

PENGARUH KONSENTRASI ZrO₂ TERHADAP KORELASI PERPINDAHAN PANAS NANOFLUIDA AIR – ZrO₂ UNTUK PENDINGIN REAKTOR

Sudjatmi K.A, K. Kamajaya, dan Efrizon Umar
Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri – BATAN
Email: sudjatmi@batan.go.id

Diterima editor 16 September 2013

Disetujui untuk publikasi 16 Oktober 2013

ABSTRAK.

PENGARUH KONSENTRASI ZrO₂ TERHADAP KORELASI PERPINDAHAN PANAS NANOFLUIDA AIR-ZrO₂ UNTUK PENDINGIN REAKTOR. Sejalan dengan perkembangan konsep keselamatan pasif pada sistem keselamatan PLTN, maka sistem perpindahan panas konveksi alam memegang peranan penting. Pemakaian nanofluid sebagai fluida pendingin pada sistem keselamatan nuklir dapat digunakan pada Sistem Pendingin Teras Darurat dan Sistem Pendingin Pengungkung Luar Reaktor. Beberapa peneliti telah melakukan studi desain konseptual aplikasi nanofluid untuk meningkatkan keselamatan AP1000 dan sistem pendingin teras darurat pada reaktor daya eksperimen. Penerapan nanofluida juga mulai dikembangkan melalui hasil penelitian perpindahan panas konveksi alamiah pada sub-buluh dengan nanofluida sebagai fluida kerjanya sangat dibutuhkan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh perubahan konsentrasi ZrO₂ terhadap korelasi perpindahan panas konveksi alamiah dengan pendekatan eksperimental. Data eksperimental yang diperoleh digunakan untuk mengembangkan korelasi umum empirik perpindahan panas konveksi alamiah. Metode penelitian dengan menggunakan alat uji sub-buluh vertikal dengan geometri segitiga dan segiempat menggunakan air dan nanofluida air-ZrO₂ sebagai fluida kerjanya. Konsentrasi nanopartikel dalam larutan yang digunakan sebesar 0,05 %, 0,10% dan 0,15 % dalam persen berat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk bilangan Rayleigh yang sama, kemampuan pemindahan kalor oleh nanofluida air-ZrO₂ lebih baik dari pada pemindahan kalor oleh air. Namun peningkatan konsentrasi nanofluida tidak selalu mendapatkan kemampuan pemindahan kalor yang lebih baik.

Kata kunci: nanofluida air-ZrO₂, konveksi alamiah, sub-buluh segitiga, sub-buluh segi empat

ABSTRACT

THE EFFECT OF ZrO₂ CONCENTRATION ON THE HEAT TRANSFER CORRELATION NANOFLUIDA WATER-ZrO₂ FOR REACTOR COOLANT. In line with the development of the passive safety concept for the safety systems of nuclear power plants, the natural convection heat transfer system plays an important role. The nanofluid as coolant fluid on nuclear safety system can be used in Emergency core cooling system and in reactor coolant system confinement. Several researchers have studied the conceptual design of nanofluid applications to improve the safety of the AP1000 and the emergency core cooling system at reactor power experiments. Application of nanofluid also began to be developed through the research of natural convection heat transfer in sub-channel. This study aimed to determine the effect of changes in the concentration of ZrO₂ on natural convection heat transfer correlation with experimental approaches. The experimental data obtained is used to develop a general empirical correlation of heat transfer of natural convection. Research methods using test equipment vertical sub-channel with triangular and rectangular geometry using water and nanofluid water ZrO₂. The concentration of nanoparticles in the solution used by 0.05 %, 0.10 % and 0.15 % in weight percent. The results showed that for the same Rayleigh number, the heat removal capability by nanofluid water-ZrO₂ better than the transfer of heat by water. However, increasing the concentration of nanofluid not always get heat removal capability better.

Keywords: water-ZrO₂ nanofluid, natural convection, triangular sub-channel, rectangular sub-channel

PENDAHULUAN

Diprediksi bahwa nanofluida akan mulai diterapkan dalam PLTN dimasa mendatang, terutama sebagai pendingin utama pada reaktor PWR, pendingin bagi instalasi ECCS pada reaktor PWR, ABWR/SBWR dan pendingin pada kondisi kecelakaan parah pada reaktor LWR dengan *power density* yang tinggi. Penerapan pertama nanofluida di bidang nuklir diprediksi akan dapat meningkatkan daya keluaran yang signifikan pada reaktor jenis PWR sehingga dapat meningkatkan pula performansinya secara ekonomis. Penerapan nanofluida dalam bidang nuklir yang sangat menjanjikan ini tentu sebelumnya harus ditunjang oleh berbagai penelitian yang komprehensif, baik dari sisi performansi termohidrolik maupun kompatibilitas kimia nanofluidanya terhadap material reaktor. Salah satu topik penelitian yang masih terus dikembangkan saat ini adalah pemanfaatan sistem pasif dalam proses pemindahan panas peluruhan saat terjadi kecelakaan reaktor. Dalam sistem ini, pemanfaatan proses konveksi alamiah dalam sub-buluh pendingin vertikal menggunakan fluida konvensional maupun nanofluida menjadi pilihan utama dan berbagai jenis penukar panas aliran vertikal dengan dimensi dan ukuran yang berbeda-beda mulai dirancang dan diaplikasikan dalam penelitian tersebut [1,2,3].

