

## STUDI EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR KONVEKSI PAKSA PADA NANOFLUIDA AIR-ZrO<sub>2</sub> DI DALAM SUB-BULUH VERTIKAL SEGIEMPAT

Ketut Kamajaya, Efrizon Umar

Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan  
Jalan Tamansari 71, Bandung 40132  
Telp/Fax: 022-2503996/022-2504081  
kamajaya@batan.go.id

Diterima: 26-01-2017

Diterima dalam bentuk revisi: 28-02-2017

Disetujui: 01-03-2017

### ABSTRAK

**STUDI EKSPERIMENTAL PERPINDAHAN KALOR KONVEKSI PAKSA PADA NANOFLUIDA AIR-ZrO<sub>2</sub> DI DALAM SUB-BULUH VERTIKAL SEGIEMPAT.** Saat ini sedang berkembang pemikiran para peneliti tentang pemanfaatan nanofluida sebagai pendingin alternatif, selain menggunakan air. Hasil kajian menunjukkan bahwa nanofluida sangat baik digunakan sebagai media pemindah kalor. Oleh karena itu, studi ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat termofisika dari nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> pada aliran konveksi paksa. Data eksperimental yang diperoleh dalam eksperimen digunakan untuk menentukan besarnya koefisien perpindahan kalor dari pemanas ke fluida pendingin nanofluida air-ZrO<sub>2</sub>. Hasil penelitian ini juga telah dibandingkan dengan hasil penelitian yang menggunakan fluida-dasar atau air murni sebagai fluida kerja. Hasilnya menunjukkan bahwa nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dengan konsentrasi sebesar 0,10 % dalam persen berat, mempunyai koefisien perpindahan kalor 20 % lebih besar dari koefisien perpindahan kalor menggunakan air-murni sebagai pendingin.

**Kata kunci:** nanofluida, air-ZrO<sub>2</sub>, konveksi paksa, sub-buluh vertikal segiempat.

### ABSTRACT

**EXPERIMENTAL STUDY ON FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER IN WATER-ZrO<sub>2</sub> NANOFUIDS INSIDE A RECTANGULAR VERTICAL SUB-CHANNEL.** Currently, it has been developed by researchers an idea of using nanofluids as an alternative coolant, instead of water. The results showed that nanofluids very well be used as a heat transfer medium. Therefore, this study was conducted to determine the properties characteristic of water-ZrO<sub>2</sub> nanofluids in forced convection flow. The experimental data obtained in experiments are used to determine the heat transfer coefficient from the heater to the cooling fluid. The results of this study have also been compared with the results of studies using the fluid-basic or pure water as the working fluid. The results show that water-ZrO<sub>2</sub> nanofluids with a concentration of 0.10 % in weight percent, has a heat transfer coefficient of 20% greater than the coefficient of heat transfer using pure-water as a coolant.

**Keywords:** nanofluids, water-ZrO<sub>2</sub>, forced convection, rectangular vertical sub-channel.

### 1. PENDAHULUAN

Salah satu pemikiran yang banyak mendapat perhatian dan telah mulai diterapkan dalam perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) generasi baru adalah menerapkan nanofluida dalam

sistem pendingin, baik untuk sistem pendingin primer maupun sistem pendingin teras darurat (1). Penerapan nanofluida untuk sistem pendingin reaktor nuklir tentu tidak terbatas pada PLTN saja tetapi berpotensi juga untuk diterapkan pada

reaktor nuklir penelitian seperti reaktor nuklir TRIGA 2000 yang ada di Indonesia. Terlebih lagi, studi perpindahan kalor pada teras reaktor nuklir penelitian TRIGA 2000 yang merupakan subbuluh vertikal dan menggunakan air sebagai pendinginnya sudah dilakukan secara luas (2-7), demikian juga untuk beberapa fasilitas eksperimental perpindahan kalor pendukungnya (8,9) sehingga studi komparatif terhadap penerapan nanofluida sangat menarik untuk dilakukan.

