

EFEK GERAK BROWN DAN STABILITAS NANOFUIDA TERHADAP KOEFISIEN KONVEKSI PADA PENUKAR KALOR PIPA GANDA

Astuti¹, S. P. Sari^{2*} dan A. Gerald²

¹ Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang

² Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Jakarta

Corresponding author: sri_ps@staff.gunadarma.ac.id

ABSTRAK: Penukar kalor pipa ganda merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk proses perpindahan panas antara dua fluida yang mempunyai temperatur berbeda dengan tujuan untuk pengoptimalan dan efisiensi energi yang ditentukan oleh nilai koefisien perpindahan panas konveksi. Penukar panas pipa ganda dengan tipe *counterflow* digunakan secara luas di industri. Fluida memiliki peran penting sebagai media pembawa panas pada peralatan penukar panas pipa ganda, namun fluida konvensional memiliki keterbatasan dengan konduktivitas termal yang rendah. Suspensi partikel padat yang mempunyai ukuran diameter dalam nanometer (10^{-9} m) dalam fluida dasar yang disebut nanofluida telah diteliti oleh para peneliti dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas termal fluida. Penelitian tentang nanofluida telah meningkat pesat. Nanofluida memiliki konduktivitas termal yang lebih baik daripada fluida dasar dan terjadi efek gerak Brown pada nanopartikel yang menyebabkan nanopartikel melayang pada fluida dasar sehingga dapat meminimalkan aglomerasi pada nanofluida. Aglomerasi berdampak buruk terhadap stabilitas nanofluida dan menyebabkan penurunan kemampuan nanofluida dalam menghantarkan panas, sehingga mengakibatkan pula penurunan nilai koefisien konveksi pada penukar kalor pipa ganda. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis efek gerak Brown dan stabilitas nanofluida terhadap nilai koefisien perpindahan panas konveksi pada penukar panas pipa ganda dengan pipa lurus bundar dan helical. Alat penukar kalor pipa ganda yang digunakan tipe *counterflow*. Pada penelitian ini digunakan pipa luar stainless steel dengan panjang dan tebal pipa 1000 mm dan 2 mm, diameter luar 101.7 mm, diameter dalam 97.7 mm untuk fluida pendingin. Pipa dalam dari tembaga dengan panjang dan tebal pipa 1200 mm dan 1 mm yang berbentuk lurus bundar dan helical, diameter luar 31.7 mm, diameter dalam 29.7 mm untuk fluida panas. Fluida panas menggunakan air murni dan suhu air panas dikontrol pada 90°C. Fluida pendingin menggunakan air murni pada suhu 30°C dengan penambahan partikel TiO₂ dan Al₂O₃ pada konsentrasi 0.2% , 0.4% , 0.6% , 2 % , 4% dan 6%. Debit aliran untuk fluida panas dan fluida pendingin dijaga agar tetap konstan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai koefisien konveksi fluida pendingin meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi partikel TiO₂ dan Al₂O₃ yang dipengaruhi oleh efek gerak Brown dan stabilitas nanofluida untuk meminimalkan aglomerasi, geometri pipa, diameter, variasi temperatur dan debit aliran.

Kata Kunci: Gerak Brown, nanofluida, penukar kalor, konsentrasi, koefisien konveksi

ABSTRACT: Double pipe heat exchanger is an equipment used for the heat transfer process between two fluids that have different temperatures with the aim of energy optimization and efficiency which is determined by the value of the convection heat transfer coefficient. Double pipe heat exchanger with counterflow type is widely used in industry. Fluid has an important role as a heat carrier on double pipe heat exchanger equipment, however, conventional fluids have limitations with low thermal conductivity. Suspension solid particles have a diameter in nanometer (10^{-9} m) in a basic fluid called a nanofluid has been researched by researchers with the aim of increasing the thermal conductivity of the fluid. Research on nanofluids has been increasing rapidly. Nanofluids have better thermal conductivity than the basic fluid and the Brownian motion effect occurs on nanoparticles which causes the nanoparticles to float in the base fluid so as to minimize agglomeration in nanofluids. Agglomeration adversely affects the stability of the nanofluids and causes a decrease in the nanofluid capacity in transmitting heat, thus resulting in a decrease in the value of the convection coefficient in double pipe heat exchanger. The research objectives are to analyze the effect of Brownian motion and nanofluid stability to the value of the convection heat transfer coefficient in double pipe heat exchanger with circular and helical straight pipe. Double pipe heat exchanger that is used counterflow type. In this study, a stainless steel outer pipe was used with the length and thickness of the pipe 1000 mm dan 2 mm, outside diameter 101.7 mm, inside diameter 97.7

mm for the cooling fluid. Inner pipe of copper with pipe length and thickness 1200 mm and 1 mm which is circular and helical straight, outer diameter 31.7, inside diameter 29.7 mm for hot fluid. Hot fluid uses pure water and hot water temperature is controlled at 90 °C. The cooling fluid uses pure water at 30 C with the addition of particles TiO_2 and Al_2O_3 on concentration 0.2% , 0.4% , 0.6% , 2 % , 4% dan 6%. The flow rate for hot fluid and cooling fluid is kept constant. The results showed that the coefficient of cooling fluid convection increased along with the increase in particle concentration TiO_2 dan Al_2O_3 which is influenced by the effect of Brownian motion and the stability of the nanofluid to minimize agglomeration, pipe geometry, diameter, temperature variations and flow rates.

