

## KAJIAN NUMERIK KORELASI PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI ALAMIAH ALIRAN NANOFLUIDA $ZrO_2$ -AIR PADA ANULUS VERTIKAL

Reinaldy Nazar

Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan - BATAN  
Jl. Tamansari No. 71 Bandung 40132, Telp.022-2503997, Fax 022-2504081  
E-mail: reinaldynazar@batan.go.id

Diterima:13-01-2016

Diterima dalam bentuk revisi: 15-03-2016

Disetujui: 16-03-2016

### ABSTRAK

**KAJIAN NUMERIK KORELASI PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI ALAMIAH ALIRAN NANOFLUIDA  $ZrO_2$ -AIR PADA ANULUS VERTIKAL.** Salah satu aspek penting dalam keselamatan reaktor nuklir adalah kemampuan fluida pendingin mengambil panas dari sumber panas. Sejalan dengan hal tersebut telah berkembang banyak pemikiran terhadap penggunaan nanofluida sebagai fluida pendingin alternatif menggantikan air untuk memaksimalkan pengambilan panas dari sumber panas di dalam teras reaktor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan nanofluida pada sistem pendingin reaktor nuklir dapat meningkatkan CHF (*critical heat flux*), mengurangi penyerapan neutron, dan meningkatkan konduktivitas panas fluida pendingin, sehingga akan menaikkan batas-batas keselamatan pengoperasian reaktor. Belum banyak dilakukan penelitian yang berkaitan dengan karakteristik perpindahan panas nanofluida di dalam reaktor untuk menunjang analisis termohidrolika reaktor berpendingin nanofluida. Berkaitan dengan hal tersebut pada penelitian ini dilakukan kajian numerik korelasi perpindahan panas aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air pada model berkas bahan bakar reaktor melalui pendekatan aliran pada anulus vertikal menggunakan paket program computer FLUENT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanofluida  $ZrO_2$ -air dengan konsentrasi 1 % meningkatkan nilai bilangan *Nusselt* ( $N_U$ ) sekitar 8 – 15% dibandingkan menggunakan air. Diperoleh juga korelasi teoritik perpindahan panas konveksi bebas tidak bergantung posisi untuk aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air pada saluran anulus vertikal dengan nilai konstanta  $a = 2,350$ ,  $b = 0,158$  dan korelasi teoritik perpindahan panas konveksi bebas bergantung posisi dengan nilai konstanta  $a = 0,688$ ,  $b = 0,211$ .

**Kata kunci:** nanofluida  $ZrO_2$ -air, konveksi alamiah, saluran anulus vertikal.

### ABSTRACT

**NUMERICAL STUDY OF NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER CORRELATION OF  $ZrO_2$ - $H_2O$  NANOFUIDS FLOW IN VERTICAL ANNULUS.** One important aspect of the nuclear reactors safety is the ability of the cooling fluid in removes heat from the heat source. In line with this has progressed a lot of thought to the use of nanofluids as an alternative cooling fluid to replace water to maximize heat removal from the heat source in the reactor core. The results showed that the use of nanofluids in a nuclear reactor cooling system can improve CHF (*critical heat flux*), reducing the neutron absorption, and improve the thermal conductivity of the cooling fluid, so it will increase the safety limits of reactor operation. Has not done much research related to the heat transfer characteristics of nanofluids in a reactor to support the analysis of nanofluids-cooled reactors thermo hydraulics. Relating to the matters in this research study the numerical correlation of heat transfer of  $ZrO_2$ - $H_2O$  nanofluids flow in model of the reactor fuel bundle through a approach flow in the vertical annulus using FLUENT computer code. The results showed that  $ZrO_2$ - $H_2O$  nanofluids concentration of 1 % increase in the value of *Nusselt* number ( $N_U$ ) about 8 - 15 % compared to using water. Retrieved the theoretic correlation of natural convection heat transfer is not dependent position for the flow of  $ZrO_2$ - $H_2O$  nanofluids on vertical annulus channel with value of  $a = 2.350$ ,  $b = 0.158$  the theoretic correlation of natural convection heat transfer depending position with value of  $a = 0.688$ ,  $b = 0.211$

