

ANALISA NUMERIK PENINGKATAN TRANSFER KALOR ALIRAN TURBULEN FLUIDA NANO TiO₂/AIR PADA CIRCULAR MINICHANNEL

Budi Kristiawan

Tenaga Pengajar (Dosen)
Program Studi Teknik Mesin
Universitas Sebelas Maret
Budi_k@staff.uns.ac.id

Agung Tri Wijayanta

Tenaga Pengajar (Dosen)
Program Studi Teknik Mesin
Universitas Sebelas Maret
agungtw@gmail.com

Wibawa Endra Juwana

Tenaga Pengajar (Dosen)
Program Studi Teknik Mesin
Universitas Sebelas Maret
wibawa.ej@gmail.com

Shegi Wulandari

Mahasiswa S1
Universitas Sebelas Maret
Program Studi Teknik Mesin
wulandarishegi@student.uns.ac.id

Conventional heat transfer fluids such as water, ethylene glycol and oil are limited by their poor thermal properties therefore it is needed the advanced heat transfer fluids that be able to improve their thermal performance. Nanofluids is a colloidal dispersion of nano-sized particles which are a breakthrough of thermal system. This numerical study using the multi-phase mixture model method investigated the convective heat transfer of TiO₂/water nanofluids flowing through a circular mini channel with a 1.09 mm diameter and 306 mm length under turbulent flow regime. TiO₂ nanoparticles with a diameter of 21 nm were dispersed into water with volume concentrations of 1.0, 2.0, 3.5, and 5.0 vol.%. The Reynolds number was varied from 4000–20,000 and a constant heat flux of 6500 W/m². The results showed that the addition of nanoparticles and the variation of the Reynolds number increased the convective heat transfer coefficient of TiO₂/water nanofluid by 5.18%, 7.4%, 12.4%, and 14.3%, respectively, with increasing in nanoparticles concentrations.

Keywords : Nanofluids, Nanoparticle, Heat Transfer Coefficient, Constant Heat Flux, Computational Fluid Dynamics

1. PENDAHULUAN

Efisiensi energi merupakan usaha yang dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan, dalam menggunakan sebuah peralatan atau mesin yang mengkonsumsi energi, untuk mendapatkan hasil yang sama. Metode peningkatan transfer kalor yang pada umumnya dilakukan dengan menggunakan metode aktif dan pasif terus dikembangkan untuk mendapatkan efisiensi energi yang lebih baik. Beberapa teknik peningkatan transfer kalor secara pasif yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan metode *insert devices*. Penelitian yang mengkaji teknik peningkatan transfer kalor telah dilakukan oleh banyak peneliti sebelumnya [1-5]. Namun demikian, semua metode teknik penyisipan (*insertion*) yang dikembangkan menimbulkan *pressure drop* yang meningkat sehingga mengakibatkan daya pemompaan (*pumping power*) yang meningkat pula. Hal ini berdampak terhadap biaya energi yang dikeluarkan juga meningkat.

Salah satu teknik peningkatan transfer kalor yang dewasa ini dikembangkan yaitu dengan memodifikasi sifat-sifat termofisik fluida kerja transfer kalor (*heat transfer fluids*). Fluida transfer kalor konvensional seperti minyak, air, *ethylene glycol* banyak digunakan di beberapa industri, antara lain pembangkit listrik, proses kimia, proses pemanasan dan pendinginan, transportasi, *microelectronics*, dan aplikasi-aplikasi berukuran mikro lainnya. Selain pemanfaatan fluida nano untuk meningkatkan transfer kalor, fluida nano juga dimanfaatkan dalam *machining process*. Salah satu aplikasi penting dalam transfer kalor adalah pemanfaatan fluida nano sebagai *coolant* dalam proses milling dan drilling dengan metode MQL atau *minimum quantity lubrication* [6-8]. Penggunaan fluida nano dalam proses pemesinan tersebut dapat menghasilkan kekasaran (*roughness*) yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan *coolant* konvensional [9, 10].

Kinerja transfer kalor menggunakan fluida konvensional seperti air terbatas oleh sifat termal fluida yang kurang baik, sehingga dibutuhkan fluida lain untuk meningkatkan konduktivitas termalnya [11]. Teknik

modifikasi sifat-sifat termofisik fluida kerja transfer kalor dapat dilakukan dengan mendispersikan partikel berukuran nanometer ke dalam fluida dasar tersebut, yang disebut dengan fluida nano. Istilah fluida nano (*nanofluids*) pertama kali diusulkan oleh Choi [12]. Konduktivitas thermal yang meningkat akibat keberadaan partikel nano adalah salah satu alasan fluida nano berpotensi menjadi fluida transfer kalor yang menjanjikan jika digunakan pada fluks kalor yang tinggi [13-16]. Fluida nano memiliki beberapa keuntungan antara lain, mereduksi ukuran sistem transfer kalor, peningkatan transfer kalor, mereduksi biaya dan peralatan termal, meminimalisasi *clogging* (penyumbatan) dan pendinginan *microchannel* dan sistem miniatur lainnya [17]. Karakteristik *thermo hydraulics* fluida nano dalam sistem termal telah dilaporkan baik dalam kajian eksperimental maupun studi numerik oleh peneliti sebelumnya [18-21].

Penelitian secara numerik pada aliran laminar pipa lurus berpenampang lingkaran menggunakan fluida nano TiO_2 -water pada *entrance region* dengan menggunakan metode satu fasa (*single-phase approach*) menunjukkan bahwa partikel nano TiO_2 memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan merupakan partikel yang stabil [22]. Sheikhalipour dan Abbasi [23] melakukan analisis numerik transfer kalor pada fluida nano Al_2O_3 /air yang mengalir melalui pipa berpenampang *trapezoidal* dalam rejim aliran laminar sedang berkembang (*developing laminar*). Hasil analisis numerik dibandingkan baik secara eksperimen maupun metode *single-phase* dan *dispersion*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Eulerian-Lagrangian memprediksi bilangan Reynolds lebih akurat dibandingkan dengan model Buongiorno. Kajian peningkatan transfer kalor fluida nano TiO_2 /air telah dilakukan baik secara numerik maupun eksperimen. Investigasi numerik peningkatan transfer kalor fluida nano TiO_2 /air yang mengalir melalui saluran berpenampang lingkaran dan persegi telah dilakukan oleh Kristiawan, *et al.* [24, 25]. Selain itu, penelitian tentang transfer kalor konvektif fluida nano TiO_2 /air yang mengalir melalui *helical microfin tube* telah dilakukan secara *experimental* oleh Kristiawan, *et al.* [26].

