

## KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI ALAMIAH ALIRAN NANOFLUIDA $Al_2O_3$ -AIR DI DALAM PIPA ANULUS VERTIKAL

Reinaldy Nazar

Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan - BATAN

E-mail: [reinaldynazar@batan.go.id](mailto:reinaldynazar@batan.go.id)

Diterima editor: 18 Desember 2015

Direvisi editor: 26 Januari 2016

Disetujui untuk publikasi: 1 Februari 2016

### ABSTRAK

**KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI ALAMIAH ALIRAN NANOFLUIDA  $Al_2O_3$ -AIR DI DALAM PIPA ANULUS VERTIKAL.** Hasil beberapa penelitian menunjukkan bahwa nanofluida memiliki karakteristik termal yang lebih baik dibandingkan dengan fluida konvensional (air). Berkaitan dengan hal tersebut, saat ini sedang berkembang pemikiran untuk menggunakan nanofluida sebagai fluida perpindahan panas alternatif pada sistem pendingin reaktor. Sementara itu, konveksi alamiah di dalam pipa anulus vertikal merupakan salah satu mekanisme perpindahan panas yang penting dan banyak ditemukan pada reaktor riset TRIGA, reaktor daya generasi baru dan alat konversi energi lainnya. Namun di sisi lain karakteristik perpindahan panas nanofluida di dalam pipa anulus vertikal belum banyak diketahui. Oleh karena itu penting dilakukan secara berkesinambungan penelitian-penelitian untuk menganalisis perpindahan panas nanofluida di dalam pipa anulus vertikal. Pada penelitian ini telah dilakukan analisis numerik menggunakan program komputer CFD (*computational of fluids dynamic*) terhadap karakteristik perpindahan panas konveksi alamiah aliran nanofluida  $Al_2O_3$ -air konsentrasi 2% volume di dalam pipa anulus vertikal. Hasil kajian ini menunjukkan terjadi peningkatan kinerja perpindahan panas (bilangan  $Nusselt - N_U$ ) sebesar 20,5% - 35%. Pada moda konveksi alamiah dengan bilangan  $2,471e^{+09} \leq Ra \leq 1,955e^{+13}$  diperoleh korelasi empirik untuk air  $N_U = 1,065 \left( Ra \frac{D_H}{x} \right)^{0,179}$  dan korelasi empirik untuk nanofluida  $Al_2O_3$ -air

$$N_U = 14,869 \left( Ra \frac{D_H}{x} \right)^{0,115} .$$

Kata kunci: Nanofluida  $Al_2O_3$ -air, konveksi alamiah, pipa anulus vertikal

### ABSTRACT

**THE CHARACTERISTICS OF NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER OF  $Al_2O_3$ -WATER NANOFLUID FLOW IN A VERTICAL ANNULUS PIPE.** Results of several researches have shown that nanofluids have better thermal characteristics than conventional fluid (water). In this regard, ideas for using nanofluids as an alternative heat transfer fluid in the reactor coolant system have been well developed. Meanwhile the natural convection in a vertical annulus pipe is one of the important mechanisms of heat transfer and is found at the TRIGA research reactor, the new generation nuclear power plants and other energy conversion devices. On the other hand, the heat transfer characteristics of nanofluids in a vertical annulus pipe has not been known. Therefore, it is important to do research continuously to analyze the heat transfer nanofluids in a vertical annulus pipe. This study has carried out numerical analysis by using computer code of CFD (*computational of fluids dynamic*) on natural convection heat transfer characteristics of nanofluids flow of  $Al_2O_3$ -water 2% volume in the vertical annulus pipe. The results showed an increase in heat transfer performance (Nusselt numbers -  $N_U$ ) by 20.5% - 35%. In natural convection mode with Rayleigh numbers  $2.471e^{+09} \leq Ra \leq 1.955e^{+13}$  obtained empirical correlations for water is

$$N_U = 1.065 \left( Ra \frac{D_H}{x} \right)^{0,179} \text{ and empirical correlations for } Al_2O_3\text{-water nanofluids is } N_U = 14.869 \left( Ra \frac{D_H}{x} \right)^{0,115} .$$

