

Studi Numerik Perpindahan Panas Konveksi-Gabungan Fluida Nano ZrO₂-Air pada Berkas 7-Silinder Vertikal

Diah Hidayanti, Nathanael P. Tandian dan Aryadi Suwono

Program Studi Rekayasa Nuklir, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132
diahhidayanti@yahoo.com

Abstrak

Studi Numerik Perpindahan Panas Konveksi-Gabungan Fluida Nano ZrO₂-Air pada Berkas 7-Silinder Vertikal. Kinerja perpindahan panas ditentukan antara lain oleh karakteristik fluida perpindahan panas yang digunakan. Penelitian tentang perpindahan panas fluida nano merupakan suatu langkah inovasi dalam mencari fluida perpindahan panas alternatif dengan kinerja yang lebih baik. Makalah ini menyajikan tentang penelitian numerik perpindahan panas konveksi-gabungan fluida nano ZrO₂-air pada berkas 7-silinder vertikal yang dipanaskan dengan fluks panas secara seragam dalam susunan heksagonal dengan P/D 1,32. Simulasi numerik dilakukan menggunakan CFD FLUENT 6.3.26 dengan mengasumsikan fluida nano sebagai fluida satu fasa. Pengaruh konsentrasi dan laju alir fluida nano terhadap koefisien perpindahan panas dianalisis pada kondisi aliran laminar yang masih berkembang pada rentang konsentrasi 1-3% volume dan debit aliran masuk 6-12 liter per menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada debit aliran masuk yang konstan, koefisien perpindahan panas lokal fluida nano ZrO₂-air lebih rendah daripada koefisien perpindahan panas lokal air murni. Koefisien perpindahan panas lokal fluida nano ZrO₂-air mengalami penurunan hingga 18% (dibandingkan dengan koefisien perpindahan panas air murni) ketika konsentrasi partikel nano mencapai 3%. Efek resultant dari perubahan sifat-sifat fisik fluida nano diduga memiliki kontribusi terhadap penurunan kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO₂-air. Pada konsentrasi fluida nano yang konstan, koefisien perpindahan panas lokal fluida nano ZrO₂-air meningkat jika debit aliran bertambah.

Kata kunci: fluida nano ZrO₂-air, konveksi-gabungan, berkas 7-silinder vertikal, konsentrasi-volume, laju alir

Abstract

Numerical Study on Mixed-Conductive Heat Transfer of ZrO₂-Water Nanofluid in 7-Vertical Rod Bundle. Performance of convective heat transfer depends on the characteristics of the heat transfer fluid. Researches on nanofluid heat transfer are innovative ways to find alternative heat transfer fluid (coolants) with better performances. This paper presents a numerical investigation on mixed-conductive heat transfer of ZrO₂-water nanofluid in a hexagonal array of seven uniformly heated vertical rods with pitch to diameter ratio (P/D) of 1.32. The numerical simulation was done using CFD FLUENT 6.3.26 by assuming nanofluid as a single phase fluid. The effects of nanofluid concentration and flow rate on the heat transfer coefficient are studied under developing laminar flow condition at the range of 1-3 vol % of nanoparticle concentration and 6-12 liter per minute of inlet flow rate. Simulation results show that at constant inlet flow rate, the local heat transfer coefficient of ZrO₂-water nanofluid is lower than that of water. The local heat transfer coefficient of ZrO₂-water nanofluid decreases 18% (compared to that of pure water) when the nanoparticle concentration reaches 3 vol %. The resultant effect of nanofluid properties change is predicted contributing to the decrease of the heat transfer performance of nanofluid. Furthermore, at constant nanofluid concentration, the heat transfer coefficient of ZrO₂-water nanofluid increases as the nanofluid flow rate increases.

Keywords: ZrO₂-water nanofluid, mixed-convection, 7-vertical rod bundle, volume-concentration, flow rate

Pendahuluan

Meningkatnya beban termal pada berbagai aplikasi teknologi serta adanya kebutuhan akan miniaturisasi peralatan menimbulkan motivasi untuk mengembangkan fluida perpindahan panas (*heat transfer fluid*) dengan kinerja yang lebih baik daripada kinerja fluida perpindahan panas konvensional, seperti air, minyak, atau etilen glikol.

