

STUDI EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR KONVEKSI FLUIDA NANO Al_2O_3 -PROPHYLENE GLYCOL PADA CIRCULAR TUBE DI BAWAH KONDISI FLUKS KALOR KONSTAN

Endra Dyatmika Karna¹, Budi Kristiawan², Eko Prasetyo Budiana²

¹Program Sarjana Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

²Staf Pengajar – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

Keywords :

Heat transfer coefficient
Nanofluids
Particle concentrations
Thermal conductivity
 Al_2O_3 nano particle

Abstract :

This research was conducted to examine the thermal conductivity and heat transfer characteristic of Al_2O_3 -prophylene glycol nanofluid on a circular tube heat exchanger under constant heat flux conditions. Al_2O_3 nanoparticles with nominal diameter of 13 nm were dispersed in prophylene glycol as base fluid at three different particles concentration of 0,2%, 0,5%, and 1,0% w/v, respectively. A straight horizontal stainless-steel tube of 1,2 m length, 0,005 m inner diameter and 0,0063 m outer diameter was used as a test section. A nickelin coil heater was connected to an AC regulated power supply to obtain constant wall heat-flux boundary condition. The flow rates were adjusted to obtain the Reynolds number specification from 75 to 215. The result shows that the effective thermal conductivity increases from its base fluid. The highest enhancement of thermal conductivity of the observed nanofluids is 4,80% for nanoparticles concentration of 1,0% w/v. For the same Reynolds number, heat transfer increases with the increase of the Nusselt number from base fluid to nanofluids at $x/D_i = 200$ with the highest value of 27,61% for 1,0% w/v. At the Reynolds number variation, the highest Nusselt number enhancement at $x/D_i = 200$ reaches 43,49% from Reynolds number 75 to 215 for alumina concentration of 1,0% w/v.

PENDAHULUAN

Latar belakang dilaksanakannya penelitian ini yaitu berdasarkan akan perkembangan penukar kalor yang membutuhkan bentuk kompak namun dengan perpindahan kalor yang tinggi. Hal tersebut dapat dicapai dengan menggunakan fluida kerja yang memiliki transfer kalor yang baik, dan saat ini perkembangannya dengan menggunakan penambahan partikel nano pada fluida kerja dasar yang digunakan.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui peningkatan nilai konduktifitas termal pada fluida nano dengan fluida dasar PG pada penambahan partikel nano Al_2O_3 dibandingkan dengan fluida kerja berupa PG murni. Mengetahui nilai perpindahan kalor dari fluida kerja nano Al_2O_3 -PG sebagai fluida kerja pada penukar kalor. Mengetahui pengaruh dari bilangan Reynolds dan variasi konsentrasi partikel terhadap nilai perpindahan kalor fluida nano pada penukar kalor. Dan manfaat yang diharapkan yaitu untuk Memberikan pengetahuan tambahan mengenai fluida kerja transfer kalor yang berupa fluida nano. Fluida kerja transfer kalor fluida nano diharapkan dapat meningkatkan transfer kalor dari aplikasi alat penukar kalor. Beberapa artikel yang meneliti dari penggunaan fluida nano akan dibahas pada bagian berikut ini.

Murshed et al (2008) meneliti mengenai karakteristik perpindahan kalor konvektif fluida nano

TiO_2 dengan air dibawah kondisi fluks kalor konstan. Hasil penelitian didapatkan bahwa fluida nano menunjukkan adanya peningkatan koefisien perpindahan kalor konvektif seiring dengan meningkatnya jumlah volume dari partikel nano pada larutan.

Liu dan Yu (2010) melakukan penelitian mengenai karakteristik perpindahan kalor dari fluida nano Al_2O_3 /air yang mengalir melalui saluran mini dengan kondisi batas fluks kalor konstan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baik pada perpindahan kalor konvektif dan angka Nusselt dari fluida nano meningkat seiring dengan peningkatan fraksi volume dari partikel nano serta meningkatnya bilangan Reynolds.

Hwang et al. (2009) melakukan penelitian mengenai aliran dan karakteristik perpindahan kalor konveksi fluida nano Al_2O_3 /air pada aliran laminar kembang penuh (*fully developed laminar flow*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan partikel nano kedalam fluida dasar meningkatkan koefisien perpindahan kalor fluida kerja secara signifikan. Semakin tinggi konsentrasi partikel nano yang didispersikan dalam fluida dasar maka semakin tinggi pula nilai koefisien perpindahan kalornya. Hal ini dapat ditunjukkan pada nilai koefisien perpindahan kalor fluida nano Al_2O_3 /air yang meningkat sampai dengan 8% pada fraksi volume 0,3% dibandingkan dengan fluida dasar pada rentang bilangan Reynolds yang sama.

Torii (2007) melakukan penelitian mengenai perpindahan kalor konveksi dari nano-diamond partikel nano yang melalui pipa horizontal dengan kondisi fluks kalor konstan. Hasil percobaan menunjukkan bahwa viskositas dari fluida nano meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi partikel pada fluida. Nilai bilangan Reynolds dan besar konsentrasi partikel sangat mempengaruhi besarnya nilai koefisien perpindahan kalor, semakin besar konsentrasi partikel maka semakin besar pula nilai koefisien perpindahan kalor dari fluida. Dari hasil juga didapatkan bahwa semakin tinggi nilai konduktifitas *thermal*, maka semakin tinggi pula nilai perpindahan kalor.

