

KARAKTERISTIK ALIRAN NANOFLUIDA CuO DENGAN VARIASI KONSENTRASI DALAM PIPA TEMBAGA *CIRCULAR* DAN *HELICAL*

Astuti¹, Sri Poernomo Sari^{2*}

¹Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang

^{2*} Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Jakarta

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

ABSTRAK : Penurunan tekanan mempengaruhi faktor gesekan dalam aliran fluida. Penambahan nanopartikel mengurangi hambatan dalam pipa. Penelitian nanofluida saat ini mengalami kemajuan. Tujuan penelitian ini menganalisis karakteristik aliran nanofluida dengan variasi konsentrasi partikel CuO (*cupric oxide*) terhadap kerugian jatuh tekanan dan koefisien gesekan dalam pipa tembaga *circular* dan *helical*. Percobaan menggunakan pipa tembaga *circular* dan *helical* diameter 11.5 mm dan panjang 1700 mm dengan variasi konsentrasi sebesar 0.4 % dan 0.8 %. Karakteristik nanofluida dihitung secara numerik. Nilai koefisien gesek dan Bilangan Reynolds dihitung dengan pengukuran kerugian jatuh tekan dan laju aliran volumetrik masing-masing dalam waktu tertentu. Hasil menunjukkan bahwa sifat aliran dipengaruhi oleh penambahan partikel nano. Penambahan CuO (*cupric oxide*) dalam aliran laminar dan turbulen efektif untuk pipa halus. Pada aliran transisi dan turbulen tanpa zat tambahan, peningkatan koefisien gesek dipengaruhi oleh kondisi dinding pipa itu sendiri. Nilai kerugian jatuh tekanan dan koefisien gesekan dari nanofluida CuO (*cupric oxide*) dengan konsentrasi 0.4% meningkat daripada 0.8% untuk pipa *circular* dan *helical* pada bilangan Reynolds 3×10^3 hingga 15×10^5 . Peningkatan konsentrasi partikel CuO (*cupric oxide*) akan menurunkan kerugian jatuh tekanan dan koefisien gesekan sehingga mengurangi hambatan di dalam aliran pipa.

Kata kunci : nanofluida, *cupric oxide*, konsentrasi, koefisien gesekan, kerugian jatuh tekanan

ABSTRACT : Pressure drop influences friction factor in fluid flow. The addition of nanoparticles reduced drag in pipe. Research on nanofluids have recently going in progress. The purpose of this research analyzed the characteristics of nanofluids flow with concentration variation of CuO (*cupric oxide*) particle on pressure drop and friction coefficient in copper circular dan helical pipe flow. Experiment use the circular and helical pipe in 11.5 mm of diameter and 15 mm of length with concentration variation 0.4 %. And 0.8 %. Nanofluids characteristics was calculated numerically analysis. The friction coefficient and the Reynolds number are calculated by measuring the pressure drop and the volumetric flow rate in periode of time, respectively. The result show that flow properties are influenced by nano particles addition. The addition of CuO (*cupric oxide*) in laminar and turbulent flow is effective for smooth pipe. In the transition and turbulent flow regime without additive, the increasing of friction coefficient appeared to be effected by wall condition alone. Pressure drop and friction coefficient of CuO (*cupric oxide*) nanofluid with 0.4% concentration obtained increase than 0.8% on the Reynolds number 3×10^4 to 15×10^5 . The particles concentration of CuO increases then decreases the pressure drop in the fluid flow. Increasing of the concentration of particles CuO (*cupric oxide*) will reduce of pressure drop and friction coefficient to reduce drag in pipe.

Keywords: nanofluids, *cupric oxide*, concentration, friction coefficient, pressure drop.

PENDAHULUAN

Alat transportasi fluida paling efektif dibandingkan dengan sistem transportasi pengangkutan fluida lainnya karena bersifat kontinyu. Aplikasi sistem perpipaan dalam industry memiliki rugi-rugi energi berupa kerugian jatuh tekan yang berpengaruh terhadap

produktivitas. Berbagai metode dikembangkan untuk meminimalkan kerugian energi yang terjadi pada sistem perpipaan dengan pengurangan kerugian gesekan fluida dalam pipa, yaitu dengan cara penambahan bahan aditif seperti *polymer*, *surfactant* atau dengan penambahan *repellent wall* pada dinding pipa. Pengujian ini digunakan CuO (*cupric oxide*). Perkembangan zaman telah menghasilkan teknologi nano khususnya dalam

