

**STUDI ANALITIK POLA ALIRAN DAN DISTRIBUSI SUHU DINDING ELEMEN  
BAKAR SILINDER DI TERAS REAKTOR NUKLIR  
SMALL MODULAR REACTOR (SMR)**

**Anwar Ilmar Ramadhan<sup>1\*</sup>, Ery Diniardi<sup>1</sup>**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

Jl. Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta, 10510

<sup>\*</sup>Email: airamadhan@yahoo.com

**Abstrak**

*Perkembangan dan penggunaan energi nuklir saat ini berkembang sangat pesat, untuk mencapai teknologi yang semakin maju, baik dari segi desain, faktor ekonomi dan juga faktor keselamatannya. Dari aspek termofluida reaktor nuklir harus dilakukan dengan perhitungan dan kondisi yang mendekati sempurna. Termasuk saat ini adalah pengembangan fluida pendingin yang berasal dari nanofluida. Secara teoritis nanofluida memiliki konduktivitas termal yang tinggi dibandingkan fluida air ringan yang biasa digunakan di teras reaktor nuklir diseluruh dunia. Dalam penelitian ini akan dilakukan pemodelan analitik untuk mengetahui pola aliran dan distribusi suhu di dinding elemen bakar dari perpindahan panas konveksi pada teras reaktor nuklir dengan susunan sub buluh segi enam ketika menggunakan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai fluida pendingin. Selanjutnya untuk pemodelan analitik ini akan dilakukan dengan menggunakan CFD code yaitu FLUENT.*

**Kata kunci:** nanofluida, pola aliran, distribusi suhu, konveksi, CFD

## 1. PENDAHULUAN

Keselamatan merupakan masalah yang sangat diperhatikan dalam proses perancangan, pengoperasian dan pengembangan suatu reaktor nuklir. Oleh sebab itu, metode analisis yang digunakan dalam semua kegiatan tersebut harus teliti dan handal sehingga mampu memprediksi berbagai kondisi pengoperasian reaktor, baik pada kondisi operasi normal maupun pada saat terjadi kecelakaan. (Umar, 2007).

Selain aspek neutronik, aspek termohidrolika merupakan aspek yang penting untuk keselamatan desain dan pengoperasian suatu reaktor nuklir. Besaran termohidrolika seperti tekanan, laju aliran pendingin dan temperatur bahan bakar perlu diketahui melalui prediksi perhitungan (Nazar, 1997).

Menurut Ramadhan, A. I., (2012) bahwa nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dapat dikembangkan lebih lanjut untuk digunakan sebagai fluida pendingin di teras reaktor nuklir yang berbasis fluida pendinginnya adalah fluida air ringan maupun fluida yang lainnya. Sehingga kelak nanofluida dapat menggantikan fluida pendingin yang sudah ada. Dimana nanofluida memiliki konduktivitas termal yang tinggi dibandingkan fluida air ringan.

Salah satu penelitian yang saat ini menjadi prioritas dalam penelitian sistem pendinginan adalah penggunaan nano-partikel yang dicampur dengan air (nanofluida) untuk meningkatkan performa pengambilan kalornya. Secara teoritis nanofluida termasuk didalamnya nanopartikel memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi dibandingkan fluida air ringan biasa, sehingga mampu menyerap dan memindahkan kalor dengan lebih baik. Buongiorno dan timnya di *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) di Amerika telah melakukan penelitian yang berkaitan dengan nanofluida, telah dibuktikan bahwa nilai *Critical Heat Flux* (CHF) nanofluida lebih besar dibandingkan fluida air ringan biasa. (Buongiorno, dkk., 2008)