**Keywords:**  $ZrO_2$ - $H_2O$  nanofluids, the natural convection, the vertical annulus channel.

## 1. PENDAHULUAN

Saat ini sedang berkembang pemikiran tentang penggunaan nanofluida sebagai fluida pendingin alternatif selain air. Hasil penelitian Buongiorno (1) menunjukkan bahwa beberapa nanofluida di antaranya nanofluida  $ZrO_2$ -air dapat meningkatkan batas *CHF* (*critical heat flux*) dan meningkatkan perpindahan panas pada proses *quenching* bahan bakar ketika terjadi *LOCA* (*loss of coolant accident*) di teras reaktor. Raja dkk (2) menunjukkan bahwa nanofluida  $ZrO_2$ -air dapat menurunkan munculnya *pool boiling*. Hal ini terjadi karena pelapisan nanofluida  $ZrO_2$ -air pada permukaan pemanas akan membentuk lapisan yang menghambat pertukaran panas, sehingga menghalangi pertumbuhan gelembung uap. Pada reaktor TRIGA perlu dihindari terjadinya *pool boiling* agar tidak tercapai kondisi *burn out* pada kelongsong bahan bakar.

Beberapa hasil penelitian menunjukkan nanofluida  $ZrO_2$ -air memiliki beberapa sifat yang baik terhadap peningkatan konduktivitas termal, sehingga memberikan pengaruh signifikan terhadap perpindahan panas. Nanofluida  $ZrO_2$ -air cukup prospektif untuk dijadikan fluida pendingin reaktor sebagai fluida pendingin alternatif ditambah dengan sifat menyerap neutronnya rendah. Penelitian yang telah dilakukan Syarif dkk (3) menunjukkan konduktivitas termal nanofluida  $ZrO_2$ -air lebih tinggi daripada konduktivitas termal fluida pendingin konvensional. Sudjatmi dkk (4) menyebutkan bahwa koefisien perpindahan panas konveksi alamiah nanofluida  $ZrO_2$ -air konsentrasi 0,05 %, 0,10 % dan 0,15 % di dalam sub

kanal segitiga vertikal sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan air, tetapi untuk konsentrasi yang lebih tinggi akan menyebabkan koefisien perpindahan panas lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan fluida dasar (air). Maheshwary (5) dengan metoda ultrasonication menunjukkan peningkatan konduktivitas termal nanofluida  $ZrO_2/H_2O$  hampir 5 % dari fluida dasarnya. Hal ini mencerminkan nanofluida  $ZrO_2$ -air dapat diaplikasikan untuk pendinginan. Corcione (6) berdasarkan eksperimen yang telah dilakukannya mengajukan bentuk korelasi yang memprediksi konduktivitas termal efektif nanofluida. Hasil penelitian Wang dkk (7), dan Wang dkk (8) menunjukkan model dinamis konduktivitas termal nanofluida yang merupakan bentuk pendekatan lain yang memberikan pemahaman yang lebih jelas tentang mekanisme perpindahan panas dalam sistem nanofluida. Penelitian yang dilakukan Khanafer (9) membuktikan ada keterkaitan antara nanofluida dengan peningkatan perpindahan panas dan massa. Hasil penelitian Umar (10) menyatakan nanofluida  $ZrO_2$ -air menjadikan koefisien perpindahan panas lebih tinggi 5 – 10 % dibandingkan air. Wardhani (11) menunjukkan bahwa nanofluida  $ZrO_2$ -air lebih efektif dipergunakan sebagai fluida pendingin dibandingkan air, karena koefisien perpindahan panas nanofluida  $ZrO_2$ -air lebih besar 1,08 kali dibandingkan dengan koefisien perpindahan panas air. Pada penelitian lain Wardhani (12) menyatakan ada keterkaitan antara penggunaan nanofluida  $ZrO_2$ -air dengan kenaikan tebal lapisan batas termal perpindahan panas.

