

# Analisis Pengaruh Nanofluida Titanium Dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) Terhadap Kinerja Fluida Dasar Pada Perpindahan Panas Pada Alat Penukar Panas Pipa Ganda

Fadhli Aulia Syukri<sup>1</sup>, Budhi M. Suyitno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta

## Abstrak.

Alat penukar kalor merupakan alat yang digunakan untuk memindahkan kalor dari sistem ke sistem lain tanpa perpindahan massa dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Salah satu alat yang digunakan untuk melakukan proses pemindahan kalor tersebut adalah Penukar kalor pipa ganda, alat ini mempunyai desain yang sederhana, dengan pipa yang membentuk horizontal dimana terdapat 2 pipa kecil di bagian dalam masing-masing pipa dan pipa besar di bagian luarnya. Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi dari alat penukar panas adalah fluida yang digunakan. Perkembangan dalam nanoteknologi saat ini telah menciptakan suatu kelas fluida baru yang disebut nanofluida. Penggunaan Nanofluida menunjukkan stabilitas yang lebih baik dan konduktivitas termal yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan fluida biasa. Titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) digunakan sebagai nanofluida dengan konsentrasi 0,4%, 0,6%, dan 0,8%. Setiap fraksi massa nanofluida diterapkan pada sistem dengan debit 0,3, 0,6, dan 0,9 liter/menit. Data yang di dapat berupa temperatur input dan output. Dengan pengolahan data didapat *thermophysical properties* dan perpindahan panas. Penggunaan titanium dioksida pada alat penukar panas pipa ganda mempengaruhi peningkatan laju perpindahan panas nanofluida dan mendapatkan nilai tertinggi pada variasi konsentrasi nanofluida  $\text{TiO}_2$  0,8% dengan debit 0,9 l/min yaitu sebesar 0,35 W. Peningkatan ini terjadi karena adanya peningkatan konduktivitas termal pada nanofluida  $\text{TiO}_2$ .

**Kata kunci :** Alat penukar panas pipa ganda, Nanofluida, Titanium dikosida, *thermophysical properties*, perpindahan panas.

## 1. PENDAHULUAN

Pemanasan atau pendinginan fluida adalah suatu kebutuhan utama didalam banyak sektor industri, kebutuhan di bidang energi dan produksi serta bidang elektronika. Alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) adalah alat yang digunakan untuk memindahkan kalor dari sistem ke sistem lain tanpa perpindahan massa dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai adalah air yang dikalorkan sebagai fluida kalor dan air biasa sebagai air pendingin (*cooling water*). Penukar kalor dirancang sebisa mungkin agar perpindahan kalor antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran kalor terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang

memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung (*direct contact*) [1]. Salah satu alat yang digunakan untuk melakukan proses pemindahan kalor tersebut adalah Penukar kalor pipa ganda, alat ini Mampu beroperasi pada tekanan yang tinggi, fleksibel dalam berbagai aplikasi, mempunyai desain yang sederhana, dengan pipa yang membentuk horizontal dimana terdapat 2 pipa kecil di bagian dalam masing-masing pipa dan pipa besar di bagian luarnya [2]

Efisiensi alat penukar kalor dipengaruhi oleh bentuk, dimensi pipa dan fluida, secara keseluruhan dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas konveksi, yang merupakan fungsi dari sejumlah termofisika fluida [3]. sifat-sifat termal dari fluida kerja mempunyai peran

penting dalam perpindahan panas [4]. Tetapi, fluida perpindahan panas konvensional seperti air, ethylene glycol dan minyak mesin secara umum, memiliki sifat-sifat perpindahan panas yang sangat rendah dibandingkan dengan kebanyakan benda padat. Sehingga salah satu alternatif untuk mengatasi keterbatasan ini adalah dengan suspensi nanopartikel pada fluida dasar [5].