Mengacu pada pemikiran-pemikiran yang telah dikemukakan di atas maka penelitian perpindahan panas konveksi alamiah maupun paksa dalam sub-buluh vertikal menggunakan nanofluida dengan nanopartikel produksi dalam negeri ini perlu dilakukan. Untuk pemahaman proses perpindahan panas konveksi alamiah pada sub-buluh vertikal menggunakan nanofluida tersebut tentu perlu dukungan semua pihak dan penelitian ini diajukan untuk tujuan tersebut. Pada saat awal penelitian digunakan air murni sebagai fluida kerjanya [4,5,6].

Sifat termal nanofluida tampaknya jauh lebih baik dari fluida air dan nanopartikel sangat meningkatkan konduktivitas termal campuran dan meningkatkan kemampuan pemindahan kalor. Li dan Xuan telah mempelajari dan melakukan eksperimen perpindahan panas konveksi menggunakan nanofluida untuk aliran laminar dan aliran turbulen di dalam tabung. Mereka dapat mengungkapkan bahwa peningkatan yang luar biasa dalam transfer panas dari fluida kerja nanofluida untuk bilangan Reynolds yang sama [7]. Dengan menggunakan nanofluida Yang dan kawan-kawan mengukur peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi sehubungan dengan konduktivitas termal efektif dan menyimpulkan bahwa bentuk partikel atau rasio aspek partikel adalah parameter yang signifikan untuk mempengaruhi kinerja nanofluida [8].

Penelitian perpindahan panas konveksi alamiah maupun paksa dengan fluida kerja nanofluida di sekitar susunan silinder sub-buluh vertikal tidak banyak dilakukan orang karena penerapannya yang belum terlalu umum. Karena penelitian di bidang ini masih relatif terbatas, maka persamaan-persamaan korelasi perpindahan panas konveksi untuk kasus ini juga masih jarang dan mempunyai daerah keberlakuan yang sangat terbatas.

Sejalan dengan perkembangan konsep keselamatan pasif dalam teknologi reaktor nuklir di mana perpindahan panas konveksi alamiah, paksa atau konveksi gabungan semakin diandalkan, dan penerapan nanofluida sebagai fluida kerjanya juga mulai dikembangkan maka penelitian perpindahan panas konveksi alamiah pada sub-buluh dengan nanofluida sebagai fluida kerjanya juga semakin penting. Atas dasar pemikiran tersebut di atas, penelitian perpindahan panas konveksi paksa pada susunan silinder vertikal ini dilakukan. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh persamaan-persamaan korelasi empirik yang dapat memprediksi nilai koefisien perpindahan panas konveksi di sekitar sub-buluh. Nilai koefisien perpindahan panas tersebut sangat diperlukan dalam melakukan analisis termohidrolika suatu reaktor nuklir berbahan bakar silinder atau dalam proses perancangan penukar panas *shell* dan *tube* tanpa penyekat yang banyak diterapkan pada reaktor nuklir LWR maupun reaktor generasi baru.

METODOLOGI

Dasar Teori

Perpindahan panas merupakan suatu proses bilamana dalam suatu sistem terdapat gradien suhu, atau bila dua sistem yang suhunya berbeda disinggungkan, maka akan terjadi perpindahan energi. Perbedaan densitas dalam fluida menyebabkan fluida tersebut dapat mengalami pergerakan aliran. Aliran inilah yang menyebabkan terjadinya perpindahan energi keseluruhan sistem. Aliran terjadi secara dua macam, yaitu: aliran alamiah dan aliran paksa. Fluks panas yang dipindahkan oleh konveksi dihitung dengan menggunakan persamaan (1) [9].

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Dalam persamaan tersebut, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, T_s adalah temperatur permukaan dan T_∞ adalah temperatur fluida. Karena terjadi konduksi pada lapisan permukaan, aliran panas tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan (2).

$$q = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2)$$

Dalam persamaan di atas k adalah konduktivitas termal fluida. Dengan mengombinasikan Persamaan 1 dan 2, diperoleh nilai koefisien perpindahan panas konveksi h dalam bentuk persamaan (3).

$$h = \frac{-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (3)$$

Dalam masalah konveksi memang ada kebutuhan untuk menyatakan parameter di dalamnya dalam fungsi yang umum dan tidak tergantung pada jenis fluida. Kebutuhan tersebut difasilitasi dengan penggunaan bilangan tak berdimensi. Salah satu bilangan tak berdimensi yang penting adalah bilangan Nusselt (Nu) yang merepresentasikan gradien temperatur tak berdimensi. Bilangan Nusselt juga memberikan ukuran koefisien perpindahan panas seperti yang tercermin dalam persamaan (4).