Penelitian-penelitian terhadap penerapan nanofluida  $ZrO_2$ -air pada sistem pendingin reaktor nuklir sebagai bagian dari kajian keselamatan reaktor, diantaranya dapat dilakukan melalui beberapa model pendekatan terhadap model aliran pendingin pada berkas bahan bakar reaktor, seperti model aliran di dalam subkanal segitiga, subkanal segiempat, pipa anulus, silinder atau pipa, dan aliran antara dua pelat. Kamajaya dkk (13, 14) telah melakukan eksperimen perpindahan panas konveksi alamiah aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air di dalam sub-buluh vertikal. Hasil penelitian-penelitian ini menghasilkan bentuk-bentuk persamaan korelasi numerik perpindahan panas konveksi alamiah aliran nanofluida di dalam subkanal vertikal. Sementara itu penelitian perpindahan panas konveksi nanofluida melalui pendekatan mekanisme perpindahan panas konveksi alamiah pada saluran anulus vertikal belum banyak dilakukan orang karena mekanisme ini belum terlalu umum. Pada sisi lain hal ini penting dilakukan untuk mendapatkan batas keselamatan optimum dalam mengoperasikan reaktor, karena analisis perpindahan panas pada berkas bahan bakar di dalam teras reaktor dapat juga dilakukan melalui pendekatan model aliran pada saluran anulus vertikal.

Atas dasar pemikiran tersebut, pada penelitian ini dilakukan kajian numerik menggunakan paket program *FLUENT*, terhadap perpindahan panas nanofluida  $ZrO_2$ -air pada model berkas bahan bakar reaktor riset, melalui pendekatan mekanisme perpindahan panas konveksi alamiah pada saluran anulus vertikal, untuk men-

dapatkan persamaan empirik korelasi perpindahan panas konveksi alamiah pada anulus vertikal. Persamaan korelasi ini akan diperlukan dalam melakukan analisis termohidrolika reaktor nuklir berbahan bakar tipe silinder

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan kajian numerik yang dilakukan dengan menggunakan paket program computer *FLUENT* yang telah tervalidasi oleh Nazififard (15). Tinggi saluran anulus vertikal yang dikaji adalah 1 m. Diameter dalam saluran anulus adalah 1,90 cm, dan diameter luar adalah 3,80 cm, sehingga terdapat lebar celah 0,95 cm sebagai daerah aliran fluida seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.

Untuk menyamakan dengan kondisi eksperimen semua kondisi batas dan fluida uji yang digunakan disesuaikan dengan kondisi eksperimen yang ada. Daya panas pada dinding pipa sebelah dalam dipilih 200 W, 400 W, 600 W, 800 W, dan 1000 W dan dianggap uniform di seluruh permukaan dinding pipa. Sedangkan dinding pipa luar anulus dinyatakan sebagai dinding adiabatik. Fluida uji yang digunakan adalah nanofluida  $ZrO_2$ -air konsentrasi 1 % volume dan fluida dasar (air). Kasus yang ditinjau adalah perpindahan panas konveksi alamiah, sehingga dalam eksperimen diberikan laju alir fluida kerja masukan (inlet) saluran anulus sangat kecil dan masih di dalam kondisi batas konveksi alamiah, tetapi dalam kajian teoritik ini digunakan syarat batas tekanan yang diketahui di masukan (inlet) dan keluaran (outlet) saluran anulus. Kemudian data - data keluaran yang diperoleh berupa

temperatur lokal fluida kerja dan temperatur lokal permukaan pemanas yang merupakan data keluaran hasil paket program computer *FLUENT* digunakan untuk menghitung parameter-parameter perpindahan panas.

### 3. TEORI

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mendapatkan persamaan teoritik korelasi perpindahan panas konveksi bebas aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air pada saluran anulus vertikal, pada bentuk bilangan *Nusselt*  $N_U$  sebagai fungsi dari bilangan *Rayleigh*  $R_a$ , dan posisi tak berdimensi  $D_H/x$ . Adapun bentuk umum persamaan korelasi tersebut adalah :

$$N_U = a \left( R_a \frac{D_H}{x} \right)^b \quad (1)$$

dimana  $x$  adalah posisi titik perhitungan pada pipa anulus yang dimulai dari bawah, dan  $D_H$  adalah diameter hidrolika anulus, sedangkan  $a$  dan  $b$  adalah konstanta yang

dihitung dari data-data temperatur keluaran program computer *FLUENT*.

