدایت گرمایی و ضریب انتقال گرما بالایی می‌باشند [۲،۳]. کبلینسکی و همکارانش [۴] چهار مکانیسم برای افزایش انتقال گرما در نانوسیالات پیشنهاد کرده اند: (۱) حرکات براونی نانوذرات (۲) لایه لایه شدن فاز مایع (۳) خوشه‌ای شدن نانوذرات (۴) خواص حرارتی محیط عمل. اولین بار کریشنامورتی و همکارانش [۵] مشاهده کردند که یک رنگ در یک

در سطح را بررسی کردند [۸]. بر طبق گزارش آنها، اضافه کردن ۷۰۰ ppm از عامل فعال در سطح (۲- اتیل ۱- هگزانول) به سیستم (آب/ آمونیاک) انتقال جرم را تا ۴/۸ برابر افزایش می‌دهد. این در حالی است که وجود همزمان نانوذرات و عامل فعال در سطح باعث افزایش ۵/۳۲ درصدی انتقال جرم می‌شود. یانگ [۹] میزان جذب گاز و انتقال گرما را در یک سیستم فیلم ریزان مورد بررسی قرار داد. محلول مورد استفاده (LiBr/H₂O) و نانوذرات، شامل نانوذرات آهن و نانولوله‌های کربنی است. نتایج نشان داد که افزایش انتقال جرم بیشتر از افزایش انتقال گرماسست. ضمن اینکه نانولوله‌های کربنی، انتقال جرم و گرما را بیشتر از نانوذرات آهن افزایش داده‌اند. اندره ناجی و همکارانش [۱۰] جذب گاز اکسیژن را در حضور قطرات نانومتری نرمال هگزادکان مورد بررسی قرار دادند. نتایج این آزمایشات نشان‌دهنده افزایش انتقال جرم تا ۲/۲ برابر است. وان گیوکیم و همکارانش [۱۴] جذب CO₂ را در حضور نانوذرات SiO₂ مورد بررسی قرار دادند.

در مجموع چهار دلیل عمده برای افزایش انتقال جرم در سیستم‌های (گاز- مایع) به خصوص سیستم‌های جذبی آمونیاک ذکر شده است:

- ۱- ایجاد جریان‌های میکرونی در سیال به دلیل حرکات براونی نانوذرات. این اثر با افزایش درصد نانوذرات در سیال، ابتدا افزایش، و سپس کاهش می‌یابد.

$$t_m = \frac{d^2}{2D} \quad (1)$$

۲- اثر گریزینگ^۱، که با افزایش مقدار نانوذرات در ابتدا افزایش می‌یابد، سپس بدون تغییر می‌ماند.

۳- افزایش نگهداشت فاز گاز در نانوسیالات

۴- انتقال گرمای بهتر در سطح تماس دو فاز باعث کاهش دما در این سطح و باعث افزایش پتانسیل جذب خواهد شد.

هدف از این مقاله، مرور تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال جرم در نانوسیالات در دهه اخیر و بررسی اثر شرایط عملیاتی بر بهبود ضریب انتقال جرم در این سیستم‌ها می‌باشد.

۲- انتقال جرم در نانوسیال

۲-۱ نفوذ مولکولی در نانوسیالات:

کریشنامورتی و گروهش [۵] سرعت افزایش سطح لکه رنگی فلورسانس را در آب خالص و دو غلظت مختلف از نانوسیال

$$t_b = \frac{3\pi\eta d^3}{2k_b T} \quad (2)$$

در این رابطه D ضریب نفوذ رنگ در آب (m²/s) است. با استفاده از این رابطه زمان محاسبه شده برای طی کردن فاصله ۲۰ نانومتری در آب برای مولکول‌های این ماده رنگی ۳/۸×۱۰^{-۷} ثانیه خواهد بود. این مقدار در نانوسیالات بسیار کمتر است.

همچنین زمان لازم برای اینکه ذره‌ای به اندازه d که حرکت براونی دارد، مسافتی به اندازه قطر خود را بپیماید با استفاده از رابطه استوکس اینشتین [۵] محاسبه می‌شود:

۱- ایجاد جریان‌های میکرونی در سیال به دلیل حرکات براونی نانوذرات. این اثر با افزایش درصد نانوذرات در سیال، ابتدا افزایش، و سپس کاهش می‌یابد.

۲- اثر گریزینگ^۱، که با افزایش مقدار نانوذرات در ابتدا افزایش می‌یابد، سپس بدون تغییر می‌ماند.

۳- افزایش نگهداشت فاز گاز در نانوسیالات

۴- انتقال گرمای بهتر در سطح تماس دو فاز باعث کاهش دما در این سطح و باعث افزایش پتانسیل جذب خواهد شد.