Keywords:  $Al_2O_3$ -water nanofluids, natural convection, vertical annulus pipe

## PENDAHULUAN

Salah satu aspek yang penting dalam keselamatan reaktor nuklir adalah kemampuan fluida pendingin dalam mengambil panas dari sumber panas, baik yang berasal bidang permukaan bahan bakar yang ada di teras reaktor maupun bidang permukaan panas yang terdapat pada alat penukar panas. Kemampuan tersebut harus tetap dijaga untuk mempertahankan integritas bidang-bidang permukaan sumber panas itu sendiri. Oleh karena itu pengetahuan tentang koefisien perpindahan panas antara fluida pendingin dengan bidang permukaan pemanas merupakan hal yang penting dalam keselamatan reaktor nuklir.

Sementara itu berbagai upaya telah dilakukan para peneliti untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas di dalam sistem reaktor, diantaranya menggunakan fluida pendingin alternatif yang memiliki karakteristik termal dan koefisien perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan terhadap fluida pendingin konvensional (air), misalnya nanofluida. Saat ini sedang berkembang pemikiran tentang penggunaan nanofluida sebagai fluida pendingin alternatif selain air. Buongiorno [1] melaporkan bahwa beberapa nanofluida diantaranya nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -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.

Nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air cukup prospektif untuk dijadikan fluida pendingin reaktor sebagai fluida pendingin alternatif karena konduktivitas termal nanofluida lebih tinggi dibandingkan dengan konduktivitas termal fluida pendingin konvensional (air). Hasil penelitian Chandrasekar dkk. [2] menggunakan nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air dengan konsentrasi 3% menunjukkan konduktivitas termal mengalami peningkatan sebesar 9,7%. Pernyataan ini diperkuat oleh hasil penelitian Karna dkk [3] yang menunjukkan bahwa penambahan partikel nano pada fluida kerja akan meningkatkan nilai bilangan *Nusselt* lokal dan koefisien perpindahan kalor, hal ini juga diperkuat oleh hasil penelitian Irawan dkk [4].

Liu [5] melakukan penelitian mengenai karakteristik perpindahan kalor nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air pada saluran mini di bawah kondisi fluks kalor konstan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor dan bilangan *Nusselt* nanofluida lebih tinggi dari fluida dasarnya dan meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* dan laju aliran. Penggunaan nanofluida sebagai fluida kerja transfer kalor sangat menjanjikan karena hasil penelitian menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan kalor yang tinggi. Bozorgan [6] menunjukkan kenaikan koefisien perpindahan panas total 3% nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air sekitar 4,1 % terhadap fluida dasar. Begitu juga hasil penelitian Ashutosh dkk [7] menunjukkan partikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  di dalam fluida kerja metanol dan etanol menaikkan laju perpindahan panas dengan perbedaan temperatur minimum.

Penelitian-penelitian terhadap penerapan nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -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, diantaranya model aliran di dalam subkanal segitiga, subkanal segiempat, pipa anulus, silinder atau pipa, dan aliran antara dua pelat. Terdapat beberapa hasil penelitian aliran nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air di dalam berkas pemanas model bahan bakar reaktor, diantaranya Zamzamian dkk [8] melakukan penelitian pengaruh nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air terhadap koefisien perpindahan panas konveksi paksa pada aliran antara dua pelat sebagai model aliran pada berkas bahan bakar reaktor. Hasil penelitian ini menunjukkan kenaikan koefisien perpindahan panas konveksi 2 – 50%. Sankar dkk [9] telah melakukan eksperimen perpindahan panas konveksi alamiah aliran di dalam anulus vertikal, sedangkan Kamajaya dkk [10] telah melakukan eksperimen perpindahan panas konveksi alamiah aliran nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air di dalam sub-buluh vertikal. Hasil penelitian-penelitian ini memperlihatkan bentuk-bentuk persamaan korelasi numerik perpindahan panas konveksi alamiah aliran nanofluida di dalam subkanal vertikal.