Penelitian sebelumnya telah mengukur performansi laju transfer kalor konvektif fluida nano grafit pada aliran laminar dalam tabung berpenampang lingkaran. Peningkatan transfer kalor karena gerakan acak partikel nano dalam aliran utama perlu diperhitungkan. Beberapa faktor seperti gravitasi, gesekan antara fluida dan partikel padat, dan gaya Brownian, menyebabkan kemungkinan terjadinya fenomena difusi, sedimentasi, dan dispersi Brownian secara bersamaan dalam aliran utama fluida nano. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan slip antara fluida dan partikel nano tidak sama dengan nol [27]. Penelitian secara numerik pada pipa berpenampang lingkaran dengan fluida nano yang terdiri dari air dan 1 vol% Cu menggunakan metode pendekatan dua fasa (*two-phase mixture model*) dilakukan oleh Behzadmehr [28, 29]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan dua fasa (*two-phase mixture model*) adalah model yang lebih baik untuk mengaplikasikan transfer kalor konvektif pada fluida nano dibandingkan dengan metode satu fasa (*single-phase approach*).

Transfer kalor konvektif menggunakan fluida nano dapat dimodelkan menggunakan metode satu fasa (*single-phase approach*) atau dua fasa (*two-phase approach*). *Single-phase* model menyediakan kemungkinan pemahaman fungsi baik fasa fluida dan partikel solid dalam proses transfer kalor. Pada model ini, dispersi partikel nano dalam fluida dasar (*base fluid*) diansumsikan kontinum. Sedangkan, pada pendekatan *two-phase mixture model*, fasa fluida dan partikel solid diansumsikan dalam kesetimbangan termal dan bergerak dengan kecepatan yang sama. Ijam, *et al.* [30] meneliti kinerja pendinginan *microchannel* dengan *heatsink* menggunakan fluida nano. Mereka menemukan bahwa penggunaan fluida nano seperti Al_2O_3 /air, TiO_2 /air atau SiC /air meningkatkan pendinginan sebesar 3-17%. Fluida nano Al_2O_3 /air telah dikaji secara eksperimen untuk mengetahui peningkatan transfer kalor dan penurunan tekanan (*pressure drop*) dalam sebuah *counter flow concentric tube heat exchanger*. Konsentrasi partikel nano divariasikan dari 0,2% dan 0,3% dengan diameter partikel nano Al_2O_3 /air adalah 30 nm [31].

Penelitian secara eksperimental menggunakan fluida nano TiO_2 /air dengan fluks kalor konstan pada dinding pipa berpenampang lingkaran dalam aliran turbulen menunjukkan bahwa penambahan partikel nano ke dalam fluida dasar meningkatkan koefisien transfer kalor dan bilangan Nusselt seiring dengan bertambahnya bilangan Reynolds yang digunakan [32]. Liu, *et al.* [33] melakukan penelitian secara eksperimental menggunakan fluida nano Al_2O_3 /air pada *minichannel* dengan diameter 1,09 mm pada bilangan Reynolds antara 400 – 4100. Penelitian ini bertujuan mempelajari transfer kalor konvektif dan penurunan tekanan meningkat sebanding dengan peningkatan konsentrasi partikel nano yang digunakan. Penelitian ini menyarankan untuk melakukan kajian lebih lanjut dengan menggunakan bilangan Reynolds yang tinggi pada aliran turbulen, sehingga dalam penelitian ini mencoba untuk melakukan penelitian dengan metode numerik menggunakan partikel nano TiO_2 karena merupakan partikel yang aman, stabil, memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan mudah diproduksi dalam skala industri yang besar.

Pada penelitian ini, analisis peningkatan transfer kalor konvektif, penurunan tekanan, dan efektivitas fluida nano TiO_2 /air dalam *minichannel* di evaluasi secara numerik menggunakan perangkat lunak komputasi

dinamika fluida (*Computational Fluid Dynamics/CFD*) ANSYS 19.0 kode FLUENT dengan metode dua fasa (*multi-phase mixture model*). Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan data hasil simulasi numerik dengan data eksperimental. Adapun hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah terciptanya peralatan termal berukuran kecil dengan kinerja transfer kalor yang tinggi.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini menggunakan model *minichannel* dengan diameter 1,09 mm dan panjang 306 mm. Bilangan Reynolds yang digunakan yaitu 4000 – 20.000 pada aliran turbulen dengan fluks kalor konstan sebesar 6500 W/m². Eksperimen dilakukan secara numerik dengan metode pendekatan dua fasa (*multi-phase mixture model*) menggunakan fluida nano TiO₂/air dengan konsentrasi 1,0; 2,0; 3,5 dan 5 vol. %.

Persamaan dua fasa (*multi-phase mixture model*) digunakan untuk menganalisis dinamika dan termal nanofluida, yang dianggap sebagai fluida tunggal dengan fasa fluida dan partikel solid diasumsikan dalam kesetimbangan termal dan bergerak dengan kecepatan yang sama. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan untuk menyelesaikan dan memecahkan persamaan Governing secara numerik berdasarkan pada geometri dan kondisi batas yang telah dibuat. Persamaan yang digunakan antara lain persamaan kontinuitas, persamaan momentum, persamaan energi dan persamaan untuk pemodelan turbulensi yang digunakan.

Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Persamaan Momentum

Koordinat x:

$$\begin{aligned} \rho_m \left[u_m \left(\frac{\partial u_m}{\partial x} \right) + v_m \left(\frac{\partial u_m}{\partial y} \right) \right] = - \frac{\partial p_m}{\partial x} + \mu_m \left(\frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial y^2} \right) \\ + \rho_k \Phi \left[u_k \left(\frac{\partial u_k}{\partial x} \right) + v_k \left(\frac{\partial u_k}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Koordinat y:

$$\begin{aligned} \rho_m \left[u_m \left(\frac{\partial v_m}{\partial x} \right) + v_m \left(\frac{\partial v_m}{\partial y} \right) \right] = - \frac{\partial p_m}{\partial y} + \mu_m \left(\frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial y^2} \right) \\ + \rho_k \Phi \left[u_k \left(\frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + v_k \left(\frac{\partial v_k}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Persamaan Energi

Persamaan energi untuk *steady-state flow* dan *incompressible flow* pada kasus 2 dimensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \rho C_p \Phi \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \\ + \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