Key Words: Brownian motion, nanofluid, heat exchanger, concentration, convection coefficient

PENDAHULUAN

Penggunaan penukar kalor (*heat exchanger*) untuk suatu keperluan proses industri perangkat elektronik, pusat pembangkit tenaga, unit pendingin dan transportasi. Peralatan ini digunakan untuk menaikkan maupun menurunkan temperatur dan mengubah fase fluida. Pendinginan atau pemanasan fluida adalah suatu kebutuhan yang utama dalam dunia industri.

Proses perpindahan panas adalah menghasilkan panas, menggunakan panas, mengubah panas dan memindahkan panas karena perbedaan suhu. Kecepatan perpindahan panas tergantung pada perbedaan suhu antar kedua kondisi. Semakin besar perbedaan suhu, maka semakin besar kecepatan perpindahan panasnya.

Penukar kalor pipa ganda merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk proses perpindahan panas antara dua fluida yang mempunyai temperatur berbeda dengan tujuan untuk pengoptimalan dan efisiensi energi yang ditentukan oleh nilai koefisien perpindahan panas konveksi. Perpindahan panas merupakan energi yang mengalir sebagai hasil dari gradien temperatur atau perbedaan temperatur yang dapat dibawa oleh partikel-partikel zat yang mengalir tersebut dan terjadi melalui tiga mekanisme dasar yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Penukar panas adalah perangkat di mana energi ditransfer dari satu cairan lain permukaan penampang, berbeda untuk penukar panas tradisional shell-dan-tube dan media yang digunakan dalam perpindahan panas dapat berupa zat padat, cair maupun gas (Holman 1986, Cengel 2006). Alat uap panas, temperatur yang tinggi, seragam dinding tidak diperoleh disebabkan oleh distribusi kondensat uap atas permukaan coil (Seban dan Laughlin, 1963). Pada aliran sepenuhnya dikembangkan dalam *curved* pipa dengan fluks panas yang seragam untuk jumlah temperatur besar (Mori dan Nakayama, 1965). Perpindahan panas yang dihitung dalam tabung melingkar (Rogers dan Mayhew, 1964). Penukar kalor pipa ganda dapat menangani tekanan dan temperatur tinggi (Incropera, 2007). Ketika beroperasi berlawanan arah dapat beroperasi dengan temperatur yang berlawanan.

Sifat-sifat termal dari fluida memegang peran yang penting di dalam perkembangan efisiensi energi peralatan perpindahan kalor. Perkembangan teknologi nano telah menciptakan nanofluida sebagai fluida yang memiliki potensi besar untuk aplikasi pendinginan. Nanofluida berarti dua campuran fase dimana fase yang biasanya cairan dan fase yang terdispersi terdiri dari nanopartikel padat yang sangat halus, berukuran lebih kecil daripada 100 nm (Choi, 1995) dan mencampurkan partikel CuO dan Al_2O_3 dalam ukuran nanometer dengan fluida cair diantaranya air dan *ethylene* (Lee dan Choi, 1996). Hasil penelitian diperoleh peningkatan perpindahan kalor konduksinya sebesar 20%. Peningkatan sebesar 40% pada konduktivitas termal dengan menambahkan 0.3% partikel Cu pada *ethylene glycol* (Eastman, et.al, 1997. Pak dan Cho, 1998).

Penelitian tentang nanofluida jet impingement cooling dengan menggunakan nanofluida dapat meningkatkan performa perpindahan panas sekitar 18.5 % dibandingkan dengan fluida dasar air dengan volume fraction sekitar 1.5% hingga 3.0% dan nanopartikel yang digunakan Cu (Yuwen et al, 2013). Penelitian tentang nanofluida jet impingement dalam pendinginan permukaan baja panas dengan menggunakan nanofluida Al_2O_3 dan TiO_2 menjelaskan bahwa penggunaan nanofluida untuk pendinginan baja adalah efektif dibandingkan dengan metode pendinginan menggunakan fluida konvensional air (Nayak et al, 2016).

Penggunaan nanofluida dapat menggantikan fluida dasar seperti air dalam penggunaannya untuk *single phase* pada konveksi paksa (Minea et al, 2015) untuk aliran laminar dan turbulen dengan menggunakan tiga jenis nanopartikel Al_2O_3 , CuO , dan TiO_2 .

Pengaruh *twisted-tape* turbulation terhadap perpindahan panas menggunakan nanofluida TiO_2 , meningkatkan koefisien perpindahan panas seiring meningkatnya temperatur dan mass flow. Percobaan pada persentase 0.1% TiO_2 dengan menggunakan *twisted tape* menghasilkan friction factor dan pressure drop lebih tinggi dibandingkan tanpa menggunakan *twisted tape* (Maddah et al, 2014).

Pengaruh penggunaan nanofluida pada aliran turbulen pada heat exchanger dan nanopartikel yang digunakan adalah Al_2O_3 dengan fluida dasar air, menghasilkan nilai perpindahan panas yang lebih tinggi dari 12% dilakukan (Aghayari et al, 2014). Penelitian tentang peningkatan koefisien perpindahan panas dan bilangan Nusselt hingga 19% - 24% pada *heat exchanger* dengan menggunakan nanofluida (Aghayari et al, 2014). Karakteristik perpindahan panas paksa konvektif untuk nanofluida TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_3O_4 dan CuO telah diteliti (Gupta et al, 2014). Koefisien perpindahan panas konveksi dan bilangan Nusselt dari nanofluida Al_2O_3 pada penukar kalor pipa ganda horizontal aliran turbulen yang menghasilkan 15-21 % lebih besar daripada fluida murni (Aghayari et al, 2015). Peningkatan koefisien perpindahan panas pada penukar kalor Shell-Tube Heliks menggunakan nanofluida Al_2O_3 (Vinodkumar et al, 2015). Peningkatan transfer panas konvektif menggunakan alumina (Al_2O_3)/air dan tembaga oksida (CuO)/air (Chidanand et al, 2016). Analisis perpindahan dari penukar kalor helical coil dengan nanofluida Al_2O_3 (Sisodiya et al, 2016). Sifat termofisika dari nanofluida Al_2O_3 dan TiO_2 pada diteliti pada penukar kalor pipa ganda dengan aliran counter dan paralel laminar (Hasan et al, 2017). Penelitian tentang perpindahan panas konveksi paksa dan penurunan tekanan di helical coiled shell-tube heat exchanger dari nanofluids (Kumar et al, 2017). Karakteristik perpindahan panas nanofluida Al_2O_3 secara numerik pada penukar kalor pipa ganda (Baby dan Johnson, 2018). Sifat-sifat termofisika dari perpindahan panas konveksi nanofluida diteliti pada penukar kalor coil dan plat (Buschmann et al, 2018).