Pada awalnya, upaya tersebut dilakukan dengan menambahkan partikel-partikel padat berukuran kecil (mm atau μm) ke dalam fluida perpindahan panas konvensional sebagai fluida dasar (*base fluid*-nya). Hasilnya menunjukkan adanya peningkatan konduktivitas termal fluida campuran dibandingkan dengan konduktivitas termal fluida dasar. Namun ternyata penambahan partikel padatan tersebut menimbulkan beberapa masalah, seperti abrasi, penyumbatan kanal, dan peningkatan *pressure drop*.

Dengan kemajuan teknologi material yang dicapai saat ini, telah dimungkinkan pembuatan partikel-partikel berukuran nm yang dapat ditambahkan ke dalam fluida dasar sehingga membentuk suatu fluida nano (*nanofluid*). Ukuran partikel nano yang digunakan umumnya berkisar 1-100 nm. Fluida nano dinilai cukup prospektif sebagai fluida perpindahan panas alternatif karena memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada konduktivitas termal fluida pendingin konvensional, serta dapat mengatasi masalah-masalah yang timbul pada penambahan partikel-partikel padat berukuran mm atau μm .

Selain penelitian mengenai konduktivitas termal fluida nano, penelitian tentang kemampuan perpindahan panas konveksi fluida nano juga banyak dilakukan, terutama pada moda konveksi paksa. Pada moda konveksi paksa, mayoritas hasil penelitian menunjukkan bahwa fluida nano memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi daripada air maupun etilen glikol (He dkk. 2007, Vajjha dkk. 2010, Kim dkk. 2009). Di sisi lain, pada moda konveksi-gabungan dan konveksi alamiah, jumlah penelitian fluida nano yang dilakukan belum terlalu banyak dan masih dijumpai kontradiksi pada beberapa hasil penelitian (Putra dkk. 2003, Khanafer dkk. 2003). Hal itu menunjukkan bahwa karakteristik perpindahan panas fluida nano masih perlu digali lebih jauh lagi untuk dapat menjelaskan penyebab peningkatan maupun penurunan kemampuan perpindahan panas konveksi fluida nano jika dibandingkan dengan fluida dasarnya.

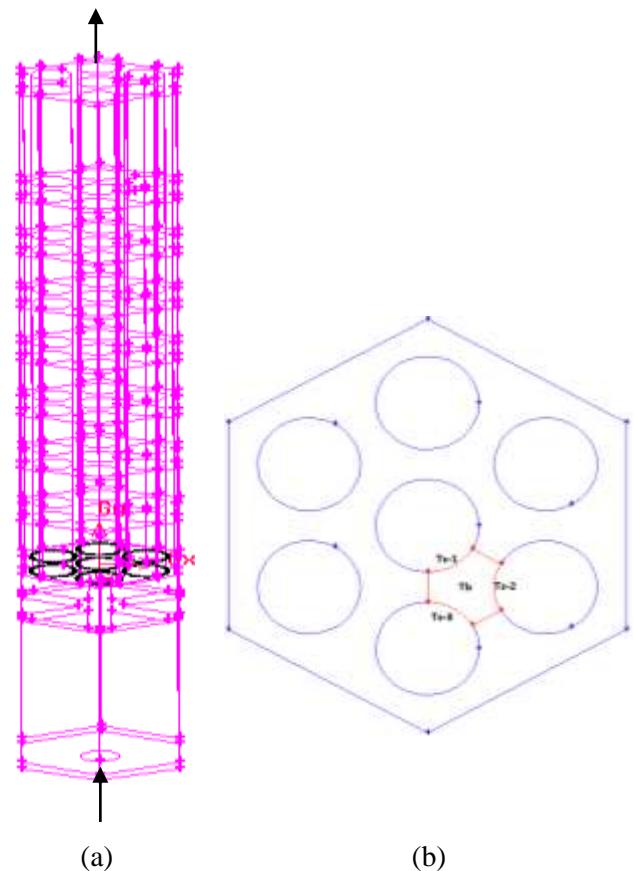
Makalah ini bertujuan untuk melakukan studi karakteristik perpindahan panas konveksi-gabungan fluida nano ZrO_2 -air pada berkas 7-silinder vertikal