fluida dimana muncul yaitu nanofluida yang berpotensi besar untuk aplikasi pendinginan (US Choi. 1996). Nanomaterial didefinisikan sebagai partikel (*crystalline* atau *amorphous*) organik atau anorganik yang memiliki ukuran antara 1 hingga 100 nm (Edelstein, A.S. 1999). Partikel berukuran nano telah banyak diaplikasikan ke dalam berbagai teknologi dan industri potensial seperti sebagai bahan campuran katalis kimia dan sebagainya (Jayadevan, et al 2004). Ukuran akan sangat mempengaruhi sifat dari partikel berukuran nano. Perubahan ukuran partikel akan mengubah rasio luas permukaan dengan volume partikel tersebut. Luas permukaan yang besar, memberikan presentase permukaan atom yang besar juga. Hal ini dapat dimanfaatkan dan diterapkan dalam banyak industri yang potensial, seperti proses katalis karena meningkatnya reaksi kimia, bidang elektronik dengan perangkat berukuran nano, bidang energi seperti pembuatan perangkat *photonic* berupa sel surya dengan tingkat efisiensi yang lebih baik, bidang farmasi bidang kedokteran dan sebagainya (Carl, C et al 2007).

Cupric oxide atau CuO merupakan jenis oksida dari tembaga, dan merupakan semikonduktor tipe-p. Semikonduktor ini memiliki struktur monoklinik. CuO nanostruktur dengan area permukaan yang luas dan dampak ukuran yang potensial memiliki sifat fisika dan kimia yang sangat baik, yang membuatnya berbeda dari ukuran mikro atau ukuran *bulk* (Zhang et al 2014. Prakash, 2016).

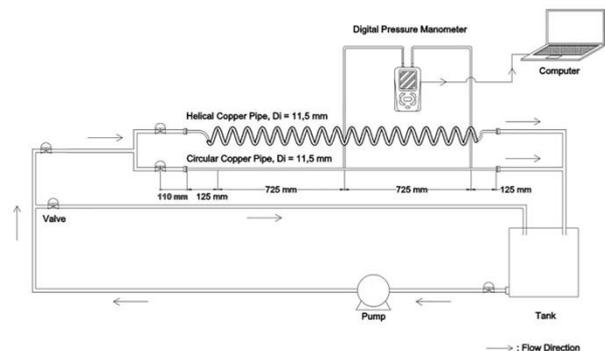
Friction factor dalam suatu aliran fluida sangat diperhatikan karena merupakan faktor yang mempengaruhi *pressure drop* dalam suatu aliran. Sifat fisik nanopartikel sangat baik karena memiliki luas permukaan atom yang besar, sehingga membuat nanopartikel lebih efisien. Oleh karena itu dengan mencampurkan nanopartikel ke dalam suatu fluida diharapkan aliran dalam fluida tersebut memiliki *losses* yang lebih kecil dibandingkan dengan fluida tanpa nanopartikel. Tujuan penelitian ini menganalisis karakteristik aliran nanofluida dengan variasi konsentrasi partikel CuO (*cupric oxide*) terhadap kerugian jatuh tekanan dan koefisien gesekan dalam pipa tembaga *circular* dan *helical*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini melakukan pengujian untuk menganalisis karakteristik aliran nanofluida, *pressure drop* dan *friction coefficient* dalam pipa. Nanopartikel yang digunakan adalah *cupric oxide* atau CuO ukuran 30-50 nm dengan menggunakan fluida dasar air. Variasi konsentrasi nanofluida yang digunakan adalah 0.4% dan 0.8%. Waktu yang digunakan setiap pengambilan data volume fluida air dan nanofluida adalah 10 menit. Variasi perubahan kecepatan aliran dan konsentrasi fluida kerja. Penelitian ini adalah menganalisis faktor luas penampang pipa terhadap karakteristik suatu aliran nanofluida CuO, menganalisis Reynolds number,

kerugian jatuh tekan dan koefisien gesek dari fluida air, nanofluida CuO menganalisa pengaruh pemberian partikel CuO terhadap kerugian jatuh tekan (*pressure drop*) aliran nanofluida di dalam pipa tembaga *circular* dan *helical*.