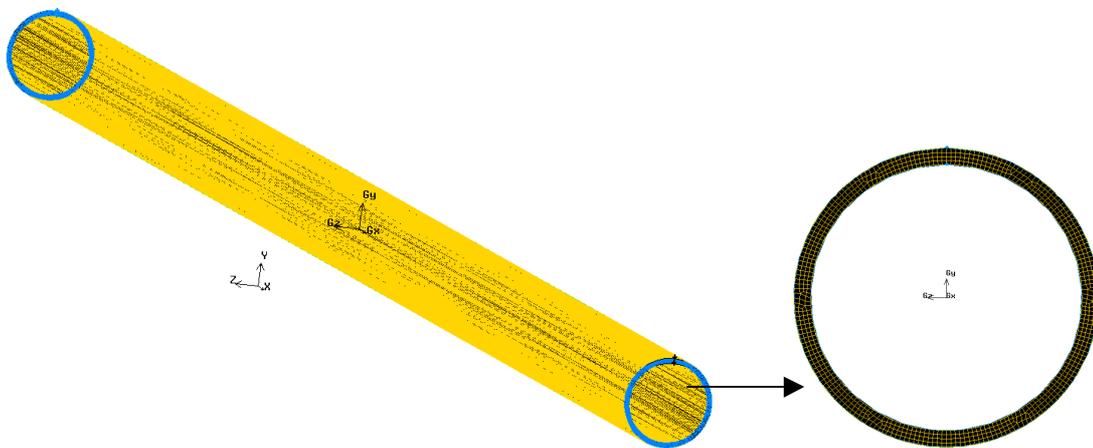
Berkaitan dengan pengembangan keselamatan reaktor dan prospek nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air sebagai fluida pendingin reaktor, pada penelitian ini dilakukan penentuan korelasi empirik koefisien perpindahan panas aliran nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air di dalam pipa anulus vertikal. Model aliran ini dipilih untuk melengkapi kajian-kajian aliran nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air di dalam berkas pipa model bahan bakar reaktor guna mendukung kajian-kajian keselamatan reaktor, dimana sebelumnya Kamajaya dkk [10] telah melakukan eksperimen perpindahan panas konveksi alamiah aliran nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air di dalam sub-buluh vertikal.

Metoda yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan paket program computer CFD (*Computational of Fluid Dynamic*). CFD code merupakan paket program computer yang paling lengkap untuk melakukan analisis termohidrolik saat ini. Nazififard [11] telah menggunakan code ini pada analisis aliran nanofluida  $Al_2O_3$ -air di dalam sub-buluh tunggal. Sedangkan moda perpindahan panas yang dikaji adalah perpindahan panas konveksi alamiah satu fasa, dimana moda perpindahan panas ini dijumpai aplikasinya pada teknologi reaktor TRIGA dan alat-alat konversi energi yang sejenis lainnya.

## METODOLOGI PERHITUNGAN

### Model Pipa Anulus

Menggunakan program komputer CFD dibuat model pipa anulus yang ditinjau dalam penelitian ini. Untuk menyamakan dengan kondisi eksperimen perpindahan panas aliran nanofluida  $Al_2O_3$ -air di dalam pipa anulus vertikal yang dapat dilakukan, maka pada penelitian ini dibuat model pipa anulus panjang 1 m, diameter pipa bagian luar 3,80 cm, dan diameter pipa bagian dalam 1,90 cm.



Gambar 1. Geometri, nodalisasi pipa anulus yang dikaji, dan penampang pipa anulus (arah vertikal dinyatakan dengan penempatan gaya gravitasi pada sumbu x)

Nodalisasi terhadap model pipa anulus dibuat berupa 896.640 sel tipe heksahedral, dengan ukuran yang lebih kecil di pinggir dinding dan jarak dalam arah vertikal (arah panjang pipa) dibuat seragam. Sedangkan jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai konvergen, tidak sama untuk setiap syarat batas fluks panas permukaan dinding pipa dalam anulus yang digunakan dan jenis fluida yang digunakan (nanofluida  $Al_2O_3$ -air atau fluida dasar). Adapun geometri dan nodalisasi pada pipa anulus yang terbentuk ditampilkan pada Gambar 1.