Perkembangan nanoteknologi saat ini telah menciptakan suatu kelas fluida baru dan khusus, disebut nanofluida. Nanofluida merupakan suspensi nanopartikel dengan setidaknya satu dimensi kurang dari 100 nm atau dapat diartikan cairan yang tersusun dari partikel-partikel yang berukuran sangat kecil dalam orde nanometer. Menurut penelitian, penggunaan nanofluida meningkatkan konduktivitas termal dan koefisien perpindahan panas konduktif dibandingkan dengan fluida dasar. Penelitian dalam bidang nanofluida yang diaplikasikan pada sistem penukar panas (*heat exchanger*) menunjukkan stabilitas yang lebih baik dan konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan fluida biasa. Selain itu juga masih banyak aplikasi lain yang dapat dimanfaatkan terkait nanofluida.

Keuntungan ini membuat nanofluida menjanjikan sebagai peningkatan alat penukar kalor (*heat*

*exchanger*) dan muncul sebagai fluida yang memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan pada sistem perpindahan panas [5].

Titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) adalah salah satu partikel logam yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi bila dibandingkan dengan logam jenis ferro lainnya. Titanium dioksida memiliki konduktivitas termal 8,9 W/m°C, dimana lebih besar dibandingkan dengan nanofluida lainnya seperti *graphene oxide* dengan konduktivitas termal 0,607 W/m°C. Secara umum TiO<sub>2</sub> adalah bahan yang aman bagi manusia dan binatang, nanopartikel TiO<sub>2</sub> mudah ditemukan,

dan metal oksida seperti nanopartikel TiO<sub>2</sub> mempunyai kestabilan yang tinggi.

Oleh karena itu, penggunaan nanofluida titanium dioksida dengan variasi konsentrasi 0,4%, 0,6% dan 0,8% menggunakan alat penukar kalor pipa ganda diharapkan dapat meningkatkan *thermophysical properties* dan karakteristik perpindahan panas pada alat penukar kalor pipa ganda.

## 2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan alat penukar kalor pipa ganda dengan tipe aliran counter flow. Alat-alat yang akan digunakan untuk penelitian ini meliputi peralatan yang digunakan untuk membuat nanofluida adalah alat sonifikator, *magnetic stirrer*, viskometer, timbangan digital, termometer, dan gelas beker 500 ml. Peralatan yang digunakan dalam pengambilan data adalah alat *Heat Exchanger* tipe *double pipe* skala laboratorium, termometer digital. Sedangkan untuk bahan-bahan yang dibutuhkan adalah nanofluida titanium dioksida dan air aquades.

Nanofluida TiO<sub>2</sub> dengan tiga konsentrasi yaitu, 0,4%, 0,6%, dan 0,8 %. Untuk mendapatkan volume nanopartikel dapat menggunakan persamaan:

$$\phi = \frac{v_p}{v_{bf}} \times 100\%$$

Setelah mendapatkan nilai volume, maka untuk menentukan massa nanopartikel adalah dengan persamaan:

$$\rho_p = \frac{m}{v}$$

Setelah mendapatkan variasi massa nanopartikel diatas berdasarkan variasi konsentrasi nanopartikel, siapkan TiO<sub>2</sub> pada gelas beker kemudian dicampurkan dengan air distilasi sebagai fluida dasarnya. Selanjutnya proses pengadukan yang dilakukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit agar TiO<sub>2</sub> dan air distilasi tercampur rata. Campuran TiO<sub>2</sub> dan fluida dasar berupa air distilasi selanjutnya dilakukan sonikasi dengan