Fluida memiliki peran penting sebagai media pembawa panas pada peralatan penukar panas pipa ganda, namun fluida konvensional memiliki keterbatasan dengan konduktivitas termal yang rendah. Suspensi partikel padat yang mempunyai ukuran diameter dalam nanometer (10^{-9} m) dalam fluida dasar yang disebut nanofluida telah diteliti oleh para peneliti dengan tujuan untuk meningkatkan konduktivitas termal fluida. Penelitian tentang nanofluida telah meningkat pesat. Nanofluida memiliki konduktivitas termal yang lebih baik dari fluida dasar dan terjadi efek gerak Brown pada nanopartikel yang menyebabkan nanopartikel melayang pada fluida dasar sehingga dapat meminimalkan aglomerasi pada nanofluida. Aglomerasi berdampak buruk terhadap stabilitas nanofluida dan menyebabkan penurunan kemampuan nanofluida dalam menghantarkan panas, sehingga mengakibatkan pula penurunan nilai koefisien konveksi pada penukar kalor pipa ganda. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis efek gerak Brown dan stabilitas nanofluida terhadap nilai koefisien perpindahan panas konveksi

pada penukar panas pipa ganda dengan pipa lurus bundar dan helical. Alat penukar kalor pipa ganda yang digunakan adalah tipe *counterflow*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan dua jenis penukar kalor pipa ganda dengan pipa lurus bundar dan helical. Penggunaan pipa helical dalam *heat exchanger* sangatlah efektif karena akan semakin banyak penurunan temperatur yang didapat. Alat penukar kalor jenis ini dapat digunakan pada laju aliran fluida yang rendah dan tekanan operasi yang tinggi. Tipe aliran yang digunakan adalah aliran *counter flow* yang memiliki efisiensi perpindahan panas yang paling baik dibandingkan aliran *parallel flow*.

Nanopartikel yang digunakan pada penelitian ini adalah TiO_2 dan Al_2O_3 . Pembuatan nanofluida pada penelitian ini menggunakan metode dengan cara mencampurkan nanopartikel TiO_2 atau Al_2O_3 kedalam fluida dasar air murni dengan konsentrasi massa masing – masing sebesar 0.2% , 0.4% , 0.6% , 2 % , 4% dan 6%.

Pembuatan nanofluida pada penelitian ini menggunakan metode *two-step process* dengan cara mencampurkan nanopartikel TiO_2 atau Al_2O_3 ke dalam fluida dasarnya air menggunakan konsentrasi fraksi volume 0.5% dan 1 %. Di mana pada proses ini nanopartikel yang telah menjadi serbuk kering (*dry powder*) didispersikan ke dalam fluida dasar (air). *Magnetic stirrer* digunakan untuk mencampurkan fluida dasar dan juga nanopartikel dengan prinsip pengadukan secara magnetik. *Magnetic stirrer* terdiri dari dua komponen yaitu *magnetic stirrer* sendiri dan juga *stirring bar*. Pada penelitian ini *stirring bar* yang digunakan berukuran 15x40 mm. Selanjutnya proses sonikasi menggunakan *ultrasonic processor* selama 15 menit untuk memecah agregasi dan mengintensifkan pendispersian nanopartikel di dalam fluida dasar (air). Berdasarkan alur proses pembuatan nanofluida jika nanofluida yang dihasilkan masih terdapat endapan dari nanopartikel ketika didiamkan, maka nanofluida tersebut harus kembali diaduk untuk membuat nanopartikel terdispersi dengan baik pada fluida dasarnya untuk mencegah terjadinya aglomerasi. Proses pencampuran antara nanopartikel dengan fluida dasar air perlu diperhatikan agar menghasilkan pencampuran yang baik sehingga akan didapatkan karakteristik fluida baru. Metode persentase fraksi volume sebagai konsentrasi nanofluida dipilih untuk penelitian ini karena banyak digunakan pada berbagai model perhitungan matematis.