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini menguji mengenai konduktifitas termal dari fluida kerja, kemudian mengenai perpindahan kalor yang terjadi pada fluida nano dibandingkan dengan fluida dasarnya. Alat yang digunakan terdiri dari saluran uji, pemanas, pendingin, serta pengontrol dan pengukur. Saluran uji terdiri dari pompa, saluran uji, serta penampung. Untuk alat pengukur menggunakan thermocouple reader yang telah terintegrasi untuk temperatur masuk dan keluar fluida, serta temperatur dinding luar seksi uji. Seksi uji berupa pipa *stainless-steel* sepanjang 1,2 m, dengan diameter dalam 0,005 m dan diameter luar 0,0063 m. Untuk mengalirkan fluida menggunakan pompa sentrifugal dengan debit dari variasi bilangan Reynolds dari 75 hingga 215. Untuk mendapatkan fluks kalor konstan digunakan kawat nikelin yang dililitkan pada seksi uji dan dihubungkan dengan regulator AC yang dapat diatur besar dayanya yang berkisar 450^{+15} Watt. Untuk mengurangi kehilangan panas, seluruh seksi uji dibungkus dengan insulator panas.

Digunakan 5 thermokopel untuk mengetahui temperatur dinding luar seksi uji yang dipasang pada posisi 0,2 m (Ts1), 0,4 m (Ts2), 0,6 m (Ts3), 0,8 m (Ts4), dan 1,0 m (Ts5). Kemudian dua termokopel lain digunakan untuk mengetahui temperatur masuk dan keluar fluida. Gambar 1. adalah diagram dari alat yang digunakan.

Partikel nano yang digunakan adalah Al_2O_3 dengan nominal diameter 13 nm. Serta menggunakan variasi konsentrasi, dari 0,2 hingga 1,0% dari partikel nano pada fluida dasar propylene glycol. Untuk mendapatkan campuran yang stabil, larutan diaduk menggunakan pengaduk magnetik dan diagitasi dengan menggunakan ultrasonic vibrator. Setelah fluida nano didapat, dilakukan pengujian konduktivitas termal dari fluida nano menggunakan alat *Thermal Conductivity of Liquid and Gases P.A. Hilton LTD* tipe H111 untuk mendapatkan nilai konduktifitas termal dari fluida kerja.

Data yang didapatkan dari penelitian ini adalah debit fluida, temperatur masuk dan keluar fluida, serta temperatur dinding luar seksi uji. Dari data yang didapatkan maka akan didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor serta nilai bilangan Nusselt dari fluida kerja.

Fluida Nano

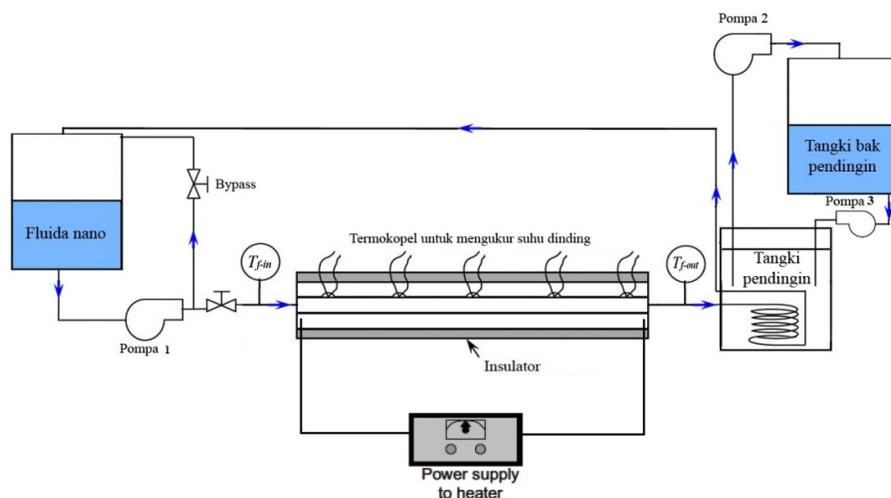
Sifat-sifat fluida nano

- Densitas Fluida Nano

Densitas dapat didefinisikan sebagai massa suatu zat per satuan volume.

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

Dimana ρ_{nf} adalah densitas fluida nano (kg/m^3), ϕ adalah fraksi volume fluida nano, ρ_{bf} adalah densitas fluida dasar (kg/m^3), ρ_p adalah densitas partikel nano (kg/m^3). Persamaan diatas didapat dari korelasi Pak dan Cho (1998), yang diambil dalam jurnal Duangthongsuk dan Wongwises (2010).



