

مروری بر کاربردهای نانوسیال در زمینه انتقال حرارت و انتقال جرم

فرهاد سلیمی^{۱*}، جواد سلیمی^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، گروه مهندسی شیمی، کرمانشاه، کدپستی ۶۷۱۸۹۹۷۵۵۱، ایران

۲- عضو باشگاه پژوهشگران جوان، واحد کرمانشاه، کدپستی ۶۷۱۸۹۹۷۵۵۱، ایران

دریافت: ۹۲/۷/۲۷ پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۹

چکیده

نانوسیال به عنوان سیالی تعریف می‌شود که ذرات با اندازه بین یک تا ۱۰۰ نانومتر و به صورت پایدار در سیال پایه معلق است. افزودن نانوذرات باعث می‌شود که خواص ترموفیزیکی سیال تحت تأثیر قرار بگیرد. امروزه تحقیقات در زمینه نانوسیالات ابعاد گسترده‌ای پیدا کرده است. تحقیقات نشان داده که استفاده از نانوذرات در سیال پایه باعث می‌شود که ضرایب انتقال حرارت و جرم افزایش یابد. افزایش ضرایب انتقال حرارت و جرم سبب افزایش بازده، کاهش اندازه تجهیزات و همچنین، هزینه ساخت آن‌ها می‌شود. از این رو، در این مقاله مروری بر کاربردهای نانوسیال در فرایندهای انتقال حرارت و جرم و همچنین، بررسی مکانیزم‌های حاکم بر آن‌ها پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: نانوسیال، ضریب انتقال حرارت، ضریب انتقال جرم

مقدمه

انجام شده است، اما تعداد آن‌ها در مقایسه با تحقیقات صورت گرفته در انتقال حرارت و هدایت گرمایی بسیار کم‌تر است. نتایج استفاده از نانوذرات، به عنوان افزودنی‌های سیال برای بهبود انتقال حرارت و جرم، توجه بسیاری از محققان را جلب کرده است. در این مقاله سعی می‌شود به بررسی کاربردهای نانوسیالات در زمینه‌های انتقال حرارت و انتقال جرم پرداخته شود و با بررسی نتایج کارهای انجام‌شده در این زمینه یک طبقه‌بندی مناسب صورت گیرد.

یکی از اهداف مهم محققان و مهندسان در صنعت افزایش بازدهی و کوچک کردن سامانه‌های مورد استفاده در صنعت است. فناوری جدید نانو تکنولوژی این امکان را فراهم آورده تا بتوان ذراتی با اندازه بسیار کوچک نانومتری تولید و فراوری کرد. در سال ۱۹۹۵، چوی^۱ از بخش تکنولوژی انرژی آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا اولین بار موضوع نانوسیال را به عنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح کرد [۱]. در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه افزایش انتقال جرم در حضور نانوذرات

*f.salimi@iauksh.ac.ir

^۱ Choi

تهیه نانوسیال

طرز تهیه نانوسیال اولین قدم کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم است. تهیه نانوسیال را که از طریق افزودن نانوذرات به سیال پایه صورت می‌گیرد، نباید مانند یک اختلاط ساده جامد-مایع در نظر گرفت. زیرا تهیه نانوسیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه‌ای است. برخی از این شرایط خاص عبارت است از: یکنواخت بودن سوسپانسیون، پایدار بودن سوسپانسیون، توده‌ای شدن کم ذرات و عدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال. برای رسیدن به چنین خواص ویژه‌ای از محلول سوسپانسیون، از روش‌های مختلف استفاده می‌شود. مثلاً می‌توان از تغییر pH محلول سوسپانسیون، استفاده از مواد فعال سطحی، استفاده از مواد پراکنده‌ساز و ضد انعقاد ذرات یا از ارتعاشات برای رسیدن به ویژگی‌های مذکور استفاده کرد [۲]. تمام این روش‌ها باعث می‌شود خواص سطحی ذرات معلق شده برای ایجاد یک سوسپانسیون پایدار تغییر کند.

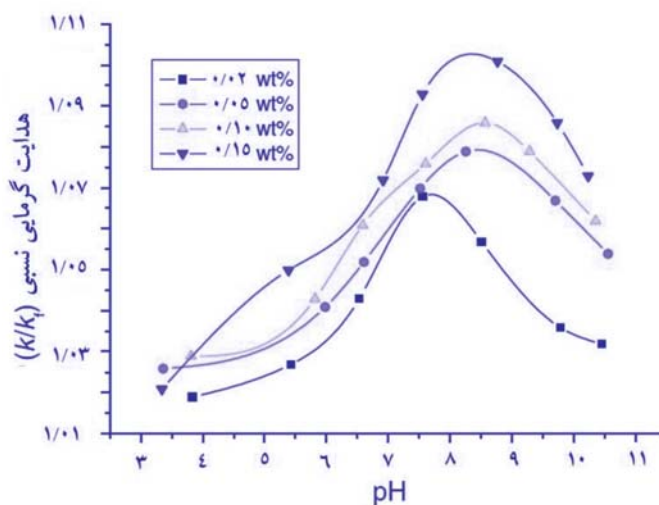
نتایج و بحث

انتقال حرارت

• افزایش هدایت حرارتی

یکی از مشخصه‌های مؤثر سیال در فرایندهای انتقال حرارت هدایتی و جابجایی ضریب هدایت حرارتی آن است. بالا بودن این مشخصه بیانگر بالا بودن نرخ انتقال حرارت توسط هر کدام از دو مکانیسم یاد شده است. آب و اتیلن گلیکول از جمله سیالاتی است که به عنوان سیال خنک‌کننده در مبدل‌ها استفاده می‌شود اما دارای هدایت گرمایی پایینی نسبت به جامدات است. افزودن نانوذرات فلزی یا اکسیدهای فلزی با هدایت گرمایی بالا به سیال پایه باعث افزایش هدایت گرمایی سیال پایه می‌شود. این افزایش در ضریب هدایت حرارتی به فاکتورهایی مانند شکل ذرات، ابعاد ذرات، درصد حجمی ذرات در محلول، ویژگی‌های حرارتی نانوذرات و سیال پایه و اسیدیته بستگی دارد [۳].