Berdasarkan alasan-alasan ini, penelitian penerapan nanofluida dalam analisis perpindahan kalor pada sub-buluh vertikal menjadi penting karena penerapannya tidak saja dalam bidang nuklir seperti teras reaktor riset, juga dibidang sistem konversi energi lainnya. Penelitian yang telah dilakukan oleh Syarif dkk (10) menunjukkan konduktivitas termal nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> lebih tinggi daripada konduktivitas fluida pendingin konvensional. Hasil penelitian Buongiorno (1) menjelaskan bahwa nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dapat meningkatkan batas fluks panas kritis dan meningkatkan perpindahan kalor pada proses pendinginan mendadak pada bahan bakar ketika terjadi kecelakaan hilangnya pendingin di dalam teras reaktor. Nanofluida dengan komposisi tertentu dapat memberikan nilai koefisien perpindahan kalor optimum, keadaan ini akan sangat baik diterapkan dalam sistem pendinginan secara umum. Menurut Maheshwary (11), dengan metode *ultrasonication* akan terjadi peningkatan konduktivitas termal nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> sekitar 5 % dibandingkan fluida dasar, yaitu air. Hasil kajian eksperimental

maupun analisis teoritis Umar dkk (12-14) menunjukkan bahwa nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dapat meningkatkan koefisien perpindahan kalor pada perpindahan kalor konveksi alamiah. Demikian juga hasil telaahan Kakaç (15), bahwa pendingin nanofluida dapat meningkatkan koefisien perpindahan kalor konveksi suatu sistem.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan numerik dan eksperimental. Data eksperimen yang didapatkan digunakan untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor konveksi pada sub-buluh vertikal dengan geometri segi empat dan menggunakan nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> sebagai fluida kerja. Sementara itu, sebelumnya Kamajaya dkk. (16,17) telah melakukan eksperimen menggunakan nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dan air-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam sub buluh vertikal dan korelasi empiris perpindahan kalor konveksi alamiahnya sudah pula didapatkan. Demikian pula Rea dkk. (18) telah dapat menentukan nilai koefisien perpindahan kalor dari nanofluida campuran air-ZrO<sub>2</sub>. Contoh-contoh studi teoritis dan eksperimen ini menunjukkan bahwa nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> mempunyai prospek yang sangat baik digunakan sebagai fluida pendingin dalam suatu sistem perpindahan kalor.

## 2. TEORI

Mekanisme perpindahan kalor konveksi paksa pada bidang datar vertikal maupun silinder vertikal konsentrik sebenarnya telah diteliti sejak lama dan berbagai korelasi untuk memprediksi koefisien perpindahan kalornya juga sudah banyak diusulkan. Namun eksperimen

menggunakan perangkat uji sub buluh belum banyak dilakukan. Untuk kasus ini, fluks panas yang dihasilkan oleh pemanas berbentuk silinder vertikal dan ditransfer ke fluida pendingin dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 1.

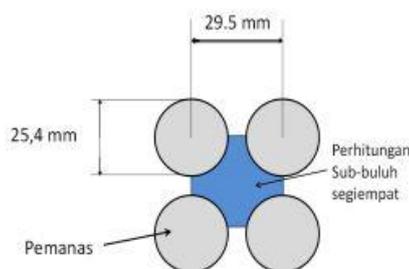
$$q'' = h (T_s - T_{nf}) \quad (1)$$

Untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor (h) pada konveksi paksa dibutuhkan bilangan tak berdimensi seperti bilangan Nusselt yang perhitungannya melibatkan panjang karakteristik diameter hidrolis dari sub buluh. Bentuk umum bilangan Nusselt (Nu) pada sub buluh dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan 2.

$$Nu = \frac{q'' \cdot D_h}{k_{nf}(T_s - T_{nf})} \quad (2)$$

Bentuk diameter hidrolis  $D_h$  susunan sub buluh vertikal segiempat yang terdapat pada Persamaan 2 dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3:

$$D_h = \left\{ \left( \frac{4}{\pi} \right) \left( \frac{P}{D} \right)^2 - 1 \right\} \quad (3)$$



Gambar 1. Geometri daerah sub-buluh segiempat

Adapun sifat-sifat termofisika khususnya konduktivitas termal nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dirumuskan oleh Hosseini (19) dalam bentuk Persamaan 4.