yang disusun secara heksagonal. Aplikasi perpindahan panas pada subbuluh yang dibentuk oleh sejumlah silinder vertikal dengan susunan tertentu banyak dijumpai, misalnya pada teras (*core*) reaktor nuklir dan *heat exchanger* tipe *shell and tube* dengan aliran vertikal. Pada penelitian ini, pengaruh konsentrasi dan laju alir fluida nano terhadap koefisien perpindahan panas dianalisis pada kondisi aliran laminar yang masih berkembang.

Pemodelan Numerik

1. Domain spasial

Geometri kanal perpindahan panas yang dianalisis berupa subbuluh yang dibentuk oleh 7 buah silinder pemanas vertikal yang disusun secara heksagonal dengan perbandingan *pitch* terhadap diameter (P/D) 1,32 (lihat Gambar 1).



Gambar 1. (a) Geometri subbuluh perpindahan panas konveksi-gabungan. (b) Susunan heksagonal berkas 7-silinder vertikal

Diameter dan panjang aktif pemanas masing-masing 2,7 cm dan 35 cm. *Mesh* yang digunakan pada analisis numerik subbuluh seluruhnya berupa tipe *hex/wedge cooper* dengan penambahan *boundary*

layer pada permukaan dinding pemanas. Ukuran grid dalam arah vertikal (pada subbuluh) dibuat konstan.

2. Kondisi batas

Kecepatan pada *inlet* adalah seragam dan konstan sehingga memberikan debit aliran tertentu, yaitu 6, 8, 10, dan 12 liter per menit. Temperatur masukan adalah seragam dan konstan 300 K. Kondisi batas termal pada dinding pemanas adalah fluks panas konstan dan seragam dengan daya total pada setiap silinder sebesar 500 W.

3. Simulasi numerik

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak CFD FLUENT 6.3.26. Pada penelitian ini, fluida nano dimodelkan dengan pendekatan satu fasa. Simulasi numerik dilakukan pada kondisi tunak dengan rezim aliran laminar yang masih berkembang dengan variasi debit aliran masuk 6-12 liter per menit. Konsentrasi fluida nano divariasikan pada rentang 1-3% volume. Untuk melihat kinerja perpindahan panas fluida nano, dilakukan pula komparasi dengan kinerja fluida air.

4. Sifat-sifat fisik fluida nano

Penentuan sifat-sifat fisik fluida nano sangat penting karena diperlukan untuk menganalisis kemampuan perpindahan panas fluida nano. Fluida nano yang dikaji dalam penelitian ini adalah fluida nano zirkonia-air (ZrO_2 -air) dengan nilai sifat-sifat fisik, yaitu konduktivitas termal dan viskositas, sebagai fungsi konsentrasi dan temperatur mengacu pada korelasi Rea dkk. (2009) sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1) dan (2).

$$k(\phi, T) = k_{bf}(T)(1 + 2,4505\phi - 29,867\phi^2) \quad (1)$$

$$\mu(\phi, T) = \mu_{bf}(T)(1 + 46,801\phi + 550,82\phi^2) \quad (2)$$

Sifat-sifat fisik lainnya ditentukan berdasarkan asumsi campuran ideal sebagai berikut:

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

$$\rho_{nf}c_{p,nf} = (1 - \phi)\rho_{bf}c_{p,bf} + \phi\rho_p c_{p,p} \quad (4)$$

Kalor jenis spesifik dan *bulk density* untuk ZrO_2 masing-masing adalah 418 J/kg.K dan 5600 kg/m³.

5. Pengolahan data

Sifat-sifat fisik fluida dievaluasi pada temperatur *film* (T_f):

$$T_f = \frac{T_s + T_b}{2} \quad (5)$$

Temperatur *bulk* didefinisikan sebagai temperatur rata-rata fluida pada subbuluh, sedangkan temperatur permukaan yang digunakan adalah rata-rata dari temperatur ketiga pemanas yang membentuk satu subbuluh (lihat Gambar 1(b)).