$$N_U = \frac{q'' \cdot D_H}{k_{nf} (T_s - T_{bnf})} \quad (2)$$

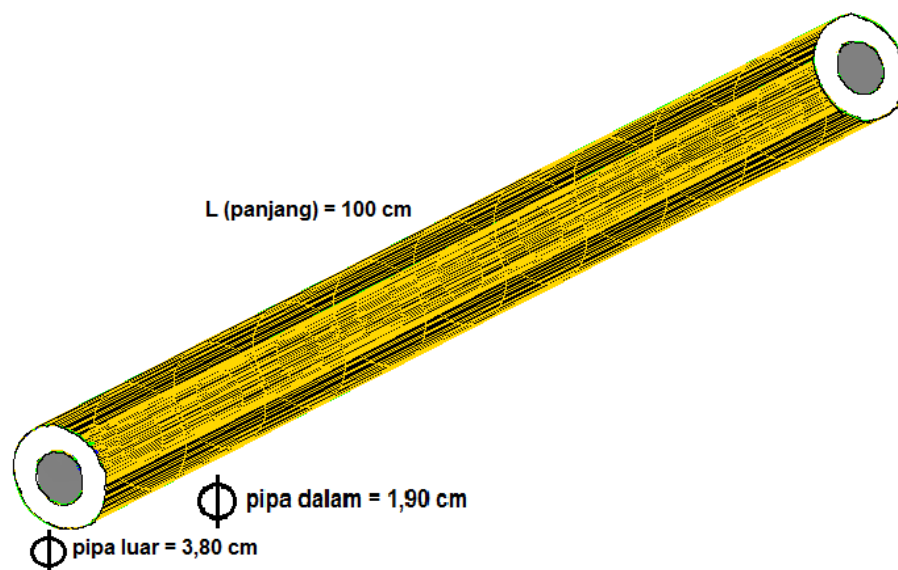
dimana  $q''$ = fluks panas pada permukaan ( $W/m^2$ ),  $k_{nf}$  = konduktivitas panas nanofluida ( $W/m^\circ C$ ),  $T_s$  adalah temperatur permukaan ( $^\circ C$ ), dan  $T_{nf}$  adalah temperatur nanofluida ( $^\circ C$ )

$$R_a = \frac{g \rho_{nf} \beta_{nf} C_{pnf} q'' D_H^4}{k_{nf}^2 \nu_{nf}} \quad (3)$$

dimana  $g$  = gaya gravitasi ( $m^2/s$ ),  $\rho_{nf}$  = densitas nanofluida ( $kg/m^3$ ),  $\beta_{nf}$  = koefisien ekspansi termal nanofluida ( $1/^\circ C$ ),  $\nu_{nf}$  = viskositas kinematika nanofluida ( $m^2/s$ ), dan  $C_{pnf}$  = kapasitas panas nanofluida ( $J/kg^\circ C$ ).

Adapun semua sifat-sifat termofisika ditentukan pada temperatur film nanofluida ( $T_{fnf}$ ) berdasarkan persamaan berikut

$$T_{fnf} = \frac{T_s + T_{bnf}}{2} \quad (4)$$



Gambar 1. Geometri saluran anulus vertikal yang dikaji.

Perolehan persamaan teoritik korelasi perpindahan panas konveksi bebas aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air pada saluran anulus vertikal diawali dengan menentukan bilangan Nusselt ( $N_U$ ) dan Rayleigh ( $R_a$ ) pada setiap titik penghitungan yang dipilih, dengan menggunakan data temperatur  $T_s$  dan  $T_{bnf}$  yang diperoleh dari data keluaran hasil program computer *FLUENT*. Sedangkan konstanta  $a$  dan  $b$  ditentukan dari hubungan linier antara bilangan *Nusslet* ( $N_U$ ) dengan bilangan *Rayleigh* ( $R_a$ ) dan posisi tak berdimensi ( $D_H/x$ ).