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (4)$$

Dari persamaan (4), L merupakan panjang karakteristik dari masalah yang ditinjau. Bilangan tak berdimensi lain adalah bilangan Prandtl (Pr) yang merupakan parameter yang menyatakan perbandingan ketebalan lapisan batas hidrodinamik dan termal, dengan kata lain bilangan Prandtl merupakan penghubung antara medan kecepatan dengan medan termal. Bilangan Prandtl diberikan oleh persamaan (5).

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (5)$$

dengan,

- c_p : panas spesifik
- μ : viskositas dinamik fluida
- k : konduktivitas termal.

Ada tiga macam jenis aliran konveksi, yaitu konveksi paksa, konveksi alamiah dan konveksi gabungan. Konveksi paksa terjadi ketika perpindahan panas berlangsung dengan aliran fluida akibat dorongan gaya eksternal. Dalam hal ini korelasi yang biasanya digunakan adalah hubungan antara bilangan Nusselt dengan bilangan Reynolds dan Prandtl sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan (6).

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (6)$$

Untuk konveksi bebas, bilangan Nusselt dinyatakan sebagai fungsi dari bilangan Rayleigh. Bilangan Rayleigh merupakan bilangan tak berdimensi, yang merupakan perkalian antara bilangan Grashof dan Prandtl.

$$Ra = Gr Pr \quad (7)$$

Sedangkan bilangan Grashof ditunjukkan oleh persamaan (8),

$$Gr = \rho^2 g \beta (T_s - T_\infty) L^3 / \mu^2 \quad (8)$$

dengan,

ρ = kerapatan

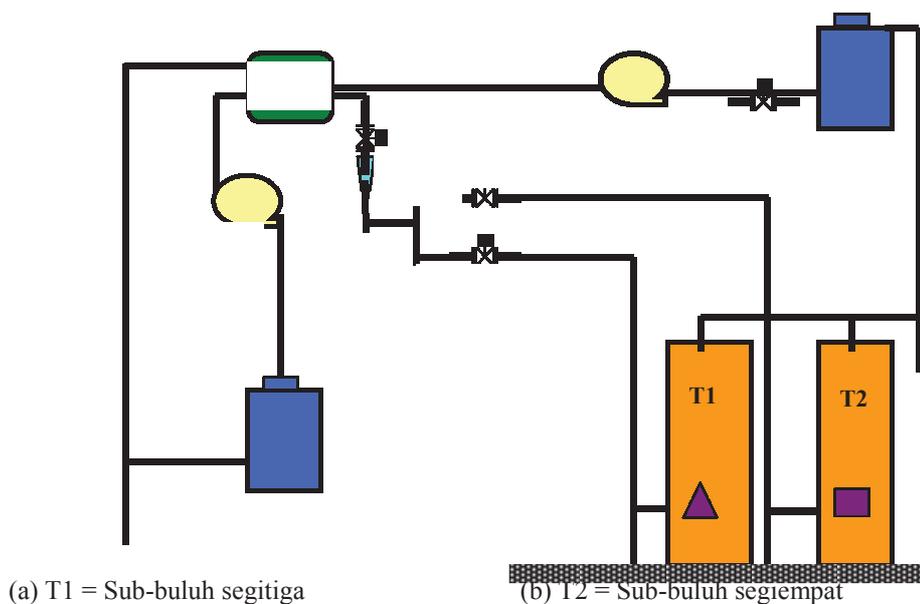
β = koefisien muai panas

L = panjang karakteristik yang digunakan pada perhitungan (*significant length*).

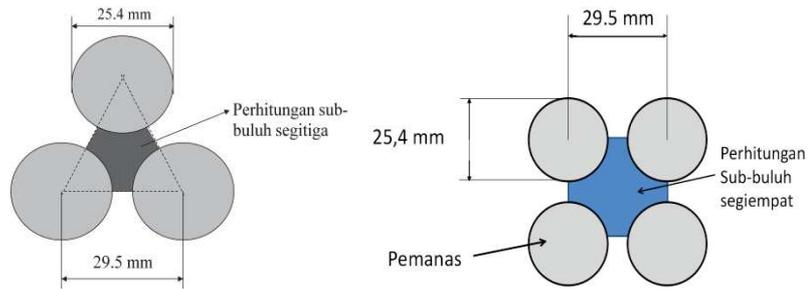
Jadi dapat dikatakan bahwa bilangan Grashof menggambarkan hubungan antara daya apung dan viskositas dalam cairan, sedangkan bilangan Prandtl menggambarkan hubungan antara difusi momentum dan difusi panas. Oleh karena itu bilangan Rayleigh sendiri juga dapat dipandang sebagai rasio gaya apung, difusi panas dan difusi momentum.