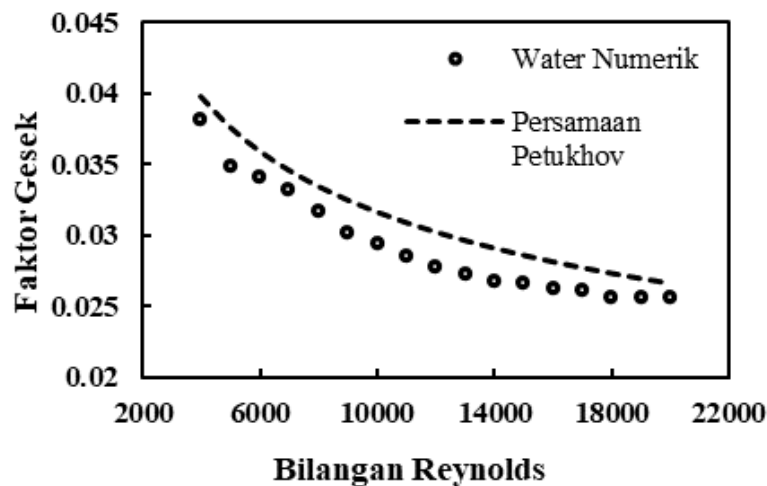
Beberapa *grid* diuji untuk mengetahui pengaruh hasil numerik terhadap *grid* yang berbeda. *Uniform grid meshing* dibandingkan untuk mengetahui hasil terbaik. Variasi *grid* yang diuji adalah 5x125, 25x125, dan 50x125 dengan mengaplikasikan faktor bias. Faktor bias digunakan untuk merapatkan mesh pada bagian-bagian penting yaitu dinding masuk pipa dan dinding pipa. Faktor bias yang digunakan dalam penelitian ini adalah 4 ke arah radial dan 25 ke arah aksial. Diantara *grid* yang diuji, *grid* 25x125 adalah yang paling mendekati korelasi seperti yang terlihat pada Gambar 1.



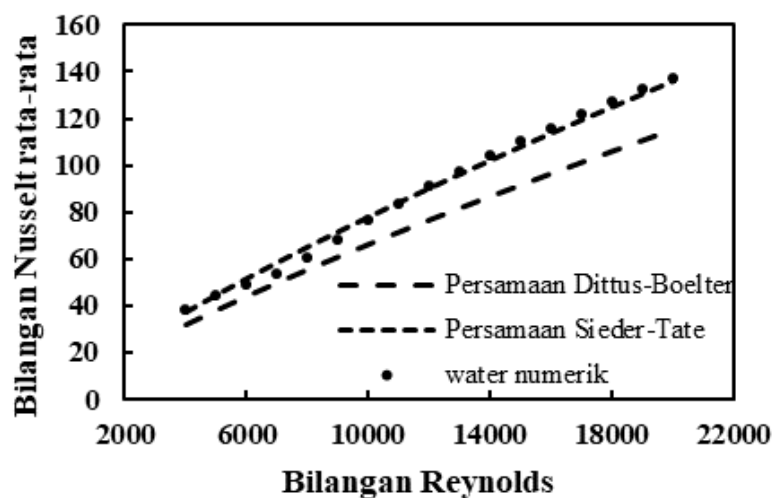
Gambar 1. Grid meshing pada model

Validasi penelitian dilakukan untuk memverifikasi akurasi dari penelitian menggunakan metode numerik dengan menggunakan air murni sebelum dilakukan dengan fluida nano. Pipa horizontal berpenampang lingkaran digambarkan secara 2 dimensi dengan ukuran domain pada simulasi sesuai dengan eksperimen yang dilakukan oleh Liu, *et al.* [33] yaitu dengan panjang 306 mm dan diameter 1,09 mm. Kondisi batas yang digunakan yaitu *velocity inlet*, *pressure outlet* dan *wall*. *Pressure outlet* digunakan pada saat *set up* agar tekanan di bagian outlet mendekati angka nol. Kecepatan seragam diaplikasikan pada bagian inlet dan fluks kalor konstan diaplikasikan pada bagian dinding sebesar 6500 W/m^2 dan tidak ada slip pada dinding.

Validasi penelitian menggunakan pemodelan turbulensi *k-ε*. Penggunaan pemodelan *k-ε* didasarkan pada nilai bilangan Reynolds yang rendah. Persamaan empiris yang digunakan adalah persamaan Dittus-Boelter dan Sieder-Tate untuk persamaan bilangan Nusselt dan menggunakan persamaan Petukhov [34] untuk persamaan faktor gesekan. Validasi dilakukan untuk membandingkan hasil antara simulasi dengan korelasi dan juga eksperimen [32]. Pada penelitian ini, hasil validasi numerik faktor gesekan (*f*) terlihat pada Gambar 2 sedangkan hasil validasi numerik bilangan Nusselt disajikan pada Gambar 3.



Gambar 2. Validasi faktor gesek fluida air dengan menggunakan persamaan Petukhov [34].



Gambar 3. Validasi perbandingan hasil numerik fluida air dengan korelasi Dittus-Boelter dan Sieder-Tate [33].

3. HASIL DAN DISKUSI

Pemodelan pada aliran turbulen dilakukan dengan melakukan verifikasi nilai konsentrasi partikel nano. Volume fraksi yang digunakan adalah 1,0; 2,0; 3,5 dan 5 vol.%. Pemodelan dilakukan pada *circular minichannel* dengan bilangan Reynolds 4000 – 20.000 dengan mengaplikasikan fluks kalor konstan sebesar 6500 W/m² dan kecepatan seragam pada bagian *inlet*.

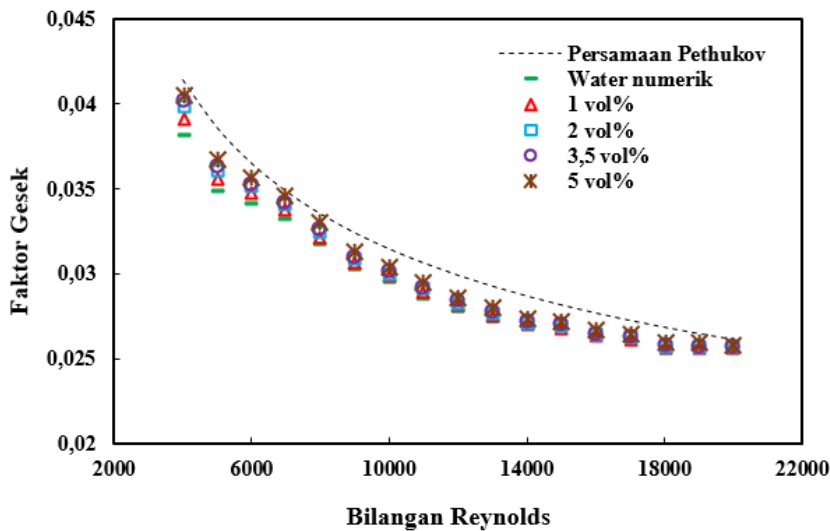
$$Nu(x) = \frac{h(x)D_h}{k_f(x)} \quad (5)$$

Bilangan Nusselt dan faktor gesekan menjadi penting untuk membandingkan perubahan yang terjadi dengan menggunakan korelasi.