Adapun sifat-sifat termofisika nano nanofluida  $ZrO_2$ -air ditentukan Hosseini (16) berdasarkan persamaan matematika berikut,

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{air} + \varphi \cdot \rho_p \quad (5)$$

$$(\rho \cdot C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho \cdot C_p)_{air} + \varphi(\rho \cdot C_p)_p \quad (6)$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\varphi)\mu_{air} \quad (7)$$

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{air} + 2\varphi(k_p - k_{air})}{k_p + 2k_{air} - \varphi(k_p - k_{air})} k_{air} \quad (8)$$

Catatan :

indek  $nf$  = nanofluida  
 indek  $p$  = partikel nano  
 $\varphi$  = fraksi volume partikel nano

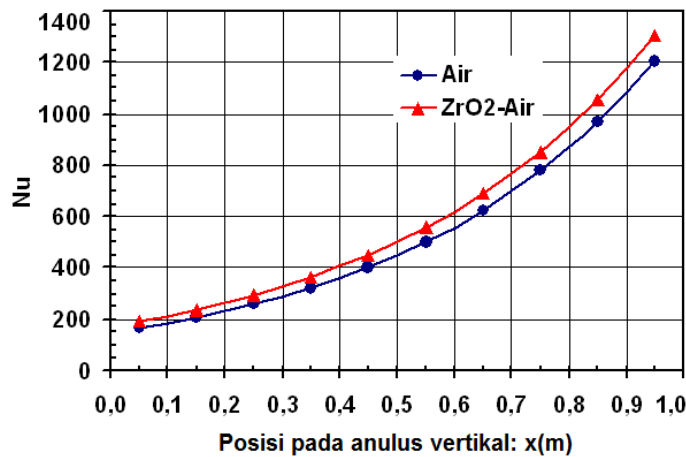
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perolehan distribusi harga temperatur air, temperatur nanofluida, dan temperatur permukaan pemanas arah aksial dari keluaran program computer *FLUENT* digunakan untuk menentukan harga parameter-parameter sifat fisika air dan nanofluida  $ZrO_2$ -air, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung harga bilangan *Nusselt* ( $N_U$ ) dan

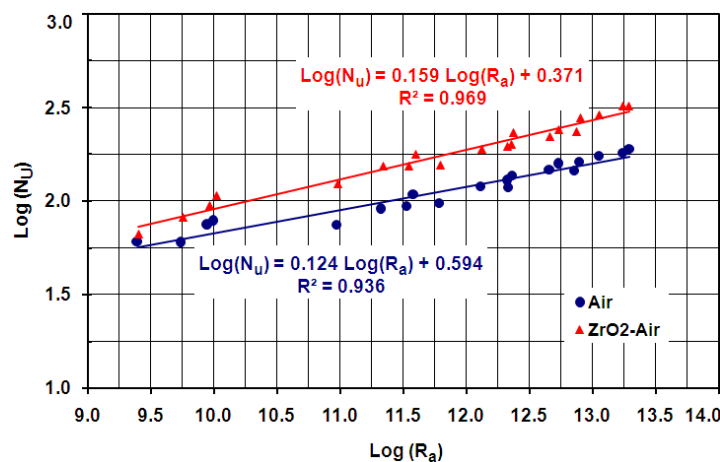
*Rayleigh* ( $R_a$ ).

Hasil hitungan *FLUENT* yang dinyatakan pada Gambar 2 menunjukkan perbandingan kemampuan perpindahan panas konveksi satu fasa nanofluida  $ZrO_2$ -air konsentrasi 1 % volume dan air. Secara kualitatif nanofluida  $ZrO_2$ -air memiliki kinerja perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan dengan fluida dasar (air), dimana terdapat peningkatan nilai bilangan  $N_U$  sekitar 8 – 15 %. Kenaikan bilangan *Nusselt* ( $N_U$ ) nanofluida  $ZrO_2$ -air konsentrasi 1 % volume sebesar 8 – 15 % terjadi karena peningkatan kapasitas termal yang disebabkan perubahan nilai sifat-sifat termofisika fluida. Nilai bilangan *Nusselt* ( $N_U$ ) ditentukan oleh bilangan *Rayleigh* ( $R_a$ ). Sedangkan nilai bilangan *Rayleigh* ( $R_a$ ) ditentukan sifat-sifat termofisika fluida, seperti konduktivitas panas, kalor jenis spesifik ( $c_p$ ), dan viskositas ( $\mu$ ), sehingga jika terjadi perubahan pada sifat termofisika fluida akan mengubah nilai bilangan *Nusselt*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa penggunaan Nanofluida  $ZrO_2$ -air konsentrasi 1 % volume sebagai fluida pendingin akan menaikkan perpindahan panas dibandingkan menggunakan air.