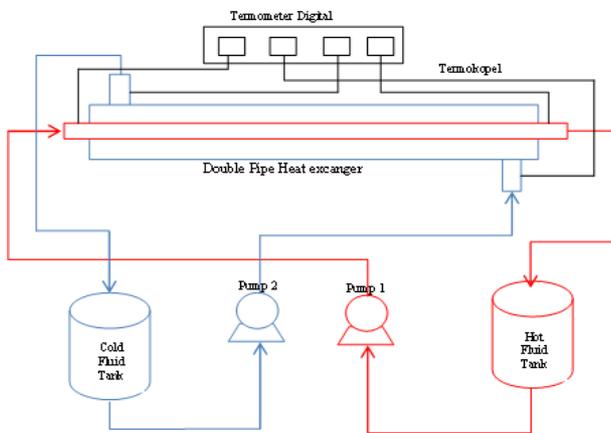
Temperatur fluida pendingin air dan nanofluida TiO_2 atau Al_2O_3 adalah 30°C dan temperatur fluida panas air

90°C. Percobaan dilakukan secara berulang – ulang dengan penggunaan kadar persentase nanopartikel yang berbeda di setiap percobaan sedangkan untuk fluida pendingin air percobaan dilakukan hanya sekali percobaan saja. Percobaan pertama menggunakan fluida panas air dan fluida pendingin air sebagai fluida konvensional. Percobaan kedua dalam penelitian ini menggunakan fluida panas air yang akan didinginkan dengan fluida pendingin nanofluida TiO_2 dan Al_2O_3 dengan konsentrasi 0.2% , 0.4% , 0.6% , 2 % , 4% dan 6%.

Proses pengambilan data diambil berdasarkan temperature input, output dari masing – masing fluida dan debit aliran fluida yang dihasilkan dalam waktu yang telah ditentukan selama ± 5 detik setelah aliran yang terjadi mengalir secara konstan, setelah pengambilan data maka dilanjutkan dengan proses perhitungan dan analisa hasil perhitungan.

Skema Alat Uji

Penukar kalor pipa ganda tipe *counterflow* dimana fluida masuk di ujung-ujung yang berlawanan dan berakhir pada ujung-ujung yang berlawanan arah juga. Skema alat uji dengan tipe aliran *counterflow* dan perbedaan temperatur yang terjadi pada pipa *heat exchanger* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema alat uji

Penukar kalor arah aliran berlawanan merupakan pola aliran yang paling efisien. Jenis ini akan memberikan koefisien perpindahan panas tertinggi keseluruhan untuk mendesain penukar panas pipa ganda juga dapat menangani tekanan tinggi dan temperatur tinggi.

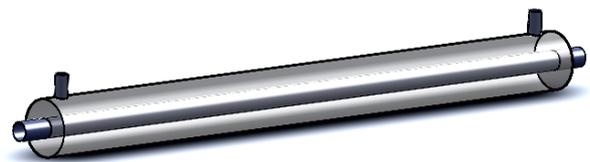
Proses sirkulasi aliran menggunakan pompa sentrifugal dimana aliran fluida dari tangki penampungan (*heater*) menuju penukar kalor kemudian aliran tersebut kembali menuju ke tangki penampungan (*heater*) untuk dipanaskan kembali. Fluida pendingin dialirkan dari tangki penampungan menuju penukar kalor. Setelah melewati penukar kalor aliran fluida pendingin (air dan

nanofluida) melalui *cooling fan* untuk mengembalikan temperatur fluida pendingin menjadi temperatur air normal, selanjutnya menuju tangki penampungan yang akan disirkulasikan kembali.

Pengujian menggunakan empat buah *thermocouple* yang berfungsi untuk mendeteksi nilai temperatur masing – masing fluida, pemasangan *thermocouple* ada pada sisi input dan output dari fluida panas dan fluida pendingin (air dan nanofluida). *Display* termometer digital digunakan untuk menampilkan nilai dari masing – masing temperatur fluida.

Set-up Alat Pengujian

Alat pengujian terdiri dari penukar kalor pipa ganda tipe *counter flow* yang memiliki pipa lurus terbuat dari kuningan (*brass*) dengan panjang 1200 mm, tebal 1 mm, diameter luar 31.7 mm, diameter dalam 29.7 mm untuk fluida panas. Pipa lurus terbuat dari *stainless steel* dengan panjang 1000 mm, tebal 2 mm, diameter luar 101.6 mm, diameter dalam 97.7 mm untuk fluida pendingin. Alat pengujian mempunyai 2 pipa penyalur untuk fluida panas dan fluida pendingin nanofluida TiO_2 secara terpisah. Terdapat juga 2 pompa sentrifugal untuk memompa fluida panas dan nanofluida TiO_2 atau Al_2O_3 . Tangki penampungan fluida berjumlah 2 buah yaitu untuk fluida panas dan fluida pendingin nanofluida TiO_2 atau Al_2O_3 . Pipa penyalur fluida pendingin menuju *heat exchanger* berdiameter 12.7 mm, dan selang anti panas untuk menyalurkan fluida panas dari tangki yang telah dipanaskan berdiameter 12.7 mm. Fluida panas di dalam tangki kemudian akan dihisap dan dialirkan melewati pipa sepanjang 1200 mm oleh pompa fluida panas menuju saluran masuk *heat exchanger*. Sedangkan nanofluida TiO_2 di dalam tangki akan dihisap dan dialirkan melalui pipa penyalur oleh pompa air pendingin menuju saluran masuk pendingin alat penukar kalor sepanjang 1000 mm. Penukar kalor pipa ganda yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3 berikut ini.



Gambar 2 Gambar alat penukar kalor pipa ganda tipe *counterflow* dengan pipa lurus bundar

Pipa helical pada Gambar 3 dan Gambar 4 didesain untuk tekanan maksimal pada setiap lintasan, dimana pada setiap lintasan tersebut akan mempunyai tekanan

kerja sesuai dengan yang direncanakan, sehingga ketebalan dari pipa pembentuk helical ini juga merupakan faktor penentu.