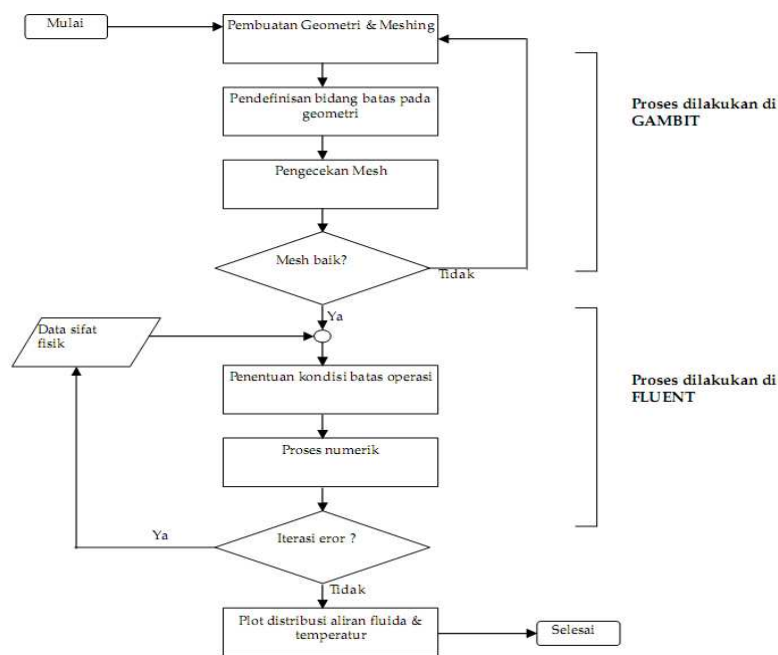
Penelitian ini akan menggunakan nanofluida sebagai fluida pendingin di teras reaktor nuklir berbahan bakar silinder dengan susunan sub buluh segi enam. Kegiatan penelitian difokuskan pada pengkajian lebih dalam mengenai aspek termofluida atau pengambilan panas hasil reaksi fisi nuklir secara konveksi yang terjadi di teras reaktor nuklir berbahan bakar silinder dengan susunan sub buluh segi enam dengan menggunakan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai fluida pendingin.

**2. METODOLOGI PENELITIAN**

Metodologi atau pendekatan yang akan dilakukan adalah dengan menggunakan metode numerik dengan terlebih dahulu melakukan analisis awal berdasarkan literatur-literatur yang digunakan. Langkah-langkah metodologinya, sebagai berikut:

- a. Melakukan studi literatur dan melakukan analisis berdasarkan data-data awal dari penelitian perpindahan kalor nanofluida yang pernah dilakukan.
- b. Membuat pemodelan untuk teras reaktor nuklir berbahan bakar silinder susunan sub buluh segi enam dengan menggunakan CFD Code, yaitu FLUENT untuk memperoleh data-data distribusi suhu bahan bakar dan juga pola vektor kecepatan aliran di teras reaktor nuklir.
- c. Melakukan analisis data dan perhitungan akhir, sehingga diperoleh perhitungan numerik dan juga perhitungan analitik untuk aspek termal yang terjadi di teras reaktor nuklir menggunakan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai fluida pendingin.

Alur penelitian untuk proses simulasi numerik pada teras reaktor nuklir berbahan bakar silinder dengan susunan sub buluh segi enam dengan fluida pendingin nanofluida, seperti pada Gambar 1. dibawah ini:

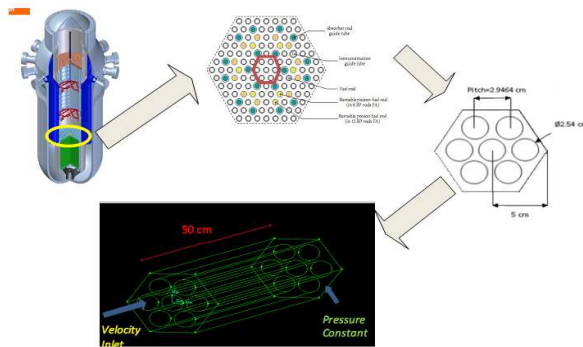


**Gambar 1. Alur penelitian**

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Pembuatan Model Teras Reaktor Nuklir *Small Modular Reactor* (SMR)**

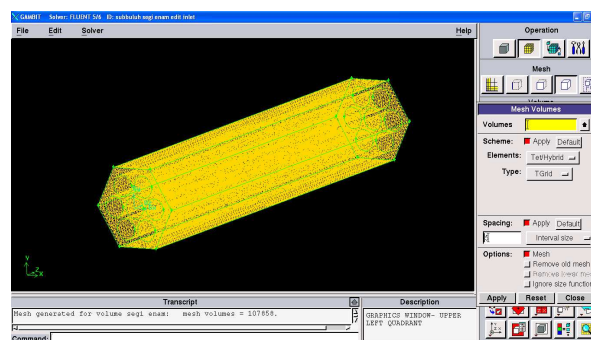
Hal yang perlu dilakukan pertama kali sebelum melakukan proses simulasi adalah membuat model yang terjadi pada subbuluh susunan segi enam. Dalam hal ini model yang dibuat adalah berupa model *volume*. Asumsi penyederhanaan model yang dilakukan adalah menganggap model subbuluh susunan segi enam sama dengan teras reaktor SMR (*Small Reactor Modular*) tipe Heksagonal dan fluks panas yang dihasilkan seragam. Dalam pembuatan model ini menggunakan program GAMBIT sebagai pembuatan model. Model yang akan disimulasikan pada riset ini adalah seperti dibawah ini:



Gambar 2. Pemodelan pada reaktor SMR sub buluh susunan segi enam

### Meshing

*Meshing* adalah proses dimana geometri secara keseluruhan dibagi-bagi dalam elemen-elemen kecil ini nantinya berperan sebagai *control surface* atau volume dalam proses perhitungan yang kemudian tiap-tiap elemen ini akan menjadi inputan untuk elemen disebelahnya. Hal ini akan terjadi berulang-ulang hingga domain terpenyuh. Dalam *meshing* elemen-elemen yang akan dipilih disesuaikan dengan kebutuhan dan bentuk geometri. Dalam skripsi ini aplikasi *meshing* yang dipakai adalah GAMBIT. Dalam penelitian ini semua konfigurasi tipe elemen disimulasikan menggunakan elemen *hybrid* atau *tetrahedron*. Dibawah ini gambar hasil *meshing* dengan konfigurasi *meshing* volum dan *interval size* sebesar 5.



Gambar 3. Hasil *meshing* dari GAMBIT

### Pemodelan Numerik dengan FLUENT

FLUENT adalah salah satu jenis program CFD yang menggunakan metode volume hingga. FLUENT menyediakan fleksibilitas *mesh* yang lengkap, sehingga dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh* yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah. Jenis *mesh* yang didukung FLUENT adalah tipe 2D *triangular-quadrilateral*, 3D *tetrahedral-hexahedral-pyramid-wedge*, dan *mesh* campuran (*hybrid*). FLUENT juga menyediakan fasilitas untuk memperhalus atau memperbesar *mesh* yang sudah ada. Secara umum langkah-langkah dalam melakukan analisis CFD dengan menggunakan FLUENT.

### Input Nilai Parameter-Parameter pada FLUENT

Pemodelan numerik dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat FLUENT versi 6.2.16. Simulasi numerik terhadap volume atur yang telah dibuat dengan program GAMBIT dilakukan untuk kondisi *steady*. Dalam pemodelan numerik tersebut, diperlukan beberapa asumsi, antara lain:

- Perpindahan panas secara konduksi pada dinding dalam maupun luar pada model sub buluh heksagonal diabaikan.
- Perpindahan panas radiasi dari dinding dalam maupun luar pada model sub buluh heksagonal diabaikan.

Tahap-tahap yang dilakukan dalam pemodelan numerik adalah sebagai berikut:

a. Mendefinisikan model.

- Solver

Pada penelitian ini digunakan pressured based karena aliran yang dianalisis bersifat *inkompresibel* dengan kecepatan rendah.

- Energi

Persamaan energi harus diaktifkan agar dapat memodelkan proses perpindahan panas yang terjadi dalam sistem.

b. Menentukan properties material yang digunakan.

Jenis fluida yang digunakan adalah nanofluida. Sifat-sifat fisik nanofluida seperti densitas, viskositas, konduktivitas termal, dan panas jenis dimodelkan sebagai fungsi temperatur.

**Tabel 1. Propertis material nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water**

Propertis material	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Water (1%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Water (3%)
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1021.7	1073.8
C <sub>p</sub> (Kapasitas panas) [J/kgK]	4.149	4.081
Konduktivitas termal [W/mK]	0.620	0.656
Viskositas [kg/ms]	8.17×10 <sup>-4</sup>	8.56×10 <sup>-4</sup>

c. Menentukan kondisi operasi

Pengaruh percepatan gravitasi juga diikutsertakan dalam sistem dengan nilai 9.8 m/s. *Gauge Pressure* = 0 Pa.

d. Menentukan kondisi batas (*boundary condition*).

