اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران
۲۷ آذرماه ۱۳۹۳، گرگان، سالن همایش های دانشگاه گلستان

مطالعه نظری رفتار نانوسیال $Water/Al_2O_3$ در رایلی معیار بنارد

سید داود محلاتیان بابکی[۱]، حمید نیازمند[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

niazmand@um.ac.ir

چکیده

در این مقاله جهت بررسی رفتار نانو سیال $Water/Al_2O_3$ در یک سیستم گرمایش از کف که در واقع متناظر با جریان همرفت رایلی-بنارد می‌باشد، از یک تئوری ساده بر مبنای روابط تجربی شناخته شده استفاده شده است. تمرکز مقاله بر بررسی اثر نانوذرات بر مشخصه های انتقال گرما در رایلی های نزدیک به رایلی معیار بنارد یا همان رایلی گذار از رسانش خالص به جابجایی طبیعی($Ra=1708$) می‌باشد. مشاهدات حاکی از آن است که افزودن نانوذرات سبب تأخیر در گذار به رسانش شده و به همین دلیل حتی در مواردی می توانند سبب کاهش عملکرد سیستم حرارتی شوند.

واژه‌های کلیدی:جریان رایلی-بنارد، نانوسیال، همرفت، رایلی معیار بنارد، $Water/Al_2O_3$

۱- مقدمه

در سالهای اخیر با توجه به کاهش روزافزون منابع بازگشت ناپذیر انرژی و هزینه مصرف آنها، طراحی بهینه سیستم‌های حرارتی اهمیت دوچندان پیدا کرده است. در این راستا یکی از مناسب ترین و پر اهمیت ترین روش‌ها استفاده از سیالات با ضریب انتقال حرارت بالاتر در سیستم‌های حرارتی می‌باشد. که این امر با افزودن ذرات با رسانش بالا و در ابعاد نانو به سیالات متداول نظیر آب و اتیلن گلیکول و ... ممکن می‌شود.

در مقالات منتشر شده موجود تلاش فراوانی برای مطالعه رفتار نانوسیالات و بررسی اثر افزودن نانوذرات صورت گرفته است. بخش اعظم این مطالعات مربوط به اثر نانوذرات بر جابجایی طبیعی بوده است. گفتنی است که خصوصاً در مورد جابجایی طبیعی، بسیاری از مطالعات نتایج متناقضی دارند[۱]. پاترا و همکاران[۲] به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر افزودن نانوذرات Al_2O_3 به سیال پایه آب و تغییرات حاصل بر مشخصه‌های جابجایی حرارتی پرداختند. گزارش آنها حاکی از کاهش عملکرد سیستم حرارتی در اثر افزودن غلظت حجمی نانوذرات می‌باشد. بعدها کیم و همکاران [۲] بررسی تئوری مفصلی در این زمینه انجام دادند که نتایج آن گزارشات پاترا و همکاران را تأیید کرد. شیوه مطالعه کیم و همکاران به علت سادگی و قدرت بالا در پیشگویی رفتار نانو سیالات، بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفته و توسط دانشمندانی نظیر هوآنگ و همکاران [۳] دنبال شد. هوانگ و همکاران با دنبال کردن روش کیم و همکاران، اثر تغییر قطر نانوذرات را بررسی کردند. گزارش آنها حاکی از کاهش نرخ انتقال حرارت با افزودن قطر نانوذرات Al_2O_3 می‌باشد. علاوه بر مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی مذکور دانشمندان بسیاری نظیر خنافر[۴] وهمکاران و کوآنگ و ویولی[۵] به بررسی مشخصه های حرارتی سیستم‌های حاوی نانوسیالات پرداختند.