menggunakan ultrasonic dispersion selama 1 jam. Volume dari fluida panas maupun dingin diatur sama yaitu 600 ml, bertujuan agar dalam pelaksanaan pengujian hasilnya akurat karena tidak ada perbedaan volume dari kedua cairan. Debit dari fluida panas diatur sebesar 1 l/m dan fluida dingin diatur bervariasi yaitu dengan debit 0,3 l/m, 0,6 l/m, dan 0,9 l/m. Masing-masing komposisi nanofluida dilakukan pengujian 3 kali dengan debit yang berbeda-beda. Debit fluida panas diatur 1 l/m untuk menjaga objek pengetesan/pengujian, agar data yang di peroleh tepat. Fluida panas dipanaskan sehingga mencapai suhu 60°C dan fluida dingin tetap dijaga dengan suhu ruangan yaitu 27°C agar tidak ada perbedaan dalam pengambilan data satu sama

lain. Karena suhu sangat berpengaruh pada

konduktivitas termal fluida. Selanjutnya mencatat data dari temperatur awal sebelum dilakukan

pengujian pada alat *Heat Exchanger*. Kedua pompa dinyalakan secara bersamaan. Posisikan selang outlet heat exchanger pada wadah yang berbeda dari wadah awal. Tujuannya agar diketahui secara langsung perbedaan temperatur

dari cairan yang telah dilakukan sekali running (sekali siklus). Karena jika selang keluar dikembalikan ke wadah awal dan sirkulasi terus

berlanjut maka temperatur tidak dapat diketahui

akibat temperatur jadi seimbang dan juga tidak ada pendingin pada fluida dingin. Temperatur diukur setelah dilakukan pengujian pada wadah

output menggunakan termometer digital langsung setelah dilakukan proses sirkulasi selesai. Tujuannya agar tidak ada perubahan temperatur akibat pengaruh suhu ruangan atau lainnya. Kemudian tulis data yang dihasilkan dari fluida panas maupun dingin sebagai temperatur outlet.

Sebelum dilakukan pengujian ulang dengan sampel nanofluida berbeda ataupun debit berbeda, alat penukar panas didinginkan terlebih

dahulu sampai suhu ruangan lagi. Tujuannya agar tidak ada perbedaan perlakuan antara sampel satu dengan sampel lainnya yang akan diuji, apabila

Untuk *thermophysical properties* maka diperlukan pengolahan data massa jenis, kalor jenis, viskositas, dan konduktivitas termal. Dengan persamaan berikut:

- Massa jenis

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

- Kalor jenis

$$Cp_{nf} = (1 - \varphi)Cp_m + \varphi Cp_p \quad (2)$$

- Viskositas

$$\mu_{nf} = 1 + 2,5\varphi \times \mu_{bf} \quad (3)$$

- Konduktivitas termal

$$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_m + 2\varphi(k_p - k_m)}{k_p + \varphi(k_p - k_m)} \right] k_m \quad (4)$$

Untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas maka menggunakan persamaan di bawah ini:

- Bilangan Prandtl

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (5)$$

- Bilangan Reynold

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (6)$$

- Bilangan Nusselt

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} \quad (7)$$

- Koefisien konveksi

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (8)$$

sampel yang digunakan memiliki konsentrasi yang berbeda maka perlu dilakukan pembersihan

Untuk menganalisa perpindahan panas maka menggunakan persamaan berikut:  
didalam saluran atau *Heat Exchanger* dengan menggunakan air biasa agar tidak berpengaruh pada hasil data penelitian

- $\Delta T_{LMTD}$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)} \quad (9)$$

- Koefisien perpindahan panas keseluruhan

$$U_a = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad (10)$$

- Perpindahan panas

$$q = U_a x \Delta T_{LMTD} \quad (11)$$

Dimana :

- $\rho_{nf}$  = massa jenis nanofluida (kg/m<sup>3</sup>)
- $\varphi$  = konsentrasi (%)
- $\rho_{bf}$  = massa jenis basefluids (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_p$  = massa jenis nanopartikel (kg/m<sup>3</sup>)
- $Cp_{nf}$  = Kalor Jenis nanofluida (J/kg °C)
- $Cp_m$  = Kalor Jenis basefluids (J/kg °C)
- $Cp_p$  = Kalor Jenis nanopartikel (J/kg °C)
- $\mu_{nf}$  = Viskositas nanofluida (kg/m s)
- $\mu_{bf}$  = Viskositas basefluid (kg/m s)
- $k_{nf}$  = Konduktivitas Termal nanofluida (W/m°C)
- $k_p$  = Konduktivitas Termal partikel (W/m°C)
- $k_m$  = Konduktivitas Termal basefluids (W/m°C)