Bahan dan Peralatan

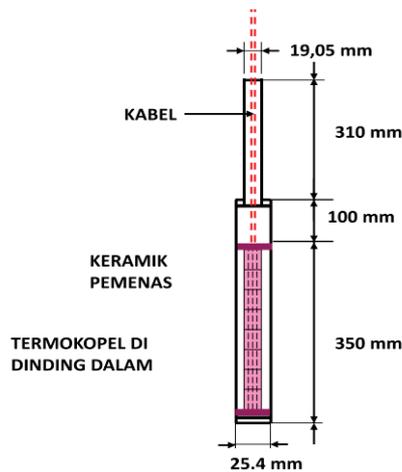
Peralatan eksperimen untuk sub buluh vertikal segitiga dan segiempat. dirancang untuk aliran konveksi alamiah. Peralatan ini juga telah dilengkapi dengan alat penukar kalor tipe plat, tangki primer untuk nanofluida yang dilengkapi pula dengan sistem pendingin primer dan sekunder. Sebagai fluida kerja digunakan air, nanofluida air-ZrO₂ dengan konsentrasi 0,05%, 0,10% dan 0,15%.



Gambar 1. Skema rangkaian alat uji [10,11,12]



Gambar 2. Geometri daerah sub-buluh segitiga dan segiempat [10,11,12]



Gambar 3. Skema pemanas



(a) Fluida kerja air



(b) Fluida kerja nanofluida air- ZrO_2

Gambar 4. Alat uji sub-buluh vertikal [10,11,12]

Tata Kerja

Metode yang digunakan dalam penyelesaian masalah perpindahan panas konveksi pada sub-buluh vertikal menggunakan air dan nanofluida air- ZrO_2 dilakukan melalui pendekatan

eksperimental. Kaji eksperimental dilakukan menggunakan peralatan eksperimen yang khusus dirancang bangun untuk keperluan tersebut.

Penelitian ini dilakukan dengan tahap-tahap sebagai berikut:

- a. Menyusun peralatan eksperimen yang meliputi pembuatan model elemen bakar, sistem penyediaan air, seksi uji (*test section*), sistem kelistrikan, dan sistem pencatat data seperti data temperatur, laju aliran fluida dan daya listrik.
- b. Melakukan kalibrasi pada alat-alat ukur suhu (termokopel)
- c. Melakukan eksperimen untuk memperoleh data-data perpindahan panas konveksi pada sub-buluh vertikal untuk air murni dan nanofluida sebagai fluida kerja. Dalam eksperimen ini dilakukan perubahan fluks panas pada permukaan setiap pemanas yang digunakan.
- d. Melakukan analisis data, perhitungan, dan pengembangan korelasi teoritik koefisien perpindahan panas konveksi pada sub-buluh vertikal susunan segitiga dan segiempat

Pelaksanaan Eksperimen

Dalam pengujian ini, pada sistem pendingin primer digunakan air dan nanofluida air-ZrO₂, sedangkan pada sistem pendingin sekunder digunakan air murni. Untuk konveksi alamiah, debit aliran primer yang masuk pada seksi uji dengan laju alir konstan sebesar 3 liter/menit sedangkan laju alir sekunder konstan 20 liter/menit. Perangkat uji telah didesain dengan memperhitungkan agar air yang masuk pada tabung uji hanya melalui lubang samping yang dibuat didalam tabung uji dan akan menyebar keseluruh tabung, sehingga kondisi konveksi alamiah dapat dipertahankan dan pengaruh pompa sebesar 3 liter/menit dapat diabaikan. Kalor pada sistem pendingin primer ditransfer ke sistem pendingin sekunder melalui sebuah alat penukar kalor tipe plat. Kemudian terhadap susunan pemanas yang ditempatkan pada bagian seksi uji dilakukan perubahan daya pemanas dengan cara mengatur tegangan kerja pada pemanas. Daya pemanas mulai dari 250 W, 350 W, 500 W, 650 W, 750 W dan 850 W perpemanas. Selanjutnya besar daya listrik yang dibutuhkan untuk setiap pengujian diukur secara langsung menggunakan wattmeter dan nilainya dijaga konstan untuk setiap tahap pengujian, sedangkan besarnya arus yang mengalir pada setiap pemanas dan tegangan kerja pemanas diukur menggunakan amperemeter dan voltmeter. Ketiga alat ukur listrik ini juga merupakan alat ukur digital.

Untuk setiap pengujian juga dilakukan pencatatan suhu fluida pendingin dan suhu permukaan pemanas pada 5 titik pengukuran dengan ketinggian yang berbeda. Pencatatan suhu untuk setiap pengujian dilakukan setelah pemanas dijalankan selama 3 jam sehingga diharapkan kondisi *steady state* telah dicapai. Termokopel yang digunakan untuk pengukuran suhu ini disambungkan secara langsung pada data akuisisi sehingga nilai suhunya dapat langsung didapatkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan eksperimental. Data eksperimen yang didapatkan digunakan untuk mengembangkan korelasi empiris perpindahan panas konveksi pada sub-buluh vertikal dengan geometri segiempat, air murni dan nanofluida air-ZrO₂ sebagai fluida kerja. Dari data tersebut dapat ditentukan korelasi perpindahan panas konveksi sub-buluh susunan segitiga segiempat vertikal.