Korelasi faktor gesek persamaan Petukhov [34]

$$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (6)$$

Gambar 4 menunjukkan perbandingan hasil numerik fluida nano TiO₂/air dengan berbagai variasi konsentrasi partikel nano terhadap persamaan Pethukov. Perhitungan numerik menghasilkan nilai faktor gesekan fluida nano yang diamatai yang lebih rendah dari Persamaan Pethukov dan fluida konvensional air. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan partikel nano membantu menurunkan faktor gesekan pada aliran turbulen.



Gambar 4. Faktor gesek terhadap bilangan Reynolds fluida nano *multi-phase mixture model*

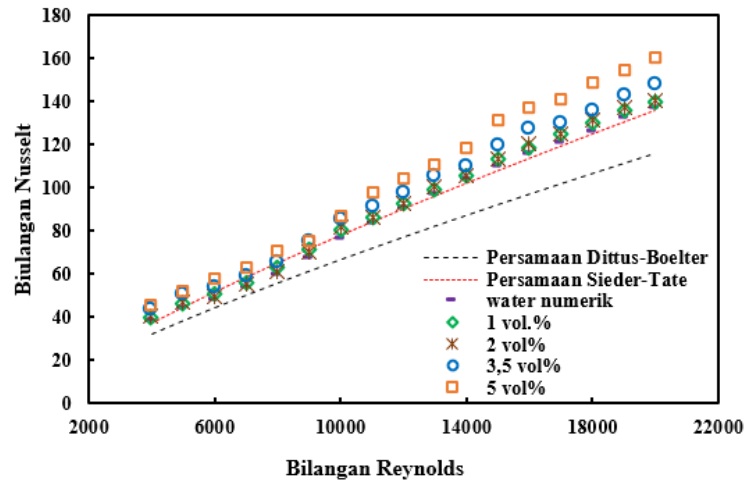
Korelasi bilangan Nusselt Dittus-Boelter [34].

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (7)$$

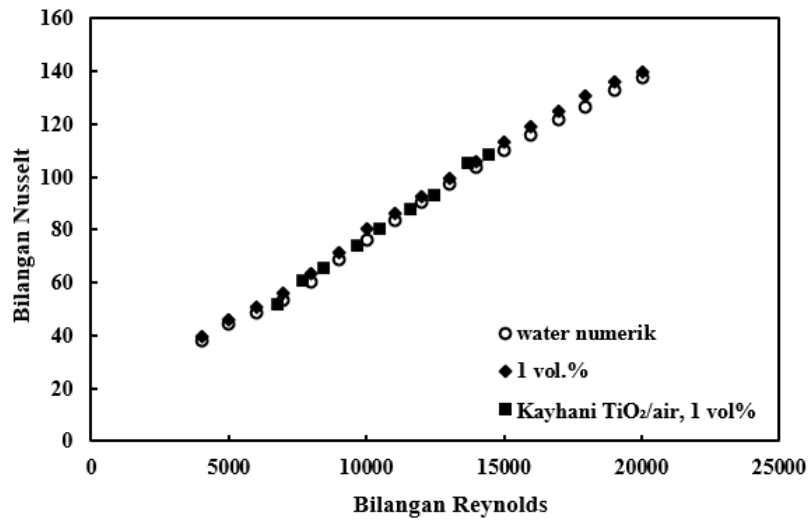
Korelasi bilangan Nusselt Sieder-Tate [34].

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_m} \right) \quad (8)$$

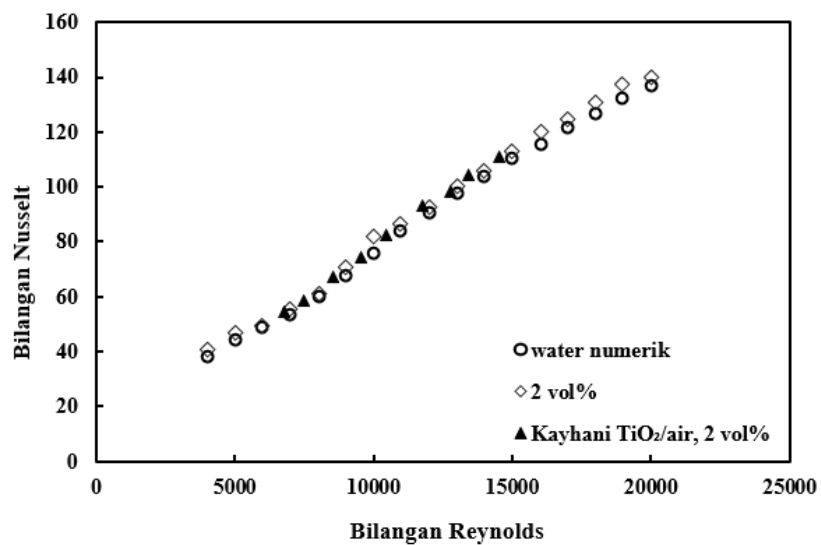
Perbandingan antara tiap fraksi volume yang digunakan dalam penelitian dibandingkan dengan hasil eksperimen [32]. Gambar 5 menyajikan nilai bilangan Nusselt fluida nano pada semua variasi konsentrasi dan dibandingkan dengan persamaan Dittus-Boelter dan persamaan Seider-Tate. Gambar 6 sampai dengan Gambar 9 menunjukkan perbandingan hasil numerik tiap-tiap konsentrasi partikel nano terhadap penelitian sebelumnya. Nilai koefisien transfer kalor berbanding lurus dengan hasil dari bilangan Nusselt. Sesuai teori yang digunakan untuk mencari bilangan Nusselt untuk kondisi fluks kalor konstan adalah $Nu = hD/k$, maka bilangan Nusselt pada $Re = 4000$ lebih kecil dibandingkan pada $Re = 20.000$. Volume fraksi juga mempengaruhi peningkatan bilangan Nusselt. Efektifitas penggunaan fluida nano pada penelitian ini dapat disimpulkan terjadi pada volume fraksi 5,0 vol%.