$U_a$  = Koefisien perpindahan panas keseluruhan (W/°C)

$D_o$  = Diameter luar pipa (m)

$D_i$  = Diameter dalam pipa (m)

$A_i$  = luas permukaan bagian inlet (m<sup>2</sup>)

$A_o$  = luas permukaan bagian outlet (m<sup>2</sup>)

$h_i$  = Koefisien perpindahan kalor inlet (W/m<sup>2</sup>°C)

$h_o$  = Koefisien perpindahan kalor outlet (W/m<sup>2</sup>°C)

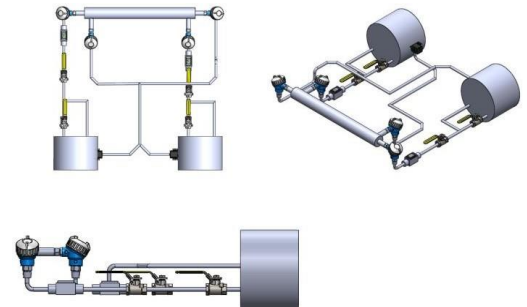
$k$  = Konduktivitas termal (W/m°C)

$q$  = Laju perpindahan panas (W)

$U$  = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh (W/m<sup>2</sup>.°C)

$A$  = Luas permukaan penukar panas (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{LMTD}$  = Perbedaan temperatur rata-rata logaritma (°C)



Gambar 2.1 Heat Exchanger Double Pipe

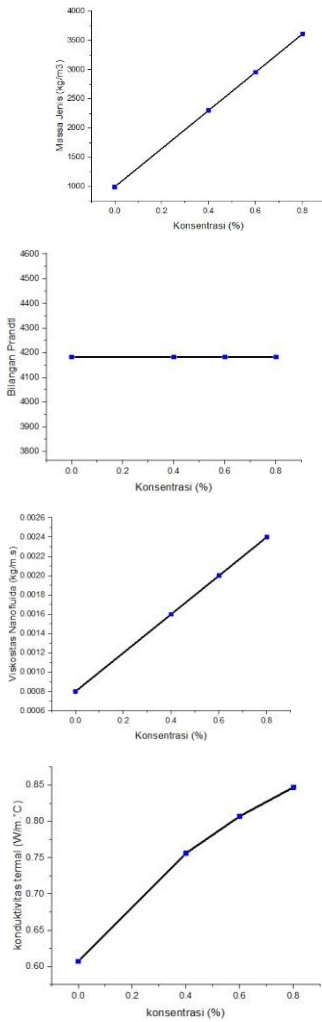
Tabel 2.1 Data hasil pengujian

Fraksi massa	Debit	Air		Nanofluid		ΔT1	ΔT2
		Tc in	Tc out	Th in	Th out		
fraksi massa 0.8%	0.9	28.25	33.54	60.8	45.2	27.26	16.95
	0.6	28.17	33.12	59.81	45.7	26.69	17.53
	0.3	27.06	33.88	59.8	44.69	25.92	17.63
fraksi massa 0.6%	0.9	27.44	33.44	60.75	44.83	27.31	17.39
	0.6	27.81	34.94	60	44.22	25.06	16.41
	0.3	27.87	33.62	59.1	45.31	25.48	17.44
fraksi Massa 0.4%	0.9	27.69	34.67	60.4	44.25	25.73	16.56
	0.6	27.75	34.56	59.75	44.44	25.19	16.69
	0.3	27.87	34.81	59	44.1	24.19	16.23
air	0.9	27	31.5	60	46.8	28.5	19.8
	0.6	27	32.5	60	47	27.5	20
	0.3	27	37.9	60	47.2	22.1	20.2

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Analisa data Thermophysical Properties

Sifat thermophysical properties tergantung pada struktur, dan proses konduksi panas yang bukan fenomena lokal, melainkan menunjukkan efek radiasi jangka panjang. Perubahan besar dalam sifat termofisika fluida dapat dikaitkan dengan perubahan besar dalam tingkat perpindahan panas konvektif [10].