Pada penelitian ini, harga koefisien perpindahan kalor rata-rata antara permukaan luar pemanas dengan fluida pendingin dalam sub-buluh ditentukan secara tidak langsung. Menggunakan data pengukuran suhu pada permukaan pemanas dan pendingin pada sub-buluh serta pengukuran daya pemanas maka harga koefisien perpindahan panas ditentukan melalui perhitungan. Dalam perhitungan diasumsikan tidak ada perpindahan kalor dalam arah tutup pemanas dan tidak ada

pengaruh aliran dari atau ke kanal yang bersebelahan (aliran satu dimensi). Agar asumsi ini dapat berlaku maka dalam pemanas listrik ditempatkan isolator dalam arah tutup kelongsongnya sehingga kerugian kalor dalam arah aksial dapat diminimumkan. Demikian pula, dengan menempatkan tiga buah *dummy* dalam seksi uji diharapkan efek geometri dapat dipertimbangkan sehingga pengaruh aliran silang dapat diperkecil.

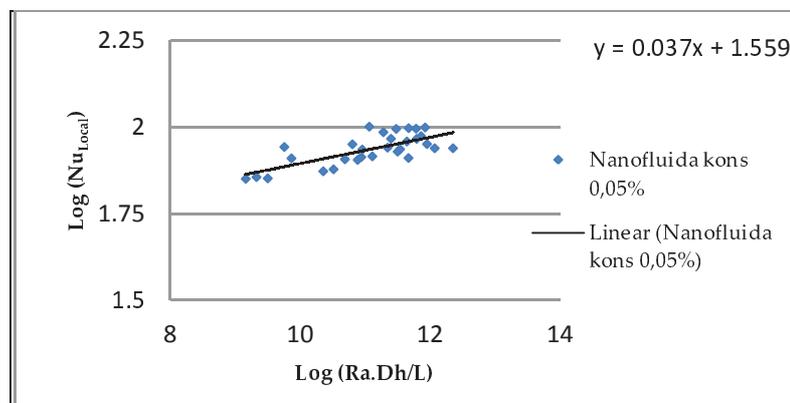
Pengembangan korelasi koefisien perpindahan panas konveksi diawali dengan penentuan semua parameter yang mempengaruhi harga koefisien perpindahan kalor konveksi alamiah tersebut. Kemudian dengan analisis dimensional, parameter yang berpengaruh tersebut dikelompokkan dalam beberapa bilangan tak berdimensi. Mengingat pemanas dirancang untuk fluks kalor seragam dan data pengamatan juga menunjukkan suhu pemanas yang tidak sama di sepanjang batang pemanas maka pengembangan korelasi ini didekati dengan kasus fluks kalor konstan.

Panjang karakteristik yang digunakan dalam penurunan korelasi ini adalah diameter hidrolis sub-buluh sehingga pemilihan ini dianggap dapat mewakili faktor konfigurasi (susunan) elemen bakar atau batang pemanas yang disusun secara segiempat. Sementara itu semua sifat fisis dievaluasi pada suhu rata-rata antara pemanas dan pendingin. Pada eksperimen menggunakan air sebagai fluida kerja baik untuk sub-buluh segitiga dan segiempat telah dilakukan [9, 10]. Demikian juga untuk fluida kerja menggunakan nanofluida air-ZrO₂ dengan konsentrasi persen berat 0,05 % telah dilakukan pula.[11]

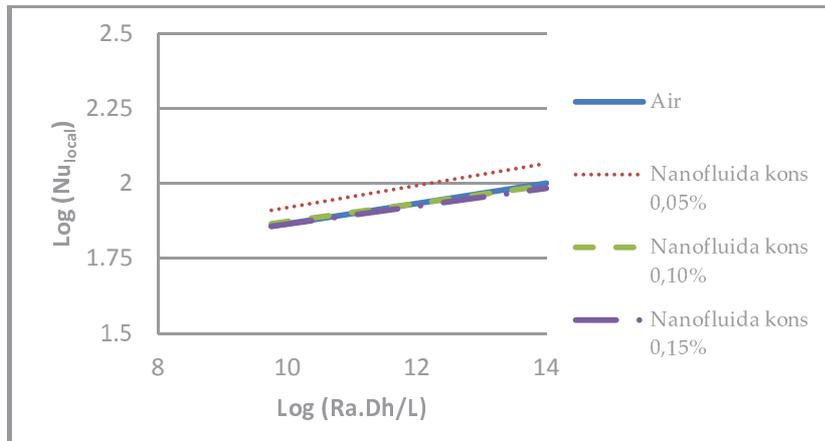
Dari hasil perhitungan diperoleh bentuk regresi linier korelasi log Nu_{Local} terhadap log (Ra.D_h/L), yang tertera pada Tabel 1. Dalam penelitian ini, nilai Rayleigh berada pada rentang orde 9 sampai 13. Nilai Rayleigh tersebut dihitung dengan mengambil ketinggian titik ukur dari dasar pemanas sebagai panjang karakteristiknya. Jadi dengan 5 titik pengukuran dengan ketinggian berbeda dan dengan masing-masing 6 nilai daya pemanas, maka akan diperoleh 30 nilai Rayleigh untuk masing-masing konsentrasi nanofluida.