Hal yang sama telah ditunjukkan pada hasil percobaan Sudjatmi dkk (4), bahwa koefisien perpindahan panas konveksi alamiyah nanofluida  $ZrO_2$ -air konsentrasi 0,05 sampai 0,1 % dalam persen berat pada sub kanal segitiga vertikal sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan air, tetapi untuk konsentrasi yang lebih tinggi akan menyebabkan koefisien perpindahan panas lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan air.



Gambar 2. Kurva bilangan Nusselt ( $N_u$ ) terhadap posisi pada anulus vertikal untuk konveksi alamiah nanofluida  $ZrO_2$ -air 1 % volume dengan air.



Gambar 3. Linearisasi  $\text{Log}(N_u)$  terhadap  $\text{Log}(R_a)$  untuk nanofluida  $ZrO_2$ -air 1 % volume dengan air.

Gambar 3 menunjukkan perolehan bentuk linierisasi  $\text{Log}(N_u)$  terhadap  $\text{Log}(R_a)$  nanofluida  $ZrO_2$ -air dan fluida dasar air pada posisi berbeda. Kurva regresi linear nanofluida  $ZrO_2$ -air memiliki koefisien arah 0,1587, artinya sudut kemiringannya adalah  $9,02^\circ$ . Sedangkan koefisien arah kurva regresi linear fluida dasar air adalah 0,1236 atau sudut kemiringannya adalah  $7,05^\circ$ . Terlihat bahwa kurva regresi linear nanofluida  $ZrO_2$ -air lebih curam dibandingkan dengan kurva regresi linear air. Hal ini

terjadi akibat kenaikan bilangan Nusselt ( $N_u$ ) yang disebabkan peningkatan kapasitas termal karena perubahan nilai sifat-sifat termofisika fluida

Bentuk linearisasi  $\text{Log}(N_u)$  terhadap  $\text{Log}(R_a)$  nanofluida  $ZrO_2$ -air adalah

$$\text{Log}(N_u) = 0,159 \text{Log}(R_a) + 0,371$$

dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0,969$ . Dengan demikian bentuk persamaan teoritik korelasi perpindahan panas konveksi bebas aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air adalah,

$$N_U = 2,350(R_a)^{0,158}$$

dengan konstanta a = 2,350 dan b = 0,158.

Bentuk linearisasi Log (N<sub>U</sub>) terhadap Log (R<sub>a</sub>) fluida dasar adalah

$$\text{Log}(N_U) = 0,124 \text{Log}(R_a) + 0,594$$

dengan koefisien determinasi R<sup>2</sup> = 0,936, sehingga bentuk persamaan teoritik korelasi perpindahan panas konveksi bebas aliran fluida dasar air adalah

$$N_U = 3,927(R_a)^{0,124}$$

dengan konstanta a = 3,297 dan b = 0,124.

Secara kualitatif bentuk linearisasi kedua persamaan di atas menggambarkan bahwa koefisien perpindahan panas semakin meningkat searah dengan tinggi saluran anulus, dan untuk aliran nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air koefisien perpindahan panas yang terjadi meningkat lebih tajam dibandingkan aliran fluida dasar, dimana hal ini ditunjukkan oleh kurva nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air lebih curam dari kurva air.