هدف از این مقاله، مرور تحقیقات انجام شده در زمینه انتقال جرم در نانوسیالات در دهه اخیر و بررسی اثر شرایط عملیاتی بر بهبود ضریب انتقال جرم در این سیستم‌ها می‌باشد.

۲- انتقال جرم در نانوسیال

۲-۱ نفوذ مولکولی در نانوسیالات:

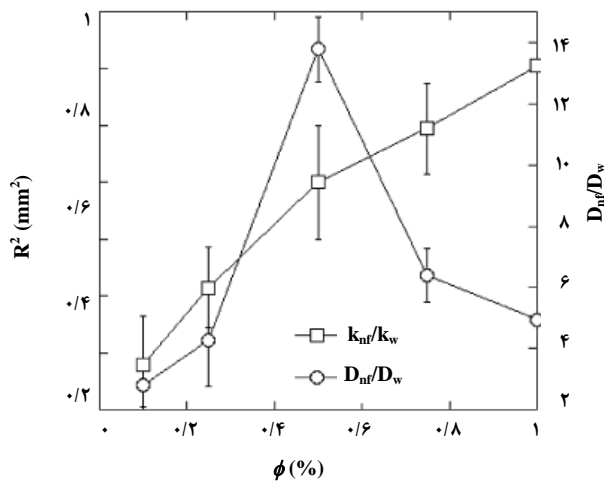
کریشنامورتی و گروهش [۵] سرعت افزایش سطح لکه رنگی فلورسانس را در آب خالص و دو غلظت مختلف از نانوسیال

1. Grazing Effect

$$t_c = \frac{d^2}{2\nu} \quad (3)$$

در شرایط مشابه با قبل، $t_c = 2/0 \times 10^{-10}$ s خواهد بود. همانطور که مشخص است زمان مورد نیاز برای انتقال یک مولکول از طریق جابجایی بسیار کمتر از نفوذ است. بنابراین افزایش انتقال جرم در اثر ایجاد آشفتگی در سیستم، بسیار محتمل تر خواهد بود.

شکل (۲) تغییرات ضرایب انتقال جرم و گرما را با افزایش مقدار نانوذرات در محیط نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص شده است مقدار افزایش در انتقال جرم بسیار بیشتر از افزایش در انتقال گرماست. دلیل تغییر شیب در منحنی (k_{nf}/k_w) و همچنین وجود پیک در منحنی (D_{nf}/D_w) مشخص نیست، به احتمال زیاد تجمع ایجاد شده بین نانوذرات که با افزایش غلظت ذرات و در پی آن کم شدن فاصله بین آنها افزایش می‌یابد، باعث ایجاد خوشه‌های بزرگ نانوذرات، کم شدن حرکات براونی و کم شدن ضرایب انتقال در نانوسیالات می‌شود.

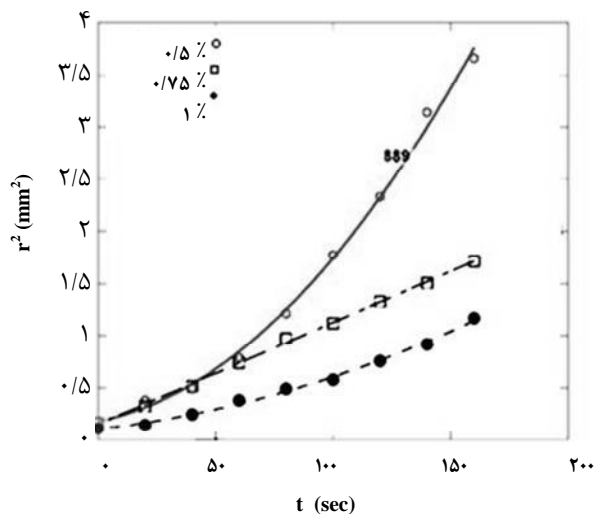
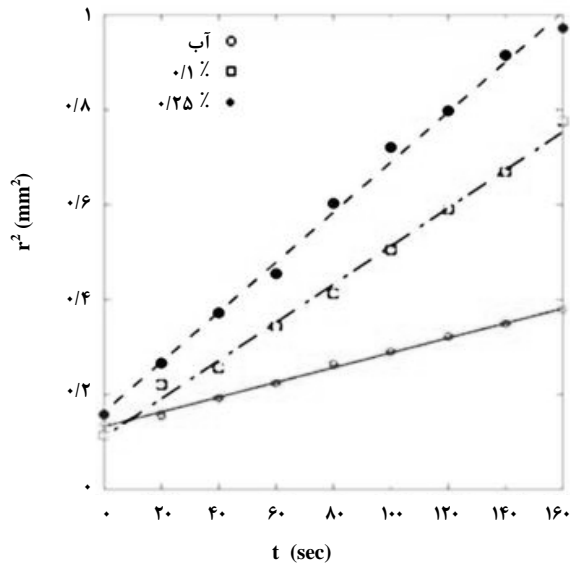