Tabel 1. Korelasi log Nu_{Local} terhadap log (Ra.D_h/L)

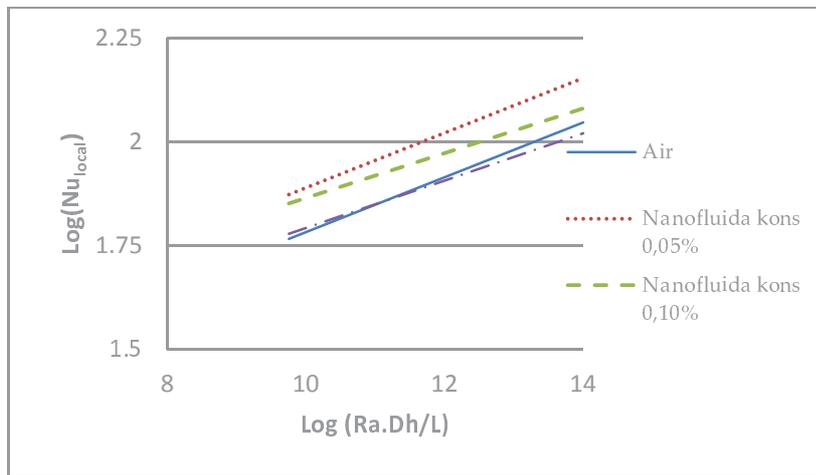
Fluida	Sub-buluh vertikal geometri segitiga	Sub-buluh vertikal geometri segiempat
Air	$y = 0,034 x + 1,526$	$y = 0,066 x + 1,123$
Nanofluida konsentrasi 0,05 %	$y = 0,037 x + 1,559$	$y = 0,066 x + 1,230$
Nanofluida konsentrasi 0,10 %	$y = 0,03 x + 1,574$	$y = 0,054 x + 1,329$
Nanofluida konsentrasi 0,15 %	$y = 0,03 x + 1,565$	$y = 0,057 x + 1,224$



Gambar 5. Grafik regresi linier korelasi log Nu_{Local} terhadap log (Ra.Dh/L) data hasil eksperimen untuk sub-buluh segitiga



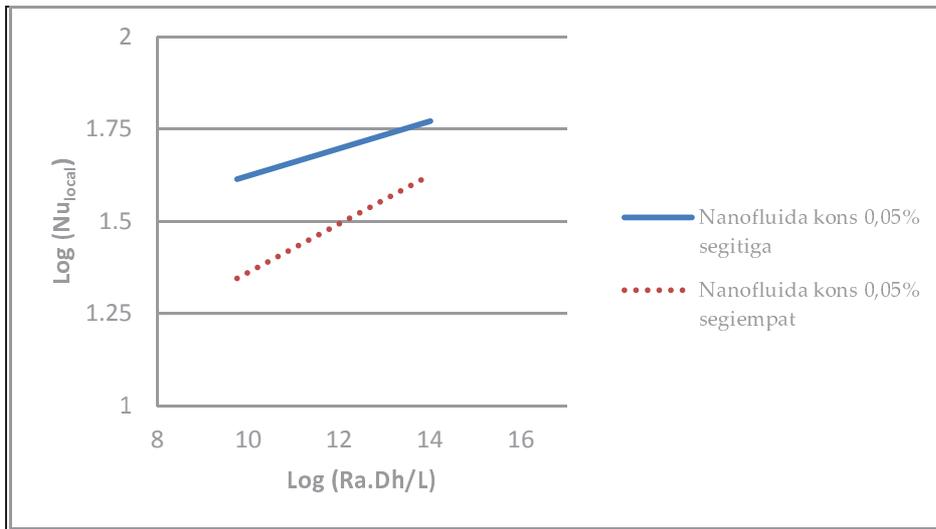
Gambar 6. Grafik regresi linier korelasi log Nu_{Local} terhadap log $(Ra.Dh/L)$ untuk sub-buluh segitiga



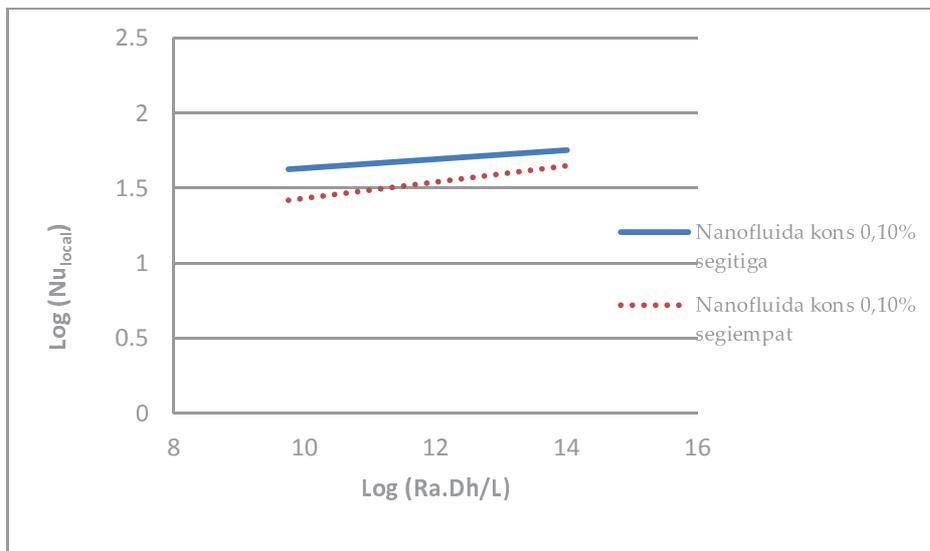
Gambar 7. Grafik regresi linier korelasi log Nu_{Local} terhadap log $(Ra.Dh/L)$ untuk sub-buluh segiempat