Gambar 1. Skema dari alat penelitian fluida nano
- Viskositas

Pada penelitian ini, viskositas yang dipakai adalah viskositas dinamik yang didapatkan dari perhitungan prediksi menggunakan persamaan dari Einstein (1956) yaitu:

$$\mu_{eff} = (1 + 2,5\phi_p) \mu_{bf} \quad (2)$$

Dimana μ_{eff} adalah viskositas efektif fluida nano, ϕ_p adalah fraksi volume dari partikel, μ_{bf} adalah viskositas dinamik fluida dasar

- Kalor spesifik fluida nano

Untuk fluida nano dimana terdapat fraksi volume, kalor spesifik efektif fluida nano pada tekanan konstan ($c_{p,nf}$) dapat diestimasi berdasarkan korelasi dari Xuan dan Roetzel (2000) sebagai berikut:

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)\rho_{bf}c_{p,bf} + \phi\rho_p c_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (3)$$

Dimana $c_{p,nf}$, $c_{p,bf}$, $c_{p,p}$ berturut turut adalah kalor spesifik fluida nano, kalor spesifik fluida dasar, dan kalor spesifik partikel (kJ/kg.K), ϕ adalah fraksi volume dari partikel, ρ_{bf} , ρ_p , dan ρ_{nf} berturut-turut adalah densitas dari fluida dasar, partikel nano, serta fluida nano (kg/m³)

- Konduktifitas termal

Dari pengujian konduktifitas termal yang dilaksanakan, akan didapatkan data berupa voltase, arus serta temperatur inti dan selimut dari seksi uji. Kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari besar perpindahan kalor insidental (Q_i) yang akan digunakan untuk mendapatkan data konduktifitas termal dari fluida nano dengan penambahan partikel Al₂O₃ yang belum memiliki data nilai konduktifitas termal sebelumnya. Perhitungan dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

Menentukan temperatur rata-rata dengan Persamaan::

$$(T_1+T_2)/2 \quad (4)$$

Dimana T_1 adalah temperatur *plug* dari alat, T_2 adalah temperatur *jacket* dari alat.

$$Q_c = V \times I \quad (5)$$

Beda temperatur dapat dihitung dengan menggunakan korelasi:

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (6)$$

Menghitung besar kalor yang terkonduksi melalui fluida dalam alat:

$$Q_c = \frac{k\Delta T}{\Delta r} \quad (7)$$

Dimana k adalah konduktifitas termal referensi dari fluida kerja yang didapat dari data referensi ASHRAE (2009) dan interpolasi untuk mendapatkan nilai 100% sebagai berikut:

Tabel 1. Data referensi nilai k untuk PG

Temperatur (°C)	Konduktifitas termal PG
25	0.1954
30	0.1937
35	0.1945
40	0.1944
45	0.1947

Menghitung perpindahan kalor insidental, yaitu kalor yang hilang dari elemen listrik alat tetapi bukan dari konduksi, namun dari mekanisme lain seperti radiasi dan konveksi. Nilai tersebut didapat dengan persamaan:

$$Q_i = Q_c - Q_c \quad (8)$$

Setelah nilai Q_i didapatkan, maka dibuat grafik antara Q_i dengan Δt . Grafik ini akan menghasilkan persamaan yang akan digunakan selanjutnya untuk menentukan nilai konduktifitas termal dengan persamaan:

$$k = \frac{Q_c \cdot A_r}{A \Delta T} \quad (9)$$

Dimana k_{nf} adalah konduktifitas termal dari fluida nano (W/m.°C), Q_c adalah Perpindahan kalor secara konduksi melalui fluida dasar (Watt), Q_c adalah Perpindahan kalor secara konduksi melalui fluida nano (Watt), Δr adalah Jarak rongga dari tabung dalam dan luar (0,0003 m), A adalah Luas area konduksi (0,0133 m²), ΔT adalah Perbedaan temperatur antara T_1 dan T_2 (°C), $Q_c = V \times I$, adalah kalor yang diterima dari elemen (Watt) dari voltase dan arus yang didapat pada pengujian.

Q_i adalah perpindahan kalor insidental (Watt) yaitu seluruh perpindahan kalor yang terjadi dari elemen ke inti dari alat selain yang ditransfer melalui konduksi melewati fluida yang sedang diuji, meliputi:

- Kalor terkonduksi dari inti ke selubung alat
- Kalor teradiasi dari inti ke selubung.
- Kalor yang hilang ke lingkungan.

Konduktifitas termal dari fluida nano divalidasi dengan menggunakan beberapa persamaan empirik yang ada. Pada penelitian ini menggunakan validasi dengan korelasi dari Yu dan Choi (1993).

> Validasi menggunakan persamaan Yu dan Choi (1993)

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_{bf} - (k_p - k_{bf})(1 + \beta)^3 \phi} \right] k_{bf} \quad (10)$$

Nilai β yang biasa digunakan untuk menghitung konduktifitas termal dari fluida nano yaitu 0,1.