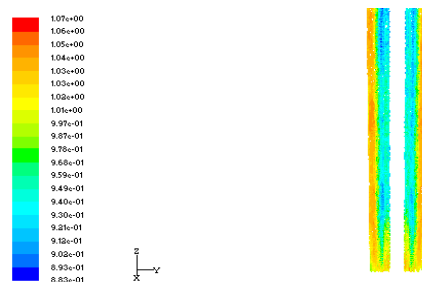
Pada pemodelan numerik, setting kondisi batas pada volume atur dilakukan dengan memasukkan nilai kuantitatif dari parameter-parameter yang terkait tipe *boundary*, diantaranya besar fluks panas pada permukaan silinder pemanas. Konfigurasi panas pada permukaan didekati dengan fluks panas konstan. Nilai-nilai parameter sebagai kondisi batas volume atur ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Input nilai parameter-parameter kondisi batas**

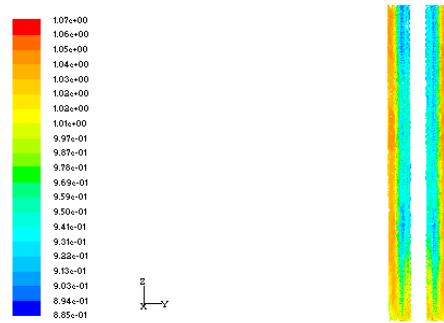
Tipe Boundary	Parameter	Nilai
Lubang masukan: Velocity inlet	Kecepatan nanofluida masuk	1 m/s
	Temperatur	300 K
Lubang Keluaran	<i>Gauge Pressure</i>	0 Pa
	<i>Backflow temperature</i>	300 K
Silinder pemanas	Fluks panas	100; 1000 W/m <sup>2</sup>

**Karakteristik Kecepatan Aliran pada Sub Buluh di Teras *Reaktor Small Modular Reactor (SMR)***

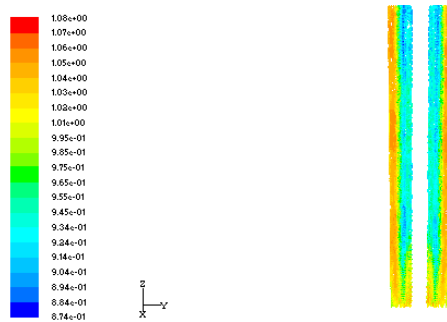
Karakteristik pola aliran pergerakan dari nanofluida sebagai fluida pendingin secara konveksi alamiah yang terjadi di teras reaktor nuklir tipe *Small Modular Reactor (SMR)* dengan sub buluh segi enam, dapat dilihat pada Gambar 4. hingga Gambar 6. berikut ini:



**Gambar 4. Kontur kecepatan aliran nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1%) dengan fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup>**



**Gambar 5. Kontur kecepatan aliran nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3%) dengan fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup>**



**Gambar 6. Kontur kecepatan aliran fluida Air (%) dengan fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup>**

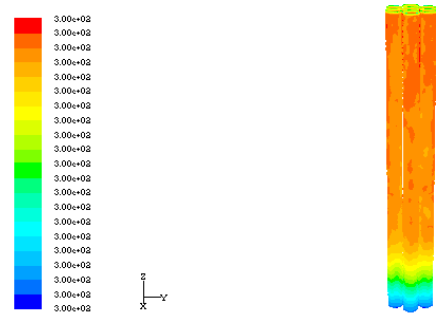
Pada Gambar 4. menunjukkan kondisi perlakuan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> untuk kondisi diberikan fluks panas 100 dan 1000 W/m<sup>2</sup> dengan fraksi volumenya sebesar 1%, dan untuk Gambar 5. merupakan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan fraksi volume sebesar 3%, dan untuk Gambar 6. menunjukkan perbandingan fluida pendingin yang biasanya digunakan pada pendingin reaktor nuklir yaitu fluida air H<sub>2</sub>O.

Gambar 4. hingga Gambar 6. merupakan kontur kecepatan aliran dari nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan fluida air ringan H<sub>2</sub>O pada posisi tengah dari sub buluh pada segi enam di teras reaktor nuklir tipe *Small Modular Reactor* (SMR). Pada Gambar tersebut memperlihatkan pola kecepatan aliran searah sumbu z (dari bawah ke atas) menunjukkan terjadinya penurunan kecepatan dimulai pada awal pergerakan aliran sebesar 1 m/s menurun pada akhir sub buluh menjadi sebesar 0.95 m/s. Hal ini membuktikan bahwa yang terjadi adalah konveksi paksa, yaitu terjadinya pergerakan fluida yang disebabkan oleh perbedaan kerapatan fluida dan juga karena faktor gradien temperatur fluidanya.