Gambar 5 merupakan contoh grafik regresi linier korelasi log Nu_{Local} terhadap log $(Ra.Dh/L)$ data hasil eksperimen untuk sub-buluh segitiga. Pada Gambar 6, antara garis air, nano1, nano2 dan nano3, terlihat hampir berhimpitan, hal ini dikarenakan penggambaran dilakukan dalam bilangan logaritmis, sehingga perbedaan nilai sangat kecil. Demikian juga pada Gambar 7, ke empat grafik terlihat juga hampir berhimpitan. Pada Gambar 6 dan 7 dapat pula dilihat bahwa perpindahan panas pada sub-buluh segitiga maupun segiempat menggunakan fluida pendingin nanofluida air-ZrO₂ dengan konsentrasi 0,05%, 0,10% dan 0,15% lebih baik dari pada menggunakan fluida pendingin air murni. Namun perpindahan panas menggunakan nanofluida air-ZrO₂ dengan konsentrasi 0,15% tidak sebaik nanofluida air-ZrO₂ dengan konsentrasi 0,05% dan 0,10%. Hal yang sama terjadi pula pada perpindahan panas sub-buluh segiempat. Tampaknya hasil eksperimen menunjukkan kenaikan konsentrasi tidak selalu memperbaiki sifat perpindahan panas pada fluida pendingin nanofluida. Dari gambar tersebut juga dapat dilihat bahwa dengan semakin besar bilangan Rayleigh maka grafik nanofluida air-ZrO₂ dengan konsentrasi 0,15% akan berpotongan dengan grafik fluida air, yang artinya sifat perpindahan panas nanofluida tersebut pada nilai Rayleigh tinggi tidak lebih baik dari pada sifat perpindahan panas air. Semua konsentrasi nanofluida yang digunakan sebagai fluida pendingin dalam persen berat.

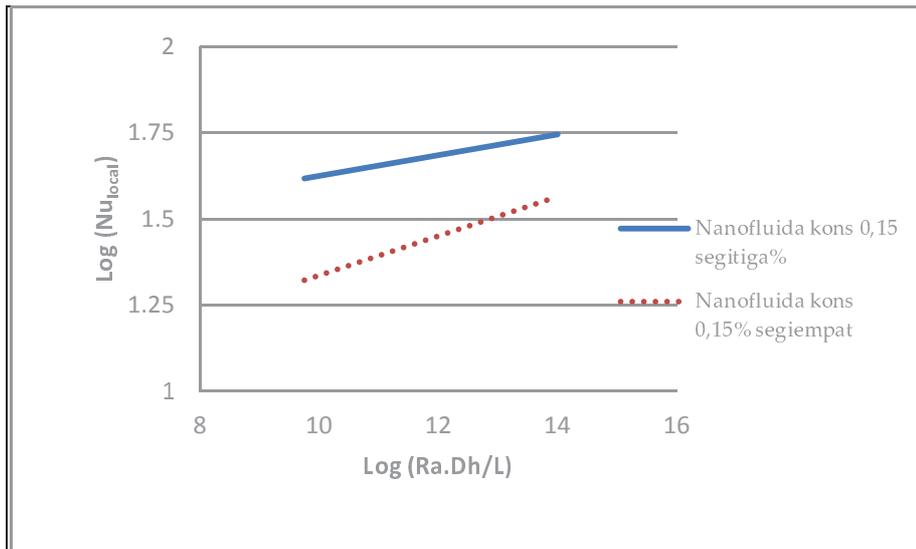
Rea, McKrell, Hu dan Buongiorno memprediksi bahwa koefisien perpindahan panas akan mencapai nilai maksimum pada 3,5% volume, dan kemudian akan menurun [13]. Selain itu Rea dkk juga menyatakan bahwa koefisien perpindahan panas pada nanofluida zirkonia tidak sebaik koefisien perpindahan panas pada nanofluida alumina. Perbedaan antara prediksi yang dilakukan oleh Rea dkk dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan dapat disebabkan karena perbedaan dalam persentase (eksperimen ini dalam % berat sedangkan Rea dkk. dalam % volume). Selain itu perbedaan hasil yang diperoleh kemungkinan disebabkan oleh ukuran butir nano partikel berbeda