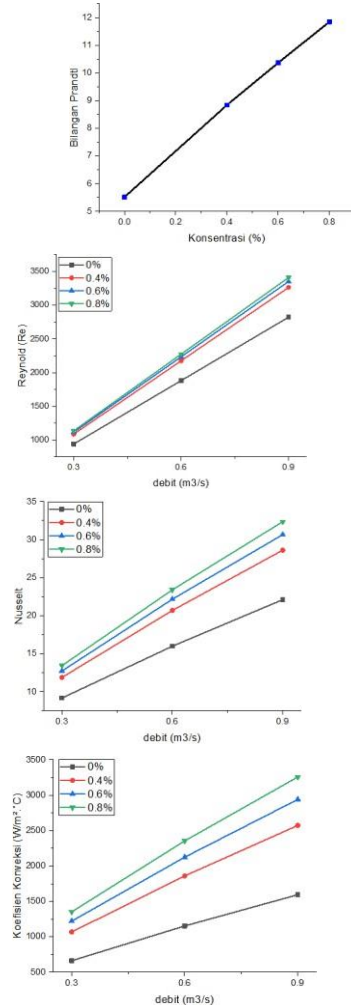
Gambar 3.1 (a) massa jenis; (b) kalor jenis; (c) viskositas (d) konduktivitas termal

Hasilnya nilai massa jenis, viskositas dan konduktivitas termal akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai konsentrasi pada nanofluida. Namun tidak terjadi pada kalor jenis yang hasilnya sama pada variasi konsentrasi nanofluida

### Analisa Karakteristik Perpindahan Panas

Pengujian karakteristik perpindahan panas ini meliputi bilangan tak berdimensi seperti bilangan

Prandtl, bilangan Reynolds dan bilangan Nusselt. Selain bilangan tak berdimensi, penelitian ini melakukan pengukuran pada koefisien konveksi



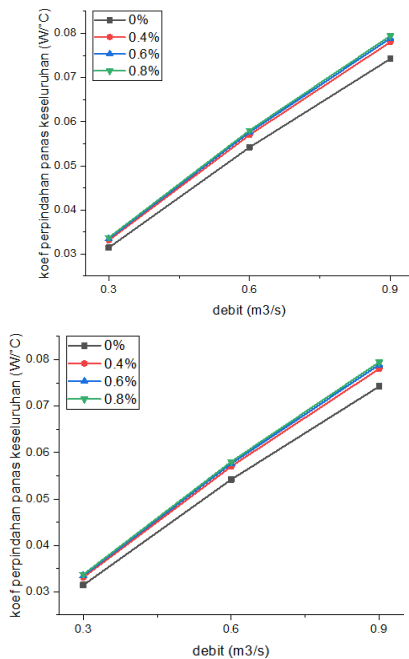
Gambar 3.2 (a) bilangan Prandtl; (b) bilangan Reynold; (c) bilangan Nusselt (d) koefisien konveksi

Hasilnya nilai bilangan Prandtl, bilangan Reynold, bilangan Nusselt, dan koefisien akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai konsentrasi pada nanofluida.

## Analisa Perpindahan Panas pada Alat Penukar

### Panas Pipa Ganda

Perpindahan panas nanofluida  $TiO_2$  merupakan tujuan utama dari pengaplikasian nanofluida  $TiO_2$  pada sistem kerja alat penukar panas pipa ganda, dimana perhitungan hasil perpindahan panas dengan metode LMTD (*log mean temperature different*) melibatkan hasil perhitungan dari koefisien perpindahan panas menyeluruh, luas penampang dari dinding *heat exchanger*, dan  $\Delta T_{LMTD}$ .