Berkaitan dengan eksperimen yang dapat dilakukan, dimana daya panas pada dinding pipa sebelah dalam yang digunakan adalah 250 W, 500 W, 750 W, dan 1000 W, maka hal yang sama juga diterapkan pada analisis ini, serta dianggap uniform di seluruh permukaan dinding pipa dalam anulus. Adapun kondisi batas termal yang digunakan dalam model pipa anulus ini adalah memberikan nilai fluks panas ( $watt/m^2$ ) yang seragam pada permukaan pipa dalam anulus berdasarkan variasi daya panas yang digunakan. Pada kasus konveksi alamiah, pada masukan (*inlet*) dan keluaran (*outlet*) pipa anulus diterapkan syarat batas tekanan yang diketahui.

Mengingat nanofluida  $Al_2O_3$ -air pada konsentrasi tinggi akan mudah menimbulkan korosi dengan material sekitarnya, sehingga pada penelitian ini digunakan nanofluida  $Al_2O_3$ -air dengan konsentrasi 2% volume. Sebagai data pembandingan, selain menggunakan nanofluida  $Al_2O_3$ -air penelitian ini juga menggunakan fluida konvensional (air).

Adapun input CFD yang diberikan untuk parameter termofisika nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air konsentrasi 2% volume, ditentukan berdasarkan persamaan matematika berikut [11, 12],

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

$$(\rho \cdot C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho \cdot C_p)_{bf} + \varphi(\rho \cdot C_p)_p \quad (2)$$

$$\mu_{nf} = (123\varphi^2 + 7,3\varphi + 1)\mu_{bf} \quad (3)$$

$$k_{nf} = (4,97\varphi^2 + 2,72\varphi + 1)k_{bf} \quad (4)$$

dengan *nf* = nanofluida, *bf* = fluida dasar (air), *p* = partikel,  $\varphi$  = konsentrasi volume partikel

### Penentuan Korelasi Empiris

Untuk mendapatkan persamaan korelasi empiris koefisien perpindahan panas konveksi bebas aliran nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air di dalam pipa anulus vertikal, penelitian diawali dengan menentukan semua parameter yang mempengaruhi harga koefisien perpindahan panas konveksi alamiah tersebut. Kemudian dengan melalui analisis dimensional, parameter-parameter tersebut dikelompokkan ke dalam bilangan tak berdimensi. Bentuk umum persamaan korelasi koefisien perpindahan panas lokal untuk konveksi alamiah pada fluks panas tetap diantaranya dapat dinyatakan sebagai persamaan di bawah ini [10].

$$N_{U_L} = C \cdot \left( R_{a_x} \cdot \frac{D_H}{x} \right)^m \quad (5)$$

$$N_U = \frac{q'' \cdot D_H}{k(T_s - T_b)} \quad (6)$$

$$R_a = \frac{g \rho \beta c_p q'' D_H^4}{k^2 \nu} \quad (7)$$

dengan  $N_U$  adalah bilangan *Nusselt*,  $R_a$  adalah bilangan *Rayleigh*,  $x$  adalah posisi titik yang dihitung pada arah tinggi pipa anulus,  $D_H$  adalah diameter basah pipa anulus,  $C$  dan  $m$  konstanta empirik,  $q''$  adalah fluks panas,  $k$  adalah konduktivitas fluida,  $T_s$  adalah suhu permukaan dinding silinder dalam anulus,  $T_b$  adalah suhu curah fluida,  $g$  adalah gravitasi,  $\rho$  adalah rapat massa fluida,  $\beta$  adalah koefisien ekspansi,  $c_p$  adalah kapasitas panas, dan  $\nu$  adalah viskositas kinematik.