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

Konduktivitas termal nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> telah dilakukan pula oleh Diah dkk (20,21), hasilnya menunjukkan nilai konduktivitas termal nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> sangat bergantung dari konsentrasi partikel nanofluida di dalam air. Pengaruh konsentrasi nano partikel dalam nanofluida sebagai pendingin juga telah dilakukan oleh Sudjatmi dkk (22), hasilnya menunjukkan kenaikan konsentrasi partikel nanofluida di dalam air juga akan menaikkan nilai koefisien perpindahan kalor konveksinya.

Selanjutnya untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor pada posisi tertentu dari pemanas ke fluida pendingin di dalam sub buluh dapat digunakan Persamaan 5.

$$h = \frac{Nu \cdot k_{nf}}{D_h} \quad (5)$$

Daftar simbol

- q = fluks panas (W/m<sup>2</sup>)
- h = koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m<sup>2</sup>.°C)
- T<sub>s</sub> = suhu permukaan pemanas (°C)
- T<sub>f</sub> = suhu fluida pendingin (°C)
- Nu = bilangan Nusselt, tak berdimensi
- D<sub>h</sub> = diameter hidrolis sub buluh (m)
- D = diameter pemanas (m)

$P$  = *pitch*, jarak antarpusat pemanas (m)  
 $k_{nf}$  = konduktivitas termal nanofluida (W/m.°C)  
 $k_{air}$  = konduktivitas termal air murni (W/m.°C)  
 $k_p$  = konduktivitas termal nanopartikel (W/m.°C)  
 $\varphi$  = fraksi nanofluida dalam air

### 3. TATA KERJA

#### 3.1. Bahan dan Peralatan

Telah dirancang dan dibuat sebuah peralatan eksperimen untuk sub buluh vertikal segiempat. Peralatan ini dirancang untuk aliran konveksi alamiah dan konveksi paksa. Disamping itu, peralatan ini juga telah dilengkapi dengan alat penukar kalor tipe plat, tangki pendingin primer untuk nanofluida dan untuk air murni serta pompa primer dan pompa sekunder. Dalam kajian eksperimental ini, sebagai fluida kerja digunakan nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> bahan lokal dengan konsentrasi 0,1 % berat dengan ukuran partikel rata-rata 20 nm.

#### 3.2. Pelaksanaan Eksperimen

Pengukuran suhu di sepanjang dinding pemanas dan fluida pendingin pada subbuluh dilakukan pada saat tercapai kondisi tunak. Sebelum pengujian sesungguhnya, dilakukan uji karakteristik untuk dapat memperkirakan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak tersebut.

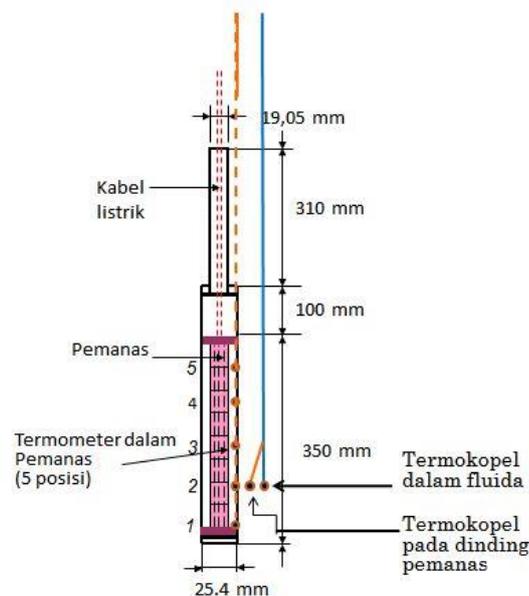
Fluida pendingin primer yang masuk pada seksi uji dibuat bervariasi dengan laju