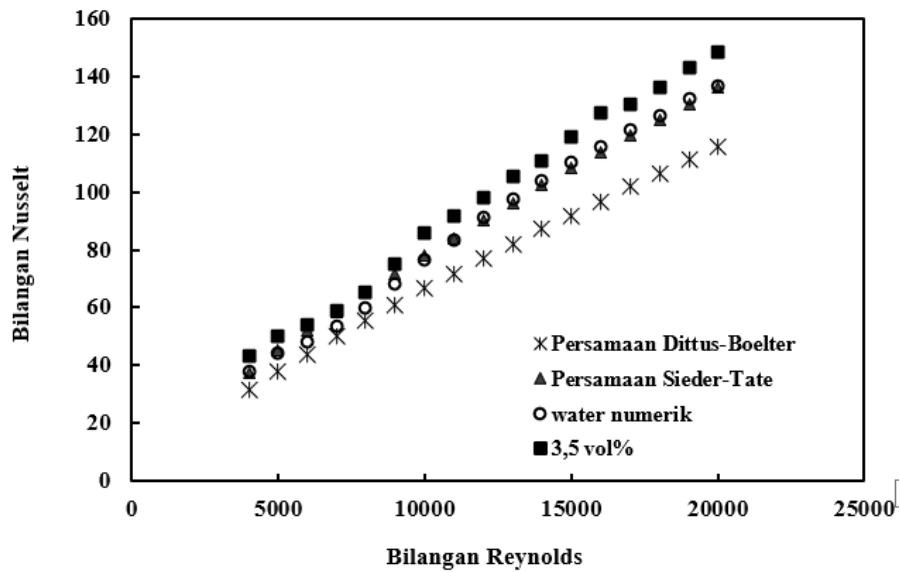
Gambar 5. Bilangan Nusselt terhadap bilangan Reynolds fluida nano *multi-phase mixture model*



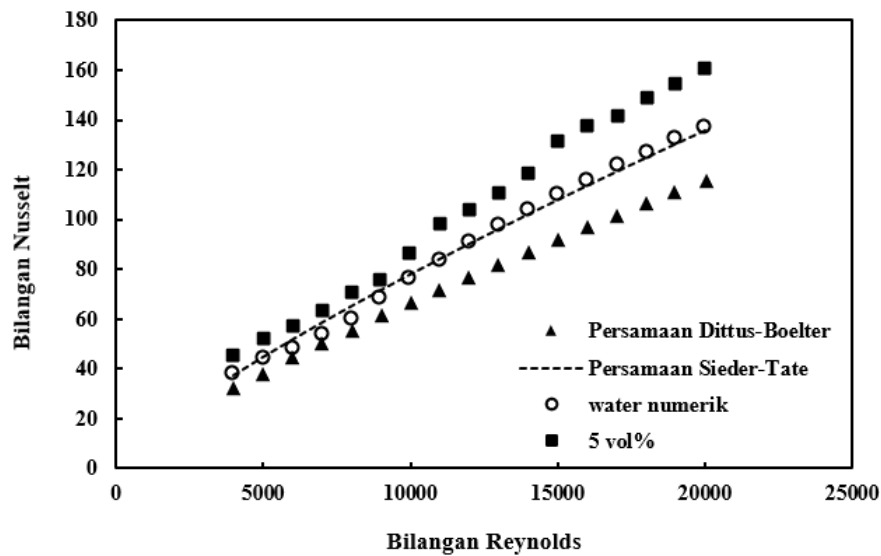
Gambar 6. Bilangan Nusselt terhadap bilangan Reynolds fluida nano 1,0 vol.% *multi-phase mixture model*



Gambar 7. Bilangan Nusselt terhadap bilangan Reynolds fluida nano 2,0 vol.% *multi-phase mixture model*



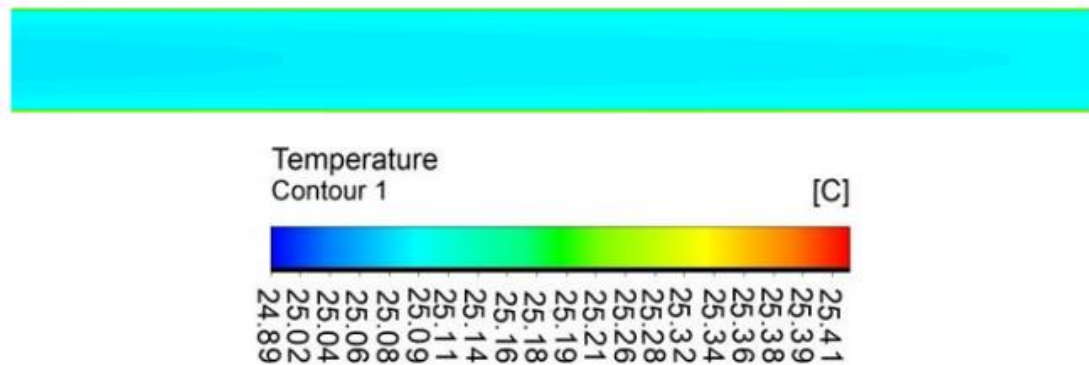
Gambar 8. Bilangan Nusselt terhadap bilangan Reynolds fluida nano 3,5 vol.% *multi-phase mixture model*



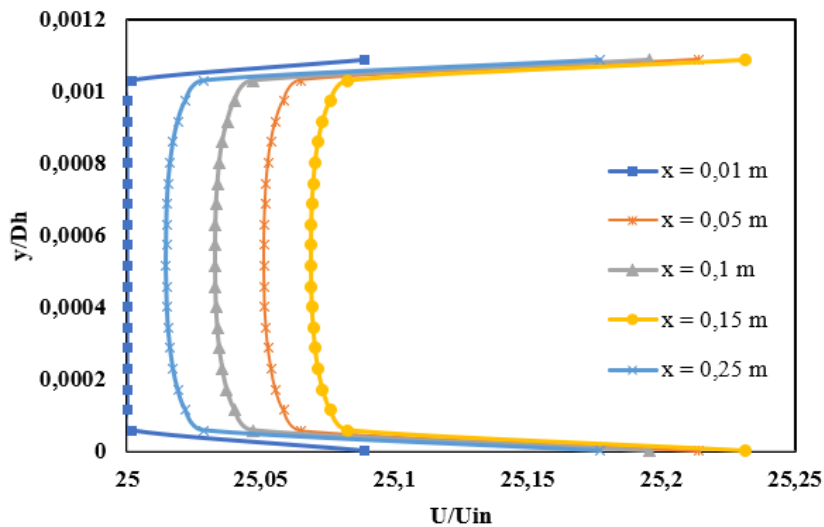
Gambar 9. Bilangan Nusselt terhadap bilangan Reynolds fluida nano 5,0 vol.% *multiphase mixture model*

Dari data-data bilangan Nusselt dari Gambar 6 sampai 9 akan didapatkan nilai koefisien transfer kalor konveksi yang dikalkulasi berdasarkan persamaan (5). Nilai koefisien transfer kalor konveksi pada kisaran bilangan Reynolds 4000–20.000 dengan volume fraksi fluida nano TiO_2/air 1,0; 2,0; 3,5; dan 5,0 vol.% masing-masing sebesar 5,18%, 7,4%, 12,4%, and 14,3%.