شکل ۲- مقایسه میزان افزایش هدایت حرارتی و نفوذ مولکولی در نانوسیال حاوی نانوذرات Al_2O_3 با اندازه ۲۰ nm [۵]

برای بررسی بیشتر "عدد رینولدز براونی" [۵] به صورت زیر تعریف می‌شود:

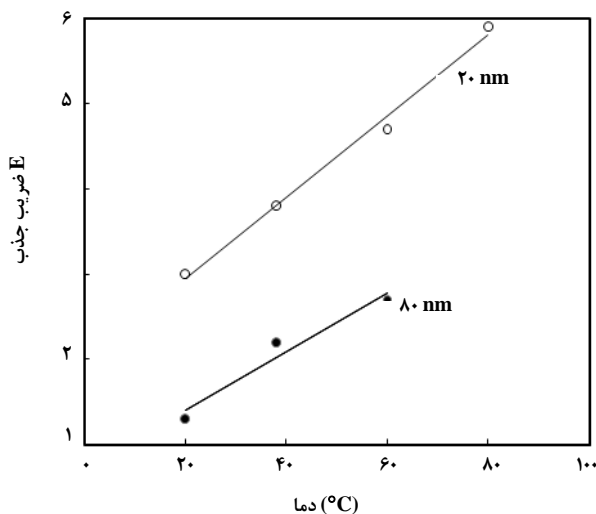
$$Re = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi \rho_n d}} \quad (4)$$

در این رابطه ρ_n چگالی نانوذرات است. این تعریف از عدد رینولدز، مبتنی بر بیان سرعت براونی به صورت $v_n = \sqrt{\frac{3k_b T}{m_n}}$ است.

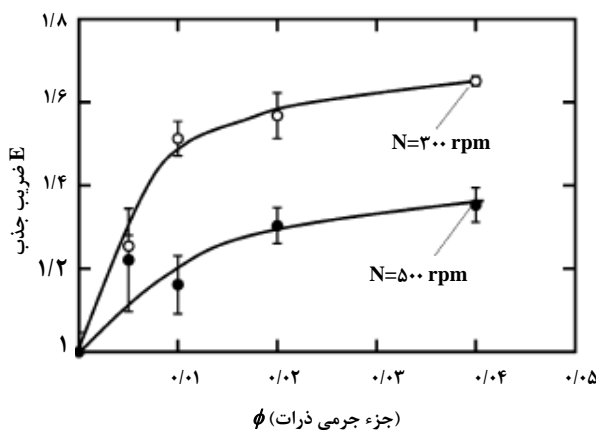


شکل ۱- تغییر سطح لکه رنگی با زمان در غلظت‌های مختلف نانوسیال [۵]

در این رابطه k_b ثابت بولتزمن، T دما و η گرانیوی آب است. در دمای اتاق و برای نانوذراتی به اندازه ۲۰ nm، $t_b = 8/1 \times 10^{-6}$ s، بنابراین تخمین زده می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود $t_b > t_m$ است، بنابراین حرکات براونی نانوذرات نمی‌تواند به طور مستقیم باعث افزایش انتقال جرم شود، به عبارتی نانوذرات نمی‌توانند مولکول‌ها را هل داده، باعث نفوذ بیشترشان شوند. بلکه حرکات براونی نانوذرات، سیال را با خود همراه ساخته و به نوعی باعث بهم خوردگی سیال می‌شوند که انتقال جرم را افزایش می‌دهد. زمان لازم برای انتقال مولکول‌ها توسط جریان جابجایی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:



شکل ۳- مقدار افزایش در $K_L a$ به صورت تابعی از دما برای ذرات پوشش داده شده با (PPO-PEO) در اندازه ۸۰ nm. اسید اولئیک در اندازه ۲۰ nm [۶]



شکل ۴- مقدار مطلق افزایش در k_L به صورت تابعی از مقدار نانوذرات برای دو مقدار متفاوت سرعت هم زن [۶]

گروه همچنین انتقال جرم را با استفاده از نظریه رسوخ^۱ و نظریه کلوموگروف^۲ در توربولنسی همگن مدل سازی کردند. کیونگ کیم و گروهش [۷] سرعت جذب در سیستم جذبی (NH₃/H₂O) را در حضور نانوذرات مختلف (Cu, CuO, Al₂O₃) و در درصدهای مختلف غلظت آمونیاک در آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که با اضافه کردن نانوذرات، سرعت جذب بیشتر می شود و در مورد Cu این افزایش در مقدار جذب بیشتر از CuO و Al₂O₃ بوده