alir konstan sebesar 6, 8, 10, 12, dan 14 liter/menit sedangkan laju alir sekunder konstan 20 liter/menit. Kalor dari sistem pendingin primer ditransfer ke sistem pendingin sekunder melalui sebuah alat penukar kalor tipe plat. Untai uji eksperimen menggunakan daya pemanas mulai dari 250 W, 350 W, 500 W, 650 W, 750 dan 850 W, perpemanas. Selanjutnya besar daya listrik yang dibutuhkan untuk setiap pengujian diukur secara langsung menggunakan wattmeter dan nilainya dijaga konstan untuk setiap tahap pengujian. Dalam menentukan nilai  $D_h$ , data yang digunakan  $D = 25,4$  mm dan  $P = 29,5$  mm, sehingga  $(P/D) = 1,16$ . Suhu fluida kerja saat eksperimen berkisar antara 30 – 50 °C, untuk itu dalam menentukan nilai  $k_{nf}$  digunakan konduktivitas termal air  $k_{air} = 0,6$  W/m.°C, konduktivitas termal partikel nano  $k_p = 3,0$  W/m.°C dan fraksi nanofluida ZrO<sub>2</sub> dalam air  $\varphi = 0,1$  % = 0,001.

Untuk setiap pengujian dilakukan pencatatan suhu fluida pendingin dan suhu permukaan pemanas pada 5 titik pengukuran dengan ketinggian yang berbeda. Pencatatan suhu untuk setiap pengujian dilakukan setelah pemanas dijalankan selama 3 jam sehingga telah dicapai kondisi tunak. Termokopel yang digunakan untuk pengukuran suhu ini disambungkan secara langsung pada data akusisi sehingga nilai suhunya dapat langsung direkam. Data input yang digunakan dan data output yang akan dihasilkan dapat dibuat dalam bentuk tabel.

Tabel 1. Data pengamatan

Nama variabel	Jenis variabel	Nilai variable input					
		250	350	500	650	750	850
Daya listrik, Q (watt) Per pemanas	Input	250	350	500	650	750	850
Fluks kalor permukaan, q'' (kW/m <sup>2</sup> )	Input	9	12,5	18	23.3	27	30,5
Jarak, x (cm)	Input	5	12,5	20	27.5	35	
Suhu permukaan, T <sub>s</sub>	Output	-					
Suhu fluida pendingin, T <sub>nf</sub>	Output	-					
Koefisien perpindahan kalor, h	Output	-					



Gambar 2. Posisi pengukuran suhu

Berikut ditampilkan cara pengukuran suhu pada dinding pemanas dan pada fluida pendingin. Dilakukan pengukuran pada lima posisi ketinggian yang berbeda, pengukuran pertama, posisi 1, pada posisi bawah, 5 cm dari ujung bawah pemanas, pengukuran posisi 5 paling atas.

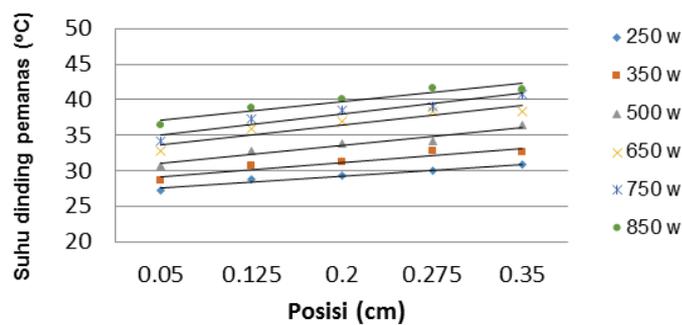
## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Data Hasil Pengukuran