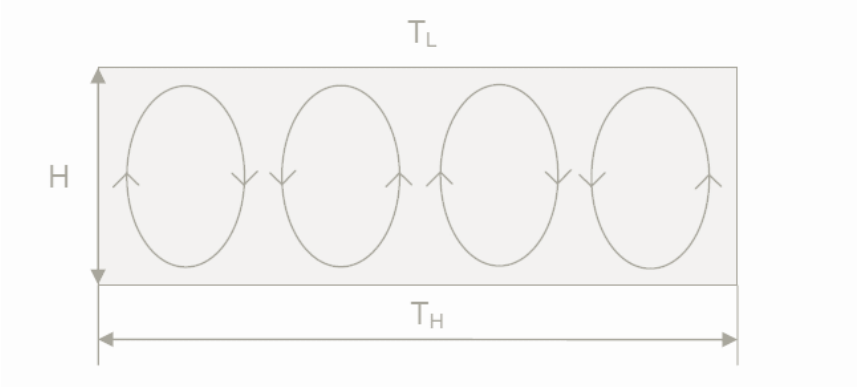
مرور مختصر فوق بر مطالعات مربوط به اثر نانوسیالات حاکی از آن است که بر خلاف اهمیت بررسی اثر نانوسیالات در رایلی‌های بحرانی نظیر رایلی معیار بنارد در همرفت بنارد که می‌توانند با افزودن نانوذرات تغییر کنند و در نتیجه اثرات افزودن نانو ذرات را دوچندان نمایند، مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در این نگاره اثر افزودن ناوذرات Al_2O_3 بر سیال پایه آب در محفظه‌ای با جریان همرفت رایلی بنارد با رایلی‌های در نزدیکی رایلی معیار بنارد($Ra=1708$) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مشخصه‌های جریان همرفت رایلی-بنارد

در شکل(۱) طرح ساده‌ای از جریان همرفت رایلی بنارد نشان داده شده است. در این جریان مهم‌ترین پارامتر عدد بی‌بعد رایلی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ra=\frac{g\beta L^3}{\nu\alpha}\Delta T \qquad (۱)$$

در رابطه فوق g، β، L، ν و α به ترتیب شتاب گرانش، ضریب انبساط حجمی، عمق سیال، ویسکوزیته سینماتیک و ضریب نفوذ حرارتی بوده و ΔT اختلاف دمای دو دیواره بالا و پایین می‌باشد.



شکل(۱) طرح اولیه‌ای از ساختار همرفت رایلی-بنارد

در رایلی‌های پایین انتقال حرارت با رسانش خالص صورت می‌گیرد تا زمانی که رایلی از مقدار مشخص ۱۷۰۸ عبور نماید، پس از آن نیروهای شناوری بر نیروهای ویسکوز غلبه نموده و مکانیزم غالب انتقال حرارت از رسانش به جابجایی طبیعی تغییر ماهیت می‌دهد و عدد ناسلت($\mathrm{Nu} = hd / \mathrm{k}$) از مقدار یک صعود می‌نماید و با رایلی افزایش می‌یابد.

رابطه ۲ رابطه ناسلت و رایلی را در رایلی‌های پایین را نشان می‌دهد:

$$\mathrm{Nu} = \begin{cases} 1 & \mathrm{Ra} \prec 1708 \\ 0.012\,\mathrm{Ra}^{0.6} & 1708 \le \mathrm{Ra} \prec 6000 \end{cases} \qquad (۲)$$

۳- روابط تعیین خواص نانوسیالات

جهت مدلسازی خواص نانوسیالات با فرض تک-فاز بودن نانوسیالات و حرکت نانوذرات با سرعتی برابر با جریان سیال پایه روابط بسیاری توسط دانشمندان مختلف ارائه شده است که منتخب آنها به شرح زیر می‌باشد:

رابطه ۳ چگالی نانوسیال را برحسب غلظت حجمی نانوذرات و خواص نانوذرات محاسبه می‌کند:

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} = (1-\phi) + \phi\delta_1 \qquad (۳)$$

در این رابطه δ_1 برابر با نسبت چگالی نانوذرات بر چگالی سیال پایه بوده و ϕ غلظت حجمی نانوذرات می‌باشد.

ظرفیت گرمایی و ضریب انبساط حجمی نانوسیال نیز به ترتیب با کمک روابط ۴ و ۵ تعیین می‌گردند:

$$\frac{(\rho C_p)_{nf}}{(\rho C_p)_f} = (1-\phi) + \phi\delta_2 \qquad (۴)$$

$$\beta_{nf} = (1-\phi)\beta_f \qquad (۵)$$

در در رابطه ۴، δ_2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta_2 = \frac{(\rho C_p)_{np}}{(\rho C_p)_f} \quad (۶)$$

که در آن اندیش np نشان دهنده خواص نانوذرات می‌باشد.