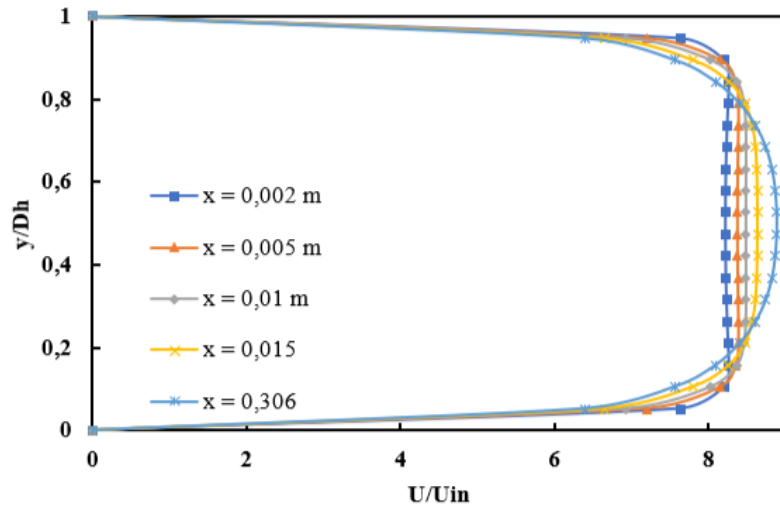
Gambar 10 menunjukkan profil distribusi temperatur untuk fluida nano TiO_2 /air dengan fraksi volume 5,0 vol.% pada $\text{Re} = 10.000$. Terlihat bahwa kontur temperatur mempunyai warna yang seragam. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran telah mencapai berkembang penuh (*fully developed flow*). Hasil dari plot kontur temperatur ini sama dengan distribusi temperatur terhadap arah radialnya seperti terlihat pada Gambar 11. Terlihat dengan jelas bahwa pada gambar ini pola distribusi temperatur mempunyai pola yang sama. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak ada perubahan temperatur terhadap arah aksialnya. Gambar 12 distribusi kecepatan terhadap arah aksialnya dari sisi masuk (*inlet*). Terlihat bahwa pada dekat sisi masuk, profil kecepatan masih berubah. Hal ini mengindikasikan bahwa pada dekat sisi masuk, aliran sedang berkembang (*developing flow*) dalam jarak yang tidak terlalu jauh dari sisi masuk.



Gambar 10. Profil distribusi temperatur dengan konsentrasi partikel nano 5,0 vol.% pada $\text{Re} = 10.000$ *multi-phase mixture model*



Gambar 11. Profil temperatur hasil simulasi dengan konsentrasi partikel nano 5,0 vol.% pada $\text{Re} = 10.000$ *multi-phase mixture model*



Gambar 12. Profil kecepatan hasil simulasi dengan konsentrasi partikel nano 5 vol% pada $Re = 10000$ *multi-phase mixture model*

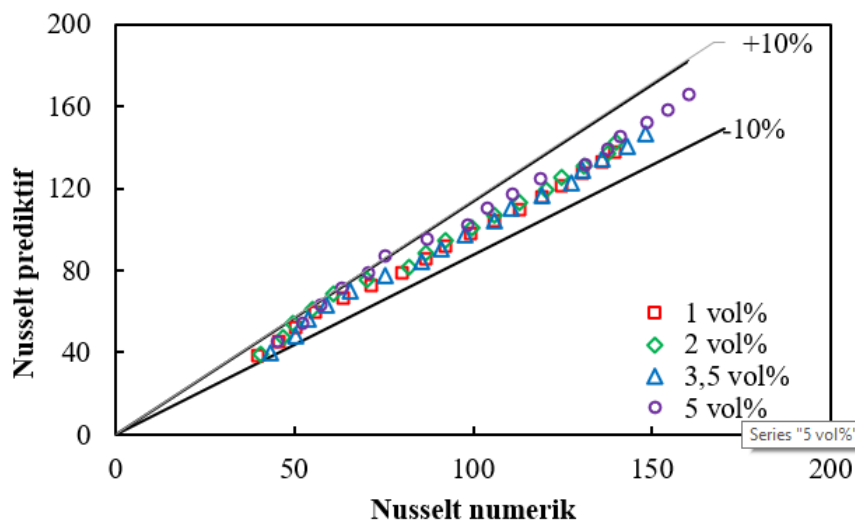
Sebuah persamaan baru yang memiliki akurasi lebih baik untuk memprediksi performa transfer kalor fluida nano adalah salah satu hal yang penting. Berikut adalah persamaan Nusselt dari Sieder-Tate [34] yang digunakan sebagai acuan dalam mencari persamaan baru :

$$Nu_{nf} = C(Re^{0,8}Pr^M) \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^N \tag{9}$$

Dari persamaan diatas, persamaan prediksi dari performa perpindahan kalor untuk fluida nano pada metode *multi-phase mixture model* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Nu_{nf} = 0,0065(Re^{0,8}Pr^{1,84}) \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0,02} \tag{10}$$

Perbandingan bilangan Nusselt dari persamaan empirik (Pers. 11) terhadap hasil numerik disajikan pada Gambar 13. Terlihat jelas bahwa terdapat *margin error* sebesar $\pm 10\%$ sehingga dapat disimpulkan bahwa persamaan bilangan Nusselt yang diusulkan dapat diterima.