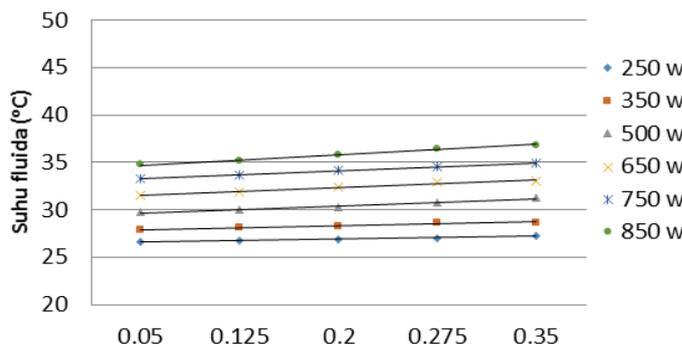
Hasil pengujian dengan berbagai daya dan kecepatan aliran menunjukkan bahwa pada semua keadaan pengujian konveksi paksa, suhu fluida pendingin menunjukkan kecenderungan meningkat

seiring kenaikan tinggi titik pengukuran secara linier. Begitu pula dengan suhu silinder pemanas, makin keatas semakin tinggi suhunya, hal ini disebabkan makin keatas titik pengukuran, suhu fluida pendingin makin tinggi, sehingga kemampuan fluida pendingin dalam memindahkan kalor dari silinder pemanas juga semakin berkurang. Dengan naiknya suhu dinding pemanas menyebabkan koefisien perpindahan kalor pada

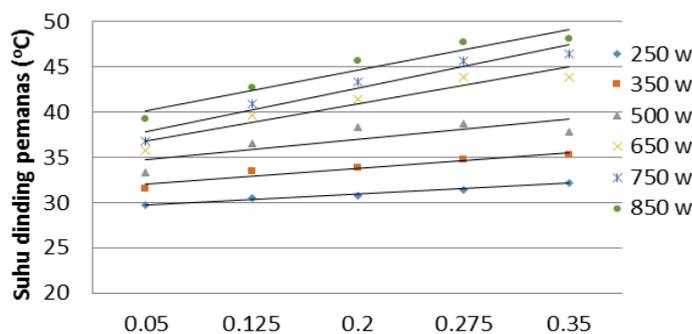
permukaan pemanas ke nanofluida semakin berkurang. Telah dilakukan pengukuran suhu permukaan pemanas dan suhu fluida pendingin pada lima posisi dengan berbagai daya pemanas dan laju alir. Berikut ditunjukkan contoh hasil pengukuran suhu dinding pemanas dan pendingin nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> untuk laju aliran 6 liter/menit dan 8 liter/menit.



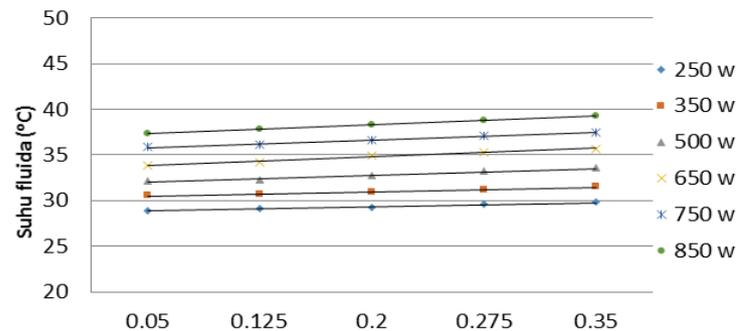
Gambar 3. Grafik suhu dinding pemanas dengan laju aliran 6 liter/menit.



Gambar 4. Grafik suhu nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dengan laju aliran 6 liter/menit



Gambar 5. Grafik suhu dinding pemanas dengan laju aliran 8 liter/menit.



Gambar 6. Grafik suhu nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dengan laju aliran 8 liter/menit

Semua grafik di atas menunjukkan kecenderungan terjadi kenaikan suhu pada posisi yang lebih atas secara linier, baik untuk suhu dinding pemanas maupun suhu fluida pendingin.

#### 4.2 Penentuan koefisien perpindahan kalor

Pada penelitian ini, harga koefisien perpindahan kalor rata-rata antara permukaan luar pemanas dengan fluida pendingin dalam sub-buluh ditentukan secara tidak langsung. Suhu permukaan pemanas dan suhu pendingin pada sub-buluh serta pengukuran daya pemanas merupakan data input untuk menghitung nilai koefisien perpindahan kalor fluida pendingin. Dalam perhitungan itu diasumsikan tidak ada perpindahan kalor dalam arah tutup pemanas dan tidak ada pengaruh aliran dari atau ke kanal yang bersebelahan (aliran satu dimensi). Agar asumsi ini dapat berlaku maka dalam pemanas listrik ditempatkan isolator dalam arah tutup kelongsongnya sehingga kerugian kalor dalam arah aksial dapat diminimumkan.