Gambar 8. Perbandingan grafik regresi linier korelasi $\log Nu_{Local}$ terhadap $\log(Ra.Dh/L)$ untuk fluida nano dengan konsentrasi 0,05% untuk sub-buluh segitiga dan segiempat



Gambar 9. Perbandingan grafik regresi linier korelasi $\log Nu_{Local}$ terhadap $\log(Ra.Dh/L)$ untuk fluida nano dengan konsentrasi 0,10% untuk sub-buluh segitiga dan segiempat



Gambar 10. Perbandingan grafik regresi linier korelasi log Nu_{Local} terhadap log $(Ra.Dh/L)$ untuk nano fluida dengan konsentrasi 0,15% untuk sub-buluh segitiga dan segiempat

Pada Gambar 8, dapat dilihat bahwa perpindahan panas nanofluida ZrO_2 dengan konsentrasi 0,05% pada sub-buluh segitiga lebih baik dibandingkan dengan pada sub-buluh segiempat. Hal yang sama terjadi pada gambar 9 dan 10, yaitu perpindahan panas nano fluida ZrO_2 dengan konsentrasi 0,10% dan 0,15% pada sub-buluh segitiga juga lebih baik dibandingkan dengan perpindahan panas pada sub-buluh segi empat.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa perpindahan panas nanofluida ZrO_2 lebih baik dibandingkan dengan fluida air. Penambahan konsentrasi ZrO_2 tidak selalu menghasilkan perpindahan panas yang lebih baik dan perpindahan panas pada sub-buluh segitiga lebih baik bila dibandingkan dengan perpindahan panas pada sub-buluh segiempat. Dengan hasil yang demikian, maka nanofluida dapat dijadikan sebagai media pendingin reaktor, terutama pada keadaan darurat.

SARAN

Dalam rangka studi pengembangan lebih lanjut dari topik yang dikaji dalam penelitian ini serta untuk memperbaiki dan menyempurnakan hasil-hasil yang telah dicapai dalam penelitian ini, diperlukan beberapa perbaikan sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan konsentrasi nanofluida air- ZrO_2 lebih besar.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai sub-buluh dengan variasi P/D yang lebih banyak sehingga akan didapat persamaan korelasi perpindahan panas dengan daerah keberlakuan yang lebih umum.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih disampaikan kepada Bapak Adis Badjarzali, Bapak Tata Kusmayadi dan Bapak Budy Darmono atas bantuannya untuk mengoperasikan peralatan uji sub-buluh segitiga maupun segiempat dan pengambilan data pada eksperimen ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Buongiorno, J. Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors. *Nuclear Technology*. 2008;162: 80-91.
2. J.W. Pockett. *Passive nuclear power, Westinghouse technology*; 1989.
3. In Cheol Bang, Gyunyoung Heo, Yong Hoon Jeong and Sun Heo. An axiomatic design approach of nanofluid engineered nuclear safety features for generation III+ reactors. *Nuclear engineering and technology*. 2009; 4: 9
4. Ciptadi, A., Kajian numerik karakteristik perpindahan panas konveksi alamiah, paksa dan gabungan pada sub-buluh dengan susunan silinder bujur sangkar. Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung, Indonesia; 2010
5. Supriyadi, Joko. Perpindahan panas konveksi paksa, alamiah dan gabungan pada sub-buluh dengan susunan silinder bujur sangkar. Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung, Indonesia; 2010.
6. N.P. Tandian, E. Umar, T. Hardianto and A. Waluyo,. Theoretical study of convective heat transfer in a vertical triangular sub channel. *Proceedings of the International Conference of Fluid and Thermal Energy Convection*, Tongyeong, South Korea; 2009
7. Q. Li and Y. Xuan. Convective heat transfer performances of fluids with nano-particles. *Proceedings of the 12th International Heat Transfer Conference*; 2002. p. 483-488
8. Y. Yang, Z. G. Zhang, E. A. Grulke, W.B. Anderson, and G.Wu. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005; 48:1107-1116.
9. M.AL-Arabi. Laminar natural convection heat transfer from the outer surface of a vertical circular cylinder. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 1980; 23.
10. K. Kamajaya, E. Umar, Sudjatmi KS. The development of empirical correlation equation at convection heat transfer correlation on vertical cylinder triangular lattice sub channels. *Proceedings of the 7th International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion*, Zhengzhou, China; 2011; p. 267-274.
11. K. Kamajaya, E. Umar, Sudjatmi KS. The study and development of the empirical correlations equation of natural convection heat transfer on vertical rectangular sub-channels. *Proceedings of The 3rd International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering, ICANSE-*. Bali, Indonesia; 2011
12. K. Kamajaya, E. Umar, Sudjatmi KS. The empirical correlations for natural convection heat transfer of water-ZrO₂ nanofluid in vertical sub-channel. *Proceedings of The ICCHT The 6th International Conference on Cooling & Heating Technologies*. Xian, China; 2012
13. Ulzie Rea, Tom McKrell, Lin-wen Hu, Jacopo Buongiorno. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009; 52: 2042-2048