Gambar 3 Penampang pipa helical



Gambar 4 Penukar kalor pipa ganda tipe *counterflow* dengan pipa helical

Persamaan

Sifat-sifat termofisik nanofluida sangat dibutuhkan untuk memprediksi perilaku atau kebiasaan perpindahan panas nanofluida. Nanofluida memiliki sifat termofisik, reologi dan termoelektrik yang berbeda dibandingkan dengan fluida konvensional. Sifat-sifat tersebut dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik partikel nano yang sangat besar.

Persamaan hukum Newton untuk pendinginan digunakan untuk perpindahan kalor konveksi (Q_{conv}) di mana jika beda temperatur antara benda dan sekitarnya adalah kecil, maka laju pendinginan sebuah benda hampir sebanding dengan beda temperatur, yang dituliskan sebagai berikut:

$$Q_{con} = h A (T_s - T_f) \quad (1)$$

dengan:

Q_{con} = Laju Perpindahan Panas Konveksi (W)

h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m²°C)

T_s = Suhu permukaan (°C)

T_f = Suhu fluida (°C)

Konduktivitas termal adalah suatu besaran intensif bahan yang menunjukkan kemampuannya untuk menghantarkan panas. Konduktivitas termal efektif (k_{eff}) dengan model Maxwell dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} k_{bf} \quad (2)$$

dengan :

k_{eff} = Konduktivitas termal efektif nanofluida (W/mK)

k_p = Konduktivitas termal nanopartikel (W/mK)

k_{bf} = Konduktivitas termal fluida dasar (W/mK)

ϕ = Konsentrasi atau fraksi volume nanopartikel

Konsentrasi volume adalah perbandingan partikel nano terhadap volume total (% v/v) yang disebut sebagai fraksi volume dan ditulis sebagai % vol. Konsentrasi volume atau fraksi volume dideskripsikan sebagai berikut :

$$\phi = \frac{m_{np} / \rho_{np}}{V_{np} + V_{bf}} \times 100 \quad (3)$$

ϕ = Fraksi volume nanopartikel (%)

m_{np} = Massa nanopartikel (kg)

ρ_{np} = Massa jenis nanopartikel (kg/m³)

V_{np} = Volume nanopartikel (m³)

V_{bf} = Volume fluida dasar (m³)

Massa jenis (*density*) merupakan jumlah suatu zat yang terkandung pada suatu unit volume. *Density* pada nanofluida secara langsung terkait dengan fraksi volume partikel. Peningkatan massa jenis memiliki berbanding lurus terhadap peningkatan fraksi volume partikel. Massa jenis mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya suhu fluida secara non linier. Alasan dasar kecenderungan non linier ini adalah adanya perbedaan koefisien ekspansi termal pada fluida dasar dan nanopartikel. Suatu densitas akan menurun nilainya dengan meningkatnya suhu cairan dengan cara non-linier. Hal ini terjadi sebab non-linier adalah perbedaan koefisien ekspansi termal dalam cairan dasar dan nano partikelnya. Massa jenis (*density*) nanofluida juga dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut ini (Pak dan Cho, 1998):

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (4)$$

dengan:

ρ_{nf} = Massa jenis nanofluida (kg/m³)

ϕ = Fraksi volume nanopartikel (%)

ρ_{bf} = Massa jenis fluida dasar (kg/m³)

ρ_{np} = Massa jenis nanopartikel (kg/m³)

Viskositas menggambarkan seberapa besar hambatan internal dari suatu fluida untuk mengalir dan viskositas merupakan suatu sifat penting untuk semua aplikasi termal yang melibatkan fluida. Daya pemompaan, penurunan tekanan pada aliran laminar, dan perpindahan panas konveksi bergantung pada viskositas fluida. Viskositas nanofluida dengan fraksi volume dibawah 4% dapat diperoleh melalui persamaan yang diusulkan Brinkman model dibawah ini:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (5)$$

dengan:

μ_{nf} = Viskositas dinamik nanofluida (kg/ms)

μ_{bf} = Viskositas dinamik fluida dasar (kg/ms)

ϕ = Fraksi volume nanopartikel (%)

Metode yang dapat digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan panas menyeluruh dari suatu *double pipe heat exchanger* adalah *Log Mean Temperature Difference* (LTMD) atau beda suhu rata-rata logaritmik. Laju perpindahan panas dengan metode LTMD dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$U = \frac{Q_{avg}}{A \Delta T_{lm}} \quad (6)$$

Q_{avg} = Laju perpindahan panas rata-rata (W)
 A = Luas Permukaan Pipa (m)
 ΔT_{lm} = Beda Suhu Rata-rata logaritmik (K)

untuk ΔT_{lm} diperoleh melalui persamaan di bawah ini:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\Delta T_1 - \Delta T_2} \quad (7)$$

Nilai ΔT_1 dan ΔT_2 menunjukkan perbedaan temperature antara dua fluida pada ujung-ujungnya (*inlet* dan *outlet*) pada *heat exchanger*. ΔT_1 dan ΔT_2 pada *double pipe heat exchanger* aliran berlawanan arah (*counter flow*).

dengan:

ΔT_1 = Selisih dari nilai temperatur air panas masuk dan temperatur air dingin keluar
 ΔT_2 = Selisih dari nilai temperatur air panas keluar dan temperatur air dingin masuk
 $T_{h,in}$ = Temperatur air panas yang masuk
 $T_{h,out}$ = Temperatur air panas yang keluar
 $T_{c,in}$ = Temperatur air dingin yang masuk
 $T_{c,out}$ = Temperatur air dingin yang keluar