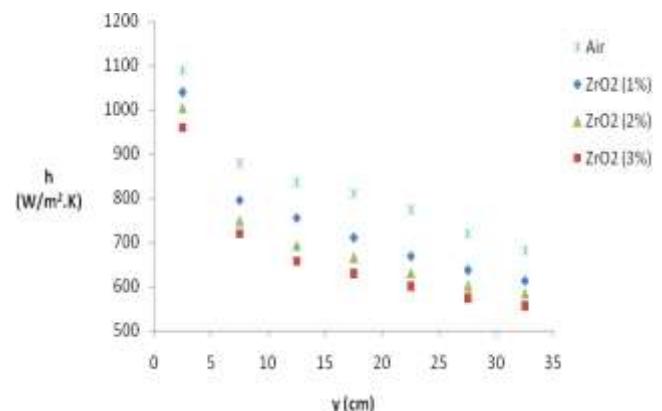
$$T_s = \frac{T_{s1} + T_{s2} + T_{s3}}{3} \quad (6)$$

Koefisien perpindahan panas fluida nano ditentukan menurut Persamaan (7):

$$h = \frac{q''}{T_s - T_b} \quad (7)$$

Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini, variasi konsentrasi-volume fluida nano ZrO_2 -air yang dianalisis adalah 1%, 2%, dan 3%. Untuk dapat menilai sejauh mana kinerja perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air maka dilakukan pula analisis terhadap kemampuan perpindahan panas air murni agar dapat dibandingkan dengan kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air. Pengaruh konsentrasi partikel nano terhadap kemampuan perpindahan panas konveksi-gabungan fluida nano ZrO_2 -air dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Profil aksial koefisien perpindahan panas konveksi-gabungan fluida nano ZrO_2 -air sebagai fungsi konsentrasi partikel nano

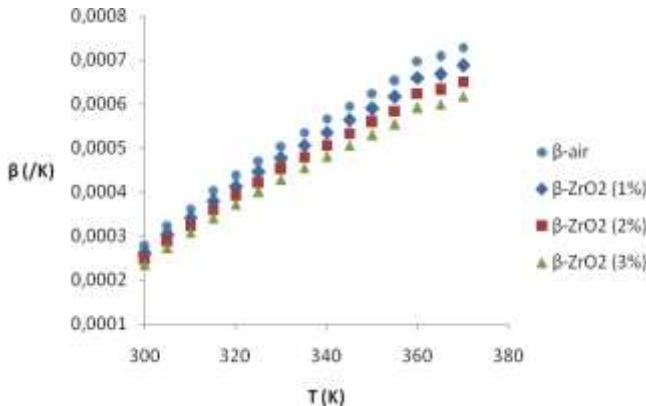
Gambar 2 menunjukkan dengan jelas bahwa air memiliki koefisien perpindahan panas lokal yang lebih tinggi daripada fluida nano ZrO_2 -air. Kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air pada moda konveksi-gabungan justru mengalami penurunan ketika konsentrasi partikel nano bertambah. Penurunan koefisien perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air mencapai 18% (jika

dibandingkan dengan koefisien perpindahan panas air murni) ketika konsentrasi partikel nano mencapai 3%. Penyebab terjadinya penurunan kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO₂-air tersebut, antara lain dapat dijelaskan melalui perubahan sifat-sifat fisik fluida nano sebagaimana akan diuraikan pada paragraf-paragraf berikutnya. Hal ini penting untuk dibahas agar karakteristik perpindahan panas fluida nano, khususnya pada moda konveksi-gabungan dapat dipahami dengan baik.