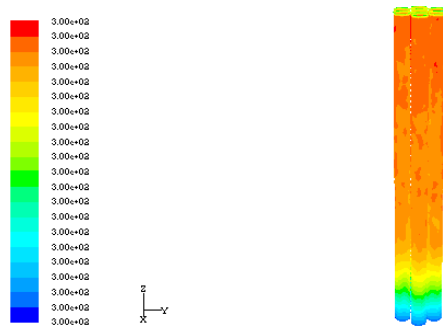
Dan, juga menunjukkan bahwa profil kecepatan aliran dari masing-masing nanofluida dan juga fluida air terjadinya peningkatan kecepatan aliran diawal ditandai dengan warna kuning sebagai awal kecepatan yang diberikan, kemudian menurun dengan ditandai pada hasil simulasi adalah warna biru muda.

### **Distribusi Suhu Dinding Silinder pada Sub Buluh di Teras *Reaktor Small Modular Reactor* (SMR)**

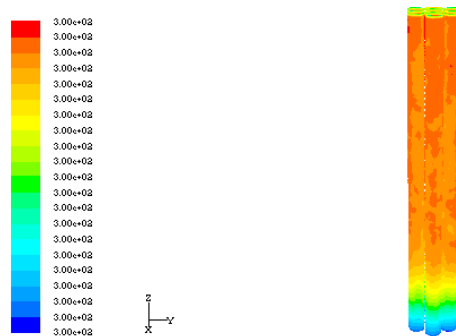
Selanjutnya, setelah mengetahui pola aliran yang terjadi pada teras reaktor nuklir tipe *Small Modular Reactor* (SMR) dengan susunan sub buluh segi enam, dapat dianalisis distribusi suhu pada dinding silinder bahan bakar ketika diberikan fluida pendinginnya yaitu nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan fluida air ringan H<sub>2</sub>O, dapat dilihat pada Gambar 7. hingga Gambar 9. berikut ini:



**Gambar 7. Kontur distribusi suhu untuk nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1%) dengan fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup>**



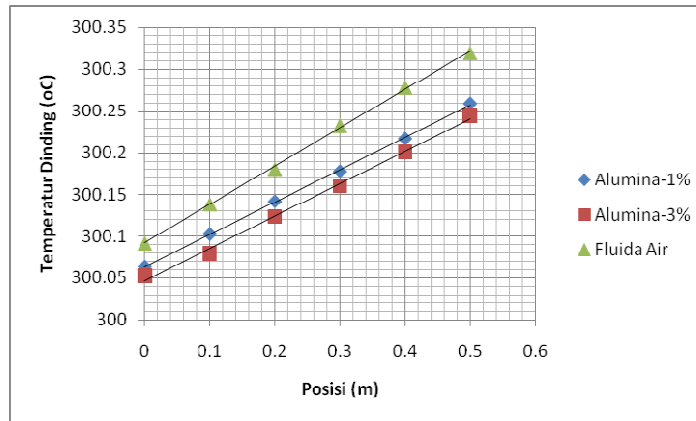
**Gambar 8. Kontur distribusi suhu untuk nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3%) dengan fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup>**



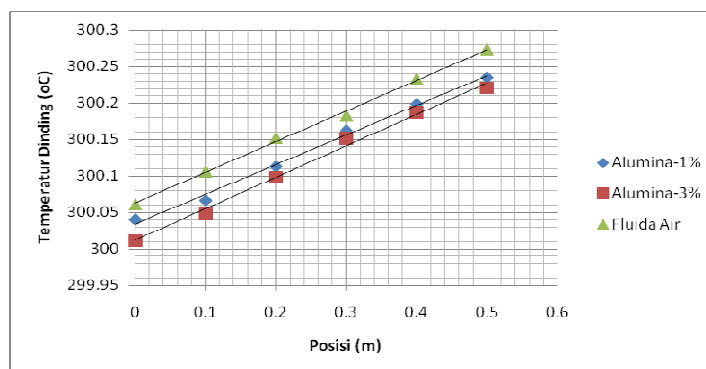
**Gambar 9. Kontur distribusi suhu untuk fluida Air H<sub>2</sub>O dengan fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup>**

Pada Gambar 7 hingga 8, merupakan kontur distribusi suhu dari masing-masing fluida pendingin, yaitu nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan fluida air ringan H<sub>2</sub>O pada kondisi fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup> untuk 7 elemen bakar pada susunan sub buluh segi enam pada teras reaktor nuklir *Small Modular Reactor* (SMR).