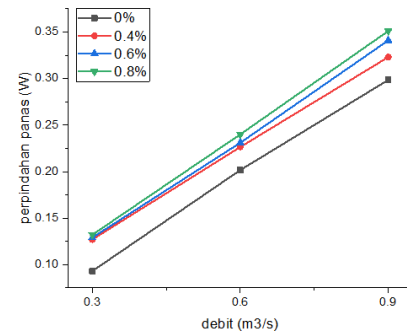


Gambar 3.3 Grafik Pengaruh Konsentrasi Nanofluida Terhadap (a)  $\Delta T_{LMTD}$ ; (b) koefisien perpindahan panas menyeluruh

Tabel 3.1 Hasil Perhitungan Perpindahan Panas

Konsentrasi (%)	Debit	Perpindahan Panas
0	0,3	0,09312
	0,6	0,20169
	0,9	0,29855
0,4	0,3	0,12706

0,6	0,6	0,22643
	0,9	0,32305
	0,3	0,12911
0,8	0,6	0,23101
	0,9	0,34107
	0,3	0,13211
0,8	0,6	0,24005
	0,9	0,35117
	0,3	0,13211



Gambar 3.3 Grafik Pengaruh Konsentrasi Nanofluida Terhadap perpindahan panas

Berdasarkan gambar 3.3 grafik pengaruh konsentrasi nanofluida terhadap perpindahan panas. Nilai perpindahan panas meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi nanofluida. Nilai tertinggi pada perpindahan panas terjadi pada konsentrasi 0,8% dengan debit 0,9 l/m yaitu 0,35117 W dan nilai terendah terjadi pada konsentrasi 0% dengan debit 0,3 l/m yaitu 0,09312 W. Hasil ini menunjukkan bahwa nanofluida dengan penambahan  $TiO_2$  memiliki nilai perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan dengan nanofluida tanpa penambahan  $TiO_2$ .

### Kelebihan dan Kekurangan Penggunaan

#### Nanofluida

Kelebihan dan Kekurangan Penggunaan Nanofluida antara lain:

- Meningkatkan stabilitas dan heat exchanger, karena perpindahan panas terjadi di permukaan partikel, maka untuk perpindahan panas sangat

diinginkan partikel yang memiliki luas permukaan besar. Karena ukurannya yang sangat kecil maka stabilitas dalam perpindahan kalor akan semakin tinggi karena gaya gravitasi yang bekerja pada partikel akan semakin kecil.

- Membuat sistem lebih kecil, hal ini dapat dilakukan karena potensi konduktifitas panas yang sangat tinggi akan membuat ukuran peralatan heat exchanger menjadi lebih kecil sehingga dapat menghemat biaya penggunaan.
- Menghemat biaya dan energi. Dengan menggunakan nanofluida maka ukuran dari alat penukar kalor beserta peralatan pendukungnya menjadi semakin kecil.

Kekurangannya penggunaan nanofluida antara lain:

- penggunaannya membutuhkan biaya yang lebih mahal

#### 4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini pengaruh penambahan konsentrasi nanofluida  $TiO_2$  terhadap *thermophysical properties*, dan karakteristik perpindahan panas pada nanofluida telah diamati secara analitik dan diaplikasikan pada sistem alat penukar panas tipe pipa ganda skala laboratorium.

Karakteristik perpindahan panas pada bilangan prandtl, Reynold dan Nusselt meningkat sering dengan bertambahnya fraksi volume nanofluida  $TiO_2$ , hal ini dikarenakan nilai dari sifat *thermophysical*  $TiO_2$  lebih tinggi jika dibandingkan dengan fluida kerja yang mendapatkan pertambahan nanofluida air distilasi.