Pada persoalan konveksi-gabungan yang dianalisis ini, nilai bilangan Ri berkisar pada rentang 62–197 dimana bilangan $Ri = Gr/Re^2$. Dengan nilai bilangan $Ri >> 1$, berarti nilai bilangan $Gr > Re$. Hal ini mengindikasikan bahwa kontribusi konveksi alamiah dalam proses perpindahan panas jauh lebih dominan daripada pengaruh konveksi paksa. Pada konveksi alamiah, proses perpindahan panas sangat ditentukan oleh gaya apung (*buoyancy force*) yang besarnya dapat ditentukan dari Persamaan (8). Semakin besar gaya apung maka perpindahan panas menjadi lebih efektif.

$$g\beta(T - T_{\infty}) \quad (8)$$

Jika koefisien ekspansi termal (β) fluida berkurang, besar gaya apung juga menjadi lebih kecil sehingga kemampuan perpindahan panas juga mengalami penurunan. Hal inilah yang diduga menjadi salah satu penyebab turunnya kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO₂-air ketika konsentrasi partikel nano meningkat. Koefisien ekspansi termal fluida nano ZrO₂-air lebih kecil daripada koefisien ekspansi termal air dan koefisien ekspansi termal fluida nano mengalami penurunan ketika konsentrasi partikel nano bertambah seperti diperlihatkan pada Gambar 3.



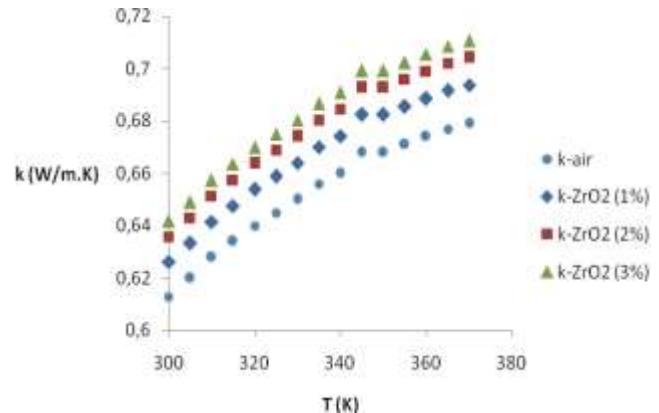
Gambar 3. Koefisien ekspansi termal fluida nano ZrO₂-air sebagai fungsi konsentrasi dan temperatur

Karena peran konveksi alamiah yang cukup dominan dalam konveksi-gabungan yang dianalisis ini, maka pengaruh perubahan sifat fisik terhadap koefisien

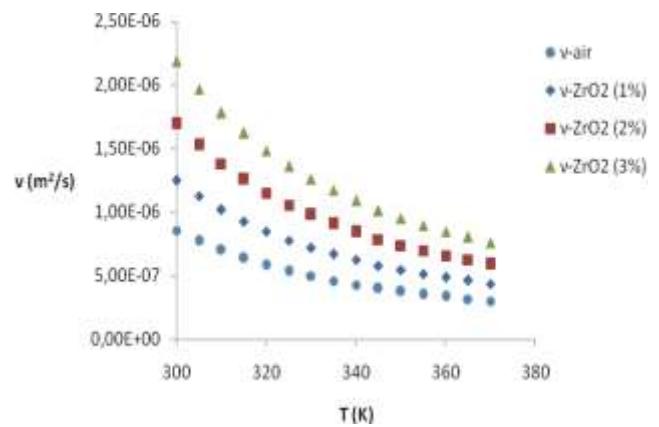
perpindahan panas dapat dilihat dari hubungan antara bilangan Nu dengan bilangan Ra ($Nu \approx Ra^n$) sebagai berikut:

$$\frac{h_{nf}}{h_{bf}} \approx \left(\frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}} \right)^n \left(\frac{k_{nf}}{k_{bf}} \right)^{1-2n} \left(\frac{C_{nf}}{C_{bf}} \right)^n \left(\frac{\nu_{nf}}{\nu_{bf}} \right)^{-n} \quad (9)$$