Penentuan fraksi volume

Pada penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi partikel, untuk dapat diperbandingkan dengan referensi yang ada, diperlukan konversi untuk dapat menjadi fraksi volume. Untuk menentukan volume dari partikel, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{V_{partikel}}{\rho_{partikel}} \quad (13)$$

Dan untuk mendapatkan fraksi volume dari fluida nano dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{V_{partikel}}{V_{larutan}} \quad (14)$$

Perpindahan kalor

Langkah perhitungan yang akan dilakukan mula-mula adalah dengan mencari nilai perpindahan kalor yang terjadi pada fluida nano. Perhitungan akan didefinisikan pada koefisien perpindahan kalor konvektif lokal dengan persamaan sebagai berikut:

$$h_{nf-x} = \frac{\dot{q}}{T_{i,w}(x) - T_m(x)} \quad (15)$$

Dimana h_{nf-x} adalah koefisien perpindahan kalor lokal dari fluida nano (W/m^2K), $\dot{q} = (\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}))/\pi D_i L$ adalah fluks kalor dari seksi uji (W/m^2), $T_{i,w}(x)$ adalah temperatur dinding dalam tabung ($^{\circ}C$), $T_m(x)$ adalah temperatur bulk rata pada posisi x ($^{\circ}C$), D_i adalah diameter dalam tabung stainless (m), L adalah panjang seksi uji (m), $\dot{m} = \rho u A_c$ adalah laju aliran massa (kg/s), c_p adalah kalor spesifik dari fluida (kJ/kg.K).

Karena temperatur dinding dalam tidak bisa diukur secara langsung, nilainya dapat dicari dengan menggunakan persamaan konduktifitas termal untuk silinder dari Pak dan Cho (1991) sebagai berikut.

$$T_{i,w}(x) = T_{o,w}(x) - \frac{q[2D_o^2 \ln(D_o/D_i) \cdot (D_o^2 - D_i^2)]}{4\pi(D_o^2 - D_i^2)k_s x} \quad (16)$$

Dimana $T_{o,w}(x)$ adalah temperatur dinding luar ($^{\circ}C$), q adalah kalor yang disalurkan ke seksi uji (W), k_s adalah konduktifitas termal dari pipa (stainless steel) ($W/m^{\circ}C$), D_o adalah diamter luar dari pipa (m), x adalah posisi longitudinal dari seksi uji dari saluran masuk (m).

Temperatur bulk rata-rata $T_m(x)$ pada salah satu titik pada seksi uji dapat ditentukan dari keseimbangan energi di titik mana saja dari pipa dengan fluks kalor konstan. Untuk dx dari pipa dengan fluida incompressible dan tekanan diabaikan, dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Dq_{conv} &= \dot{q}pdx \\ &= \dot{m}c_p dT_m \end{aligned} \quad (17)$$

Dimana keliling dari pipa adalah $p = \pi D_i$ dan dT_m adalah temperatur diferensial rata-rata dari fluida pada bagian tersebut. Dari persamaan (17), maka akan didapat:

$$dT_m = \frac{\dot{q} \pi D_i}{\dot{m} c_p} dx \quad (18)$$

Variasi dari T_m terhadap x ditentukan melalui integrasi dari $x = 0$ ke x , kemudian didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$T_m(x) = T_{in} + \frac{(T_{out} - T_{in})}{L} x \quad (19)$$

Mensubstitusikan persamaan (16) dan (19) kepada persamaan (15), koefisien perpindahan kalor h_{nf-x} didapat melalui persamaan berikut:

$$\left\{ T_{o,w}(x) - \frac{q[2D_o^2 \ln(D_o/D_i) \cdot (D_o^2 - D_i^2)]}{4\pi(D_o^2 - D_i^2)k_s x} \right\} \left\{ T_m + \frac{(T_{out} - T_{in})}{L} x \right\} \quad (20)$$

Dengan memasukkan temperatur dinding, temperatur fluida, serta fluks kalor konstan yang didapat dari pengukuran kedalam persamaan (20),

maka koefisien perpindahan kalor dapat diketahui dalam studi ini. Setelah koefisien perpindahan kalor dari fluida nano diketahui, serta konduktifitas termal diketahui dari pengujian. Bilangan Nusselt dapat diketahui dari persamaan berikut ini:

$$Nu_{nf-x} = \frac{h_{nf-x} D_i}{k_{nf}} \quad (21)$$

Bilangan Nusselt juga dapat diketahui melalui persamaan dari Shah untuk aliran laminar dengan kondisi fluks kalor konstan yang dapat dilihat dari Bejan (2004) seperti pada persamaan sebagai berikut:

$$Nu = 1,953 \left(Re Pr \frac{D_i}{x} \right)^{1/2} \quad (22)$$

$$\text{untuk } \left(Re Pr \frac{D_i}{x} \right) \geq 33,3$$

Bilangan Reynolds, Prandtl, dan Peclet dapat didefinisikan sebagai berikut:

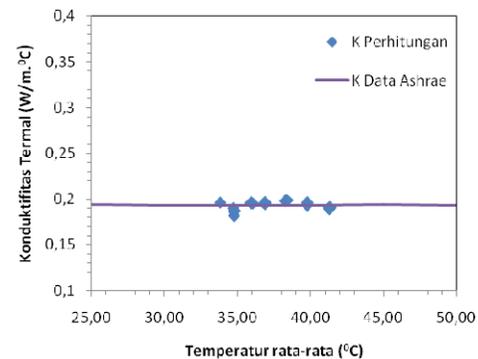
$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu_{nf}} \quad (23)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu_{nf}}{k_{nf}} \quad (24)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