Penambahan variasi fraksi volume nanofluida  $TiO_2$  pada fluida dasar air distilasi mempengaruhi peningkatan laju perpindahan panas nanofluida  $TiO_2$  dan mendapatkan nilai tertinggi pada variasi konsentrasi nanofluida  $TiO_2$  0,8% dengan debit 0,9 l/min yaitu sebesar 0,351171206 W. Peningkatan ini terjadi karena adanya peningkatan konduktivitas termal pada nanofluida  $TiO_2$ .

Untuk perkembangan penulisan ini maka penulis memberikan saran perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai performa alat penukar panas pipa ganda dengan konsentrasi titanium dioksida lebih tinggi untuk menentukan adanya nilai puncak.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. A. ÇENGEL and A. J. GHAJAR, *HEAT AND MASS TRANSFER: FUNDAMENTALS & APPLICATIONS*, 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [2] S. Kakac and H. Liu, *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*. CRC Press, 1997.
- [3] B. Syarifuddin, "Analisis Efektivitas Alat Penukar Kalor Pada Mesin Pengering Rak Telur Dengan Tungku Berbahan Bakar Sekam Padi," Universitas Hasanuddin Makassar, 2018.
- [4] Astuti and S. P. Sari, "Analisis Pengaruh Konsentrasi Partikel  $TiO_2$  Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Konveksi pada Penukar Kalor Pipa Ganda," in *Seminar Nasional – XVII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri*, 2018.
- [5] B. A. Bhanvase, D. P. Barai, S. H. Sonawane, N. Kumar, and S. S. Sonawane, *Intensified Heat Transfer Rate With the Use of Nanofluids*. Elsevier Inc., 2018.
- [6] R. S. Khedkar, S. S. Sonawane, and K. L. Wasewar, "Heat transfer study on concentric tube heat exchanger using  $TiO_2$ -water based nanofluid," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 57, pp. 163–169, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2014.07.011.
- [7] agus haryanto, *perpindahan panas*, 1st ed. Yogyakarta: Innosains, 2015.
- [8] M. R. Esfahani, E. M. Languri, and M. R. Nunna, "Effect of particle size and viscosity on thermal conductivity enhancement of graphene oxide nanofluid," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 308–315,





2016, doi:  
10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.06.006.

- [9] A. Hajatzadeh Pordanjani, S. Aghakhani, M. Afrand, B. Mahmoudi, O. Mahian, and S. Wongwises, "An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 198, no. April, p. 111886, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111886.
- [10] S. Eiamsa-ard, K. Kiatkittipong, and W. Jedsadaratanachai, "Heat transfer enhancement of TiO<sub>2</sub>/water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 18, no. 3, pp. 336–350, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.JESTCH.2015.01.008.
- [11] A. Yunus Cengel, *Heat and Mass Transfer*, Fifth. United States of America: McGraw-Hill Education, 2014.
- [12] M. Fares, M. AL-Mayyahi, and M. AL-Saad, "Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 18, p. 100584, 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100584.
- [13] W. H. Azmi, K. V. Sharma, P. K. Sarma, R. Mamat, and S. Anuar, "Comparison of convective heat transfer coefficient and friction factor of TiO<sub>2</sub> nanofluid flow in a tube with twisted tape inserts," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 81, pp. 84–93, 2014.
- [14] J. P. Holman, *Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [15] M. M. Rizki, "Pengaruh Konsentrasi 0,1%, 0,3%, Dan 0,5% Partikel TiO<sub>2</sub> Terhadap Koefisien Konveksi Pada Penukar Kalor Pipa Ganda Dengan Diameter 0,5 Inch Dan 4 Inch," Universitas Sriwijaya, 2020.
- [16] J. P. Holman, "Heat Transfer," 2009, doi: 10.1115/1.3246887.
- [17] H. Li, H. Huang, G. Xu, J. Wen, and H. Wu, "Performance analysis of a novel compact