کریمی [۴] و همکاران اثر نانوذره کربن نانوتیوپ را در ضریب هدایتی حرارتی سیال پایه بررسی کردند. نتایج به دست آمده



شکل ۱: نمودار نسبت ضریب هدایت گرمایی نانوسیال به سیال پایه برحسب pH [۵]

از کار آن‌ها نشان داد که افزایش غلظت نانوذره باعث افزایش هدایت حرارتی سیال می‌شود. مقدار pH نانوسیال از عوامل دیگر مؤثر در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. ژو [۵] و همکاران اثر نانوذرات اکسید آلومینیوم را در ضریب هدایت حرارتی آب بررسی کردند. آن‌ها غلظت نانوذرات، تغییرات pH و غلظت سورفکتانت را به عنوان پارامترهای کلیدی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب هدایت حرارتی در غلظت ۰/۱۵ درصد وزنی ۱۰/۱ درصد افزایش می‌یابد. آن‌ها ضریب هدایت حرارتی را به ازای pHهای مختلف اندازه گرفتند و به این نتیجه رسیدند که در pH برابر هشت ضریب هدایت حرارتی بیشینه است.

دما از عوامل مؤثر دیگر در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. یافته‌های تجربی نشان می‌دهد، با افزایش دما اثر نانوذرات در افزایش ضریب هدایت حرارتی نیز به شدت افزایش می‌یابد [۶]. تغییرات ضریب هدایت گرمایی برحسب دما در شکل (۲) رسم شده است. چوی و همکاران اثر اندازه نانوذرات را در ضریب هدایت حرارتی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه نانوذره ضریب هدایت حرارتی کاهش می‌یابد [۷].

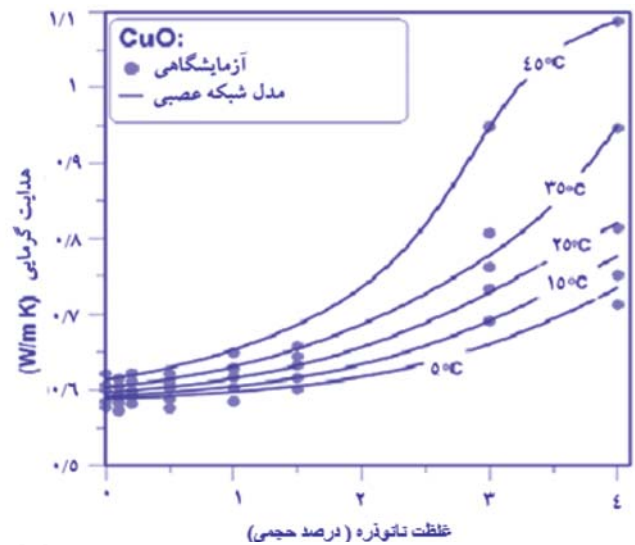
• افزایش انتقال حرارت

یکی از مشکلات سامانه‌های انتقال حرارت امروزی نبود

بازده آب گرم‌کن‌های خورشیدی، بهبود بازده انتقال حرارت در سردسازها، خنک کردن تجهیزات الکتریکی و خنک‌کاری موتور نمونه‌هایی از کاربرد نانوسیالات در زمینه انتقال حرارت است [۹].

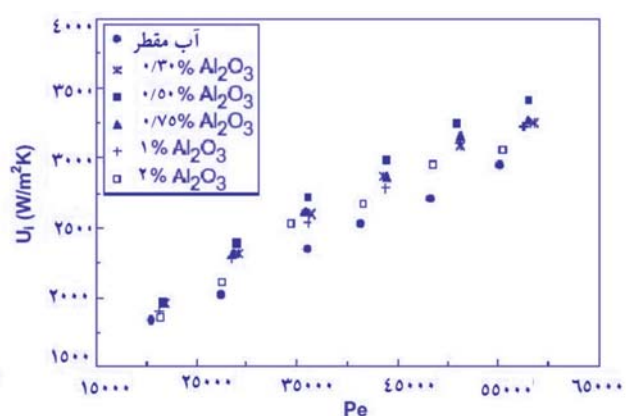
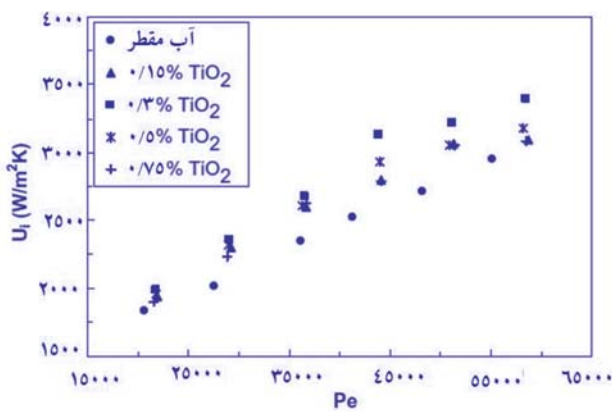
اعتماد و همکاران [۱۰] اثر نانوذرات Al_2O_3 و TiO_2 در سیال پایه آب را بر روی انتقال حرارت در یک مبدل پوسته و لوله بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد، افزودن نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود و برای نانوذرات استفاده‌شده غلظت‌های بهینه وجود دارد که در این غلظت‌ها انتقال حرارت بیشینه است. بیش‌ترین افزایش در ضریب انتقال حرارت کلی برای TiO_2 و Al_2O_3 به ترتیب حدود ۲۰ و ۲۴ درصد است. تغییرات ضریب انتقال حرارت کلی برحسب عدد پکلت، به ازای غلظت‌های مختلف نانوذره، در شکل (۳) رسم شده است.