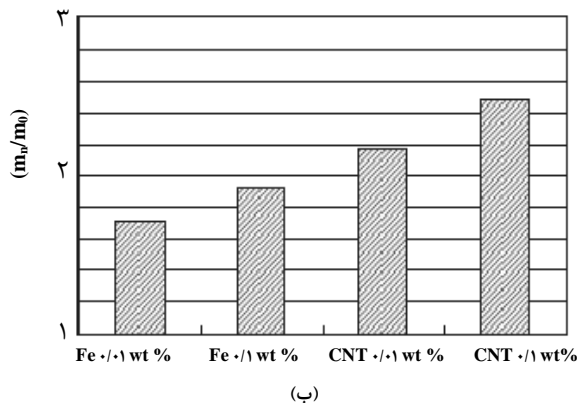
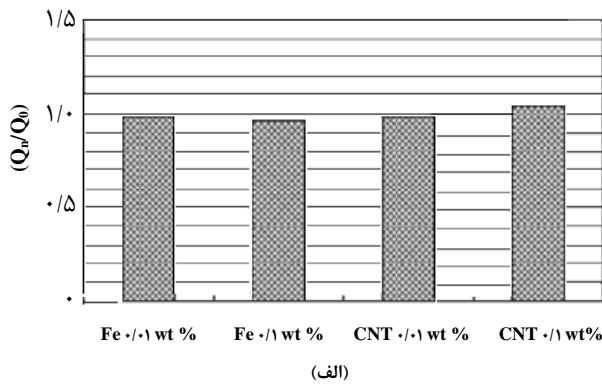
همانطور که مشخص است با افزایش اندازه نانوذرات یا d، عدد رینولدز، و به دنبال آن، انتقال جرم در اثر جابجایی کم خواهد شد.

۲-۲ انتقال جرم نانوسیالات در سیستم های (گاز- مایع)

بر طبق گزارش داگاونکار [۱۱] که در سال ۲۰۰۳ منتشر شد، وجود ذرات میکرومتری TiO₂ میزان جذب CO₂ را در آب، هگزادکان و روغن آفتابگردان افزایش می دهد. اصولاً در سیستم های کلوییدی، اثر گریزینگ، باعث افزایش مقدار جذب گاز در مایع می شود. بدین صورت که در این سیستم ها ذرات جامد بین سطح ساکن مایع و بالک مایع حرکت می کنند و بعد از جذب مولکولهای گاز (جذب سطحی) در لایه مرزی، در بالک فاز مایع این مولکول را دفع می کنند، و از این طریق انتقال جرم را افزایش می دهند. در سیستم های حاوی نانوذرات انتظار می رود عملکرد مشابهی باعث افزایش انتقال جرم شود. طبق این تحقیق، افزایش انتقال جرم تابعی از میزان مواد جامد و شدت هم زدن است. بر طبق آزمایشات اولی [۶] که نتایج آن در شکل (۳) نشان داده شده است، استفاده از نانوسیالی شامل ۱٪ نانوذرات Fe₂O₃ پوشش داده شده با اسید اولئیک، ضریب انتقال جرم را در یک سیستم (اکسیژن- آب) در حدود ۱/۶ مرتبه و $k_L a$ را در حدود ۶ برابر افزایش می دهد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود، افزایش دما باعث افزایش ضریب انتقال جرم می شود. همچنین نتایج نشان می دهند که مقدار افزایش ضریب جذب که از رابطه $E = (k_{L, \text{in nanofluid}} / k_{L, \text{in base fluid}})$ محاسبه می شود، با افزایش سرعت همزن کاهش می یابد (شکل (۴)). در این سیستم از همزن نوع توربینی ۴ پره ای با قطر ۹/۸ cm استفاده شده است. همچنین ۸۰٪ از میزان افزایش در انتقال جرم در این سیستم، به افزایش در سطح نسبت داده می شود.

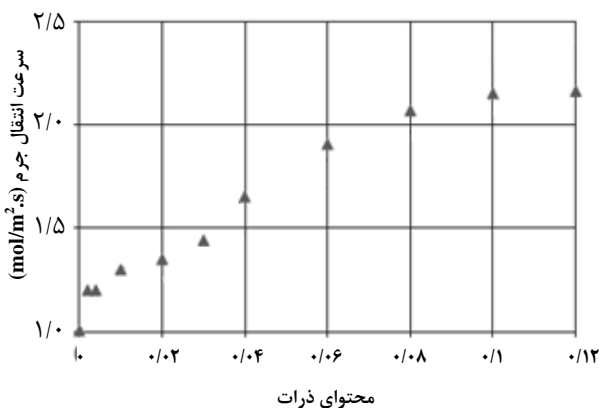
ون [۱۲] انتقال جرم بین گاز و مایع در یک راکتور حیابی با حلقه داخلی را در حضور نانوذرات بررسی کرد که نتیجه این بررسی نشان دهنده کاهش $K_L a$ با افزایش غلظت نانوذرات بود. علت این کاهش، بهم پیوستن نانوذرات بیان شده است که می تواند تأثیر منفی بر انتقال جرم و حرارت داشته باشد. آنها تأثیر سرعت ظاهری گاز ورودی را نیز بر انتقال جرم بررسی کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت گاز، ضریب انتقال جرم ($K_L a$) افزایش می یابد. این