ویسکوزیته نانوسیال با مدل برینکمن[۶] به صورت زیر تعیین می گردد:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۷)$$

به همین ترتیب ضریب رسانش حرارتی نانوسیال با کمک مدل H-C [۷]به صورت محاسبه می‌شود:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{\gamma+2-2\phi(1-\gamma)}{\gamma+2+\phi(1-\gamma)} \quad (۸)$$

که در آن γ نسبت ضریب رسانش حرارتی نانوذرات به ضریب رسانش حرارتی سیال پایه می‌باشد.

٤- بررسی نظری رفتار نانوسیالات

با توجه به رابطه ۲ پارامتر تعیین کننده مشخصات جریان رایلی- بنارد، عدد رایلی می‌باشد که با جایگذاری روابط ۳ تا ۸ و با تعریف پارامتر جدید f به صورت زیر تعیین می گردد:

$$\mathrm{Ra}_{nf} = f\,\mathrm{Ra}_f \quad (۹)$$

که در آن پارامتر f برابر است با:

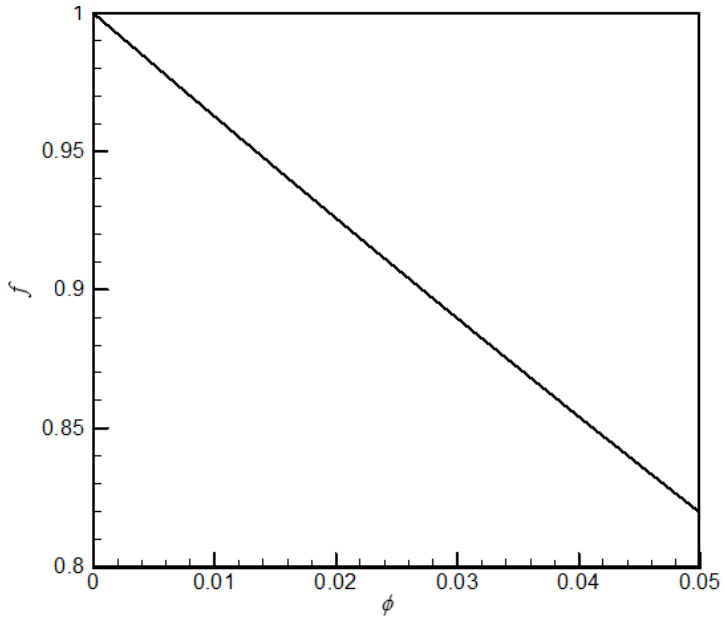
$$f = \frac{\gamma+2+\phi(1-\gamma)}{\gamma+2-2\phi(1-\gamma)}(1-\phi)\left((1-\phi)+\phi\delta_1\right)\left((1-\phi)+\phi\delta_2\right)(1-\phi)^{2.5} \quad (۱۰)$$

در ادامه به بررسی رفتار نانوسیال با کمک پارامتر f پرداخته خواهد شد.