جانگ^۱ و همکاران [۱۱] اثر نانوذرات Al_2O_3 را در ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری بررسی کردند و نشان دادند در غلظت ۰/۳ درصد ضریب انتقال حرارت جابجایی تا هشت درصد افزایش می‌یابد. در بحث استفاده از نانوسیالات در انتقال حرارت جابجایی آزاد نتایج متفاوتی به دست آمده است و در بعضی موارد باعث افزایش و در بعضی موارد باعث کاهش انتقال حرارت شده است. ون^۲ [۱۲] و پوترا^۳ [۱۳] اثر نانوذرات را در انتقال حرارت جابجایی آزاد به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد، انتقال حرارت با افزایش مقدار نانوذرات کاهش می‌یابد. دهنوی [۱۴] و حبیب [۱۵] اثر نانوذرات را در انتقال



شکل ۲: نمودار تغییرات ضریب هدایت گرمایی برحسب دما [۸]

انتقال حرارت با شدت زیاد در زمان کوتاه است. افزایش سطح انتقال حرارت یکی از راه‌های قدیمی افزایش انتقال حرارت است. اما با افزایش سطح انتقال حرارت، باید دبی حجمی سیال خنک‌کننده در مبدل حرارتی افزایش یابد که این باعث افزایش هزینه پمپاژ می‌شود. امروزه افزایش هدایت حرارتی سیال خنک‌کننده در مبدل حرارتی به عنوان یکی از روش‌های مهم افزایش بازده حرارتی و طراحی مبدل حرارتی مطرح است. تشکیل سوسپانسیون پایدار، عدم کلوخه شدن، ضریب رسانش بالا و ضریب انتقال حرارت بالا برخی از ویژگی‌های نانوسیالات است که پتانسیل کاربرد آن‌ها را در زمینه انتقال حرارت افزایش داده است. بهبود بازده موتورهای دیزلی، بهبود



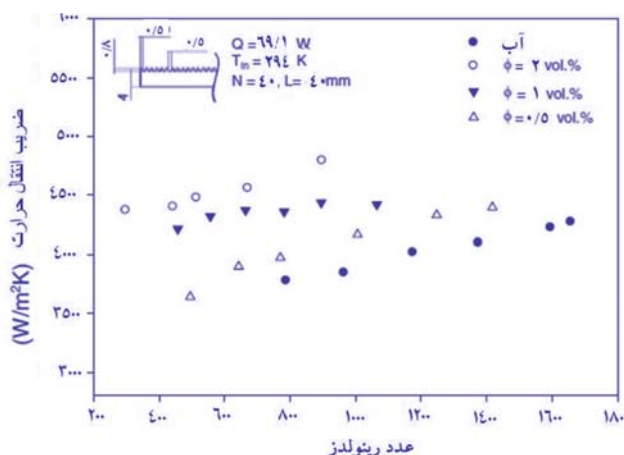
شکل ۳: نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت کلی برحسب عدد پکلت به ازای غلظت‌های مختلف نانوذره [۱۰]

1. Jang
2. Wen

3. Putra

بهبود انتقال حرارت و در بعضی موارد باعث کاهش انتقال حرارت شده است. اعتماد و همکارانش [۱۸] اثر نانوذرات $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ را در فرایند جوشش سیال پایه آب تحت فشار اتمسفریک بررسی کردند. غلظت‌های وزنی نانوذرات و غلظت محلول CMC^3 به عنوان پارامترهای کلیدی بررسی شد. نتایج جوشش نانوسیال نیوتنی آب-اکسید آلومینیوم نشان می‌دهد که نانوسیالات به طور قابل توجهی قادر به بهبود عملکرد انتقال حرارت جوشش است و میزان بهبود با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. اما افزایش CMC به سیال پایه باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود که به دلیل افزایش ویسکوزیته محلول است. با این وجود افزودن نانوذرات به این محلول غیر نیوتنی باعث بهبود در رفتار جوشش می‌شود. نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب شار حرارتی در شکل (۶) رسم شده است.

آزمایش‌هایی توسط بنگ^۴ و همکاران [۱۹] روی نانوسیال آب و اکسید آلومینیوم، با درصد حجمی ۰/۵ تا ۴، انجام شده است. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد، افزودن نانوذرات باعث کاهش انتقال حرارت در جوشش نانوسیال می‌شود که به دلیل ته‌نشینی نانوسیال و کاهش سطح مؤثر جوشش رخ می‌دهد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال حرارت تا ۲۰ درصد کاهش و شار حرارتی بحرانی تا ۳۲ درصد افزایش می‌یابد. آن‌ها دلیل این روند را به تغییر زبری سطح نسبت دادند.

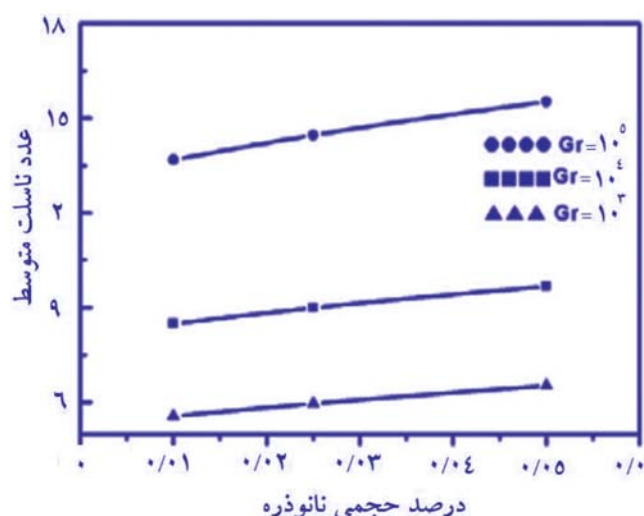


شکل ۵: نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب عدد رینولدز [۱۷]

حرارت جابجایی آزاد به صورت عددی بررسی کردند و نتایج به دست آمده از کار آن‌ها نشان داد، افزودن نانوذرات باعث افزایش در عدد ناسلت می‌شود. عدد ناسلت بر حسب غلظت نانوذره در شکل (۴) رسم شده است.

از دیگر کاربردهای نانوسیالات استفاده از آن‌ها در میکروکانال‌هاست که در سال‌های اخیر اهمیت زیادی پیدا کرده است. از جمله کاربردهای میکروکانال‌ها استفاده از آن‌ها در ساخت وسایل الکترونیکی از جمله کامپیوترهای شخصی است. آنوپ^۱ و همکاران [۱۶] اثر نانوسیالات را در انتقال حرارت در یک میکروکانال، با شرط دما ثابت، بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد، نرخ انتقال حرارت با افزایش دبی افزایش می‌یابد و برای نانوسیالات اثر افزایش انتقال حرارت در دبی‌های پایین بیش‌تر است. نیتیاپیروک^۲ و همکاران [۱۷] نیز در کاری مشابه اثر نانوسیالات را در انتقال حرارت میکروکانال‌ها بررسی کردند و میکروکانال آن‌ها دقیقاً مشابه میکروکانال‌های استفاده شده در ساخت کامپیوترهای شخصی است. نتایج کار آن‌ها حاکی از آن است که افزودن نانوذرات باعث بهبودی انتقال حرارت می‌شود. در شکل (۵) ضریب انتقال حرارت بر حسب عدد رینولدز، به ازای غلظت‌های مختلف نانوذره، رسم شده است.