1. Kolmogorof
2. Higbie



شکل ۵- مقایسه میزان افزایش انتقال گرما (الف) و انتقال جرم (ب) در شرایط مختلف [۹]

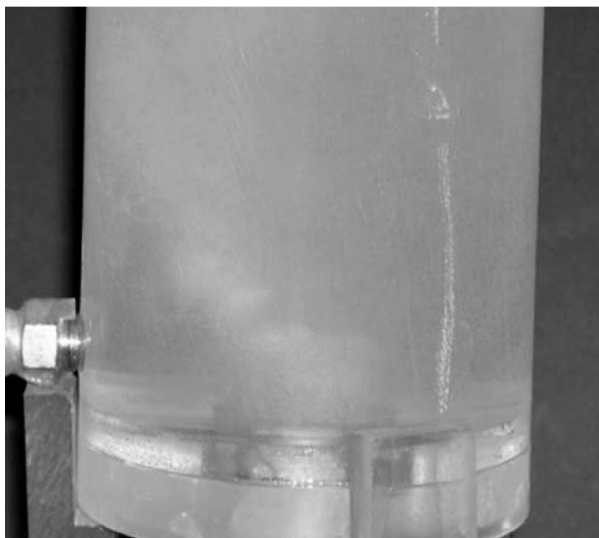
اندره ناجی [۱۰] و همکارانش جذب گاز اکسیژن را در حضور قطرات نانومتری از نرمال هگزادکان مورد بررسی قرار دادند. نتایج این آزمایشات که در شکل (۶) آورده شده نشان‌دهنده افزایش انتقال جرم تا ۲/۲ برابر است.



شکل ۶- داده‌های تجربی بدست آمده از جذب اکسیژن در فاز پراکنده (n-هگزا دکان) [۱۰]

است، این تفاوت احتمالاً از تفاوت در اندازه نانوذرات و تفاوت در تعداد نانوذرات موجود در همان درصد وزنی است (اندازه نانوذرات CuO ، Cu و Al_2O_3 به ترتیب ۳۳، ۵۰ و ۴۷ نانومتر بوده است). بیشترین میزان افزایش در جذب به میزان ۳/۲۱ برابر و مربوط به نانوذرات Cu بود. به طور کلی میزان افزایش جذب در غلظت‌های بالاتر آمونیاک بیشتر است، که بیانگر مؤثر بودن حضور نانوذرات در افزایش جذب در پتانسیل‌های پایین جذب است. این گروه همچنین تاثیر اضافه کردن عامل فعال در سطح را در این نوع سیستم‌ها مورد بررسی قرار دادند [۸]. از سه نوع عامل فعال در سطح مختلف در این مطالعه استفاده شده است، (۲- اکتانول)، (n-اکتانول) و (۲- اتیل، ۱- هگزانول). استفاده از عامل فعال در سطح باعث می‌شود که نانوذرات در سیال پایه بهتر پراکنده شوند، که تاثیر حضور نانوذرات را افزایش می‌دهد. اضافه کردن ۷۰۰ ppm از عامل فعال در سطح (۲ اتیل، ۱- هگزانول) به سیستم (آب/ آمونیاک) انتقال جرم را تا ۴/۸ برابر افزایش می‌دهد. افزودن ۱ wt% از نانوذرات Cu انتقال جرم را ۳/۲۱ برابر افزایش می‌دهد. این در حالی است که وجود همزمان نانوذرات و عامل فعال در سطح باعث افزایش ۵/۳۲ درصد در انتقال جرم می‌شود. افزودن نانوذرات و عامل فعال در سطح، هر دو، انتقال جرم را افزایش می‌دهند، بنابراین برای کاربردهای عملی، استفاده همزمان از هر دوی آنها توصیه می‌شود. در دیگر مطالعه انجام شده توسط کیونگ کیم و گروهش [۱۳] مدل‌سازی انتقال جرم و گرما در یک سیستم جذب آمونیاک به صورت همزمان انجام شد. این گروه تاثیر اضافه کردن نانوذرات و عامل فعال در سطح را بر روی اندازه دستگاه بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده این است که اضافه کردن عامل فعال در سطح باعث کاهش اندازه دستگاه تا ۶۳٪ می‌شود، در صورتی که افزودن ۱۰۰۰ ppm از نانوذرات Cu ، ۵۴٪ اندازه دستگاه را کاهش می‌دهد. همچنین طبق نتایج این گروه، تاثیر افزایش انتقال گرما بر اندازه دستگاه در برابر اثری که افزایش انتقال جرم بر اندازه دستگاه دارد، قابل صرف نظر کردن است. یانگ [۹] میزان جذب گاز و انتقال گرما را در یک سیستم فیلم ریزان مورد بررسی قرار داد. محلول مورد استفاده ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$) و نانوذرات شامل نانوذرات آهن و نانولوله‌های کربنی است. نتایج نشان داد که افزایش انتقال جرم بیشتر از افزایش انتقال گرماست. ضمن اینکه نانولوله‌های کربنی انتقال جرم و گرما را بیشتر از نانوذرات آهن افزایش داده‌اند. این نتایج در شکل (۵) مشاهده می‌شود.