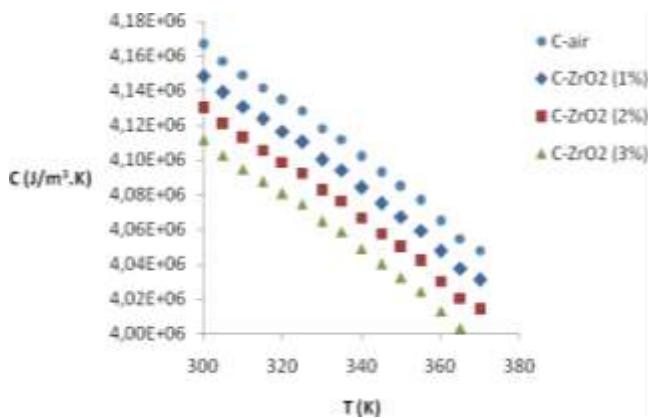
Karena kondisi batas termal yang digunakan dalam analisis ini adalah fluks panas konstan maka bilangan Gr yang digunakan adalah bilangan Gr termodifikasi $Gr = g\beta q'' D_h^4 / (k\nu^2)$. Distribusi konduktivitas termal, viskositas kinematik, dan kapasitas kalor fluida nano ZrO₂-air terhadap temperatur dan konsentrasi fluida nano dapat dilihat pada Gambar 4, 5 dan 6.



Gambar 4. Konduktivitas termal fluida nano ZrO₂-air sebagai fungsi konsentrasi dan temperatur

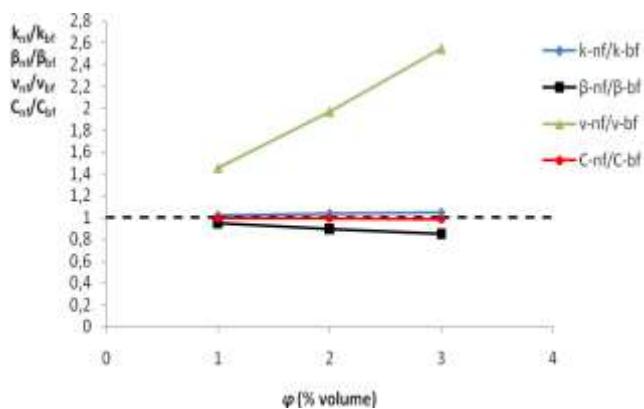


Gambar 5. Viskositas kinematik fluida nano ZrO₂-air sebagai fungsi konsentrasi dan temperatur



Gambar 6. Kapasitas kalor fluida nano ZrO_2 -air sebagai fungsi konsentrasi dan temperatur

Perubahan sifat-sifat fisik fluida nano ZrO_2 -air terhadap air sebagai fungsi konsentrasi dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan sifat fisik fluida nano ZrO_2 -air terhadap air sebagai fungsi konsentrasi partikel nano

Dari Gambar 7 dan berdasarkan Persamaan (9) dapat dianalisis bahwa dengan meningkatnya konsentrasi, peningkatan konduktivitas termal fluida nano merupakan satu-satunya faktor yang mendukung peningkatan kemampuan perpindahan panas fluida nano. Adapun penurunan koefisien ekspansi termal fluida nano, penurunan kapasitas kalor (kalor jenis) fluida nano, dan peningkatan viskositas kinematik (dinamik) fluida nano merupakan faktor-faktor yang berkontribusi terhadap penurunan kemampuan perpindahan panas fluida nano. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah faktor yang menyebabkan penurunan kemampuan perpindahan panas fluida nano lebih banyak daripada jumlah faktor yang mendukung peningkatan kemampuan perpindahan panas fluida nano sehingga dapat diperkirakan bahwa pada proses perpindahan panas konveksi dimana konveksi alamiah lebih dominan daripada konveksi paksa, kemampuan perpindahan panas fluida nano

cenderung mengalami penurunan jika dibandingkan dengan kemampuan perpindahan panas air murni.

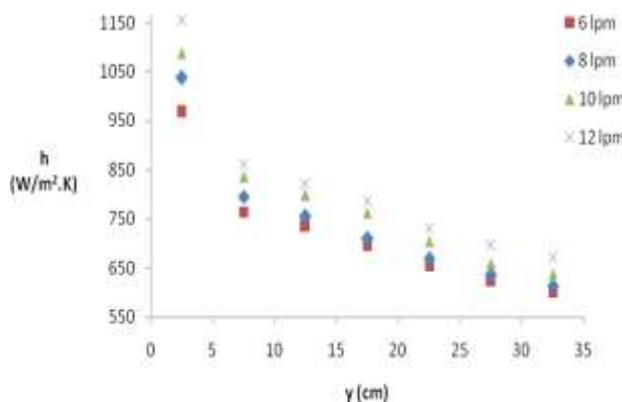
Gambar 7 juga menunjukkan bahwa pada fluida nano ZrO_2 -air, ketika konsentrasi partikel nano bertambah, peningkatan konduktivitas termal sangat kecil jika dibandingkan dengan peningkatan viskositas. Artinya, efek peningkatan konduktivitas termal fluida nano tidak mampu mengimbangi efek peningkatan viskositas fluida nano sehingga secara keseluruhan berakibat pada menurunnya kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air. Efek resultan dari seluruh perubahan sifat-sifat fisik fluida nano inilah yang diduga menjadi salah satu penyebab mengapa koefisien perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air lebih rendah daripada koefisien perpindahan panas air dan mengapa terjadi penurunan koefisien perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air ketika konsentrasi fluida nano meningkat.