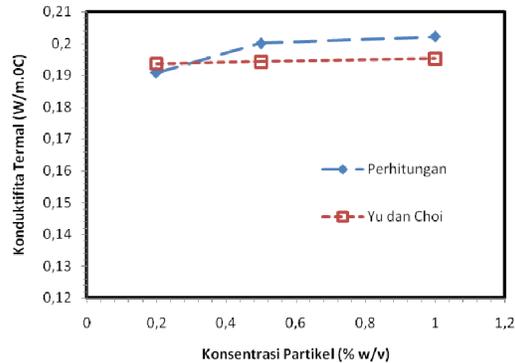
Konduktifitas termal

Dari hasil penelitian konduktifitas termal dari fluida nano menggunakan alat Termal Conductivity of Liquid and Gases P.A. Hilton LTD tipe H111, akan didapatkan data yang digunakan untuk melakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai konduktifitas termal dari fluida nano. Nilai perhitungan akan divalidasi menggunakan nilai dari data referensi untuk fluida dasar dan dengan korelasi empirik dari Yu dan Choi. Gambar 2 berikut menunjukkan perbandingan dari hasil perhitungan dengan data referensi dari fluida dasar PG. Dari hasil didapatkan nilai konduktifitas termal untuk perhitungan sebesar 0,1946 W/m. $^{\circ}C$ dan dari data referensi PG sebesar 0,2013 W/m. $^{\circ}C$. Ketidaksesuaian dari perhitungan dengan nilai referensi sebesar 1,4% pada grafik 2.



Gambar 2. Perbandingan antara k referensi dengan perhitungan dari PG

Grafik 3 menunjukkan nilai konduktifitas termal dari perhitungan untuk fluida nano dengan nilai validasi dari korelasi Yu dan Choi.

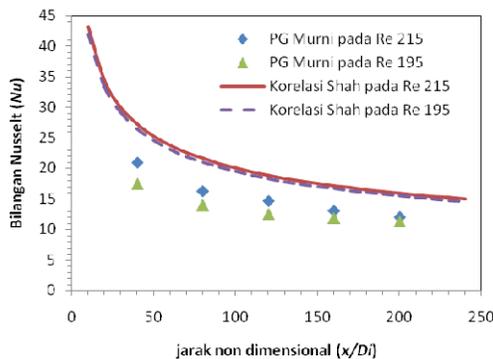


Gambar 3. Grafik hubungan k dari perhitungan dengan validasi

Dari grafik didapatkan nilai konduktifitas termal dari perhitungan memiliki nilai yang lebih tinggi dari data validasi. Dari perhitungan didapatkan ketidaksesuaian sebesar 1,45%, 2,97%, dan 3,54% berturut-turut untuk fluida nano 0,2%, 0,5% dan 1,0%. Dari grafik didapatkan bahwa nilai perhitungan dan validasi memiliki trend yang sama.

Perpindahan kalor

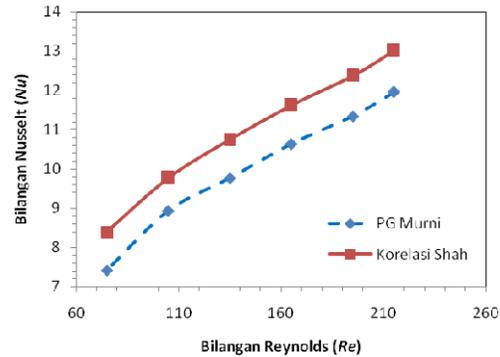
Pada gambar 4 menunjukkan hubungan Nu dengan posisi axial untuk fluida dasar. Penelitian ini dilakukan pada kondisi laminar di *entrance region*, pada *entrance region* laminar nilai Nu semakin menurun hingga akan mencapai kondisi linear dengan nilai 4,36 yang terjadi pada wilayah *fully developed*. Nilai perhitungan akan dibandingkan dengan nilai dari korelasi Shah. Dari perhitungan didapatkan ketidaksesuaian sebesar 9% dibawah nilai dari korelasi Shah, namun data hasil penelitian memiliki nilai trend yang sama dengan korelasi yang digunakan. Hal ini juga terjadi pada penelitian oleh Wen dan Ding ??, serta Murshed et al ??.



Gambar 4. Grafik hubungan Nu dengan posisi axial untuk fluida dasar.

Pada gambar 5 menunjukkan hubungan Nu dengan Re untuk fluida dasar sebagai perbandingan antara data perpindahan kalor dari data penelitian dengan hasil perhitungan korelasi empirik yang ada pada variasi bilangan Reynolds. Dari data yang telah

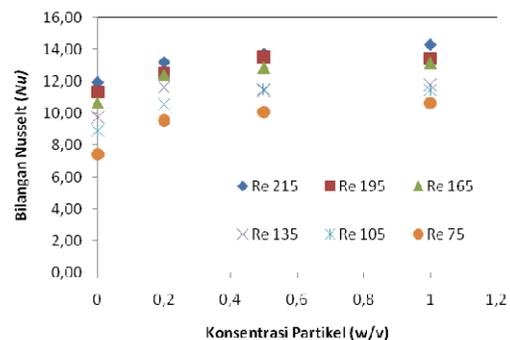
didapatkan, maka akan dapat diketahui nilai perpindahan kalor yang terjadi pada fluida nano.