Rancangan alat uji seperti terlihat pada gambar 1 dimana fluida yang akan diuji ditempatkan pada penampung fluida (*tank*) kemudian dari penampungan ini akan ada dua saluran keluar dimana saluran pertama akan terhubung dengan pompa 1 dan saluran kedua terhubung dengan pompa 2. Ujung keluaran dua pompa akan bersatu dalam pipa penyalur. Pipa penyalur akan menyalurkan fluida menuju pipa uji. Pengujian terdiri dari 2 jenis pipa yang mempunyai bentuk yang berbeda yaitu *helical* dan *circular* dengan diameter yang sama yaitu 11.5 mm untuk panjang dari pipa pengujian adalah 1700 cm. Pada masing-masing pipa pengujian dipasang dua buah tab (P) untuk mengukur perbedaan tekanan fluida. Alat ukur diletakkan pada *pressure tab* yang ada pada masing-masing pipa pengujian. *Pressure tab* pertama berjarak 850 cm dari pangkal pipa, sedangkan *pressure tab* kedua berjarak 725 cm dari *pressure tab* pertama.



Gambar 1. Eksperimental set-up

TEORI

Fluida merupakan suatu zat yang tidak mampu menahan gaya geser yang bekerja sehingga akan mengalami deformasi. Fluida dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu :

1. Fluida Newtonian

Fluida Newtonian adalah suatu jenis fluida yang memiliki kurva hubungan shear stress dan gradient kecepatan yang linier. Contoh fluida Newtonian adalah air, udara, ethanol, benzene, dan lain-lain. Fluida Newtonian akan terus mengalir dan viskositas fluida tidak berubah sekalipun terdapat gaya yang bekerja pada fluida. Viskositas fluida akan berubah jika terjadi perubahan temperature. Pada dasarnya fluida Newtonian adalah fluida yang mengikuti hukum Newton tentang aliran dengan persamaan :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

dimana :

τ = Tegangan geser pada fluida (Pa)

μ = Viskositas dinamik fluida (m^2/s)

$\frac{\partial u}{\partial y}$ = Gradient kecepatan fluida

2. Fluida Non-Newtonian

Fluida non-Newtonian adalah fluida yang memiliki kurva hubungan tegangan geser dengan gradient kecepatan tidak linear. Viskositas fluida ini tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur tetapi juga dipengaruhi oleh regangan geser dan lain-lain.

Persamaan dasar fluida non-Newtonian adalah :

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (2)$$

dimana :

τ = Tegangan geser pada fluida (Pa)

K = Indeks perilaku aliran

n = Power law indeks

$\frac{\partial u}{\partial y}$ = Gradient kecepatan fluida

Ketika aliran melewati awal ujung pipa, distribusi kecepatan didalam pipa mempunyai bentuk yang tidak teratur yang disebut aliran sedang berkembang. Kondisi ini akan semakin berubah seiring bertambahnya panjang dari inlet. Distribusi kecepatan yang terjadi masing mengalami perubahan bentuk kontur. Setelah aliran mengalami *fully developed flow* atau berkembang penuh, maka distribusi kecepatan akan seragam untuk jarak dari inlet semakin panjang. Untuk aliran laminar, panjang hidrodinamik untuk mencapai keadaan *fully developed flow* adalah kurang lebih 120 kali diameter dalam pipa.

Dalam suatu aliran yang melewati sistem atau instalasi pipa maka terjadi suatu hambatan aliran. Hambatan tersebut disebabkan oleh faktor-faktor bentuk instalasi. Hambatan tersebut dapat menyebabkan turunnya energi dari fluida yang sering disebut dengan kerugian tekanan (*head loss*) atau penurunan tekanan (*pressure drop*) yang disebabkan oleh pengaruh kerugian gesekan fluida (*friction losses*) dan perubahan pola aliran. Pada kondisi aliran laminar, hambatan gesek tersebut hanya dipengaruhi oleh kekentalan fluida. Namun, pada aliran turbulente hambatan tersebut dipengaruhi oleh kekentalan fluida dan kekasaran permukaan pipa.