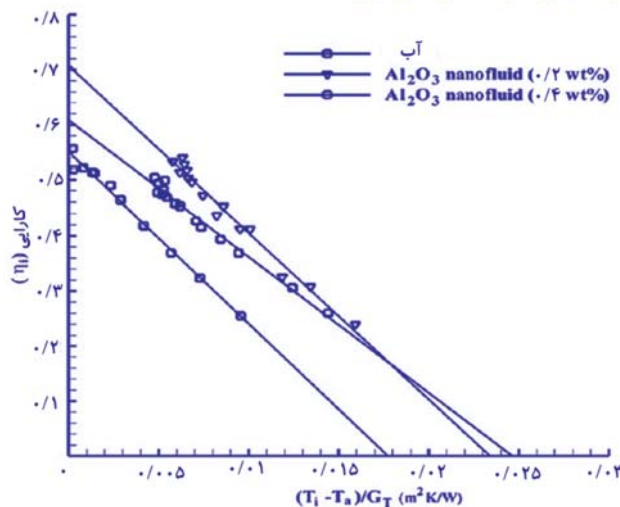
اثر نانوذرات در فرایند جوشش نیز بررسی شده و نتایج به دست آمده دارای تناقض زیادی است که در بعضی موارد باعث



شکل ۴: نمودار عدد ناسلت بر حسب غلظت نانوذره [۱۴]

1. Anoop
2. Nitiapiruk

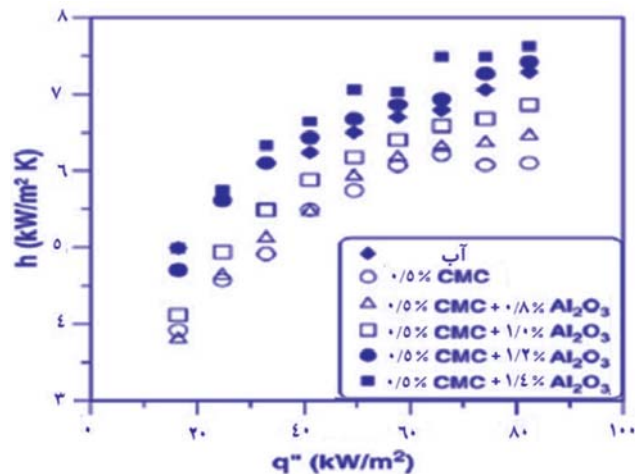
3. carboxy methylcellulose
4. Bang



شکل ۷: نمودار بازدهی به ازای غلظت‌های مختلف نانوذره [۲۰]

همکاران [۲۲] پیشگامان پژوهش در زمینه نفوذ جرم در نانوسیالات هستند. آن‌ها اثر نفوذ رنگ در نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که ضریب نفوذ در نانوسیالات بیش‌تر از آب مقطر (سیال پایه) است و بیشینه ضریب نفوذ در غلظت ۰/۵ درصد حجمی نانوذرات رخ می‌دهد. در غلظت‌های کم حرکت براونی نانوذرات باعث به وجود آمدن میدان‌های آشفتگی در نانوسیالات می‌شود که می‌تواند دلیل افزایش شدت نفوذ باشد. اما با افزایش غلظت نانوذرات، نانوذرات به هم می‌چسبند و سنگین می‌شوند که به سبب آن حرکت براونی نانوذرات کاهش می‌یابد و در نتیجه ضریب نفوذ کاهش می‌یابد. در شکل (۸) نسبت ضریب نفوذ رنگ در نانوسیالات بر ضریب نفوذ در آب خالص برحسب غلظت نانوذره رسم شده است.

آزمایش مشابه دیگر توسط فانگ^۴ و همکاران [۲۳] انجام شد. آن‌ها نیز مشاهده کردند، افزودن نانوذرات مس به آب باعث افزایش نفوذ رنگ می‌شود. فانگ^۵ و همکاران [۲۴] به بررسی اثر نفوذ سدیم کلراید در نانوسیال سیلیکا-آب پرداختند و مشاهده کردند که افزودن نانوذرات تأثیری در نفوذ یدیم کلراید ندارد. در بیش‌تر کارهایی که بر روی بررسی ضریب نفوذ نانوسیالات انجام شده است نشان می‌دهد که یک غلظت بهینه وجود دارد



شکل ۶: نمودار ضریب انتقال حرارت نانوسیالات برحسب غلظت‌های مختلف نانوذره [۱۸]

از دیگر کاربردهای نانوسیالات استفاده از آن‌ها در کالکتورهای خورشیدی برای افزایش بازدهی آن‌هاست. یوسفی و همکاران [۲۰] اثر نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در بازدهی یک کالکتور خورشیدی صفحه تخت بررسی کردند. اثر غلظت نانوذره، اثر دبی سیال و غلظت سورفکتانت بررسی شد. نتایج به دست آمده از کار آن‌ها نشان داد، استفاده از نانوسیالات میزان بازدهی را تا ۲۸/۳ درصد، نسبت به سیال پایه (آب) افزایش می‌دهد. نمودار بازدهی به ازای غلظت‌های مختلف نانوذره در شکل (۷) رسم شده است. اتانیکار^۱ و همکاران [۲۱] نیز به بررسی استفاده از نانوسیالات در یک میکروکالکتور خورشیدی پرداختند و نتایج نشان داد، نانوسیالات بازدهی را تا پنج درصد افزایش می‌دهند.