Untuk mendapatkan korelasi empiris koefisien perpindahan panas konveksi alamiah yang dimaksud dilakukan dengan mencari nilai  $C$ , dan  $m$  yang dinyatakan pada Persamaan (5). Hal ini dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

- Ruas kanan dan kiri Persamaan (5) dilogaritmakan sehingga menjadi bentuk persamaan linier berikut:

$$\text{Log}(N_{U_L}) = m \cdot \text{Log}\left(R_{a_x} \frac{D_H}{x}\right) + \text{Log } C \quad (8)$$

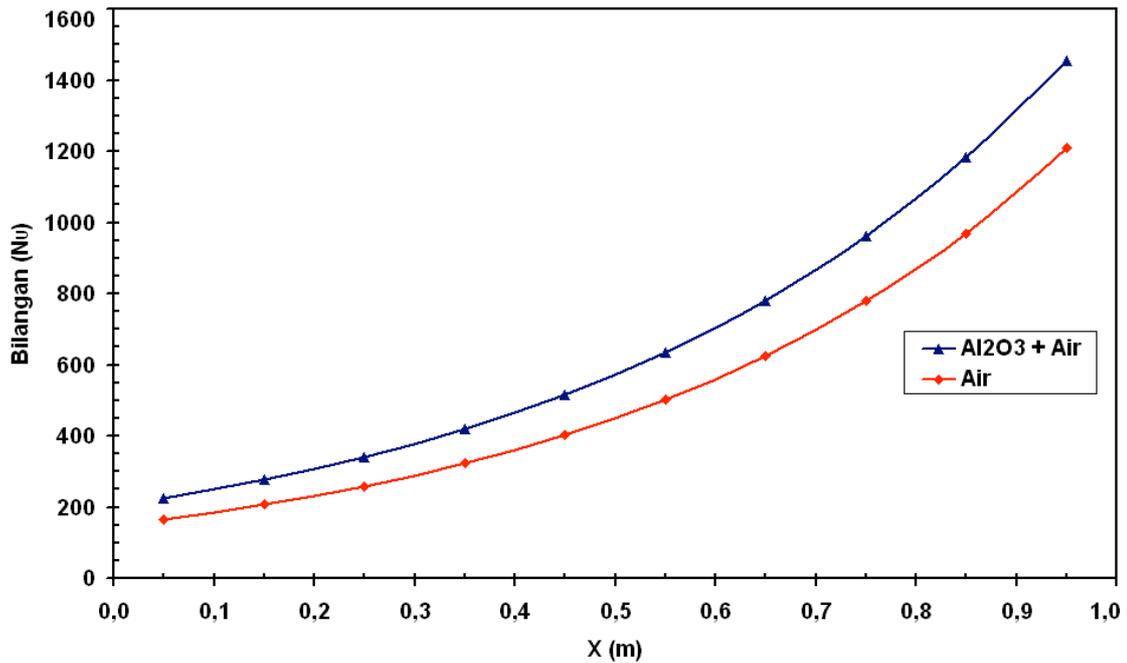
- Menggunakan data-data hasil penelitian yang diperoleh, kemudian dibuat grafik hubungan antara  $\text{Log}(N_{U_L})$  dengan  $\text{Log}\left(R_{a_x} \frac{D_H}{x}\right)$ .
- Melalui regresi linier terhadap grafik hubungan antara  $\text{Log}(N_{U_L})$  dengan  $\text{Log}\left(R_{a_x} \frac{D_H}{x}\right)$  diperoleh harga  $C$  dan  $m$  berdasarkan persamaan (6).

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Data-data keluaran paket program computer CFD berupa temperatur permukaan pemanas dan temperatur nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air dan air yang diperoleh, digunakan untuk menghitung  $N_u$  dan  $R_a$  melalui Persamaan (6) dan Persamaan (7).