Volume fluida yang melalui suatu penampang dalam satuan waktu tertentu disebut dengan debit. Kecepatan aliran, luas penampang dan waktu menjadi faktor yang mempengaruhi debit. Persamaan untuk menghitung nilai debit adalah:

$$Q = \frac{U}{t} \quad (3)$$

atau debit juga dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q = A \cdot U \quad (4)$$

dimana :

Q = debit aliran (m^3/s)

A = luas penampang (m^2)

U = kecepatan aliran (m/s)

t = waktu (s)

Densitas dapat dihitung dengan persamaan:

$$\rho_{nf} = \alpha \rho_p + (1 - \alpha) \rho_{bf} \quad (5)$$

dimana:

ρ_{nf} = densitas nanofluida (kg/m^3)

ρ_p = densitas partikel nano (kg/m^3)

ρ_{bf} = densitas fluida dasar (kg/m^3)

α = fraksi volume partikel

Viskositas dapat dihitung dengan persamaan:

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5 \alpha) \mu_{bf} \quad (6)$$

dimana:

μ_{nf} = viskositas efektif nanofluida (Pa.s)

μ_{bf} = viskositas dinamik fluida dasar (Pa.s)

Viskositas suatu fluida adalah sifat yang menentukan besarnya daya tahan terhadap tegangan geser atau dapat didefinisikan sebagai ketahanan terhadap aliran. Ketahanan ini dipengaruhi oleh gaya tarik antara molekul – molekul dalam fluida tersebut.

Persamaan untuk menghitung viskositas kinematik suatu fluida adalah:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

dan untuk menghitung viskositas kinematik pada nanofluida digunakan persamaan sebagai berikut:

$$v = \frac{\mu_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (8)$$

dimana:

v = viskositas kinematik (m^2/s)

μ = dynamic viscosity ($kg.m/s$)

ρ = density (kg/m^3)

μ_{bf} = dynamic viscosity of base fluid (kg/m^3)

ρ_{nf} = density of nanofluid (kg/m^3)

Reynolds number merupakan sebuah besaran tanpa dimensi yang digunakan untuk mengetahui atau memprediksi karakteristik dari suatu aliran fluida di berbagai situasi, *Re number* menyatakan perbandingan gaya inersia terhadap kekekentalan suatu fluida. Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai dari *Reynolds number* antara lain, kecepatan aliran fluida (U), diameter dalam pipa (D_h) dan viskositas kinematik (v). Persamaan yang

digunakan untuk menghitung nilai Reynolds number fluida dalam suatu pipa adalah:

$$Re = \frac{U \cdot D_h}{\nu} \quad (9)$$

dimana:

Re = Reynolds number

U = kecepatan aliran fluida (m/s)

D_h = diameter dalam pipa (m)

ν = viskositas kinematik (m^2/s)

Nilai Reynolds number dapat mengetahui karakteristik suatu aliran fluida apakah laminar atau turbulen.

Pada tahun 1883 Osborne Reynolds menunjukkan bahwa penurunan tekanan tergantung pada parameter : kerapatan (ρ), kecepatan aliran (U), diameter (D), dan viskositas dinamik (μ) yang selanjutnya dikenal dengan bilangan Reynolds, penurunan tekanan merupakan fungsi dari faktor gesekan (f) dan kekasaran relatif dari dinding (ϵ/D).

$$f = \phi\left(Re, \frac{\epsilon}{D}\right) \quad (10)$$

Hambatan gesek menyebabkan kerugian jatuh tekanan, Δh . Nilai Δh ini didapatkan dari persamaan Darcy dan Weisbach (1806-1871):

$$\Delta h = f \left(\frac{L}{D}\right) \frac{U^2}{2g} \quad (11)$$

Dimana f adalah faktor gesekan Darcy dan dapat ditentukan dengan rumus $f = 64/Re$ untuk aliran laminar. Terlihat hubungan yang linear antara koefisien gesekan dengan bilangan Reynolds, sedangkan untuk aliran turbulen nilai koefisien gesekan tersebut banyak dipengaruhi oleh faktor-faktor lain misalnya kekasaran permukaan pipa. Kekasaran permukaan pipa menjadi faktor yang dominan dalam menentukan besarnya koefisien gesek yang terjadi. Nilai kekasaran permukaan dinotasikan dengan symbol ϵ dapat ditentukan dengan rumus:

$$\epsilon = \frac{\epsilon}{D} \quad (12)$$

dimana ϵ adalah kekasaran relatif.