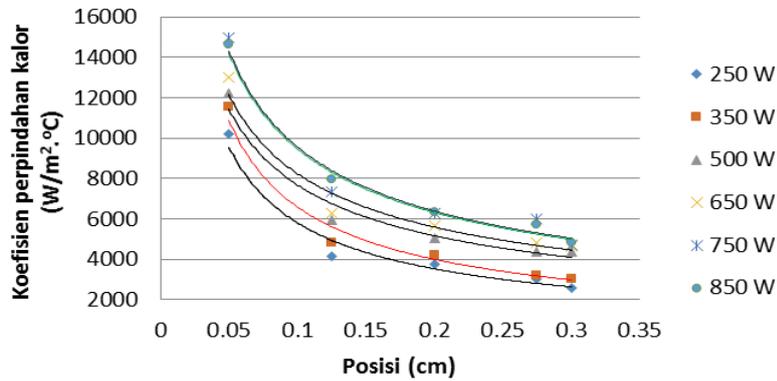
Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan antara koefisien perpindahan kalor ( $h$ ) terhadap posisi, mulai dari posisi paling bawah 0,05 m dari ujung bawah pemanas ke atas sampai pada ketinggian 0,3 m.

Dari grafik pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa semakin tinggi posisi pengukuran, nilai koefisien perpindahan kalor makin menurun. Hal ini dapat terjadi karena perbedaan suhu antara permukaan pemanas dan fluida pendingin makin besar. Jadi dengan meningkatnya ketinggian, terjadi penurunan koefisien perpindahan kalor. Terlihat pula jika daya pemanas dibesarkan koefisien perpindahan kalor cenderung mengalami peningkatan. Ini berarti jika daya diperbesar maka kalor yang dipindahkan juga semakin besar karena potensi perpindahan kalornya juga semakin besar. Namun pada peningkatan daya dari 750 W ke 850 W, nilai koefisien perpindahan kalornya hampir tidak mengalami peningkatan. Ini menunjukkan pada daya operasi yang cukup tinggi, perpindahan kalornya tidak mengalami peningkatan yang berarti. Koefisien perpindahan kalor rata-rata untuk daya 850 W sedikit lebih kecil

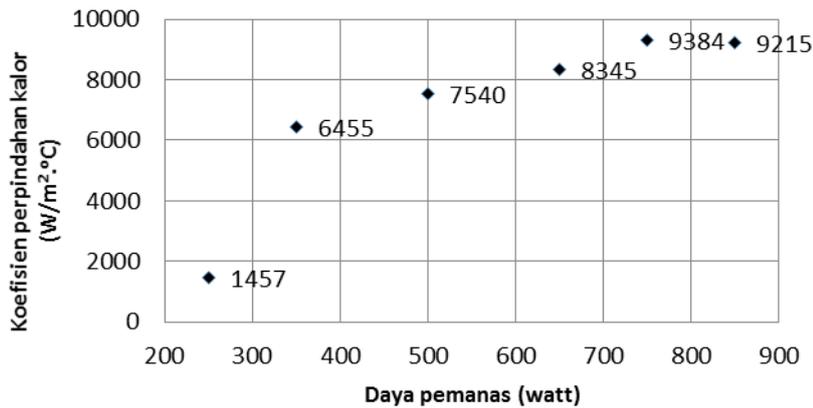
dibandingkan dengan koefisien perpindahan kalor rata-rata untuk daya 750 W.

kalor (h) terhadap daya pemanas, mulai dari pemanasan dengan daya 250 W sampai 850 W.