۵- نتایج

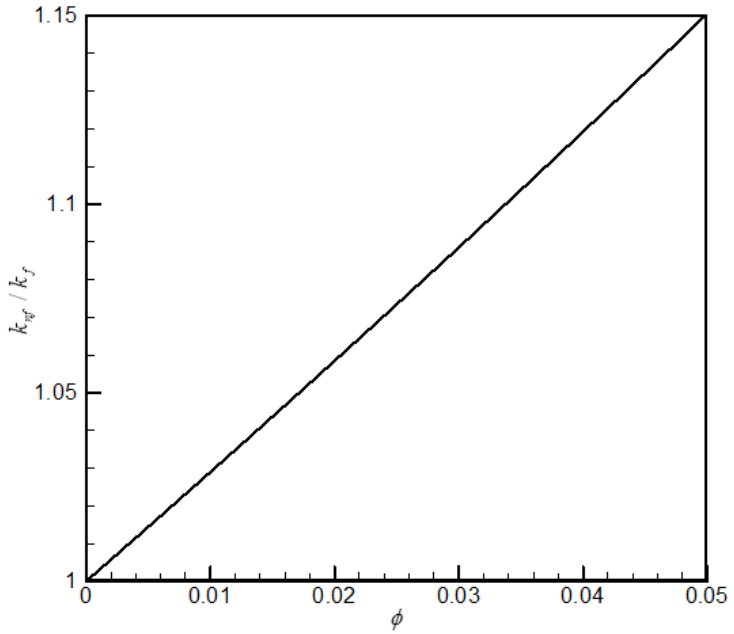
در این قسمت برای تعیین رفتار نانوسیال $Water/Al_2O_3$ در رایلی معیار بنارد($Ra=1708$)مقادیر δ_1 ، δ_2 و γ به ترتیب برابر با ۳/۸۹، ۰/۷۱۲ و ۶۵/۲۵۰ قرار داده شده اند.

پیش از هر چیز اثر غلظت نانوذرات بر پارامتر شاخص f در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش غلظت نانوذرات پارامتر f کاهش یافته یا به عبارتی دیگر مطابق رابطه ۹ با کاهش عدد رایلی فرایند جابجایی آرام شده است. دلیل این موضوع خاصیت مستهلک کنندگی نانوذرات می‌باشد.



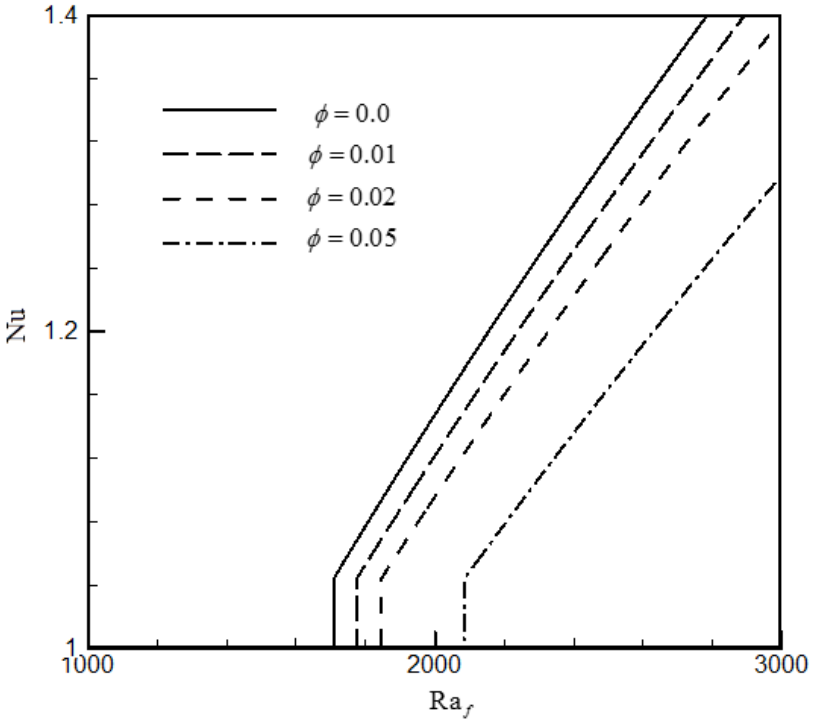
شکل(۲) رابطه ضریب مشخصه f با درصد حجمی نانوذرات

یکی دیگر از مهم‌ترین اثرات نانوذرات افزایش قابل ملاحظه ضریب رسانش حرارتی سیال می‌باشد. این اثر در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل افزایش قابل ملاحظه ضریب رسانش نانوسیال با افزودن غلظت حجمی نانوذرات نشان داده شده است.