Pengaruh kekasaran permukaan pipa diteliti secara luas pertama kali oleh Nikuradse. Hasil dari percobaannya menunjukkan bahwa kekasaran permukaan sangat mempengaruhi aliran pada bilangan Reynolds tinggi, nilai koefisien gesekan tergantung pada bilangan Reynolds. Von Karman menurunkan rumus untuk aliran turbulen dengan memasukkan kekasaran permukaan. Hasil dari penurunan rumus tersebut adalah:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 + 2 \log \frac{D}{\epsilon} \quad (13)$$

Persamaan Blasius juga menggambarkan nilai koefisien gesekan untuk aliran turbulen yaitu:

$$f = 0.3164 Re^{-\frac{1}{4}} \quad (14)$$

Lewis F. Moody (1880-1953) mengembangkan hasil percobaan Nikuradse ke dalam bentuk model matematika dan berhasil memplot sebuah grafik hubungan koefisien gesek dengan bilangan Reynolds pada aliran turbulen dengan variasi kekasaran permukaan.

Penurunan tekanan (*pressure drop*) pada aliran juga akan mempengaruhi nilai koefisien gesekan (*friction coefficient*), berikut ini adalah persamaan untuk menghitung nilai *pressure drop* khususnya

$$\Delta P = f \frac{L \rho U^2}{D 2} \quad (15)$$

dimana:

ΔP = pressure drop (kPa)

f = friction factor

L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (m)

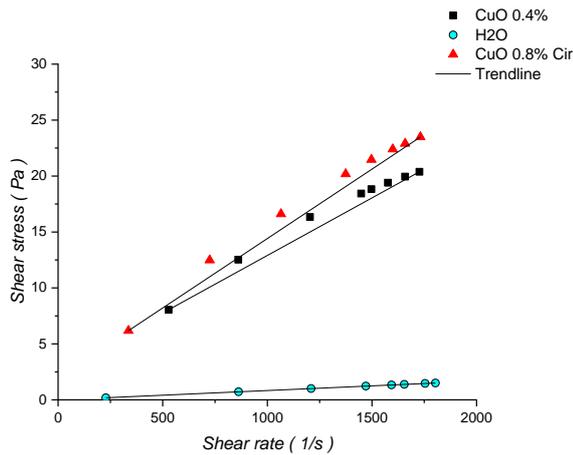
ρ = densitas fluida (kg/m^3)

U = velocity (m/s)

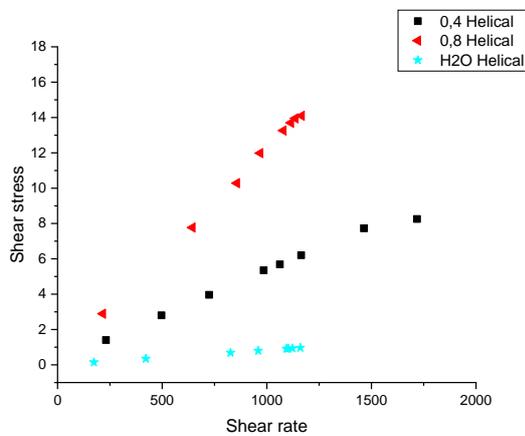
HASIL DAN PEMBAHASAN

Nanofluida yang digunakan dalam pengujian ini adalah *cupric oxide* (CuO) nanofluid dengan air sebagai fluida dasarnya. Variasi konsentrasi yang digunakan pada pengujian ini adalah 0.4% dan 0.8%.

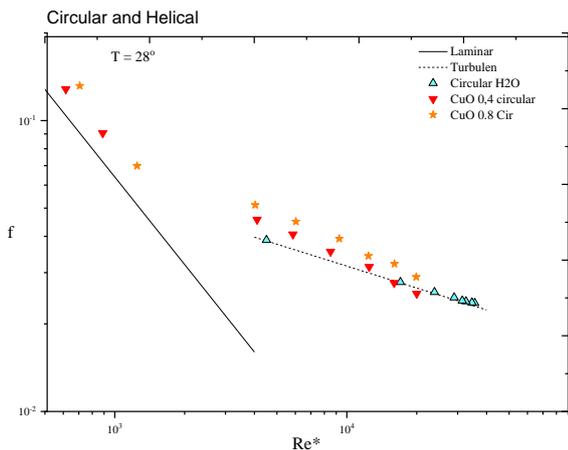
Gambar 2 dan 3 menunjukkan kurva aliran CuO yang diukur dengan menggunakan pipa *cooper* ($D = 11.5$ mm) circular. Pada saat percobaan, suhu dijaga konstan ($T=28^\circ C$) karena Rheologi sangat bergantung pada suhu. Dengan standar *tangent-drawing procedures*, dibuat garis singgung yang membentuk sebuah kurva di berbagai $8V/D$. Dari kurva yang terbentuk, bisa didapatkan nilai n berdasarkan *tangent slop*. Serta didapatkan juga nilai K dari pertemuan garis singgung di $8V/D$. Kurva aliran antara *shear stress* yang diplot terhadap *shear rate*, untuk data CuO 0,4% adalah Pseudoplastis (plastis semu) dengan kurva aliran CuO 0.8%, yang mengindikasikan material ini adalah *power law fluid* dalam rentang *shear stress*. Nilai dari *power law index* (n) dari CuO pada pipa circular tersebut adalah 0.515