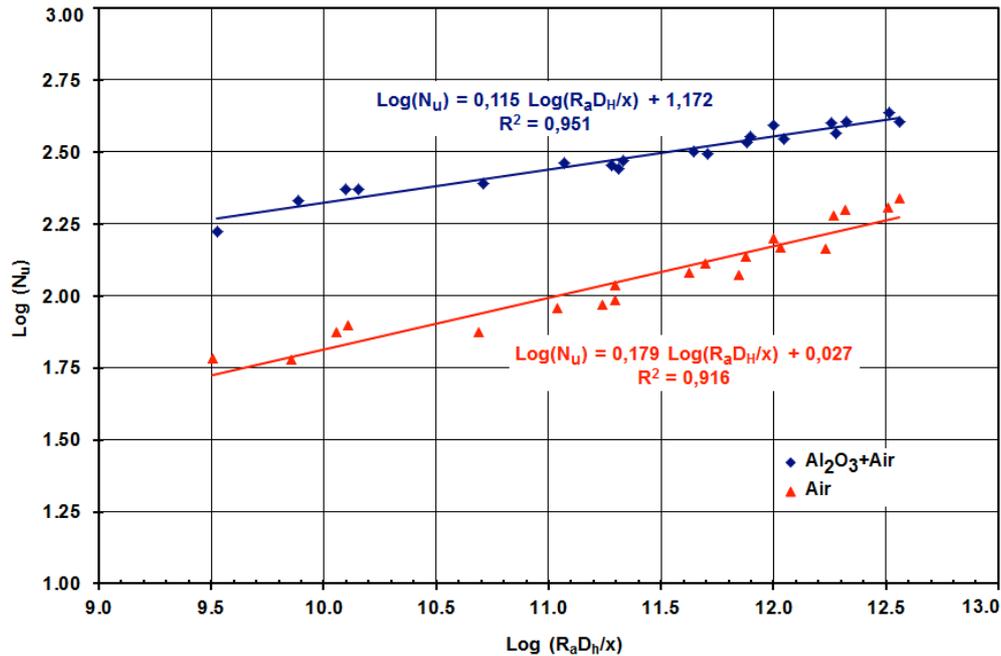
Berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat perbandingan kemampuan perpindahan panas konveksi alamiah satu fasa nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air konsentrasi 2% volume dengan fluida konvensional (air). Terlihat bahwa nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-air memiliki kinerja perpindahan panas yang lebih baik jika

dibandingkan dengan fluida konvensional (air), dimana terdapat peningkatan nilai bilangan  $Nu$  sekitar 20,5% - 35%. Berbeda dengan percobaan yang dilakukan Zamzaman dkk [8] terhadap koefisien perpindahan panas konveksi paksa pada aliran antara dua pelat sebagai model aliran pada berkas bahan reaktor, dimana hasil penelitian ini menunjukkan kenaikan koefisien perpindahan panas konveksi 2 – 50%. Perbedaan ini terjadinya karena penelitian yang dilakukan adalah untuk kasus konveksi alamiah pada aliran di dalam annulus vertikal, sedangkan Zamzaman dkk melakukannya untuk kasus konveksi paksa pada aliran antara dua pelat. Terlihat bahwa faktor nanofluida  $Al_2O_3$ -air sangat mempengaruhi besarnya peningkatan rasio koefisien perpindahan kalor konveksi nanofluida terhadap fluida dasarnya (air).



Gambar 2: Perbandingan kemampuan perpindahan panas konveksi alamiah nanofluida  $Al_2O_3$ -air 2% volume dengan fluida dasar (air)

Peningkatan bilangan *Nusselt* ( $Nu$ ) nanofluida  $Al_2O_3$ -air sebesar 20,5% - 35% dibandingkan dengan fluida dasar (air), terjadi karena peningkatan konduktivitas panas, perubahan nilai sifat-sifat termofisika nanofluida. Hal ini ditunjukkan oleh Persamaan (7), dimana kinerja perpindahan panas nanofluida ditentukan oleh peningkatan nilai konduktivitas termal dan bilangan *Prandtl* ( $Pr$ ). Perubahan bilangan  $Pr$  berarti pula perubahan nilai kalor jenis spesifik ( $c_p$ ) dan viskositas ( $\mu$ ). Disinilah letak pentingnya penentuan nilai sifat-sifat termofisika nanofluida secara tepat karena hal itu sangat berpengaruh dalam ketepatan memprediksi kemampuan perpindahan panas nanofluida.