انتقال جرم

• افزایش ضریب نفوذ^۲

ضریب نفوذ شاخصی از قدرت نفوذ یک ماده در ماده دیگر است که مقدار آن بستگی به جزء موردنظر و شرایط محیط اطراف آن؛ یعنی دما، فشار، غلظت و طبیعت دیگر اجزا دارد. افزایش ضریب نفوذ سبب افزایش ضریب انتقال جرم می‌شود که در فرایند انتقال جرم بسیار مهم است. کریشممورتی^۳ و

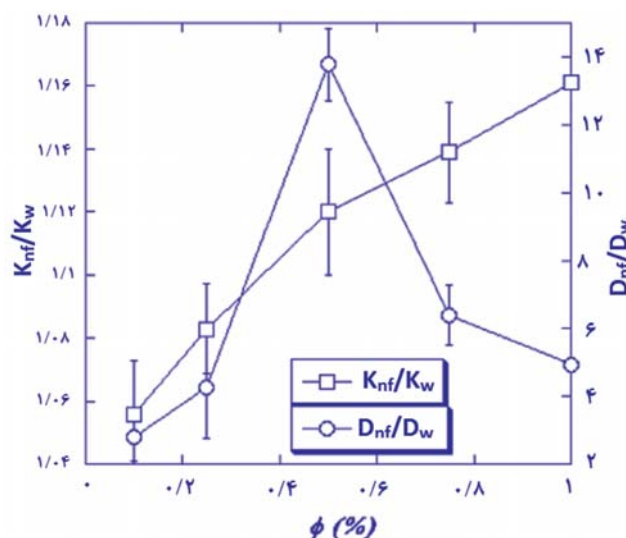
1. Otanicar
2. diffusion coefficient
3. Krishnamurthy

4. Fang
5. Feng

همکاران [۲۷] از نانوسیالات برای بهبود جذب گاز آمونیاک در سامانه H_2O/NH_3 استفاده کردند. بدین منظور از برج جذب نوع حبابی استفاده کرده و ذرات با اندازه نانو را به سیال پایه اضافه کردند. آن‌ها از فرایند جذب حبابی تصویربرداری کرده و مشاهده کردند که اندازه حباب ایجاد شده در نانوسیال از سیال دوجزئی پایه کوچک‌تر است. این موضوع به دلیل برخورد نانوذرات با حباب‌های تشکیل شده است و این باعث می‌شود سطح انتقال جرم افزایش یابد، بنابراین، حباب در نانوسیال سریع‌تر جذب می‌شود. آن‌ها دریافتند که نرخ جذب در همه غلظت‌ها و در همه انواع نانوذرات (CuO ، Al_2O_3 و Cu) بیش‌تر از سیال پایه است و با افزایش درصد وزنی نانوذره افزایش می‌یابد. آن‌ها بیشینه کسر جذب مؤثر (نسبت جذب در حضور نانوذرات به جذب در سیال پایه) در غلظت $18/7$ درصد از آمونیاک و غلظت حجمی $0/1$ درصد از نانوذرات مس را برابر $3/21$ به دست آوردند.

در سال ۲۰۰۸، کیم و همکاران [۲۸] از نانوسیال سیلیکا/آب برای جذب دی‌اکسیدکربن در یک برج جذب حبابی استفاده کردند. براساس مشاهدات آن‌ها، افزودن نانوذرات به سیال پایه شدت جذب را تا 76 درصد در طول یک دقیقه اول و مقدار کلی جذب را تا 24 درصد افزایش می‌دهد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال جرم دی‌اکسیدکربن در نانوسیال پنج برابر بیش‌تر از آب خالص است. همچنین مشاهده کردند، حباب‌های تشکیل شده در نانوسیال کوچک‌تر از آب خالص است و سطح انتقال جرم بیش‌تر و حلالیت بالایی دارند. در سال ۲۰۰۹، ما^۲ و همکاران [۲۹] میزان انتقال حرارت و جرم را با استفاده از نانولوله‌های کربنی، در سیال پایه آب-آمونیاک، در یک برج حبابی بررسی کردند. با اصلاح کردن سطح نانوذرات، نانوسیال دوتایی بدون اضافه کردن هیچ نوع پخش‌کننده تهیه شد. اثر غلظت نانوذره و غلظت اولیه آمونیاک در سیال پایه در جذب بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش غلظت نانوذره باعث افزایش شدت جذب می‌شود.

در سال ۲۰۱۱، لی^۳ و همکاران [۳۰] با استفاده از یک برج حبابی و به وسیله متانول، به عنوان سیال پایه و نانوذرات



شکل ۸: نمودار نسبت ضریب نفوذ رنگ در نانوسیالات بر ضریب نفوذ در آب خالص و همچنین نسبت هدایت حرارتی نانوسیالات بر ضریب هدایت حرارتی آب خالص بر حسب درصد حجمی نانوذرات [۲۲]

که پس از آن ضریب نفوذ کاهش می‌یابد.

• افزایش انتقال جرم

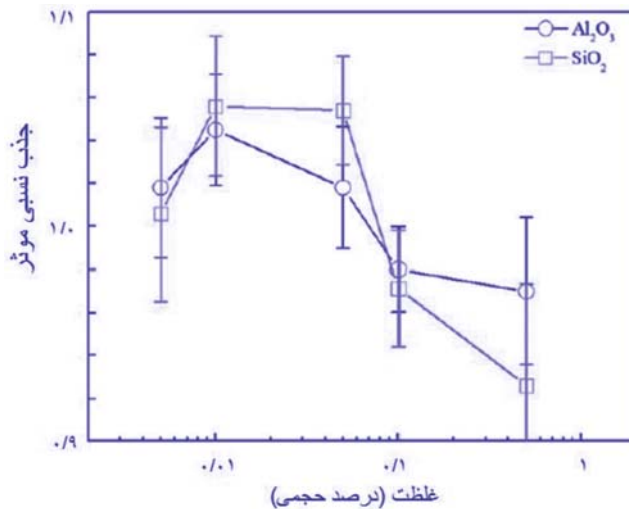
انتقال جرم یکی از فرایندهای مهم در صنایع شیمیایی است. ضرایب انتقال جرم در طراحی دستگاه‌هایی مانند برج‌های تقطیر، برج‌های جذب و دفع و برج‌های خنک‌کننده آب نقش مهمی دارند. در این قسمت مروری بر کارهای انجام شده، برای بهبود انتقال جرم با نانوسیال، در فرایند جذب گاز بیان می‌شود. به طوری که بیش‌تر تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده است، نشان می‌دهد که افزایش نانوذرات به حلال می‌تواند سبب افزایش شدت انتقال جرم شود [۲۵-۲۶]. بیش‌تر از دو برج حبابی و جداره مرطوب برای ایجاد سطح تماس بین دو فاز گاز و مایع استفاده شده و با توجه به متفاوت بودن مکانیزم انتقال جرم در این دو برج، تلاش شده تا یک طبقه‌بندی مناسب با توجه به نوع برج صورت گیرد.