Dari Gambar diatas terlihat bahwa pola distribusi suhu pada masing-masing fluida pendingin memiliki kemiripan distribusi suhu pada silinder elemen bahan bakarnya, yaitu penyebaran suhu pada silinder awal searah sumbu z (pada 0 m hingga 0.5 m) akan mengalami kenaikan secara signifikan dan mendekati pola linear. Sehingga apabila dibuatkan grafik hubungan antara distribusi suhu dinding silinder terhadap posisi (m) untuk masing-masing fluida pendingin dengan kondisi fluks panas 100 W/m<sup>2</sup> dan 1000 W/m<sup>2</sup>, dapat dilihat pada Gambar 10. dan Gambar 11. dibawah ini:



**Gambar 10. Hubungan besaran distribusi suhu dinding silinder terhadap posisi (m) pada sub buluh segi enam di teras reaktor nuklir SMR untuk nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Air H<sub>2</sub>O dengan fluks panas 100 W/m<sup>2</sup>**



**Gambar 11. Hubungan besar distribusi suhu dinding silinder terhadap posisi (m) pada sub buluh segi enam di teras reaktor nuklir SMR untuk nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Air H<sub>2</sub>O dengan fluks panas 1000 W/m<sup>2</sup>**

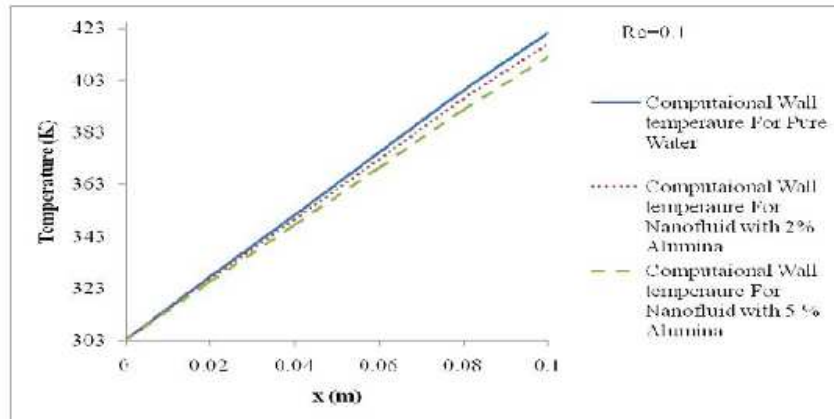
Dari Gambar 10. dan Gambar 11. memperlihatkan untuk masing-masing fluida pendingin yaitu nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan fluida air ringan H<sub>2</sub>O dengan masing-masing kondisi fluks panas di silinder elemen bahan bakar menunjukkan pola kecenderungan kenaikan seiring dengan posisi silinder tersebut, dimulai pada posisi 0 m hingga posisi 0.5 m (ujung silinder elemen bahan bakar).

Hal ini disebabkan faktor sifat-sifat fluida (kerapatan fluida, viskositas dan konduktivitas termal serta kapasitas panas) dari fraksi volume Alumina yang digunakan sebagai fluida pendingin. Dan untuk nilai besarnya temperatur dinding yang besar untuk fluida adalah karena nilai konduktivitas termal yang kecil dibandingkan konduktivitas termal yang dimiliki oleh nanofluida Alumina 1%, 2% dan 3%. Dimana nilai konduktivitas termal berbanding terbalik dengan temperatur dinding silinder elemen bahan bakar.

Dan, menunjukkan juga bahwa nanofluida memiliki temperatur dinding yang lebih kecil dibandingkan fluida air ringan (H<sub>2</sub>O). Hal ini membuktikan bahwa kecepatan yang diberikan sebesar 1 m/s tidak terlalu mempengaruhi temperatur dinding dari silinder elemen bahan bakar.