Gambar 5. Grafik hubungan Nu dengan Re untuk fluida dasar.

Penyimpangan rata-rata nilai aktual Nu dari fluida dasar dengan korelasi Shah sebesar 9% dibawah korelasi Shah. Hal ini sesuai dengan gambar 5 yang menyebutkan bahwa terjadi *overpredict* dari korelasi Shah, yang memiliki nilai Nu yang lebih tinggi dari nilai perhitungan. Trend yang didapat dari data perhitungan sesuai dengan korelasi Shah dan dari Torii (2007), Murshed et. al. (2008), serta Murshed Castro (2011).

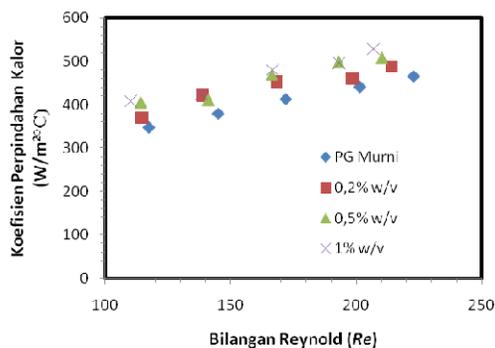
Pengaruh konsentrasi partikel nano terhadap karakteristik perpindahan kalor fluida nano dapat dilihat pada grafik 6 yang menunjukkan bahwa konsentrasi partikel dapat mempengaruhi nilai bilangan Nusselt yang didapat. Dapat dilihat bahwa bilangan Nusselt meningkat dari fluida dasar ke fluida nano, dan peningkatan menjadi linear pada fluida nano seiring bertambahnya jumlah konsentrasi partikel nano. Nilai rata-rata Nu fluida dasar adalah sebesar 11,18, fluida nano dengan konsentrasi partikel 0,2%, 0,5% dan 1,0% berturut-turut adalah 13,19, 13,89, dan 14,86.



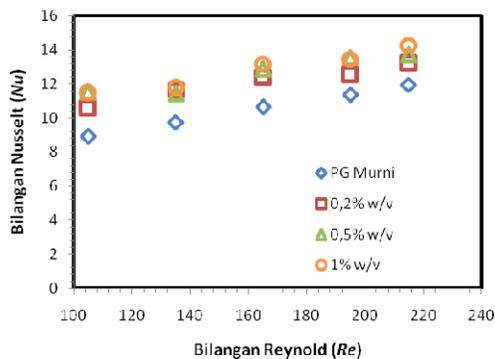
Gambar 6. Grafik hubungan Nu dengan konsentrasi partikel untuk x/D 200.

Pada gambar 7 menunjukkan pengaruh bilangan Reynolds terhadap karakteristik perpindahan kalor. Pengujian karakteristik perpindahan kalor dari fluida kerja pada penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan bilangan Reynolds aliran di pipa serta konsentrasi partikel nano dalam fluida dasar. Pengaruh variasi bilangan Reynolds aliran air di pipa

dalam serta pengaruh variasi konsentrasi partikel pada fluida kerja terhadap nilai koefisien perpindahan kalor dapat dilihat pada gambar 6. Sedangkan pengaruh dari variasi bilangan Reynolds aliran air di pipa dalam serta pengaruh variasi konsentrasi partikel pada fluida kerja terhadap nilai perpindahan kalor (dilihat dari nilai Nu) dapat dilihat pada gambar 7. Karakteristik perpindahan kalor dari fluida kerja ini dapat dilihat dari hubungan antara koefisien perpindahan kalor (h) dengan bilangan Reynolds, sedangkan untuk perpindahan kalor dari fluida kerja ini dapat dilihat dari hubungan antara bilangan Nusselt (Nu) dengan bilangan Reynolds (Re).



Gambar 7. Grafik hubungan koefisien perpindahan kalor dengan Re fluida kerja pada x/D 200



Gambar 8. Grafik hubungan Nu dengan Re fluida kerja pada x/D 200

Dari gambar 7 didapat bahwa nilai koefisien perpindahan kalor meningkat seiring peningkatan nilai Re dan konsentrasi partikel nano. Peningkatan terjadi sebesar 17,62%, 26,36%, dan 39,29% untuk fluida nano dari Re 75 hingga 215. Dari gambar 8 juga terjadi trend peningkatan yang sama dengan grafik pada gambar 7. Dari dua grafik didapatkan bahwa nilai Nu akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai bilangan Reynolds dan konsentrasi partikel.