هیدرودینامیک سیستم (اندازه، شکل و سرعت نوسان حباب‌ها و نگهداشت فاز پراکنده) را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. با توجه به اینکه هیدرودینامیک سیستم تأثیر مستقیم بر انتقال جرم خواهد داشت، در ادامه به شرح مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده پرداخته شده است. وان گیوکیم و همکارانش [۱۴] انتقال جرم و هیدرودینامیک یک سیستم (گاز-مایع) را مورد بررسی قرار دادند. بر طبق گزارش این گروه اندازه حباب‌ها در نانوسیال کمتر از آب خالص است (شکل (۷)). کوچک بودن اندازه حباب‌ها به معنی بالا بودن مساحت سطح و بالا رفتن سرعت انتقال جرم است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- حباب‌های تشکیل شده در (الف) نانو سیال مربوط به نانو ذرات با اندازه ۳۰ nm و غلظت ۰/۰۲۱ wt% از نانوذرات SiO₂ (ب) آب [۱۴]

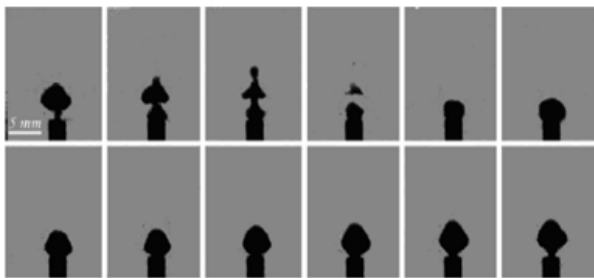
همچنین این گروه انتقال جرم در نانوسیالات را با استفاده از دو مدل هموزن (یکنواخت) و هتروژن (نایکنواخت) مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه علاوه بر تأثیر مستقیم حرکات براونی، تأثیر میدان سرعت تشکیل شده در اطراف نانوذرات در انتقال جرم مورد بررسی قرار گرفت. این میدان سرعت در اثر حرکات براونی نانوذرات شکل می‌گیرد. محاسبات این گروه نشان داد که فاصله بین نانوذرات کمتر از ضخامت لایه مرزی سرعتی تشکیل شده در اطراف این ذرات است. بنابراین لایه‌ها با هم برخورد دارند و در مقادیر کم نانوذرات، میدان جریان اطراف ذره افزایش یافته، انتقال تکانه به دلیل افزایش گرادیان سرعت در اطراف ذره افزایش می‌یابد. بنابراین انتقال جرم در اطراف نانوذرات افزایش می‌یابد. داده‌های مدل نایکنواخت به مقادیر تجربی نزدیک‌ترینند. بر طبق گزارش این گروه زمانی که مقدار نانوذرات در محیط کم است نانوذرات با دو مکانیزم حرکات براونی (تصادفی) نانوذرات و جابه جایی عناصر مایع در نتیجه حرکت براونی ذرات نانو متری ممکن است انتقال جرم را افزایش دهند.