شکل(۳) افزایش نسبت ضریب رسانش نانوسیال به ضریب رسانش سیال پایه مدل H-C (رابطه ۸)

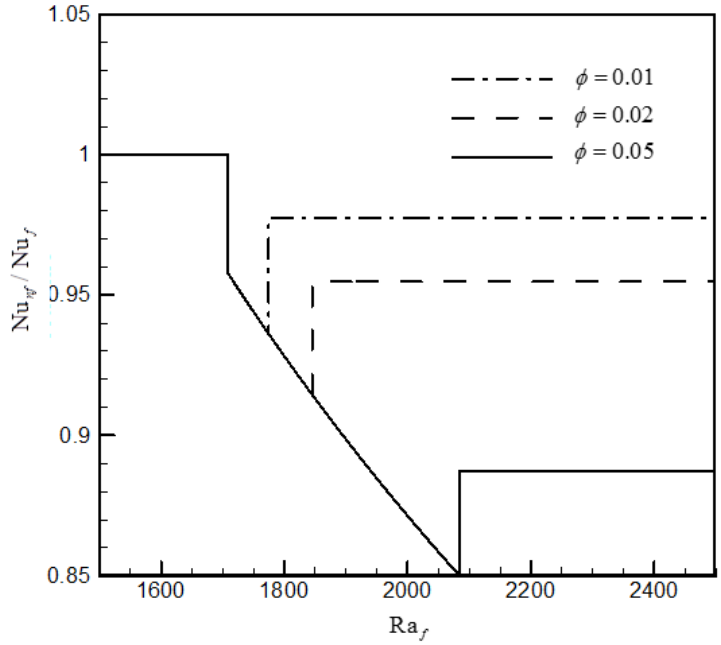
در شکل (۴) رابطه عدد رایلی و ناسلت در رایلی‌های نزدیک به رایلی معیار بنارد نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود به علت خاصیت مستهلک کنندگی نانوذرات(شکل (۲)) گذار از رسانش به جابجایی به تأخیر می‌افتد. این تأخیر در گذار به جابجایی باعث افت ناسلت در نانوسیالات نسبت به سیال پایه خالص می‌شود.



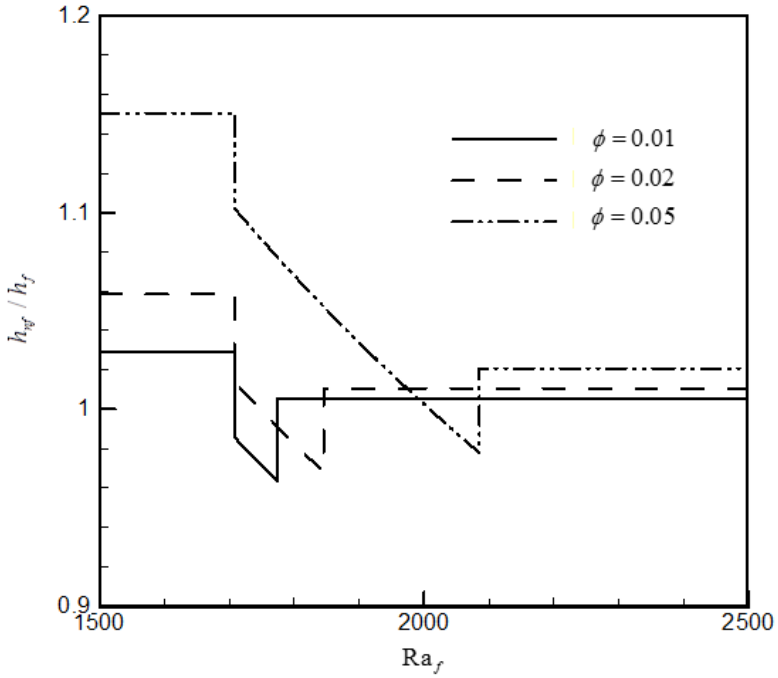
شکل(٤) رابطه عدد ناسلت و عدد رایلی در رایلی‌های نزدیک به رایلی معیار بنارد برای نانوسیالات با غلظت‌های مختلف

در شکل (۵) رابطه میان عدد رایلی و نسبت ناسلت نانوسیال به ناسلت سیال پایه در رایلی گذار به رسانش نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات Al_2O_3 و در نتیجه تأخیر بیشتر در گذار به رسانش، نسبت عدد ناسلت کاهش بیشتری یافته و بر خلاف انتظار عملکرد حرارتی سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

در شکل (۶) رابطه نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی($h_{nf} / h_f = (\mathrm{Nu}_{nf} / \mathrm{Nu}_f)(k_{nf} / k_f)$) که در واقع متناظر است با نسبت شار عبوری از سیستم حاوی نانوذرات بر شار عبوری در سیستم حاوی سیال پایه خاص، و عدد رایلی در نانو سیالات باغلظت‌های حجمی مختلف نشان داده شده است.