Gambar 4 menunjukkan perolehan

bentuk linierisasi Log (N<sub>U</sub>) terhadap Log (R<sub>a</sub>D<sub>H</sub>/x) nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air dan fluida dasar air. Kurva regresi linier nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air memiliki sudut kemiringan 11,92°, sedangkan kurva regresi linier fluida dasar air sudut kemiringannya adalah 9,31°. Jadi kurva regresi linier nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air lebih curam dibandingkan dengan kurva regresi linier fluida dasar air. Bentuk linierisasi Log (N<sub>U</sub>) terhadap Log (R<sub>a</sub>D<sub>H</sub>/x) nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air adalah

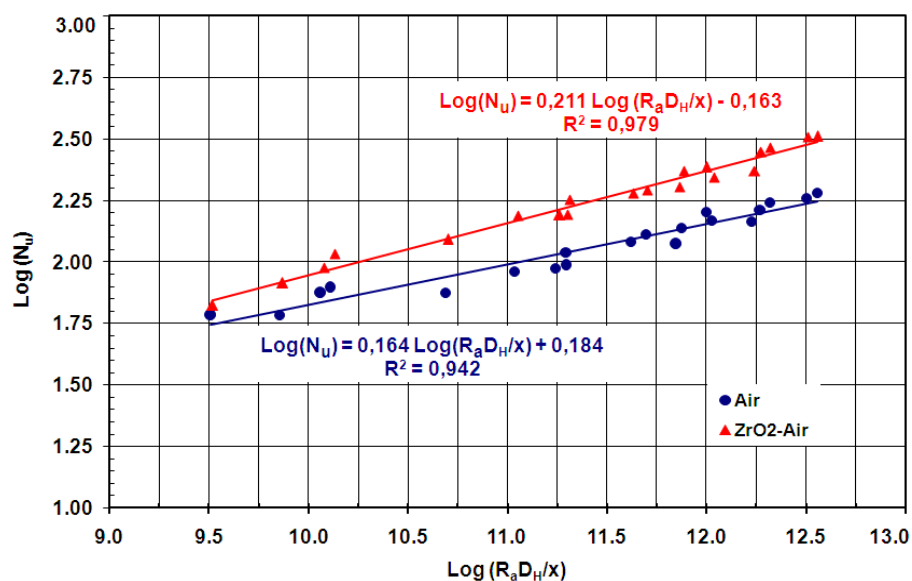
$$\text{Log}(N_U) = 0,211 \text{Log}(R_a D_H / x) - 0,163$$

dengan koefisien determinasi R<sup>2</sup> = 0,979. Dengan demikian bentuk persamaan empirik korelasi perpindahan panas konveksi bebas aliran nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air adalah

$$N_U = 0,688 \left( R_a \frac{D_H}{x} \right)^{0,211}$$

dengan:

$$a = 0,688, \quad b = 0,211 \quad \text{dan} \quad 2,130e^{+09} \leq R_a \leq 1,972e^{+13}$$



Gambar 4. Linearisasi Log (N<sub>U</sub>) terhadap Log (R<sub>a</sub>D<sub>H</sub>/x) untuk nanofluida ZrO<sub>2</sub>-air 1 % volume dengan air.

Adapun bentuk linierisasi Log ( $N_U$ ) terhadap Log ( $R_a D_H/x$ ) fluida dasar air adalah

$$\text{Log}(N_U) = 0,164 \text{Log}(R_a D_H / x) + 0,184$$

dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0,942$ , sehingga bentuk persamaan empirik korelasi perpindahan panas konveksi bebas aliran air adalah

$$N_U = 1,526 \left( R_a \frac{D_H}{x} \right)^{0,164}$$

dengan  $a = 1,526$ ;  $b = 0,164$ ; dan  $2,130e^{+09} \leq R_a \leq 1,9721e^{+13}$ .

Secara kualitatif bentuk linearisasi kedua persamaan di atas menggambarkan bahwa koefisien perpindahan panas semakin meningkat searah dengan tinggi saluran anulus, dan untuk aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air koefisien perpindahan panas yang terjadi meningkat lebih tajam dibandingkan aliran fluida dasar, dimana hal ini ditunjukkan oleh kurva nanofluida  $ZrO_2$ -air lebih curam dari kurva air.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan penting bahwa nanofluida  $ZrO_2$ -air memiliki kinerja perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan terhadap fluida dasar (air) dengan peningkatan nilai bilangan  $N_U$  sekitar 8 – 15 %. Perpindahan panas yang terjadi semakin me-ningkat ke arah tinggi saluran anulus, tetapi untuk aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air perpindahan panas yang terjadi meningkat lebih tajam dibandingkan aliran fluida dasar (air). Disamping itu diperoleh juga bentuk korelasi teoritik perpindahan panas konveksi bebas tidak bergantung posisi untuk aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air pada pipa anulus

vertikal dengan nilai konstanta  $a = 2,350$ ,  $b = 0,158$  dan korelasi teoritik perpindahan panas konveksi bebas bergantung posisi untuk aliran nanofluida  $ZrO_2$ -air pada pipa anulus vertikal dengan nilai konstanta  $a = 0,688$ ,  $b = 0,211$ .