Kapasitas panas didefinisikan sebagai jumlah panas yang diperlukan untuk mengubah temperatur suatu benda sebesar 1°C. Kapasitas panas tergantung dari jumlah material yang bertukar panas dan properti bahan tersebut. Kapasitas panas dapat dipresentasikan sebagai perkalian dari masa dan kapasitas panas atau jumlah mol dan kapasitas panas molar.

$$q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (8)$$

dengan :

q = Energi (Watt)
 \dot{m} = laju aliran massa (kg/s)
 ΔT = perubahan suhu $t_{akhir} - t_{awal}$ (°C)
 C_p = kalor spesifik (J/kg.K)

Setiap konsentrasi volume nanopartikel yang diberikan pada fluida dasar, panas spesifik (*specific heat*) nanofluida dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1-\varphi)(\rho_{bf} C_{p_{bf}}) + \varphi(\rho_p C_{p_p})}{(1-\varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_p} \quad (9)$$

dengan:

$C_{p_{nf}}$ = *Specific heat* nanofluida (J/kg.K)
 $C_{p_{bf}}$ = *Specific heat* fluida dasar (J/kg.K)

C_{p_p} = *Specific heat* nanopartikel (J/kg.K)
 ρ_{bf} = Massa jenis fluida dasar (kg/m³)
 ρ_p = Massa jenis nanopartikel (kg/m³)

Aliran di dalam celah adalah tertutup sempurna, maka kesetimbangan energi dapat digunakan untuk menentukan temperatur fluida yang bervariasi dan nilai total transfer panas konveksi Q_{conv} tergantung dari laju aliran massa. Jika perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan, maka pengaruh yang signifikan adalah perubahan energi thermal dan fluida kerja. Sehingga kesetimbangan energi tergantung pada 3 variable, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = \dot{m}_h C_{p_h} (T_{h,in} - T_{h,out}) = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c,out} - T_{h,in}) \quad (10)$$

dengan:

Q = Laju Perpindahan Panas (W)
 \dot{m}_h = Laju aliran massa fluida panas (kg/s)
 C_{p_h} = Panas spesifik fluida panas (J/kg.K)
 $T_{h,in}$ = Suhu fluida panas pada sisi *inlet pipe* (K)
 $T_{h,out}$ = Suhu fluida dingin pada sisi *outlet pipe* (K)
 \dot{m}_c = Laju aliran massa fluida dingin (kg/s)
 C_{p_c} = Panas spesifik fluida dingin (J/kg.K)
 $T_{c,in}$ = Suhu fluida dingin pada sisi *inlet pipe* (K)
 $T_{c,out}$ = Suhu fluida dingin pada sisi *outlet pipe* (K)

Bilangan Reynold merupakan besaran fisis yang tidak berdimensi. Bilangan ini digunakan untuk menentukan aliran fluida apakah laminar, turbulen, dan transisi. Terdapat empat besaran yang menentukan apakah aliran tersebut digolongkan aliran laminier ataukah aliran turbulen yaitu kerapatan air, kecepatan aliran, kekentalan, dan diameter pipa. Kombinasi dari keempatnya akan menentukan besarnya bilangan Reynold. Penentuan nilai dari bilangan Reynolds (Re) untuk aliran dalam pipa digunakan :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (11)$$

dengan :

Re = Bilangan Reynolds
 ρ = Kerapatan (kg/m³)
 v = Kecepatan Aliran (m/s)
 D = Diameter pipa (m)
 μ = Viskositas dinamik fluida (Ns/m²)

Bilangan Prandtl merupakan rasio kinematik viskositas (ν) fluida dengan difusivitas kalor (α), dimana bilangan Prandtl merupakan properties termodinamika dari fluida diperoleh melalui persamaan berikut ini:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{C_{p_{nf}} \mu_{nf}}{k_{nf}} \quad (12)$$

Pr = Bilangan Prandtl

- ν = Viskositas kinematik fluida (m²/s)
- α = *Thermal diffusivity* (m²/s)
- C_p = *Specific heat* fluida (J/Kg.K)
- μ = Viskositas dinamik fluida (kg/ms)
- k = Konduktivitas termal fluida (W/mK)
- k_{nf} = Konduktivitas termal nanofluida (W/mK)

Bilangan Nusselt (Nu) merupakan rasio perpindahan kalor konveksi fluida dengan perpindahan kalor konduksi fluida dalam kondisi yang sama yang terjadi di permukaan, juga menyatakan gradient suhu non dimensional dipermukaan.

$$Nu = \frac{Q_{conv}}{Q_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/\delta} = \frac{h\delta}{k} = \frac{hD}{k_f} \quad (13)$$

dengan:

Nu = Nusselt Number

$k = k_f$ = Konduktivitas thermal fluida (W/m. K)

h = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m² °C)

δ = Geometri profil penampang fluida (m)

D = Diameter pipa (m)

Komponen konduktif diukur di bawah kondisi yang sama dengan konveksi dengan kondisi fluida stagnan atau tidak bergerak. Aliran panas konduksi dan konveksi sifatnya sejajar satu sama lainnya dan terhadap permukaan normal terhadap bidang batas, sehingga aliran yang terjadi di dalam pipa adalah sebagai berikut:

Aliran laminar

$$Nu = 1,86 \left(\frac{Re Pr D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (14)$$

dengan :

Nu = Nusselt Number

L = Panjang pipa (m)

μ_b = viskositas dinamik temperatur *bulk* (kg.m/s)

μ_s = viskositas dinamik temperatur permukaan (kg.m/s)

Aliran turbulen, melalui persamaan Ditus-Boelter berikut ini:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (15)$$

Nanofluida dengan syarat ($0 < \phi < 3\%$, $10^4 < Re < 10^5$, dan $6.54 < Pr < 12.33$, (Pak dan Chou, 1998).