Pada Persamaan (9), pangkat yang sama dari suku koefisien ekspansi termal, kapasitas kalor, dan viskositas menunjukkan bahwa kontribusi ketiga suku tersebut terhadap koefisien perpindahan panas adalah sama. Namun, dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa kuantitas peningkatan viskositas fluida nano jauh lebih besar daripada kuantitas penurunan koefisien ekspansi termal maupun kuantitas penurunan kapasitas kalor. Oleh karena itu, dapat dinyatakan bahwa pengaruh peningkatan viskositas terhadap penurunan kemampuan perpindahan panas fluida nano jauh lebih besar daripada pengaruh penurunan koefisien ekspansi termal maupun pengaruh penurunan kapasitas kalor.

Fakta bahwa karakteristik perpindahan panas fluida nano, khususnya yang didominasi oleh moda konveksi alamiah, penting untuk diteliti lebih jauh didukung pula oleh hasil penelitian Ho dkk. (2010). Ho dkk. (2010) melakukan eksperimen perpindahan panas konveksi alamiah fluida nano Al_2O_3 -air dengan konsentrasi 0,1-4% volume pada suatu wadah segi empat dengan tiga variasi dimensi. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa pada konsentrasi fluida nano $\geq 2\%$ koefisien perpindahan panas fluida nano mengalami penurunan ketika konsentrasi meningkat. Namun pada konsentrasi 0,1% dan pada wadah dengan ukuran yang terbesar, fluida nano Al_2O_3 -air memiliki kemampuan perpindahan panas yang lebih tinggi daripada air, yaitu dengan peningkatan sekitar 18%. Fakta ini menunjukkan bahwa kemampuan perpindahan panas fluida nano tidak hanya dipengaruhi oleh efek resultan dari perubahan sifat-sifat fisik fluida nano, namun juga oleh faktor-faktor lain yang masih perlu dieksplorasi lebih lanjut.

Selain pengaruh konsentrasi fluida nano, pada penelitian ini juga dilakukan analisis terhadap

pengaruh kecepatan alir fluida nano terhadap kemampuan perpindahan panas konveksi-gabungan, yang hasilnya ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Distribusi koefisien perpindahan panas lokal fluida nano ZrO_2 -air 1% sebagai fungsi kecepatan alir

Hasil ini tidak berbeda dengan hasil penelitian lain pada umumnya, baik yang menggunakan fluida nano maupun fluida murni. Pada konsentrasi konstan, semakin besar kecepatan alir fluida nano maka semakin tinggi koefisien perpindahan panas yang dicapai. Jika dibandingkan dengan Gambar 2, dapat dilihat bahwa peningkatan koefisien perpindahan panas fluida nano akibat peningkatan laju alir tidak sebesar penurunan koefisien perpindahan panas fluida nano akibat meningkatnya konsentrasi. Fakta ini menunjukkan bahwa kontribusi bilangan Re terhadap kinerja perpindahan panas adalah kecil, sehingga menguatkan indikasi bahwa peran konveksi paksa dalam peristiwa konveksi-gabungan ini tidak signifikan jika dibandingkan dengan peran konveksi alamiah.