Dari hasil pengujian, peningkatan nilai rata-rata Nu pada fluida nano dari fluida dasarnya adalah sebesar 17,35% untuk konsentrasi partikel 0,2% w/v, 22,91% untuk konsentrasi partikel 0,5% w/v, dan

25,81% untuk konsentrasi partikel 1,0% w/v. Fenomena ini serupa dengan penelitian dari Murshed et al. (2008), Liu dan Yu (2011), Duangthongsuk dan Wongwises (2010), serta Murshed dan Castro (2011). Bilangan Reynolds (Re) didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia dengan gaya kekentalan, di dalam lapis batas kecepatan. Untuk harga Re yang tinggi, gaya inersia akan lebih berpengaruh daripada gaya kekentalan. Untuk harga Re yang rendah, gaya kekentalan akan lebih berpengaruh dari gaya inersia. Hal ini akan mempengaruhi tebalnya lapis batas aliran. Apabila nilai bilangan Reynolds tinggi, lapis batas akan semakin tipis, karena lapis batas dipengaruhi oleh gaya inersia yang menekan lapis batas. Berkurangnya tebal fluida yang memiliki kecepatan rendah akan meningkatkan jumlah fluida berkecepatan tinggi yang pergerakan molekulnya akan mempercepat proses penarikan molekul dengan temperatur lebih tinggi keluar lapis batas dan mempercepat laju transfer kalor. Variasi konsentrasi partikel juga akan mempengaruhi besarnya nilai perpindahan kalor dari fluida, dari penelitian yang didapatkan, peningkatan perpindahan kalor pada fluida nano meningkat dari fluida dasar ke fluida nano. Hal ini disebabkan adanya peningkatan nilai konduktifitas *thermal* dari fluida kerja karena penambahan partikel yang memiliki nilai konduktifitas *thermal* lebih tinggi dibandingkan dengan fluida dasarnya. Nilai konduktifitas *thermal* mengindikasikan seberapa cepat kalor akan dialirkan pada suatu material.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan mengenai pengujian karakteristik perpindahan kalor dari fluida nano Al_2O_3 -Propylene Glycol pada pipa mendatar di bawah kondisi fluks kalor yang konstan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar konsentrasi partikel nano Al_2O_3 yang didispersikan ke dalam fluida dasar PG maka semakin besar nilai konduktifitas termalnya. Nilai konduktifitas termal fluida nano dengan variasi konsentrasi 0,2, 0,5 dan 1% w/v masing-masing adalah 0,1844, 0,2001 dan 0,2021 W/m.⁰C.
2. Penambahan partikel nano pada fluida kerja akan meningkatkan nilai bilangan Nusselt lokal dan koefisien perpindahan kalor pada setiap titik pengukuran. Peningkatan nilai bilangan Nusselt dari fluida dasar ke fluida nano pada posisi $x/D = 200$ dengan peningkatan tertinggi sebesar 43,49% untuk variasi 1,0% w/v. Sedangkan peningkatan nilai koefisien perpindahan kalor fluida dasar ke fluida nano pada posisi $x/D = 200$ dengan peningkatan tertinggi sebesar 27,61% untuk variasi 1,0% w/v.
3. Semakin besar laju aliran massa fluida kerja maka akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan kalor dan bilangan Nusselt.

DAFTAR NOTASI

A	= Luas area (m^2)
c_p	= Kalor spesifik fluida ($kJ/kg.K$)
$c_{p,bf}$	= Kalor spesifik fluida dasar ($kJ/kg.K$)
$c_{p,nf}$	= Kalor spesifik fluida nano ($kJ/kg.K$)
$c_{p,p}$	= Kalor spesifik partikel ($kJ/kg.K$)
D	= Diameter dalam pipa (m)
D_i	= Diameter dalam tabung (m)
D_o	= Diameter luar tabung (m)
h	= Koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2.^\circ C$)
h_{nf-x}	= Koefisien perpindahan kalor lokal dari fluida nano ($W/m^2.^\circ C$)
h_x	= Koefisien perpindahan kalor konveksi lokal ($W/m^2.^\circ C$)
I	= Arus (ampere)
k	= Konduktifitas termal fluida ($W/m.^\circ C$)
k_{bf}	= Konduktifitas termal dari fluida dasar ($W/m.^\circ C$)
k_{nf}	= Konduktifitas termal dari fluida nano ($W/m.^\circ C$)
k_s	= Konduktifitas termal dari pipa (stainless steel) ($W/m.^\circ C$)
L	= Panjang seksi uji (m)
\dot{m}	= Laju aliran massa (kg/s)
Nu	= Bilangan Nusselt
Pr	= Bilangan Prandtl
q	= Kalor yang disalurkan (Watt)
\dot{Q}_c	= Perpindahan kalor secara konduksi melalui fluida (Watt)
\dot{Q}_{c-nf}	= Perpindahan kalor secara konduksi melalui fluida nano (Watt)
\dot{Q}_s	= Kalor yang diterima dari elemen (Watt)
$\dot{Q}_{s,nf}$	= Kalor yang diterima dari elemen pada fluida nano (Watt)
\dot{Q}_i	= Perpindahan kalor insidental fluida dasar (Watt)
\dot{Q}_{i-nf}	= Perpindahan kalor insidental fluida nano (Watt)
\dot{q}	= Fluks kalor dari seksi uji (W/m^2)
\dot{q}_s	= Fluks kalor konstan (W/m^2)
Δr	= Jarak rongga dari tabung dalam dan luar (0,0003 m)
Re	= Bilangan Reynolds
ΔT	= Perbedaan temperatur antara T_1 dan T_2 ($^\circ C$)
ΔT_{nf}	= Perbedaan temperatur antara T_1 dan T_2 pada fluida kerja nano ($^\circ C$)
T_1	= Temperatur <i>plug</i> dari alat ($^\circ C$)
T_2	= Temperatur <i>jacket</i> dari alat ($^\circ C$)
T_e	= Temperatur fluida keluar tabung ($^\circ C$)
T_i	= Temperatur fluida masuk tabung ($^\circ C$)
$T_{i,w}(x)$	= Temperatur dinding dalam tabung ($^\circ C$)
T_m	= Temperatur rata-rata fluida ($^\circ C$)
$T_m(x)$	= Temperatur bulk rata pada posisi x ($^\circ C$)
$T_{o,w}(x)$	= Temperatur dinding luar ($^\circ C$)
T_s	= Temperatur permukaan dinding ($^\circ C$)