Hasil penelitian ini membuktikan riset yang diperoleh oleh Pandey, dkk, seperti Gambar 12. berikut ini:





**Gambar 12. Hubungan besar distribusi suhu dinding terhadap posisi (m) pada *microchannel* [Pandey, 2011]**

Dengan membandingkan grafik yang diperoleh antara Gambar 10 dan 11 terhadap Gambar 12 [Pandey, 2011] menunjukkan pola yang sama, yaitu fluida air ringan memiliki nilai suhu dinding yang lebih besar dibandingkan suhu dinding untuk nanofluida  $Al_2O_3$ , hal ini dipengaruhi oleh pergerakan kecepatan aliran pada sub buluh sehingga terlihat penaknaan pola penyebaran distribusi suhu pada dinding silinder.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini memberikan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pola penyebaran kecepatan aliran pada masing-masing fluida pendingin (fluida air ringan ( $H_2O$ ) dan nanofluida  $Al_2O_3$  (1% dan 3%) memiliki pola yang hampir sama, yaitu diawal mengalami kecepatan yang besar, seiring dengan ketinggian secara paksa kemudian menjadi alamiah dimana terjadi penurunan kecepatan aliran diujung silinder.
2. Distribusi suhu pada dinding pada analisis perpindahan panas yang terjadi di sub buluh segi enam pada *Small Modular Reactor* (SMR) memperlihatkan kecenderungan kenaikan secara signifikan dan mendekati kenaikan secara linear pada posisi searah sumbu z, dan membuktikan pula bahwa fluida air memiliki nilai distribusi suhu dinding yang lebih besar daripada nanofluida  $Al_2O_3$  (1% dan 3%)

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Muhammadiyah Jakarta, yang telah memberikan dana hibah penelitian Institusi untuk mengembangkan penelitian mengenai nanofluida dan reaktor nuklir CAREM-25 pada tahun 2014.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bang, I. C., and Jeong, J. H., 2011, *Nanotechnology for Advanced Nuclear Thermal-Hydraulic and Safety: Boiling and Condensation*, Nuclear Engineering and Technology, Volume 43 No 3
- Buongiorno, et. al, 2008, *Alumina Nanoparticles Enhance the Flow Boiling Critical Heat Flux of Water at Low Pressure*, *Jurnal of Heat Transfer*, Volume 130
- Das, S.K., et al, 2007, *Nanofluids Science and Technology*, Jhon Wiley and Sons, Inc., United State of America
- Fuzaetun, 2007, *Penentuan Distribusi Daya Reaktor PLTN dengan Bahan Bakar Dimuati Thorium*, Skripsi Program Sarjana, Universitas Negeri Semarang, Semarang
- Gimenez., M.O., 2011, *CAREM Technical Aspects, Project and Licensing Status*, Interregional Worksho on Advanced Nuclear Reactor Technology, Vienna
- Li, C. H., Peterson, G.P., 2010, *Experimental Studies of Natural Convection Heat Transfer  $Al_2O_3/DI$  Water Nanoparticle Suspensions (Nanofluids)*, *Advances in Mechanical Engineering*, Volume 2010, Hindawi Publishing Corporation



- Nazar, R., 1997, *Kaji Teoritik Aspek Termohidrolik Reaktor Riset Pada Daya 2 MW*, Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Pandey, A.K., 2011, *A Computational Fluid Dynamics Study of Fluid Flow and Heat Transfer in a Micro Channel*, Tesis Program Magister, National Institute of Technology Rourkela, India
- Ramadhan, A.I, 2012, *Analisis Perpindahan Panas Fluida Pendingin Nanofluida Di Teras Reaktor (Pressurized Water Reactor) Dengan Computational Fluid Dynamics*, Tesis Program Magister, Universitas Pancasila, Jakarta
- Umar, E., 2007, *Studi Termohidrolik Pada Reaktor Nuklir-Penelitian Berbahan bakar Silinder*, Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Wang, X. Q., and Mujumdar, S. A., 2008, *A Review On Nanofluids-Part II: Experiments and Applications*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Volume 2008, Brazil
- Wong, K. V., and Leon, O.D., 2010, *Applications of Nanofluids : Current and Future*, Advances in Mechanical Engineering, Volume 2010, Hindawi Publishing Corporation
- Yuliasyari, F., 2007, *Perpindahan Kalor Nanofluida Pada Sistem Pendingin Komponen Elektronik*, Tesis Program Magister, Universitas Indonesia, Jakarta