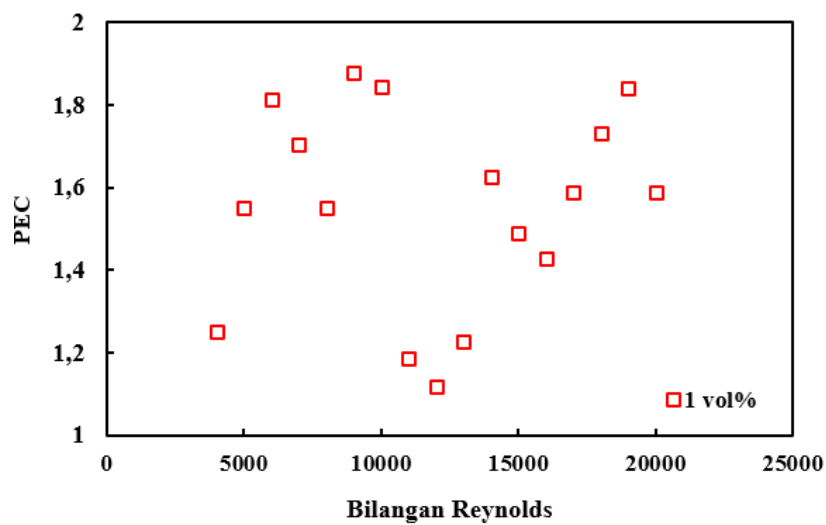


Gambar 13. Nusselt simulasi dan Nusselt prediktif *multi-phase mixture model*

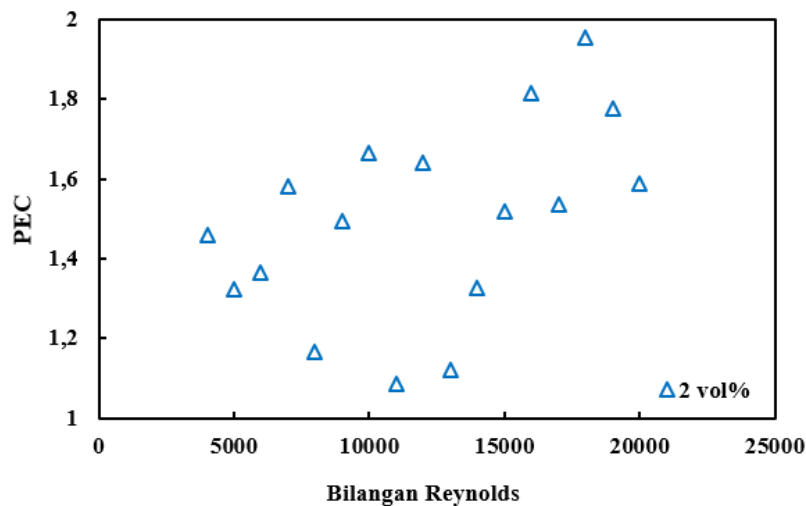
Selain meningkatkan kinerja transfer kalor, penggunaan fluida nano juga menyebabkan peningkatan *pressure drop*. Untuk mengetahui dominasi kedua peningkatan tersebut, maka pada penelitian ini menggunakan parameter tak berdimensi yang disebut dengan *Performance Evaluation Criterion* (PEC) dapat didefinisikan sebagai:

$$PEC = \frac{Nu_{nf} / Nu_{water}}{(f_{nf} / f_{water})^{\frac{1}{3}}} \quad (11)$$

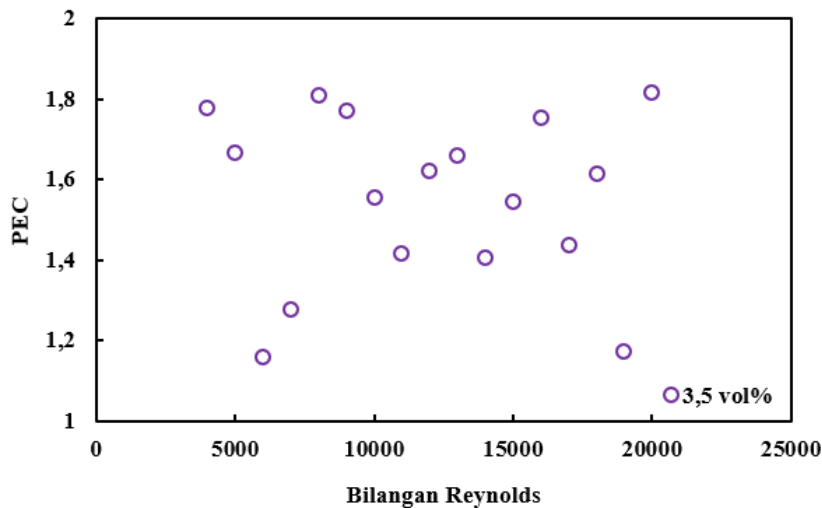
Gambar 14 sampai 17 masing-masing menunjukkan nilai PEC untuk setiap fraksi volume yang divariasikan, yaitu 1,0; 2,0; 3,5 dan 5,0%. Terlihat jelas bahwa semua variasi fraksi volume menunjukkan nilai PEC diatas 1,0. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan transfer kalor fluida nano lebih dominan dibandingkan dengan peningkatan *pressure drop*. Aliran acak turbulen menyebabkan nilai PEC yang berflutuasi terhadap bilangan Reynolds. Nilai maksimal PEC yang dihasilkan mencapai 2,0 yang berarti bahwa peningkatan tansfer kalor fluida nano mencapai 2 kali lebih besar jika dibandingkan peningkatan *pressure drop*-nya.



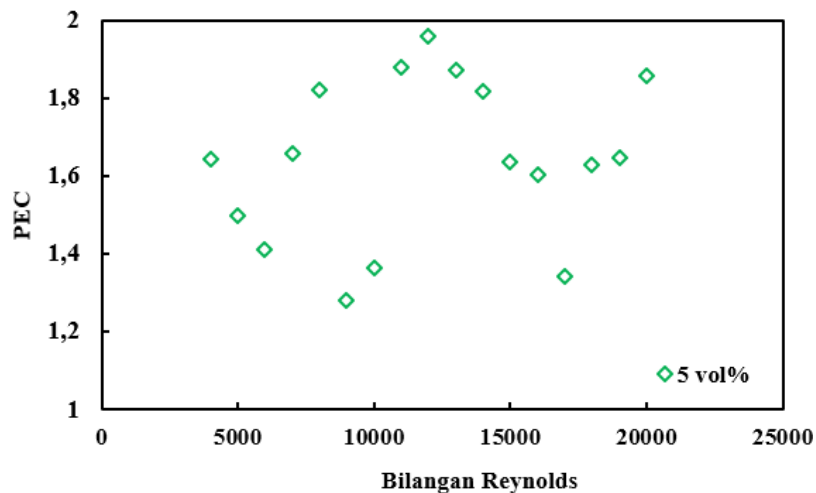
Gambar 14. PEC fluida nano terhadap bilangan Reynolds *multi-phase mixture model* pada volume fraksi 1,0 vol.%



Gambar 15. PEC fluida nano terhadap bilangan Reynolds *multi-phase mixture model* pada volume fraksi 2,0 vol.%



Gambar 16. PEC fluida nano terhadap bilangan Reynolds *multi-phase mixture model* pada volume fraksi 3,5 vol.%



Gambar 17. PEC fluida nano terhadap bilangan Reynolds *multi-phase mixture model* pada volume fraksi 5,0 vol.%

4. KESIMPULAN

Setelah melakukan eksperimen dan analisis perhitungan data, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode *multi-phase mixture model (Eularian Approach)* dapat digunakan sebagai salah satu penyelesaian untuk menganalisis transfer kalor konveksi fluida nano TiO_2/air pada *circular minichannel* dengan aliran turbulen.
2. Nilai rata-rata peningkatan transfer kalor pada bilangan Reynolds 4000–20.000 dengan volume fraksi fluida nano TiO_2/air 1,0; 2,0; 3,5; dan 5,0 vol.% adalah sebesar 8,16% dengan peningkatan minimal pada volume fraksi 2,0 vol.% dan bilangan Reynolds 6000 sebesar 1,47% serta peningkatan maksimal pada volume fraksi 5,0 vol.% dan bilangan Reynolds sebesar 19,32%.
3. Penggunaan fluida nano lebih efisien dibandingkan dengan penggunaan air karena peningkatan transfer kalor yang lebih besar dan menghasilkan bilangan Nusselt yang lebih besar pula terlihat dari nilai PEC yang dihasilkan.