Gambar 2. Karakteristik Nanofluida Pipa Circular



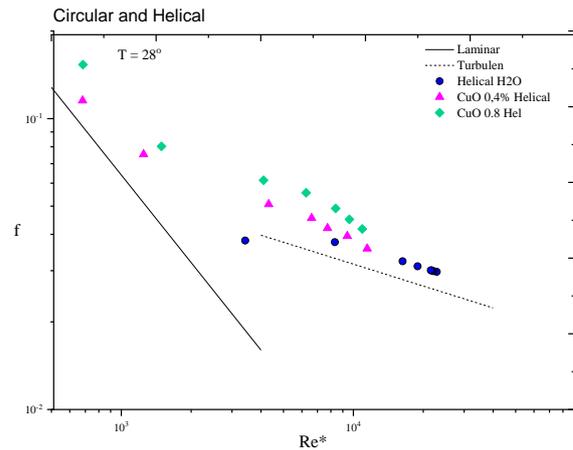
Gambar 3. Karakteristik Nanofluida Pipa Helical



Gambar 4. Grafik Perbandingan f Aktual dan f Teoritis terhadap Bilangan Reynolds Fluida CuO 0.4%, 0.8% dan H₂O pada Pipa Circular.

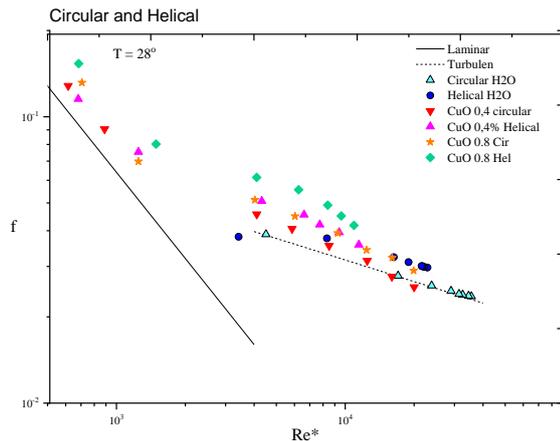
Berdasarkan gambar 4 menunjukkan grafik perbandingan f aktual dan f teoritis terhadap Bilangan Reynolds fluida CuO 0.4%, 0.8% dan H₂O pada pipa

berdiameter 11.5 mm diatas, maka dapat diketahui bahwa f teoritis berada pada angka 0.023451 sampai dengan 0.208196 untuk Bilangan Reynolds 20003.485 sampai dengan 615.636 Adapun f aktual yang mendekati range dari f teoritis adalah f aktual dari fluida berupa CuO dengan konsentrasi 0.8% yang berada pada nilai f aktual antara 0.030000 sampai dengan 0.151523 sesuai dengan data yang diperoleh. Sedangkan f aktual dari fluida berupa H₂O berada jauh diatas range dari f teoritis, dimana fluida H₂O berada pada angka f aktual 0.023593 sampai dengan 0.028989.



Gambar 5. Grafik Perbandingan f Aktual dan f Teoritis terhadap Bilangan Reynolds Fluida CuO 0.4%, 0.8% dan H₂O pada Pipa Helical.

Pada gambar 5 menunjukkan grafik perbandingan nilai friksi terhadap Bilangan Reynold fluida CuO 0.4%, 0,8%, dan H₂O pada pipa helical, untuk garis utuh yang terbentuk adalah hasil analisis dengan menggunakan persamaan Hegen Poiuselle sebagai persamaan laminar. Sedangkan untuk garis putus-putus yang terbentuk adalah hasil dari analisis dengan menggunakan Persamaan Blasius. Maka dapat diketahui bahwa nilai f akan semakin tinggi seiring dengan bertambahnya konsentrasi. Sedangkan nilai Reynolds berbanding terbalik dengan nilai f, dimana semakin tinggi konsentrasi maka akan semakin kecil nilai Reynolds.