Bilangan Nusselt untuk aliran turbulen dalam tabung, juga dapat diketahui yaitu:

$$Nu_{nf} = 0.021 Re_{nf}^{0.8} Pr_{nf}^{0.5} \quad (16)$$

Nu = Bilangan Nusselt

Re = Reynolds Number

Pr = Bilangan Prandtl

n = 0.4 untuk pemanasan, 0.3 untuk pendinginan

nf = Nanofluida

Panas spesifik merupakan kapasitas panas per satuan massa dan memiliki berbagai satuan (J/Kg-K, kal/g-K, Btu/lb_m-°F). Densitas merupakan jumlah suatu zat yang terkandung pada suatu unit volume. Densitas pada nanofluida secara langsung terkait dengan fraksi volume partikel. Suatu densitas akan menurun nilainya dengan meningkatnya suhu cairan dengan cara non-linier. Hal ini terjadi sebab non-linier adalah perbedaan koefisien ekspansi termal dalam cairan dasar dan nano partikelnya. Persamaan untuk koefisien perpindahan panas keseluruhan disederhakan sebagai berikut:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}} \quad (17)$$

dengan:

U = Total koefisien perpindahan panas konveksi menyeluruh (W/m².K)

h_i = Koefisien perpindahan panas konveksi pipa dalam (W/m².K)

h_o = Koefisien perpindahan panas konveksi pipa luar (W/m².K)

Laju aliran volume disebut juga debit aliran (Q) yaitu jumlah volume aliran per satuan waktu. Debit aliran dapat dituliskan pada

$$Q = \frac{V}{t} \quad (18)$$

dengan :

V = Volume aliran (m³)

Q = Debit aliran (m³/s)

t = Waktu aliran (s)

Kecepatan fluida (u), didefinisikan besarnya debit aliran yang mengalir persatuan luas.

$$u = \frac{Q}{A} \quad (19)$$

dengan :

u = Kecepatan atau laju aliran (m/s)

Q = Debit aliran (m³/s)

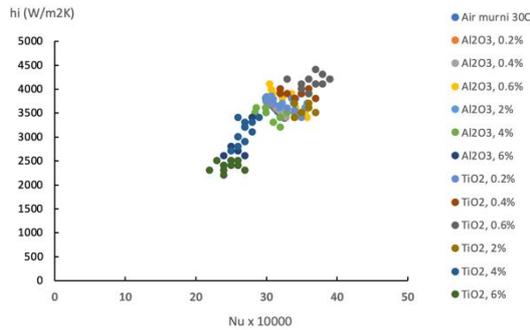
A = Luas penampang (m²)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pipa bulat lurus, fluida panas dengan fluida pendingin nanofluida TiO₂ dan Al₂O₃ konsentrasi 0.2% , 0.4%, 0.6% dihasilkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi (hi) lebih tinggi dari pada konsentrasi 2%, 4% dan 6% seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

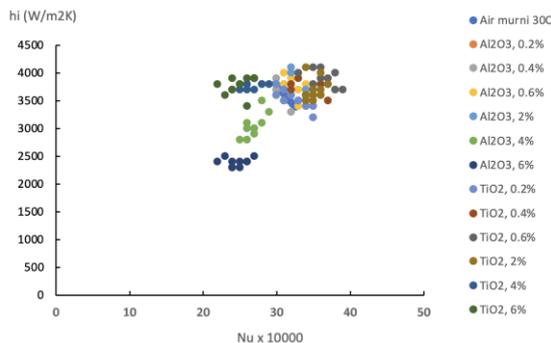
Nilai koefisien perpindahan panas konveksi yang dihasilkan pada pipa bulat lurus di Gambar 5 akan menurun dengan konsentrasi yang lebih tinggi, hal ini dapat dilihat bahwa konsentrasi yang lebih tinggi

menurunkan efek gerak Brown sehingga stabilitas nanofluida menurun.



Gambar 5 Grafik hubungan $hi - Nu$ untuk fluida panas pada pipa lurus bundar dengan fluida pendingin air Murni 30°C dan nanofluida Al_2O_3 dan TiO_2 .

Pada pipa helical, fluida panas dengan fluida pendingin nanofluida Al_2O_3 dan TiO_2 konsentrasi 0.2%, 0.4%, 0.6% dihasilkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi (hi) lebih tinggi dari pada konsentrasi 2%, 4% dan 6% ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Grafik hubungan $hi - Nu$ untuk fluida panas pada pipa helical dengan fluida pendingin air murni 30°C dan nanofluida Al_2O_3 dan TiO_2

Nilai koefisien perpindahan panas konveksi yang dihasilkan pada pipa helical di gambar 7 akan menurun dengan konsentrasi yang lebih tinggi, hal ini dapat dilihat bahwa konsentrasi yang lebih tinggi menurunkan efek gerak Brown sehingga stabilitas nanofluida menurun

Bentuk geometri pipa helical dihasilkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi yang lebih tinggi daripada bentuk geometri pipa lurus bundar. Efek gerak brown dan stabilitas nanofluida dihasilkan pada geometri pipa helical daripada pipa lurus bundar