• برج جذب حبابی

در این قسمت مروری بر کارهای انجام شده با برج حبابی و بررسی مکانیزم‌های آن انجام می‌شود. در سال ۲۰۰۶، کیم^۱ و

1. Kim
2. Ma

3. Lee



شکل ۹: نمودار نرخ جذب مؤثر بر حسب غلظت نانوسیال [۳۰]

۱۵ درصد از آمونیاک و در حضور نانوذرات γ - Al_2O_3 و ماده فعال کننده سطح PAA، نرخ جذب ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۱، یانگ و همکاران [۳۳] اثر نانوذرات ZnFe_2O_4 و Fe_2O_3 ، Al_2O_3 را در جذب گاز آمونیاک، با سیال پایه آب-آمونیاک، در یک برج جداره مرطوب بررسی کردند. غلظت نانوذرات، ویسکوزیته، پایداری نانوسیال و نسبت جرمی آمونیاک در سیال پایه به عنوان پارامترهای کلیدی بررسی شد. آن‌ها یک مقدار بهینه را برای هر یک از نانوذرات و سورفکتانت به دست آوردند. آن‌ها علت اصلی نتایج به دست آمده را تغییرات ویسکوزیته دانستند. آزمایش‌های ویسکوزیته نشان داده است که ویسکوزیته به سرعت بعد از مقدار خاصی از نانوذره افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش میزان ذرات هنگامی می‌تواند سبب افزایش نرخ جذب شود که ویسکوزیته نانوسیال به مقدار زیادی افزایش پیدا نکند. اضافه کردن فقط سورفکتانت یا مقدار کمی نانوذره شدت جذب را به صورت ناچیز افزایش داد. آن‌ها توانستند شدت جذب را تا ۷۰ درصد برای Fe_2O_3 و ۵۰ درصد برای ZnFe_2O_4 در غلظت ۱۵ درصد جرمی آمونیاک افزایش دهند. نمودار نرخ جذب بر حسب غلظت نانوذره در شکل (۱۰) رسم شده است [۳۳].

• اثر میدان مغناطیسی در فرایند جذب

تحقیقات اخیر نشان داده است، اعمال میدان مغناطیسی

1. Yang

SiO_2 و Al_2O_3 ، عملیات جذب گاز دی‌کسیدکربن را انجام دادند. آن‌ها موفق شدند مقدار جذب را برای نانوسیال Al_2O_3 تا ۴/۵ درصد در غلظت ۰/۰۱ درصد و برای SiO_2 تا ۵/۶ درصد در غلظت ۰/۰۵ درصد، در دمای ۲۰- درجه افزایش دهند. همچنین، آن‌ها یک غلظت بهینه را برای هر یک از نانوذرات به دست آوردند که این غلظت، برای هر دو نانوذره استفاده شده، ۰/۰۱ درصد حجمی است. بعد از این غلظت بهینه نرخ انتقال جرم کاهش می‌یابد. آن‌ها علت این کاهش را به واسطه به هم چسبیدن نانوذرات بیان کردند که باعث سنگین شدن نانوذرات و کاهش میدان سرعت آن‌ها در سیال می‌شود. در شکل (۹) نمودار مقدار جذب بر حسب غلظت نانوذره رسم شده است [۳۰].

• برج جداره مرطوب

در این قسمت مروری بر کارهای انجام شده با برج جداره مرطوب و بررسی مکانیزم‌های آن انجام می‌شود. در سال ۲۰۱۱، صمدی و همکاران [۳۱] اثر نانوذره Al_2O_3 را در جذب گاز دی‌اکسیدکربن با سیال پایه آب در یک برج جداره مرطوب بررسی کردند. شدت جرمی آب و گاز و غلظت نانوسیال به عنوان پارامترهای کلیدی بررسی شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش ضریب انتقال جرم و شدت انتقال جرم می‌شود و بیش‌ترین افزایش در غلظت یک درصد حجمی مشاهده می‌شود که شدت انتقال جرم ۹۰ درصد و ضریب انتقال جرم ۵۵ درصد، نسبت به آب خالص، افزایش پیدا می‌کند.

یانگ^۱ و همکاران [۳۲] اثر نانوذرات آلفا اکسید آلومینیوم و گاما اکسید آلومینیوم را در فرایند جذب آب-آمونیاک در برج‌های فیلم ریزان بررسی کردند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از دو نوع فعال کننده سطح پلی‌اکریلیک اسید (PAA) و سدیم دو دسیل بنزن (SDBS) استفاده کردند. طبق مشاهدات آن‌ها، نانوذرات α - Al_2O_3 بر جذب آمونیاک ضعیف بوده ولی γ - Al_2O_3 باعث افزایش جذب آمونیاک می‌شود. زیرا با ساختار متفاوت ویژگی‌های سطح تغییر می‌کند که سبب می‌شود توانایی برای جذب آمونیاک نیز متفاوت باشد. در غلظت اولیه

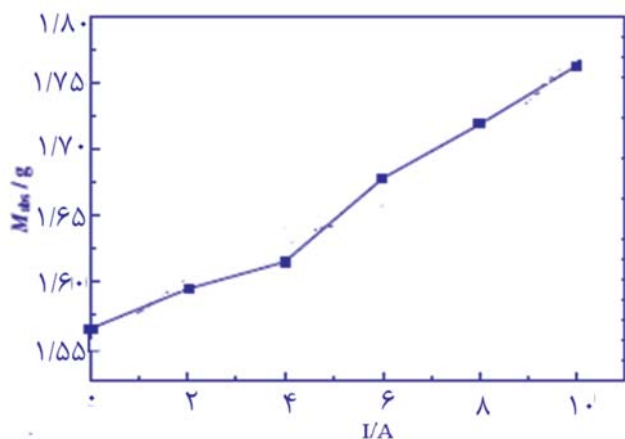
در پی آن انتقال جرم افزایش می‌یابد. نمودار نرخ جذب بر حسب شدت میدان مغناطیسی در شکل (۱۱) رسم شده است [۳۹]. مکانیسم‌هایی که برای افزایش انتقال جرم بررسی شده به این صورت است که حرکت براونی نانوذرات سبب به وجود آمدن گردابه و میکروجابجایی درون نانوسیالات می‌شود که به موجب آن ضریب انتقال جرم تقویت می‌شود [۲۷-۲۲-۳۴-۳۵-۳۶]. از طرفی، تجمع نانوذرات مکانیسمی است که برای کاهش انتقال جرم در نانوسیالات استفاده شده است [۳۰-۲۲-۳۴]. در واقع، تجمع نانوذرات در غلظت‌های بالا رخ می‌دهد که سبب به وجود آمدن ذرات با اندازه بزرگ می‌شود. این ذرات بر سر راه انتقال جرم اجزا تجمع کرده و سبب افزایش مقاومت انتقال جرم می‌شود. عامل دیگری که باعث کاهش انتقال جرم نانوسیال می‌شود افزایش ویسکوزیته است که باعث افزایش مقاومت انتقال جرم می‌شود [۳۳].