Gambar 6. Grafik Perbandingan nilai Friksi terhadap Bilangan Reynold fluida CuO 0.4%, 8%, dan H₂O pada pipa *circular* dan *helical*

Pada gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan nilai friksi terhadap Bilangan Reynold fluida CuO 0.4%, 0.8%, dan H₂O diatas, untuk garis utuh yang terbentuk adalah hasil analisis dengan menggunakan persamaan Hagen Poiuselle sebagai persamaan laminar. Sedangkan untuk garis putus-putus yang terbentuk adalah hasil dari analisis dengan menggunakan Persamaan Blasius. Maka dapat diketahui bahwa nilai f akan semakin tinggi seiring dengan bertambahnya konsentrasi. Sedangkan nilai Reynolds berbanding terbalik dengan nilai f .

KESIMPULAN

1. Nanofluida CuO, benar hal ini merupakan fluida non-Newtonian *Pseudoplastic* dikarenakan nilai *power law index* (n) < 1
2. Nilai friksi dari fluida CuO dengan konsentrasi 0.4% lebih kecil dibandingkan dengan konsentrasi 0.8% pada pipa *Circular* dan *Helical*. Sedangkan fluida berupa H₂O memiliki nilai friksi paling rendah dari ketiga fluida uji karena nilai viskositasnya yang lebih rendah. Sehingga nilai kerugian jatuh tekan paling rendah dari ketiga fluida tersebut adalah fluida H₂O, kemudian CuO dengan konsentrasi 0.4% dan terakhir adalah CuO dengan konsentrasi 0.8%.
3. Nilai Bilangan Reynolds yang dihasilkan oleh aliran fluida CuO dengan konsentrasi 0.4% lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi 0.8%, sehingga semakin besar konsentrasi partikel CuO maka nilai Bilangan Reynolds akan menurun. Sedangkan pada fluida H₂O, nilai Bilangan Reynolds jauh lebih kecil dari fluida dengan partikel CuO dikarenakan nilai viskositas air yang lebih rendah dibandingkan dengan fluida dengan partikel CuO.
4. Koefisien gesekan aliran dalam pipa mulus dengan penambahan partikel CuO pada bilangan Reynolds 3×10^3 hingga 15×10^5 .
5. Kerugian jatuh tekan aliran dalam pipa mulus dengan penambahan partikel CuO dengan konsentrasi 0.4 % dan 0.8 % pada bilangan Reynolds 2×10^4 hingga 10×10^5 .
6. Semakin tinggi konsentrasi partikel CuO dalam fluida maka semakin rendah kerugian jatuh tekan dan koefisien gesekan sehingga mengurangi hambatan dalam pipa.

DAFTAR PUSTAKA

- Edelstein, A.S. (1999). *Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications*. IOP Publishing: Bristol.
- Jayadevan, K.P. Tseng, T.Y. (2004). *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*. American Scientific: California.
- Carl, C. Koch. (2007). *Nanostructured Materials: Processing, Properties and Applications, 2nd edition*. William Andrew Inc: United State of America
- Decker, S. Klabunde, K.J. (1996). *J. American Chemical Society*.
- Siegel, R.W. (1993). *Materials Science and Engineering*.
- Dutta, J. Reaney, I.M. Cabarrocas, P.R.I. and Hofmann, H. (1995). *Nanostructured Materials*.
- Zhang, Qiaobao. Zhang, Kaili. (2014). *CuO Nanostructures: Synthesis, Characterization, Growth Mechanisms, Fundamental Properties, and Applications. Progress in Material Science* 60, 208 – 337: Hongkong.
- Prakash, S B. Kotin, Kiran Ningappa. Kumar M, Praveen. (2016). *Preparation and Characterization of Nanofluid (CuO – Water, TiO₂ – Water)*. *International Journal Science and Engineering*.
- Thamaphat, Khaemrutai. (2008). *Phase Charaterization of TiO₂ Powder by XRD and TEM*. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* 42: 357 – 361.
- Xuan, Yimin. Li, Qiang. (2000). *Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. International Heat Transfer of Heat and Fluid Flow* 21: 58 – 64.
- Munson, B. R. (2000). *Fundamental of Fluid Mechanics 4th Edition*. John Wiley & Sons, Inc.: United State of America.
- Maisura, M.B. Bhatt, M.K. Anup Nimkar. (2015). *Proceeding of 2nd The IRES International Conference*. Berlin. Germany. ISBN 978-93-85465-28-4
- Cuneyt Uysal. Kamil Arslan. Huseyin Kurt. (2016). *A Numerical Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer Characteristic of ZnO-Ethylene Glycol Nanofluid in Rectangular Microchannels. Journal of Mechanical Engineering*. 603-613.