Gambar 3. Hubungan antara bilangan Nusselt ( $N_U$ ) dengan bilangan Rayleigh ( $R_a$ ) dan posisi non-dimensi ( $DH/x$ )

Menggunakan persamaan (6) dan persamaan (7) dihitung harga bilangan *Nusselt* ( $N_U$ ) dan bilangan *Rayleigh* ( $R_a$ ) dari data-data temperatur permukaan dinding pemanas dan temperatur fluida sebagai data-data keluaran paket program computer CFD. Selanjutnya ditentukan harga  $\text{Log}(N_U)$  dan  $\text{Log}(R_a \cdot D_H/x)$ . Gambar 3 menyatakan grafik hubungan antara  $\text{Log}(N_U)$  dan  $\text{Log}(R_a \cdot D_H/x)$  untuk nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air dan fluida dasar.

Menggunakan analisis regresi linear terhadap grafik hubungan antara  $\text{Log}(N_U)$  dan  $\text{Log}(R_a \cdot D_H/x)$  untuk nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air, diperoleh korelasi empiris hubungan antara bilangan *Nusselt* ( $N_U$ ) dan bilangan *Rayleigh* ( $R_a$ ) dan posisi non-dimensi pada perpindahan panas konveksi alamiah untuk nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air di dalam pipa anulus vertikal, yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$Y = 0,115X + 1,172, \text{ atau dapat juga ditulis sebagai}$$

$$\text{Log}(N_U) = 0,115 \text{Log}\left(R_a \frac{D_H}{x}\right) + 1,172, \text{ sehingga dapat dinyatakan sebagai}$$

$$N_U = 14,869 \left(R_a \frac{D_H}{x}\right)^{0,115} \text{ pada daerah } 2,4708e^{+09} \leq R_a \leq 1,9554e^{+13}$$

dengan koefisien determinasi  $R^2$  adalah 0,951

Sementara itu dari analisis regresi linear terhadap grafik hubungan hubungan antara  $\text{Log}(N_U)$  dan  $\text{Log}(R_a \cdot D_H/x)$  untuk fluida dasar, diperoleh korelasi empiris hubungan antara bilangan *Nusselt* ( $N_U$ ) dengan bilangan *Rayleigh* ( $R_a$ ) dan posisi non-dimensi pada perpindahan panas konveksi alamiah untuk fluida dasar air di dalam anulus vertikal, yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$Y = 0,179X + 0,027, \text{ atau dapat juga ditulis sebagai}$$

$$\text{Log}(N_U) = 0,179 \text{Log}\left(R_a \frac{D_H}{x}\right) + 0,027, \text{ sehingga dapat dinyatakan sebagai}$$

$$N_U = 1,065 \left(R_a \frac{D_H}{x}\right)^{0,179} \text{ pada daerah } 2,471e^{+09} \leq R_a \leq 1,955e^{+13}$$

dengan koefisien determinasi  $R^2$  adalah 0,916

Pada Gambar 3 juga ditunjukkan bahwa kurva regresi linear fluida kerja nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air memiliki koefisien arah 0,115 artinya sudut kemiringannya adalah  $6,57^\circ$ , sedangkan kurva regresi linear fluida kerja air memiliki koefisien arah 0,179 artinya sudut kemiringannya adalah  $10,14^\circ$ . Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kurva regresi linear fluida kerja air lebih curam dibandingkan dengan kurva regresi linear fluida kerja nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air.

Secara kualitatif bentuk linearisasi kedua persamaan di atas menggambarkan bahwa, koefisien perpindahan panas nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air dan fluida dasar (air) semakin meningkat searah

dengan tinggi saluran anulus, dan koefisien perpindahan panas nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air lebih tinggi dari fluida dasar (air). Tetapi searah dengan tinggi saluran anulus, koefisien perpindahan panas fluida dasar (air) naik lebih tajam dibandingkan dengan nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air, dimana hal ini ditunjukkan oleh kurva fluida dasar (air) lebih curam dari kurva nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air.