KESIMPULAN

Pengaruh konsentrasi nanopartikel Al_2O_3 dan TiO_2 dalam nanofluida sangat mempengaruhi besarnya peningkatan nilai koefisien perpindahan panas konveksi nanofluida terhadap fluida dasarnya. Semakin besar konsentrasi partikel Al_2O_3 dan TiO_2 maka akan mengakibatkan nilai peningkatan koefisien perpindahan kalor konveksi yang semakin besar. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi pada nanofluida dengan partikel Al_2O_3 lebih tinggi daripada nanofluida dengan partikel TiO_2 . Efek gerak Brown dan stabilitas nanofluida dipengaruhi oleh geometri pipa pada penukar kalor pipa ganda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah memberikan hibah penelitian dan Program Studi Teknik Mesin Universitas Gunadarma yang telah bersedia memberikan dukungan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghayari, Reza., Heydar Maddah., Fatemeh Ashori., Afshin Hakiminejad and Mehdi Aghili, (2014), Effect of Nanoparticle on heat transfer in mini double-pipe heat exchanger in turbulent flow, Springer, Berlin.
- Aghayari, Reza., Heydar Maddah., Malihe Zarei., Mehdi Dehgani and Sahar Ghanbari Kaskari Mahalle, (2014), Heat Transfer of Nanofluids in a Double Pipe Heat Exchanger, Hindawi Publishing Corporation Journal of Engineering.
- Aghayari et al. (2015). Aluminum Oxide Nanofluid Energy Transfer, Trans. Phenom. Nano Micro Scales, 3(1): 54-61, Winter – Spring.
- Baby, Shinu., Johnson, Jijo. (2018). Numerical Investigation on the Heat Transfer Characteristics of Alumina-Water Nanofluid in a Double Pipe Heat Exchanger, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 05 Issue: 03.
- Buschmann et al. (2018). Correct Interpretation of Nanofluid Convective Heat Transfer. International Journal of Thermal Sciences 129 504–531.
- Cengel, Yunus.A. (2006). Heat And Mass Transfer: A Practical Approach Third Edition (Si Unit), Mcgraw-Hill, Inc. New York.
- Chidanand K. Mangrulkar, Vilayatrai M. Kriplani and Ashwinkumar S. Dhoble. (2016). Experimental

- Investigation of Convective Heat Transfer Enhancement Using Alumina/Water and Copper Oxide/Water Nanofluids. *Thermal Science*. Vol. 20, No. 5, pp. 1681-1692.
- Choi, U. S. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles in *Developments Applications of Non-Newtonian Flows*, D. A. Siginer and H. P. Wang, Eds., FEDvol. 231/MD-vol. 66, pp. 99–105, ASME, New York, NY, USA.
- Eastman JA, Choi US, Li S, Thompson LJ, Lee S. (1997). Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. In: Komarneni, S., Parker, J.C., Wollenberger, H.J. (Eds.), *Nanophase and nanocomposite Materials II*. MRS, Pittsburg, PA, pp. 3-11.
- Gupta et al. (2014). A Comprehensive Review of Experimental Investigations of Forced Convective Heat Transfer Characteristics for Various Nanofluids, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 9:11.
- Hasan, M. I., Salman, M. D., Ayat Lateef Thajeel. (2017). Experimental Investigation of Double Pipe Heat Exchanger Using Al₂O₃ and TiO₂ Nanofluid. *Thi Qar University Journal for Engineering Sciences*, Vol.8, No. 1.
- Holman, J.P. (1986). *Heat Transfer Sixth Edition*, McGraw-Hill, Inc. New York.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th ed.)*, United States of America: John Wiley & Sons.
- Kumar, M.P.C., Palanisamy, K. (2017). A Review of Forced Convection Heat Transfer and Pressure Drop in Shell and Helical Coiled Tube Heat Exchanger of Nanofluids, *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*. Volume IV, Issue IA, ISSN 2321–2705.
- Lee S, Choi U.-S. (1996). Application of Metallic Nanoparticle Suspensions in advanced Cooling Systems, *ASME Publications PVP-Vol. 342/MD Vol.72*, pp. 227-234.
- Maddah, Heydar., Reza Aghayari., Shabnam Jahanizadeh and Khatere Ashtary. (2014). Effect of Twisted-Tape Turbulators and Nanofluids on Heat Transfer in a Double Pipe Heat Exchanger, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Engineering*.
- Minea Alina Adrian, Ortoni Manca, Madalina Georgiana Moldoveanu. (2015). Fom Comparison on Al₂O₃, CuO and TiO₂ Water Based Nanofluids in Laminar and Turbulent Flow, *ASME-ATI-UIT*.
- Mori Y., Nakayama, W. (1965). Study on forced convective heat transfer in curved pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8, , 67-82
- Nayak, Santosh Kumar, Purna Chandra Mishra and S. K. S. Parashar. (2016). Enhancement of Heat Transfer by water-Al₂O₃ and water-TiO₂ Nanofluids Jet Impingement in Cooling Hot Steel Surface, *Journal of Experimental Nanoscience*, Vol 11, No 16, 1253-1273
- Pak, BC, Cho YI. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*. 11:151–70.
- Rogers, G.F.C., Mayhew, Y.R. (1964). Heat transfer and pressure loss in helically coiled tubes with turbulent flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 7, 1207-1216.
- Seban, R.A., McLaughlin, E. F. (1963). Heat transfer in tube coils with laminar and turbulent flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 6, ,387-395
- Sisodiya, V. dan Geete, A. (2016). Heat Transfer Analysis of Helical Coil Heat Exchanger with Al₂O₃ Nanofluid. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 03 Issue: 12.
- Vinodkumar. Voonna, Kiran. Tharakeshwar, T.K. (2015). Improvement of Heat Transfer Coefficients in a Shell and Helical Tube Heat Exchanger Using Water/Al₂O₃ Nanofluid, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 02 Issue: 03.
- Yuwen, Zhang, , Editor, (2013), *Nanofluids Research, Development and Application*, Nova Publishers, New York.