- Budi Kristiawan, Samsul Kamal, Suhanan, Yanuar. (2016). *Thermo-Hydraulic Characteristics of Anatase Titania Nanofluids Flowing Through a Circular Conduit*. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. Vol 16. 6078-6085.
- Adnan M Huseein, RA Bakar, K Kadirgama, KV Sharma. (2013). *Experimental Measurement of Nanofluids Thermal Properties*. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)*. Volume 7. Pp 850-863.
- Mohamed H Shedid. (2014). *Computational Heat Transfer for Nanofluids Through an Annular Tube*. *Proceeding of the International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow*. Prague, Czech Republic.
- Al-Badr, Jaafr., Tayal, Satinder., Alasadi, Mushtaq. (2013). *Heat transfer through heat exchanger using CuO nanofluid at different concentration*. Elsevier Ltd. India.
- I Hassan, Mohamed., A Alzarooni, Izmail., Shatilla, Youssef. (2015). *The effect of water based nanofluid incorporating Al₂O₃ nanoparticles on heat pipe performance*. Elsevier Ltd. Abu Dhabi.
- Endra Dyatmika Karna., Budi Kristiawan., Eko Prasetyo Budiana. (2012). Studi Eksperimental perpindahan kalor konveksi nanofluida CuO Propylene Glycol pada circular tube dibawah kondisi fluks kalor konstan. univerristas sebelas maret. Surabaya
- Torang Ridho Souveniergus., (2011)., Kerugian Jatuh Tekan (*Pressure Drop*) Pipa Mulus Acrylic Ø 8 mm. Jakarta
- M Primadya Putra., (2012)., Pengurangan *Pressure Drop* dengan menggunakan Serat Abaca pada Tangki Air Ballast Kapal. Jakarta
- Smits, A.J., A. *Physical Introduction To Fluida Mechanics*. (2000). John Wiley & Sons. Inc. USA.
- Gerhart M Philip. (1992). *Fundamentals of Fluida Mechanics*. Addison Wiley Publishing Company. USA.
- Watanabe, K., Yanuar., And H Udagawa. (1999). *Drag Reduction Of Newtonian Fluid in a Circular Pipa Wide Highly Water-Repellent Wall*. *Journal of fluid mch*. P. 225. Jakarta.
- Poernomo Sari, Rr. Sri., A, P, Muhammad Alfin., Astuti. (2016). Efek Konsentrasi Partikel CuO dan TiO₂ terhadap Faktor Gesekan dan Kerugian Jatuh Tekanan Aliran Fluida dalam Pipa Lurus. Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat. Universitas Sriwijaya. Palembang.
- Yanuar., T, Kurniawan., Sealtial Mau, Waskito., Wulandari, Winda., Poernomo Sari, Rr Sri., (2017). *Helical Twisted Effect of Spiral Pipe in General Swirl Flow for Coal Slurries Conveyance*. *Jurnal Teknologi*. Universitas Teknologi Malaysia. Malaysia.
- Anwas, Yanuar., Poernomo Sari, Rr. Sri., Gunawan. 2015. *The Flow Behavior of Bamboo Fiber Suspension in Circular Pipe and Spiral Pipe*. *Proceeding The 26TH International Symposium on Transport Phenomena*. Montan Universitaet Leoben. Austria.
- Streeter V. L., Terjemahan: Arko Prijoma. 1999. *Mekanika Fluida*. Edisi kedelapan. Erlangga. Jakarta.
- Haikal. M. 2011. *Kerugian Jatuh Tekan (Pressure Drop) Pipa Mulus Acrylic φ10 mm*. Tugas Akhir. Universitas Gunadarma. Depok.
- Poernomo Sari, Rr. Sri., Haikal, Muhammad. 2011. *Friction Coeffition of TiO₂ and Al₂O₃ Solution in Pipes*. Universitas Udayana. KNEP-2011. Bali.
- Raswari. 2007. *Sistem Perpipaan*. Edisi kedua. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Tabel Saturasi Viskositas Dinamik Air Berdasarkan Temperatur. www.vaxasoftware.com. [Diakses pada 02-09-2018]. USA.