Karakteristik perpindahan panas konveksi-gabungan fluida nano, khususnya yang lebih didominasi oleh moda konveksi alamiah, perlu diteliti lebih jauh lagi. Hal ini penting dilakukan sebelum fluida nano diaplikasikan secara nyata sebagai fluida pendingin. Untuk lebih memahami karakteristik perpindahan panas konveksi-gabungan fluida nano, perlu dilakukan variasi faktor-faktor lain, selain konsentrasi dan laju alir fluida nano, seperti misalnya jenis fluida nano, geometri kanal perpindahan panas, dan bentuk serta ukuran partikel nano. Di samping itu, pemodelan numerik fluida nano sebagai fluida dua fasa juga penting dilakukan dalam rangka mengeksplorasi mekanisme fisik perpindahan panas konveksi fluida nano.

Kesimpulan

Telah dilakukan analisis numerik perpindahan panas konveksi-gabungan satu fasa menggunakan fluida

nano ZrO_2 -air 1-3% volume dengan rezim aliran laminar yang masih berkembang pada berkas 7-silinder vertikal yang disusun secara heksagonal. Hasil analisis menunjukkan bahwa air memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi daripada fluida nano. Kemampuan perpindahan panas fluida nano pada moda konveksi-gabungan justru mengalami penurunan ketika konsentrasi partikel nano bertambah. Berdasarkan analisis korelasi sifat-sifat fisik fluida nano, efek resultan dari perubahan sifat-sifat fisik fluida nano, yang meliputi konduktivitas termal, koefisien ekspansi termal, kapasitas kalor (kalor jenis), dan viskositas, diduga menjadi penyebab penurunan kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air pada moda konveksi-gabungan.

Pada konsentrasi fluida nano tertentu, peningkatan kecepatan alir fluida nano menyebabkan peningkatan kemampuan perpindahan panas fluida nano ZrO_2 -air meskipun proses perpindahan panas konveksi-gabungan didominasi oleh moda konveksi alamiah.

Nomenklatur

k	konduktivitas termal ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T	temperatur (K)
h	koefisien perpindahan panas ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
c_p	kalor jenis spesifik ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
q''	fluks panas (Wm^{-2})
g	konstanta gravitasi (ms^{-2})
C	kapasitas kalor ($\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$)
D_h	diameter hidrolik (m)
Gr	bilangan <i>Grashof</i> termodifikasi
Re	bilangan <i>Reynolds</i>
Ri	bilangan <i>Richardson</i>
Ra	bilangan <i>Rayleigh</i>
Nu	bilangan <i>Nusselt</i>

Greek letters

φ	konsentrasi (% volume)
μ	viskositas dinamik (Nsm^{-2})
ρ	densitas (kgm^{-3})
β	koefisien ekspansi termal (K^{-1})
ν	viskositas kinematik (m^2s^{-1})

Subscripts

bf	fluida dasar (<i>base fluid</i>)
nf	fluida nano (<i>nanofluid</i>)
p	partikel nano
f	<i>film</i>
b	<i>bulk</i>
s	<i>surface</i> (dinding)
∞	lingkungan

Referensi

- He, Y. *et al.* "Heat Transfer and Flow Behaviour of Aqueous Suspensions of TiO₂ Nanoparticles (Nanofluids) Flowing Upward through a Vertical Pipe". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, 2272-2281 (2007).
- Ho, C.J., Liu, W.K., Chang, Y.S., Lin, C.C. "Natural Convection Heat Transfer of Alumina-Water Nanofluid in Vertical Square Enclosures: An Experimental Study". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, 1345-1353 (2010).
- Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M. "Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, 3639-3653 (2003).
- Kim, D. *et al.* "Convective Heat Transfer Characteristics of Nanofluids under Laminar and Turbulent Flow Conditions". *Current Applied Physics*, Vol. 9, e119-e123 (2009).
- Putra, N., Roetzel, W., Das, S.K. "Natural Convection of Nano-Fluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, 775-784 (2003).
- Rea, U., McKrell, T., Hu, L., Buongiorno, J. "Laminar Convective Heat Transfer and Viscous Pressure Loss of Alumina-Water and Zirconia-Water Nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2042-2048 (2009).
- Vajjha, R., Das, D.K., Kulkarni, D.P. "Development of New Correlations for Convective Heat Transfer and Friction Factor in Turbulent Regime for Nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, 4607-4618 (2010).