شکل(۵) رابطه نسبت ناسلت در نانوسیال به ناسلت سیال پایه خالص در نانوسیالات با غلظت‌های مختلف



شکل(٦) رابطه نسبت ضریب جابجایی نانوسیال به ضریب جابجایی سیال پایه و عدد رایلی در نانوسیالات با غلظت حجمی مختلف

همانطور که دیده می‌شود افت شدید در نسبت ناسلت(شکل (۵)) در نسبت ضریب جابجایی حرارتی(شکل(۶)) دیده نمی‌شود. دلیل این امر افزایش شدید رسانش حرارتی نانوسیال با افزایش نانوذرات Al_2O_3 می‌باشد که در نتیجه آن شار گرمای ورودی به سیستم، افزایش می‌یابد. اما نتیجه کلی این است که افزودن نانوذرات به سیال پایه در رایلی‌های نزدیک به رایلی معیار بنارد یا به عبارتی رایلی‌های نزدیک به مقدار ۱۷۰۸، باعث کاهش عملکرد سیستم حرارتی می‌شود.

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر افزودن نانوذرات Al_2O_3 بر رفتار حرارتی سیال پایه آب در یک سیستم گرمایش از کف با ساختار جابجایی همرفت رایلی-بنارد در رایلی های کوچک نزدیک به رایلی معیار بنارد پرداخته شده است. برای این منظور از یک تحلیل تئوری مبتنی بر روابط شناخته شده عدد ناسلت برای همرفت رایلی-بنارد استفاده شده است. طبق این تئوری از جایگذاری روابط مربوط به محاسبه خواص نانوسیال بر حسب غلظت و خواص سیال پایه و نانوذرات در رابطه ناسلت، پارامتر تعیین کننده‌ای بدست می‌آید که به کمک آن می‌توان مشخصه‌های جریان را ارزیابی نمود. از تحقیق حاضر نتایجی بدست آمده است که خلاصه آنها به شرح زیر است:

- افزودن نانوذرات Al_2O_3 باعث کاهش رایلی نانوسیال و آرام‌تر شدن جریان می‌شود.
- با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، گذر از رسانش خالص به جابجایی طبیعی در همرفت بنارد کاهش یافته در نتیجه سیستم با افت ناسلت روبرو می‌شود.
- برخلاف کاهش شدید ناسلت در غلظت‌های بالای نانوذرات، شار ورودی به سیستم حرارتی در غلظت‌های پایین افت بیشتری پیدا می‌کند.
- به طور کلی افزودن نانوذرات Al_2O_3 سیال پایه باعث کاهش عملکرد سیستم حرارتی با ساختار همرفت رایلی-بنارد در رایلی‌های پایین نزدیک به رایلی معیار ۱۷۰۸ خواهد شد.

۷- فهرست منابع و مأخذ

[1] P. Ternik, R. Rudolf, Laminar natural convection of non-Newtonian nanofluids in a square enclosure with differentially heated side walls, *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 12, No. 1, pp. 5-16, 2013 .

[2] N. Putra, W. Roetzel, S. K. Das, Natural convection of nano-fluids, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 8-9, pp. 775-784, 2003 .

[3] K. S. Hwang, J.-H. Lee, S. P. Jang, Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al< sub> 2</sub> O< sub> 3</sub> nanofluids in a rectangular cavity ,*International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 19, pp. 4003-4010, 2007 .

[4] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 19, pp. 3639-3653, 2003 .

[5] K. C. Lin, A. Violi, Natural convection heat transfer of nanofluids in a vertical cavity: Effects of non-uniform particle diameter and temperature on thermal conductivity, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 2, pp. 236-245, 2010 .

[6] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000 .

[7] R. Hamilton, O. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962 .