در یک مایع ساکن انتظار می‌رود که ذرات کوچک حول یک مقدار میانگین نوسان داشته باشند، مقدار و مسیر این حرکات مشخص نیست ولی باید بیشتر از حرکت خود مولکول‌های مایع باشد. از آنجایی که ضریب نفوذ مولکول‌های سیال پایه بیشتر از نانوذرات است، حرکت انتقالی مولکول‌های مایع و سرعت نفوذ آنها باید بیشتر از نانوذرات باشد، بنابراین حرکت براونی نانوذرات نمی‌تواند تأثیر به سزایی در افزایش نرخ انتقال جرم داشته باشد. مکانیزم دوم در افزایش انتقال جرم جابه جایی مایع اطراف نانوذرات به همراه حرکت نانوذرات یا حرکت خزشی^۱ است که به صورت پیوسته با فاصله گرفتن از ذره کاهش می‌یابد. محاسبات نشان می‌دهند که فاصله بین نانوذرات کمتر از ضخامت لایه مرزی اطراف ذرات است. بنابراین لایه‌ها با هم برخورد دارند. و در مقادیر کم از نانوذرات میدان جریان اطراف ذره افزایش یافته و بنابراین انتقال تکانه به دلیل افزایش گرادیان سرعت در اطراف ذره افزایش می‌یابد. بنابراین انتقال جرم در اطراف نانوذرات افزایش می‌یابد. حال این که این فرایند چطور سرعت نفوذ را افزایش می‌دهد هنوز کاملاً مشخص نیست.

۳-۲ هیدرودینامیک سیستم‌های (گاز-نانوسیال)

افزایش شدن نانوذرات به سیستم با تغییر خواص سیال پایه،

1. Creeping Flow



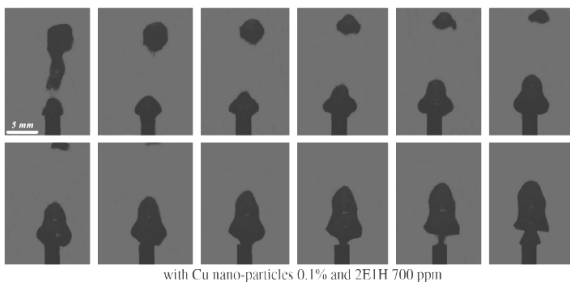
(الف)



(ب)

شکل ۸- رفتار حباب ها در نانو سیالها و سیالات معمولی در غلظت ۰/۸٪ از آمونیاک (الف) آب خالص (ب) نانوسیال حاوی ۰/۱٪ نانوذره CuO [۷]

بزرگتر از زمانی است که عامل فعال در سطح به سیستم اضافه نشده است. (شکل (۹)). ون [۱۲] هیدرودینامیک سیستم (گاز- مایع) را در یک راکتور حبابی با این فرض که نانوسیالات را می توان به صورت یک سیال تک فاز در نظر گرفت مدل سازی کرد. نتایج این مدل سازی سازگاری نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشت.



شکل ۹- رفتار حباب ها در نانو سیالها همراه با عامل فعال در سطح در غلظت ۰/۸٪ از آمونیاک [۷]

۳- نتیجه گیری

به طور کلی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از نانوسیالات در انتقال جرم چندان گسترده نیست. اما همین مطالعات، حاکی بر تأثیر نانوسیالات بر بهبود ضریب انتقال جرم می باشند. در این مقاله

این گروه مقدار نهایی جذب در نانوسیال را ۲۴٪ بیشتر از آب گزارش داده و دلیل آن را جذب حباب های میکرومتری گاز بر روی سطح نانوذرات بیان کردند. نانوذرات پایدار موجود در نانوسیال علاوه بر افزایش سطح کل حباب های گاز به دلیل برخورد آنها به نانوذرات و تقسیم شدنشان به حباب های کوچکتر، انرژی اضافه مورد نیاز برای حل شدن را فراهم می کنند.

قواعد کلی ای را که می توانند رابطه تغییر مقدار جذب گاز با اندازه حباب ها را بیان کنند می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. حباب های کوچکتر سطح بیشتری دارند.

۲. بر طبق رابطه (لاپلاس- یانگ) $(\Delta P = P_{in} - P_{out} = (2\gamma/R))$ فشار داخلی حباب های گاز با کاهش اندازه افزایش می یابد.

۳. بر طبق رابطه کلونین $(RT \ln(P/P_0) = (2\gamma V/r))$ با کاهش اندازه حباب ها انحلال پذیری افزایش می یابد.

همچنین، آزمایش ها، بیانگر تأثیر نداشتن اندازه نانوذرات با درصد وزنی یکسان در مقدار جذب می باشند. در توجیه این پدیده می توان گفت که داشتن محتوای یکسان از نانوذرات باعث شده است که انرژی اضافه شده که قرار است به انحلال پذیری کمک کند در همه محلول ها یکسان باشد. توجه داشته باشید که در نانوسیالاتی با غلظت یکسان تعداد نانوذرات با اندازه آنها تغییر می کند. همچنین حبابها در نانوسیالاتی با غلظت یکسان به اندازه های مشابهی شکسته می شوند، که در نتیجه آن مقدار افزایش در انتقال جرم در اثر کاهش اندازه حباب ها در همه موارد یکسان است. کیونگ کیم و گروهش [۷] تأثیر وجود نانوذرات را در سیستم جذبی (NH_3/H_2O) مورد بررسی قرار دادند. حباب های تشکیل شده در آب تا حدود ۷/۵ mm بالا می روند در حالی که در نانوسیال حاوی ۰/۱ wt% Cu حبابها تا ارتفاع ۵/۸۳ mm بالا می روند. بررسی ها همچنین نشان دهنده تشکیل حباب های کوچکتر و کروی تر بعد از اضافه شدن نانوذرات به سیستم هستند. این موضوع در شکل (۸) نشان داده شده است:

همچنین این گروه تأثیر اضافه کردن عامل فعال در سطح را بررسی کرده اند، نتیجه این بررسی نشان داده است که حباب های تشکیل شده، بی شکل و به هم پیوسته اند، و در نتیجه کاهش کشش سطحی بعد از اضافه کردن عامل فعال در سطح اندازه حباب ها

1. Laplace-Young
2. Kelvin

- [6] Olle, B.; Bucak, S.; Holmes, T.C.; Bromberg, L.; Alan Hatton, T.; Wang, D.I.C., "Enhancement of Oxygen Mass Transfer Using Functionalized Magnetic Nanoparticle", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45: 4355-4363 (2006).
- [7] Kim, J.K., Jung, J.Y.; Kang, Y.T., "The effect of nanoparticle on bubble absorption performance in binary nanofluid", *Int. J. Refrig.*, 29: 22-29 (2006).
- [8] Kim, J.K., Jung, J.Y.; Kang, Y.T., "Absorption Performance Enhancement by nano-particles and chemical surfactants in binary nanofluid", *Int. J. Refrig.*, 30: 50-57 (2007).
- [9] Kang, Y.T.; Kim, H.J.; Lee, K., "Heat and mass transfer enhancement of binary nanofluids for H₂O/LiBr falling film absorption process", *Int. J. Refrig.*, 31: 850-856 (2008).
- [10] Nagy, E.; Feczko, T.; Koroknai, B., "Enhancement of Oxygen mass transfer rate in the presence of nanosized particles", *Chem. Eng. Sci.*, 62: 7391-7398 (2007).
- [11] Dagaonkar; M.V., Heeres; H.J., Beenackers; A.A.C.M., Pangarkar, V.G., "The application of fine TiO₂ particles for enhanced gas absorption", *Chem. Eng. J.*, 92: 151-159 (2003).
- [12] 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", *Chem. Eng. Technol.*, 28: 53-60 (2005).
- [13] Kim, J.K., Akisawaa, A., Kashiwagia, T., Kangb, Y.T., "Numerical design of ammonia bubble absorber applying binary nanofluids and surfactants", *Int. J. Refrig.*, 30: 1086-1096 (2007).
- [14] kim;W.G., Kang, H.U., Jung, K., kim, S.H., "Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO₂ Absorption", *Sep. Sci. Technol.*, 43: 3036-3055 (2008).

استفاده از نانوسیالات در بهبود ضریب انتقال جرم در سال های اخیر، به صورت اجمالی، مورد مطالعه قرار گرفته است. اگرچه مکانیسم عملکرد نانوذرات در افزایش ضریب انتقال جرم همچنان تا حدودی مبهم است، اما به طور عمده در اکثر این مطالعات حرکات براونی نانوذرات را عامل این افزایش می دانند که این اثر با افزایش درصد نانوذرات در سیال، ابتدا افزایش، و سپس، کاهش می یابد، بنابراین افزودن بیش از حد نانوذرات باعث افزایش انتقال جرم نخواهد شد.

در بحث هیدرودینامیک نانوسیالات، تحقیقات انجام گرفته نشان دهنده تشکیل حباب های کوچک تر و کروی تر بعد از اضافه شدن نانوذرات به سیستم هستند. کوچک بودن اندازه حباب ها به معنی بالا بودن مساحت سطح و بالا رفتن سرعت انتقال جرم است.

مراجع

- [1] Choi, S.U.S., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *ASME International Mechanical Engineering Congress*, California, (1995).
- [2] Zhang, X.; Gu, H.; Fujii, M., "Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 31: 593-599 (2007).
- [3] Zeinali Heris, S.; Nasr Esfahany, M.; Etemad, S.Gh., "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube", *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 28: 203-210 (2007).
- [4] Koblinski, P.; Phillpot, S.R.; Choi, S.U.S., Eastman, J.A., "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles", *Int. J. Heat Mass Tran.*, 45: 855-863 (2002).
- [5] Krishnamurthy, S.; Bhattacharya, P.; Phelan, P.E.; "Enhanced Mass Transport in Nanofluids", *Nano Lett.*, 6: 419-423 (2006).