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Endang Kurnia, Drs. K. Kamajaya MT. dan Ir. Sudjatmi K.S., MT atas segala bantuan dan kontribusinya dalam kegiatan pene-litian ini mulai dari tahap pengajuan usulan kegiatan hingga publikasi hasil penelitian ini.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

1. Buongiorno J, Hu LW. Nanofluid heat transfer enhancement for nuclear reactor applications, *Journal of Energy and Power Engineering* 2010; 4(6(31)):1-8.
2. Raja JK, Rajan RA, Puviyarasan M. Thermal aspects of nanofluids: An Insight of other researchers. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* 2014; 11(4) :19-27
3. Syarif DG, Prajitno DH. Characteristics of water- $ZrO_2$  nanofluid made from solgel synthesized  $ZrO_2$  nanoparticle utilizing local zircon. *Journal of Materials Science and Engineering* 2013; 3(2):124-129.
4. Sudjatmi KA, Kamajaya K, Umar E. Pengaruh konsentrasi  $ZrO_2$  terhadap korelasi perpindahan panas nanofluida air- $ZrO_2$  untuk pendingin reaktor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa*



- Mega Oktober 2013; 15(3):171-181.
5. Maheshwary PB, Nemade KR. Enhancement in heat transfer performance of ZrO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O nanofluid via ultrasonication time. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication (IJRITCC)* 2015; 3(2):35–37
6. Corcione M. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Journal of Energy Conversion and Management* 2011; 52:789-793.
7. Wang L, Fan J. Toward nanofluids of ultra-high thermal conductivity. *Nanoscale Research Letters* 2011; 6(153):1-9.
8. Wang JJ, Zheng RT, Gao JW, Chen G. Heat conduction mechanisms in nanofluids and suspensions. *Nano Today* 2012; 7:124-136.
9. Khanafer K, Vafai K. A Critical synthesis of thermo-physical characteristics of nanofluids. *International Journal Heat and Mass Transfer* 2011; 54:4410-4428.
10. Umar E, Kamajaya K, Tandian NP. Experimental study of natural convective heat transfer of water-ZrO<sub>2</sub> nanofluid in vertical sub channel. *Contemporary Engineering Sciences* 2015; 8(33):1593–1605.
11. Wardhani VIS. Fluida nano ZrO<sub>2</sub> sebagai pendingin untuk permukaan pemanas pelat vertical: Studi experimental. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega* 2014; 16(3):169-177.
12. Wardhani VIS, Rahardjo HP. Karakterisasi tebal lapisan batas fluida nano ZrO<sub>2</sub> di permukaan pemanas pada proses konveksi alamiah. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega* 2015; 17(3):167-174.
13. Kamajaya K, Umar E, KS Sudjatmi. The empirical correlation for natural convection heat transfer of water ZrO<sub>2</sub> nanofluid in vertical sub-channel. *The 6<sup>th</sup> International conference and Exhibition on Cooling and Heating Technologies )* November 2012; Xian, China 2012:9-12.
14. Kamajaya K, Umar E, Sudjatmi, The empirical correlations for natural convection heat transfer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> nanofluid in vertical sub-channel. *The 7<sup>th</sup> International conference and Exhibition on Cooling and Heating Technologies (ICCHT-2014)* November 2014; Kualalumpur, Malaysia 2014:4-6.
15. Naziffard M, Nematollahi M, Jafarpur K, Suh KY. Numerical simulation of water-based alumina nanofluid in subchannel geometry. *Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations* 2012; 2012: 1-12.
16. Hosseini SSH, Shahrjerdi A, Vazifeshenas Y. A Review of relations for physical properties of nanofluids. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 2011; 5(10):417-435.