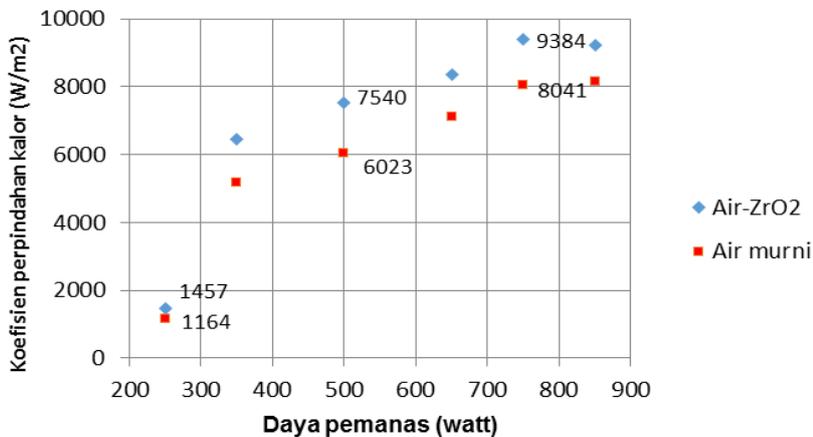
Pada Gambar 8 ditunjukkan grafik hubungan antara koefisien perpindahan



Gambar 7. Grafik hubungan antara h terhadap posisi dengan laju aliran 6 liter/menit



Gambar 8. Nilai h nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> rata-rata untuk setiap daya pemanas



Gambar 9. Perbandingan nilai h dari nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dan air-murni rata-rata untuk setiap daya pemanas

Gambar 9 memperlihatkan perbandingan nilai koefisien perpindahan kalor dari nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> dan air-murni rata-rata untuk setiap daya pemanas. Nilai koefisien perpindahan kalor dari nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> rata-rata lebih besar sekitar 20% dari koefisien perpindahan kalor air-murni.

#### 4. KESIMPULAN

Peningkatan koefisien perpindahan kalor konveksi nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> tidak berbanding lurus dengan daya pemanas yang diberikan. Peningkatan koefisien perpindahan kalor relatif besar untuk daya yang lebih rendah. Hasil eksperimen menunjukkan untuk peningkatan daya dari 750 kW ke 850 kW tidak menghasilkan peningkatan koefisien perpindahan kalor sehingga daya operasi maksimum peralatan uji dibatasi sampai 750 W untuk setiap pemanas. Nilai koefisien perpindahan kalor rata-rata dari nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> 20 % lebih besar daripada koefisien perpindahan kalor rata-rata air murni untuk konsentrasi nanopartikel sebesar 0,1% berat, sehingga dapat digunakan sebagai fluida pendingin pada berbagai sistem perpindahan kalor.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Bapak Dani Gustaman Syarif dan Bapak M. Yamin yang telah menyediakan nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> untuk eksperimen ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada penyelia Bidang Teknofisika yaitu Bapak Budy Darmono dan Bapak Tata Kusmayadi serta Brain Aulia Biandika Jurusan Fisika Universitas Pajajaran Bandung yang ikut

berkontribusi dalam pencatatan data eksperimen.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

1. Buongiorno J, Hu LW. Nanofluid heat transfer enhancement for nuclear reactor application. *Journal of Energy and Power Engineering* 2010; 4 (6(31)): 1- 8.
2. Umar E. Prediction of mass flow rate and pressure drop in the coolant channel of the TRIGA 2000 reactor core, *Atom Indonesia* 2001; 27(1): 67- 84.
3. Umar E. Studi termohidrolik pada reaktor nuklir penelitian berbahan bakar silinder, Disertasi Program Dioktor, Institut Teknologi Bandung, Bandung 2007.
4. Fiantini R, Umar E. Fluid Flow Characteristics Simulation on the Original TRIGA 2000 Reactor Core Design Using Computational Fluid Dynamics Code, *AIP Conference Proceedings* 201; 1244 (1): 215-223.
5. Umar E, Kamajaya K. Redesign, Construction and Operation Characteristics of the Primary Cooling System of TRIGA 2000 reactor, *Pacific Basin, Nuclear Conference Australian Nuclear Association* 2006; p. 472.
6. Umar E, Fiantini R. Modification of the Core Cooling System of TRIGA 2000 Reactor, *AIP Conference Proceedings* 2010;1244 (1): 224-231.
7. Umar E, Kamajaya K, Tandian NP, Hardianto T, Suwono A. An Experimental Study of Natural Convection in the Hottest Channel of TRIGA 2000 kW, *Pacific Basin Nuclear Conference*