نتیجه‌گیری

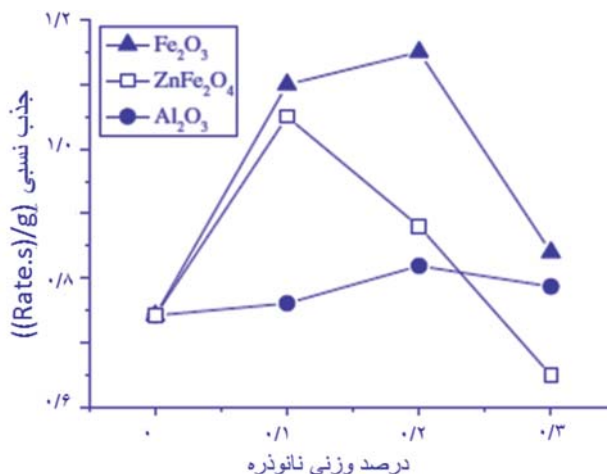
در این مقاله، مروری بر کاربردهای نانوسیال در زمینه انتقال حرارت و جرم ارائه شد. علت اصلی افزایش انتقال حرارت توسط نانوسیالات این است که افزودن نانوذرات با ضریب هدایت حرارتی بالا منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می‌شود و همچنین، حرکت براونی نانوذرات آشفستگی و اغتشاش را در سیال

بر نانوذرات مغناطیسی باعث افزایش انتقال جرم شده است. در فرایند جذب، در حضور میدان مغناطیسی، بیش‌تر از نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 استفاده شده است. سورش^۱ و همکاران [۳۷] تأثیر میدان مغناطیسی را در سیال مغناطیسی بررسی کردند. اعمال میدان به این دلیل بود که بتوانند رفتار ذرات مغناطیسی را در فیلم نفوذ کنترل کرده و یک اختلاط، هرچند جزئی، در این ناحیه ایجاد کنند. آن‌ها هنگامی به افزایش ۴۰ تا ۵۰ درصد ضریب انتقال جرم در یک برج جداره مرطوب دست یافتند که میدان مغناطیسی متناوبی، با فرکانس ۵۰ هرتز، به سامانه اعمال کردند. وی-دانگ^۲ و همکارانش [۳۸] آزمایش‌های جذب آب/آمونیاک را در سامانه حبایی، در حضور میدان مغناطیسی، انجام دادند. آن‌ها از نانوذرات مغناطیسی آهن برای افزایش جذب استفاده کردند و علت افزایش شدت جذب را در حضور میدان مغناطیسی، به دلیل کاهش کشش سطحی و ویسکوزیته نانوسیال، بیان کردند.

اعمال میدان مغناطیسی باعث می‌شود یک نیروی ثانویه به ذرات مغناطیسی وارد شود که باعث اغتشاش در ضخامت فیلم مایع می‌شود که این امر شار انتقال جرم را افزایش می‌دهد. همچنین، تحقیقات اخیر نشان داده است، میدان مغناطیسی باعث کاهش ویسکوزیته و کشش سطحی می‌شود که کاهش این دو باعث ریزتر شدن حباب‌ها و افزایش سطح تماس می‌شود که



شکل ۱۱: میزان انتقال جرم بر حسب شدت میدان‌های مختلف [۳۹]



شکل ۱۰: نمودار نرخ جذب بر حسب غلظت نانوذرات [۳۳]

زمینه انتقال حرارت و جرم، می‌توان با به کارگیری آنها در صنعت، به بازدهی بالاتر و مصرف انرژی کمتر در تجهیزات دست یافت.

تشکر و قدردانی

این کار قسمتی از یک طرح تصویب شده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه است. بنابراین، بر خود لازم می‌دانیم که به دلیل حمایت‌های مالی این دانشگاه تشکر و قدردانی نماییم.

افزایش می‌دهد که این باعث می‌شود فرایند انتقال انرژی بهبود یابد. یکی از عواملی که باعث افزایش انتقال جرم در نانوسیالات می‌شود به وجود آمدن گردابه و میکروجابجایی‌های ناشی از حرکت براونی نانوذرات است. البته حرکت براونی نانوذرات در غلظت‌های بالا، با به هم چسبیدن نانوذرات و سنگین شدن آنها کاهش می‌یابد. بنابراین، باید غلظت بهینه نانوذرات در فرایند جذب به دست آید. با توجه به پتانسیل‌های موجود در نانوسیالات در

فهرست علائم و نشانه‌ها

1. $K (wm^{-1}k^{-1})$: Conductivity
2. $U_i (wm^{-2}k^{-1})$: Overall heat transfer coefficient
3. Pe : Peclet number
4. $h (wm^{-2}k^{-1})$: heat transfer coefficient
5. $D (m^2s^{-1})$: diffusion coefficient
6. $I (A)$: current intensity

منابع

1. Choi S.U.S., Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, development and applications of non-Newtonian flows, ASME, 1995, FED 231/MD.
2. Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H.S.C., A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.54, 2011, pp. 4051–4068.
3. Xuan Y., Roetzel W., Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.43, 2000, pp. 3701–3707.
4. Karimi M., Akhavan Bahabadi M.A., Delfani S., Ghazatloo A., A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.121, 2014, pp. 114–118.
5. Zhu D., Li X., Wang N., Wang X., Gao J., Li H., Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of $Al_2O_3-H_2O$ nanofluids, Current Applied Physics, Vol.9, 2009, pp. 131–139.
6. Das S.K., Putra N., Theisen P., Roetzel W., Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluid”, J. Heat Transfer, Vol.125, 2003, pp. 567–575.
7. Keblinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.45, 2002, pp. 855–863.
8. Hojjat M., Etemad S.Gh., Bagheri R., Thibault J., Thermal conductivity of non-Newtonian nanofluids: Experimental data and modeling using neural network, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.54, 2011, pp. 1017–1023.
9. Saidur R., Leong K.Y., mohammad, H.A., A review on applications and challenges of nanofluids, Renewable and sustainable Energy reviews, Vol.15, 2011, pp. 1646–1668.
10. Farajollahi B., Etemad S.Gh., Hojjat M., Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger, Int. J. Heat and Mass Transfer Vol.53, 2010, pp. 12–17.
11. Jang S.P., Choi S.U.S., Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, Applied Physics Letters, Vol.84, 2004, pp. 4316–8.