$T_s(x)$	= Temperatur permukaan dinding pada jarak x ($^\circ C$)
u_m	= Kecepatan rata-rata fluida (m/s)
V	= Voltase (Volt)
V_{nf}	= Volume campuran/fluida nano (cm^3)
V_p	= Volume dari partikel (cm^3)
W	= Berat (kg)
w/v	= Fraksi massa
x	= Posisi longitudinal dari seksi uji dari saluran masuk (m)

Greek Symbol

μ	= Viskositas dinamik ($kg/m.s$)
μ_{bf}	= Viskositas dinamik fluida dasar ($kg/m.s$)
μ_{eff}	= Viskositas efektif fluida nano
μ_{nf}	= Viskositas dinamik fluida nano ($kg/m.s$)
ϕ	= Fraksi volume
ϕ_p	= Fraksi volume dari partikel nano
ρ	= Massa jenis fluida (kg/m^3)
ρ_{bf}	= Densitas fluida dasar (kg/m^3)
ρ_{nf}	= Densitas fluida nano (kg/m^3)
ρ_p	= Densitas partikel nano (kg/m^3)

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Amayreh, M., 2010, Experimental Study of Thermal Conductivity of Ethylene Glycol Water Mixtures, European Journal of Scientific Research, Vol.44 No.2 (2010), pp.300-313.
- Cengel, Y.A., 2003, *Heat Transfer : A Practical Approach*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York.
- Daungthongsuk, W. & Wongwises, S., 2010, An Experimental Study on The Heat Transfer Performance and Pressure Drop of TiO₂-Water Nanofluids Flowing Under a Turbulent Flow Regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 334-344.
- Green, D. W. & Perry, R. H., 2008, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8th ed., McGraw-Hill, New York.
- Hilton, P.A., 1994, Experimental Operating and Maintenance Manual, Thermal Conductivity of Liquids and Gases Unit H111, P.A. Hilton LTD.
- Hosseini, S. Sh., Shahrjerdi, A., Vazifeshenas, Y., 2011, A Review of Relations for Physical Properties of Nanofluids, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(10): 417-435.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Ed, John Wiley and Sons, New York.
- Microelectronics Heat Transfer Lab, 1997, Fluid Properties Calculator, [online], (<http://www.mhltl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>)
- Murshed, S. M. S., Leong, K. C., Yang, C. & Nguyen N. T., 2008, Convective Heat Transfer Characteristics of Aqueous TiO₂

- Nanofluids Under Laminar Flow Conditions, *International Journal of Nanoscience*, Vol. 7, No.6, pp.325-331.
- Murshed, S. M. S. & Nieto de Castro, C. A., 2011, Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids in Minichannel, in *Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling*, Ed., A. Ahsan, Chapter 18, pp.419-434, INTECH, Vienna.
- N. Bozorgan and N. Bozorgan, 2012, Evaluation of Using Al₂O₃/EG and TiO₂/EG Nanofluids as Coolants in the Double-tube Heat Exchanger, *Int. J. Adv. Design and Manufacturing Technology*, Vol. 5/ No. 2, pp. 27-34.
- Sigmaaldrich.com, 2011, Titanium(IV) oxide nanopowder, ~21 nm particle size, ≥99,5% trace metals basis | Sigma-Aldrich, [online], (<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/718467?lang=en®ion=ID>).
- Sunarya, Y. & Setiabudi, A., 2007, *Mudah dan Aktif Belajar Kimia*, PT Purnama Setia Inves, Bandung.
- Torii, S., 2007, Experimental Study on Convective Heat Transfer of Aqueous Suspension of Nano-Diamond Particles, *Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2007, ISETS07*.
- Wang, X., Mujumdar, A. S., 2008, A Review on Nanofluids - Part I: Theoretical and Numerical Investigations, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, No. 04, pp. 613 – 630.
- White, F.M., 2001, *Fluid Mechanics*, 4th edition, McGraw–Hill, New York.
- Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, Conceptions of Heat Transfer Correlation of Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, 2000, pp. 3701-3707.