- Australian Nuclear Association 2006; p.480.
8. Kamajaya K, Umar E, Sudjatmi. K.S. The Study and Development of the Empirical Correlations Equation of Natural Convection Heat Transfer on Vertical Rectangular Sub Channels, AIP Conference Proceedings 2012; New York, 1488 (1): 261-269.
9. Tandian NP, Umar E, Hardianto T, Febriyanto C. Experimental Study of Natural Convective Heat Transfer in a Vertical Hexagonal Sub Channel, AIP Conference Proceedings, 2012; New York, 1488 (1): 252-260.
10. Syarif DG, Prajitno DH. Characteristic of water-ZrO<sub>2</sub> nanofluid made from solgel synthesized ZrO<sub>2</sub> nanoparticle utilizing local zircon. *Journal of Material Science and Engineering* 2013; 3 (2): 124-129.
11. Maheshwary PB, Nemedede KR. Enhancement in heat transfer performance of ZrO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O nanofluid via ultrasonication time. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication* 2015; 3 (2): 35-37.
12. Umar E, Kamajaya K, Tandian NP. Experimental study of natural convective heat transfer of water-ZrO<sub>2</sub> nanofluids in vertical sub channel. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015; 8(33): 1593-1605.
13. Sukarno DH, Tandian NP, Suwono A, Umar E. A new theoretical model for predicting the thermal conductivity of nanofluids, *Contemporary Engineering Sciences* 2015; 8(33): 1583-1592.
14. Hidayanti D, Tandian NP, Suwono A, Umar E. Mixed convective heat transfer of low concentration ZrO<sub>2</sub>-Water nanofluid in a seven vertical rod bundle, *Proceedings of Regional Conference in Mechanical and Manufacturing Engineering (RCMME) 2014*; Hanoi.
15. Kakaç Sadik, Anchasa Pramuanjaroenkij. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer (Elsevier)* 2009; (52): 3187–3196.
16. Kamajaya K, Umar E, Sudjatmi KS. The empirical correlation for natural convective heat transfer of water-ZrO<sub>2</sub> nanofluid in vertical sub channel. *The 6<sup>th</sup> International conference and exhibition on cooling and heating technologies* 2012; China, 2012: 9-12.
17. Kamajaya K, Umar E. The empirical correlations for natural convective heat transfer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> nanofluid in vertical sub channel, *IOP Conference Series; Materials Science and Engineering* 2015; 88 (1): 012053.
18. Rea U, McKrell T, Hu LW, Buongiorno J. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2009; (52): 2042-2048.
19. Hosseini SSH, Shahrjerdi A, Vazifesheres Y. A review of relations of physical properties of nanofluids. *Australian journal of basic and applied science* 2011; 5(10): 417- 435.
20. Hidayanti D, Tandian NP, Suwono A, Umar E. Investigation on modeling the

- thermal conductivity of zirconia-water based nanofluids. Proc. 3<sup>rd</sup> Appl. Sci. for tech. Applications- ASTECHNOVA 2014; Yogyakarta.
21. Hidayanti D, Tandian NP, Suwono A, Umar E. A theory model for predicting the thermal conductivity of zirconia-water based nanofluids. Proceeding of regional conference on mechanical and manufacturing engineering 2014.
22. Sudjatmi KS, Kamajaya K, Umar E. Pengaruh konsentrasi ZrO<sub>2</sub> terhadap korelasi perpindahan panas nanofluida air-ZrO<sub>2</sub> untuk pendingin reaktor, Jurnal Teknologi Nuklir TRI DASA MEGA, Oktober 2015; 15(3): 171-181.