5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Sebelas Maret yang telah mendukung dan memfasilitasi penelitian ini dalam skema Penelitian Fundamental (PF-UNS) dengan Nomor Kontrak: 260/UN27.22/HK.07.00/2021.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] WIJAYANTA, A.T., et al., "Internal flow in an enhanced tube having square-cut twisted tape insert", *Energies*, v. 12, n. 2, pp. 1-12, 2019.
- [2] MARADIYA, C., VADHER, J., and AGARWAL, R., "The heat transfer enhancement techniques and their Thermal Performance Factor", *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 7, n., pp. 1-21, 2018.
- [3] CHAMOLI, S., et al., "Heat transfer in a turbulent flow tube integrated with tori as vortex generator inserts", *Applied Thermal Engineering*, v. 194, n., pp. 117062, 2021.
- [4] GURURATANA, S. and SKULLONG, S., "Experimental investigation of heat transfer in a tube heat exchanger with airfoil-shaped insert", *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 14, n., pp. 100462, 2019.
- [5] PROMVONGE, P. and SKULLONG, S., "Heat transfer in a tube with combined V-winglet and twin counter-twisted tape", *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 26, n., pp. 101033, 2021.
- [6] CHINCHANIKAR, S., KORE, S.S., and HUJARE, P., "A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining", *Journal of Manufacturing Processes*, v. 68, n., pp. 56-70, 2021.
- [7] SHARMA, A.K., TIWARI, A.K., and DIXIT, A.R., "Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review", *Journal of Cleaner Production*, v. 127, n., pp. 1-18, 2016.
- [8] ROY, S., et al., "A Brief Review on Effects of Conventional and Nano Particle Based Machining Fluid on Machining Performance of Minimum Quantity Lubrication Machining", *Materials Today: Proceedings*, v. 18, n., pp. 5421-5431, 2019.
- [9] SUGIANTORO, B., et al., "Studies the cold cooling using bionanofluids, characteristics and applications in milling operations on high-hardness steels", *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 10, n. 1, pp. 77-86, 2019.
- [10] KRISTIAWAN, B., et al., "Investigation on Tribological Behavior of Al₂O₃ Nano Cutting Fluid under Minimum Quantity Lubrication Technique", in: *Grand Renewable Energy*, PP. Yokohama, Jepang, 2018.
- [11] DUANGTHONGSUK, W. and WONGWISES, S., "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*, v. 53, n. 1, pp. 334-344, 2010.
- [12] CHOI, S.U.S., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *ASME-Publications-Fed.*, v. 231, n., pp. 99-106, 1995.
- [13] FORMALIK-WAJS, E., ROSZKO, A., and DONIZAK, J., "Nanofluid flow driven by thermal and magnetic forces – Experimental and numerical studies", *Energy*, v. 201, n., pp. 117658, 2020.
- [14] LODDO, V. and CAMERA RODA, G., 8 - *Heat transfer by using TiO₂ nanofluids*, in *Titanium Dioxide (TiO₂) and Its Applications*, F. Parrino and L. Palmisano, Editors. 2021, Elsevier. p. 267-307.
- [15] Waqas, H., et al., "Thermal transport in magnetized flow of hybrid nanofluids over a vertical stretching cylinder", *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 27, n., pp. 101219, 2021.
- [16] ELSAID, K., et al., "Thermophysical properties of graphene-based nanofluids", *International Journal of Thermofluids*, v. 10, n., pp. 100073, 2021.
- [17] HAGHSHENAS FARD, M., ESFAHANY, M.N., and TALAIE, M.R., "Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 37, n. 1, pp. 91-97, 2010.
- [18] KRISTIAWAN, B., et al., "Thermo-hydraulic characteristics of anatase titania nanofluids flowing through a circular conduit", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 16, n., pp. 6078–6085, 2016.
- [19] TANG, J., et al., "Thermo-hydraulic performance of nanofluids in a bionic heat sink", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 127, n., pp. 105492, 2021.
- [20] ZHAI, X., et al., "Thermo-hydraulic performance of nanofluids under adjustable magnetic field", *Applied Thermal Engineering*, v. 186, n., pp. 116491, 2021.
- [21] KAOOD, A. and HASSAN, M.A., "Thermo-hydraulic performance of nanofluids flow in various internally corrugated tubes", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 154, n., pp. 108043, 2020.
- [22] HE, Y., et al., "Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions", *Applied Thermal Engineering*, v. 29, n. 10, pp. 1965–1972, 2009.
- [23] SHEIKHALIPOUR, T. and ABBASSI, A., "Numerical analysis of nanofluid flow inside a trapezoidal microchannel using different approaches", *Advanced Powder Technology*, v. 29, n. 7, pp. 1749-1757,

- 2018.
- [24] KRISTIAWAN, B., et al., "Heat transfer enhancement of TiO₂/water nanofluid at laminar and turbulent flows: A numerical approach for evaluating the effect of nanoparticle loadings", *Energies*, v. 11, n. 6, pp. 1-15, 2018.
 - [25] KRISTIAWAN, B., et al., "Heat Transfer Enhancement of TiO₂/Water Nanofluids Flowing Inside a Square Minichannel with a Microfin Structure: A Numerical Investigation", *Energies*, v. 12, n. 16, pp., 2019.
 - [26] KRISTIAWAN, B., et al., "Enhancing the thermal performance of TiO₂/water nanofluids flowing in a helical microfin tube", *Powder Technology*, v. 376, n., pp. 254-262, 2020.
 - [27] XUAN, Y. and LI, Q., "Heat transfer enhancement of nanofluid Heat transfer enhancement of nanofluids", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 21, n. 1, pp. 58-64, 2000.
 - [28] BEHZADMEHR, A., SAFFAR-AVVAL, M., and GALANIS, N., "Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 28, n. 2, pp. 211-219, 2007.
 - [29] KRISTIAWAN, B., et al., "Numerical investigation of laminar convective heat transfer for TiO₂/water nanofluids using two-phase mixture model (Eulerian approach)", in: *International Conference on Engineering, Science and Nanotechnology (ICESNANO 2016)*, PP. 1-9, Surakarta, 2017.
 - [30] IJAM, A. and SAIDUR, R., "Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices)", *Applied Thermal Engineering*, v. 32, n., pp. 76-82, 2012.
 - [31] MARALI, A.M., WAHYUDI, S., and HAMIDI, N., "Analisa transfer panas dan pressure drop fluida nano Al₂O₃-air proses pendinginan dengan metode simulasi", *Jurnal Rekayasa Mesin* v. 9, n. 9, pp. 103-108, 2018.
 - [32] KAYHANI, M.H., et al., "Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 39, n. 3, pp. 456-462, 2012.
 - [33] LIU, D. and YU, L., "Single-phase thermal transport of nanofluids in a minichannel ", *Journal of Heat Transfer*, v. 133, n. 3, pp. 11, 2011.
 - [34] CENGEL, Y.A., *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2nd ed. 2002, Texas, US: Mcgraw-Hill.