12. Wen D., Ding Y., Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.26, 2005, pp. 855–864.
13. Putra N., Roetzel W., Das S.K., Natural convection of nanofluids, *Heat Mass Transfer*, Vol.39, 2003, pp. 775-784.
14. Dehnavi R., Rezvani Abdollah., Numerical investigation of natural convection heat transfer of nanofluids in a Γ shaped cavity, *Superlattices and Microstructures*, Vol.52, 2012, pp. 312-325.
15. Habibi Matin, M., Pop I., Natural convection flow and heat transfer in an eccentric annulus filled by Copper nanofluid, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.61, 2013, pp. 353–364.
16. Anoop K., Sadr R., Yu J., Kang S., Jeon S., Banerjee D., Experimental study of forced convective heat transfer of nanofluids in a microchannel, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.39, 2012, pp. 1325–1330.
17. Nitiapiruk P., Mahian O., Dalkilic A.S., Wongwises S., Performance characteristics of a microchannel heat sink using TiO₂/water nanofluid and different thermophysical models, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer* Vol.47, 2013, pp. 98–104,.
18. Soltani S., Etemad S.Gh., Thibault J., Pool boiling heat transfer of non-Newtonian nanofluids, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.37, 2010, pp. 29–33.
19. Bang I.C., Chang S.H., Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃–water nanofluids from a plain surface in a pool, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.48, 2005, pp. 2407–2419.
20. Yousefi T., Veysi F., Shojaeizadeh E., Zinadini S., An experimental investigation on the effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors, *Renewable Energy*, Vol.39, 2012, pp. 293-298.
21. Otanicar T., Phelan P.E., Prasher R.S., Rosengarten G., Taylor R.A., Nanofluid-based direct absorption solar collector. *J. Renewable Sustainable Energy*, Vol.2, 2010.
22. Krishnamurthy S., Bhattacharya P., Phelan P.E., Prasher R.S., Enhanced mass transport in nanofluids, *Nano Lett.*, Vol.6, No.3, 2006, pp. 419-423.
23. Fang X., Xuan Y., Li Q., Experimental investigation on enhanced mass transfer in nanofluids, *Applied Physics Letters*, Vol.95, No.20, 2009, pp. 203108 - 203111,.
24. Feng X., Johnson D.W., Mass transfer in SiO₂ nanofluids: a case against purported nanoparticle convection effects, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.55, No.13–14, 2012, pp. 3447–3453.
25. Nagy E., Feczak T., Koroknai B., Enhancement of oxygen mass transfer rate in the presence of nanosized particles, *Chemical Engineering Science*, Vol.62, 2007, pp. 7391–7398.
26. Komati S., Suresh A.K., CO₂ Absorption into Amine Solutions: a Novel Strategy for intensification based on the addition of ferrofluids, *J. Chemical Technology and Biotechnology*, Vol.83, 2008, pp. 1094-1100.
27. Kim J.K., Jung J.Y., Kang Y.T., The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid, *Int. J. Refrigeration*, Vol.29, 2006, pp. 22–29.
28. Kim W.G., Kang H.U., Jung K.M., Kim S.H., Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO₂ Absorption, *Separation Science and Technology*, Vol.43, 2008, pp. 3036 – 3055.
29. Ma X., Su F., Chen J., Bai T., Han Z., Enhancement of bubble absorption process using a CNTs-ammonia binary nanofluid, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.36, 2009, pp. 657–660.
30. Lee J.W., Jung J.Y., Lee S.G., Kang Y.T., CO₂ Bubble Absorption Enhancement in Methanol-Based Nanofluids, *Int. J. Refrigeration*, Vol.34, 2011, pp. 1727-1733.
31. Samadi Z., Haghshenas Fard M., Moheb A., Effect of nanofluid on mass transfer coefficient of CO₂ in

- a wetted wall column Int. Chemical Engineering Congress & Exhibition Kish, Iran, 2011, pp. 21-24.
32. Yang L., Du K., Cheng B., Jiang Y., The influence of Al₂O₃ Nanofluid on the falling film absorption with ammonia-water, The Natural Science Foundation of China (No. 50876020).
 33. Yang L., Du K., Niu X. F., Cheng B., Jiang Y.F., Experimental study on enhancement of ammonia water falling film absorption by adding nano-particles, Int. J. Refrigeration, Vol.34, 2011, pp. 640-647.
 34. Kim H., Jeong J. Y., Kang Y. T., Heat and mass transfer enhancement for falling film absorption process by SiO₂ binary nanofluids, Int. J. Refrigeration, Vol.35, 2012, pp. 645-651.
 35. Sara O.N., Tcer F., Yapici S., Sahin B., Effect of suspended CuO nanoparticle on mass transfer to a rotating disc electrode, experimental Thermal and fluid science, Vol.35, 2011, pp. 558-564,.
 36. Komati S., Suresh A.K., Anomalous enhancement of interphase transport rates by nanoparticles; Effect of magnetic iron oxide on gas-liquid mass transfer, Industrial and Engineering chemistry Research, Vol.49,2010, pp. 390-405.
 37. Suresh A.K., Bhalerao S., Rate Intensification of Mass Transfer Process Using Ferrofluid, J. Pure Ppplcation Physical, Vol.40, 2001, pp. 172-184.
 38. Wu W.D., Liu G., Chen S.X., Zhong H., Nanoferrofluid addition enhances ammonia/water bubble absorption in on external magnetic field, Energy and Buiding, Vol.57, 2013, pp. 268-277.
 39. Niu X. F., Du K., Xiao F., Experimental study on ammonia-water falling film absorption in external magnetic fields, Int. J. Refrigeration, Vol.33, 2010, pp. 686 – 694.