## KESIMPULAN

Faktor nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air mempengaruhi peningkatan koefisien perpindahan panas konveksi alamiah aliran fluida di dalam anulus vertikal, dimana terdapat peningkatan nilai bilangan  $N_U$  sebesar 20,5% - 35% dibandingkan menggunakan fluida kerja konvensional (air). Kenaikan koefisien perpindahan panas konveksi alamiah menggunakan fluida kerja nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air, akan memberikan peluang nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air sebagai fluida alternatif pendingin reaktor, paling tidak sebagai air pendingin sekunder reaktor atau air pendingin pada sistem pendingin teras darurat (ECCS). Korelasi empirik perpindahan panas konveksi alamiah aliran nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air di dalam anulus vertikal adalah  $N_U = 14,869 \left( R_a \frac{D_H}{x} \right)^{0,115}$  dan korelasi empirik perpindahan panas konveksi alamiah aliran fluida konvensional (air) di dalam anulus vertikal adalah  $N_U = 1,065 \left( R_a \frac{D_H}{x} \right)^{0,179}$  yang berlaku pada daerah  $2,471e^{+09} \leq R_a \leq 1,955e^{+13}$ . Kurva regresi linear fluida kerja nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air memiliki sudut kemiringan lebih kecil dibandingkan kurva regresi linear fluida kerja air.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Endang Kurnia, Drs. K. Kamajaya MT., dan Ir. Sudjatmi KS, MT. atas segala bantuan dan kontribusinya dalam kegiatan penelitian ini mulai dari tahap pengajuan usulan kegiatan hingga penulisan laporan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Buongiorno J. and Hu L.W., Nanofluid heat transfer enhancement for nuclear reactor applications, *Journal of Energy and Power Engineering* 2010;4(6):1-8.
2. Chandrasekar M., Suresh S., Senthilkumar T., Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:3917-3938.
3. Karna E.D., Kristiawan B., Budiana E.P., Studi eksperimen perpindahan kalor konveksi fluida nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -propylene glycol pada circular tube di bawah kondisi fluks kalor konstan, *Mekanika* 2012;11: 14-21.
4. Defri Irawan, Budi Kristiawan, Eko Prasetyo Budiana, Studi eksperimen perpindahan kalor konveksi fluida nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /ethylene glycol pada circular tube di bawah kondisi fluks kalor konstan, *Mekanika* 2013;11:101-106.
5. Liu D and Yu L., Single-Phase Thermal Transport of Nanofluids in a Minichannel, *Journal of Heat Transfer* 2011;133:031009-1 - 031009-11.
6. Bozorgan N., Evaluation of Using  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$  and  $\text{TiO}_2/\text{EG}$  nanofluids as coolants in the double-tube heat exchanger, *Int. J. Adv. Design and Manufacturing Technology* 2012;5(2): 27-34.
7. Gadge A.B. and Gohel N.S., Effect of heat transfer in circular heat pipe with ethanol methanol and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  as a nanofluid, *The International Journal Of Science & Technoledge* 2014;2:397-402.

8. Zamzamian A., Oskouie S.N., Doosthoseini A., Joneidi A., Pazouki M., Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science* 2011;35:495-502.
9. Sankar M., Park Y., Lopez J.M., Do Y., Numerical study of natural convection in a vertical porous annulus with discrete heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011;54:1493–1505.
10. 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)*; 2014, Kualalumpur, Malaysia; 2014:1-6.
11. Nazififard M., Nematollahi M., Jafarpur K., Suh K.Y., Numerical simulation of water-based alumina nanofluid in bubchannel geometry, *Hindawi Publishing Corporation, Science and Technology of Nuclear Installations* 2012; 2012:1-12.
12. Hosseini S.Sh., Shahrjerdi A., Vazifeshenas Y., A review of relations for physical properties of nanofluids, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 2011;5:417- 435.