

## **PENGARUH PENAMBAHAN ALIRAN DARI BAWAH KE ATAS (BOTTOM-UP) TERHADAP KARAKTERISTIK PENDINGINAN TERAS REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG**

**V. Indriati Sri Wardhani**

*vero@batan-bdg.go.id*

*Pusat Teknologi Nuklir Bahan Dan Radiometri-Batan-Bandung*

*Jl. Tamansari 71 Bandung*

Diterima 6 Nopember 2009, diterima dalam bentuk perbaikan 19 Januari 2010, disetujui 20 Januari 2010

### **ABSTRAK**

**PENGARUH PENAMBAHAN ALIRAN DARI BAWAH KE ATAS (BOTTOM-UP) TERHADAP KARAKTERISTIK PENDINGINAN TERAS REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG.** Panas yang dihasilkan dari reaksi fisi akan menaikkan temperatur dinding elemen bakar. Oleh karena itu fluida kerja yang berfungsi sebagai pendingin primer dalam tanki reaktor harus dapat memindahkan panas dengan baik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan unjuk kerja sistem pendinginan reaktor nuklir berbahan bakar silinder melalui perpindahan panas konveksi alamiah dengan sistem pendinginan yang dilakukan secara konveksi paksa. Pendinginan konveksi paksa dilakukan dengan cara menyemprotkan fluida pendingin dari bawah teras reaktor. Hasilnya menunjukkan bahwa unjuk kerja pendinginan konveksi dengan tambahan sprayer lebih baik jika dibandingkan dengan pendinginan konveksi alamiah. Hal ini ditunjukkan melalui temperatur maksimum pendingin di bagian atas teras sebelum ada penyemprot (pendinginan konveksi alamiah) 88,55 °C, setelah ditambah penyemprot (pendinginan konveksi paksa) turun menjadi 47,35 °C. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa dengan penambahan penyemprot yang dipasang di bawah teras reaktor akan dapat memperbaiki pendinginan di dalam kanalnya dan dapat mengurangi timbulnya gelembung.

*Kata kunci: pendinginan, primer, konveksi, alamiah, paksa, teras reaktor.*

### **ABSTRACT**

**INFLUENCE OF THE ADDING BOTTOM-UP FLOW RATE TO THE CHARACTERISTIC OF THE COOLING SYSTEM ON TRIGA 2000 BANDUNG REACTOR CORE.** Heat generated from the fission reaction will heat up the cladding of the fuel element. For this reason, the fluid which used as a primary coolant in the reactor tank must have a good conductivity. This research is done to know the comparison between the performance of the natural convection cooling system and the performance of the forced convection cooling system which is done by spraying the bottom-up flow rate to the cylindrical nuclear reactor core. The result shows that the forced convection by adding spraypipe has a better performance than that of the natural convection. This case is indicated by decreasing of the maximum temperature on the top of the reactor core from 88,55 °C to 47,35 °C after the adding bottom-up flow rate. It can be assumed that the adding of the spraying bottom-up flow rate will give a better performance on the cooling system and will reduce the bubbles formation.

*Key words : cooling system, primary coolant, natural convection, forced convection, reactor core*

### **PENDAHULUAN**

Panas yang dihasilkan dari proses reaksi fisi di dalam teras reaktor nuklir harus dipindahkan ke fluida pendingin untuk kemudian dibuang kelingkungan melalui menara pendingin. Pembuangan panas tersebut dilakukan melalui mekanisme perpindahan panas sehingga tidak terjadi akumulasi panas di dalam teras reaktor. Pendinginan di dalam reaktor nuklir dilakukan oleh sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Pada pendinginan primer terjadi perpindahan panas secara konveksi dari permukaan kelongsong elemen bakar ke fluida pendingin. Mekanisme perpindahan panas konveksi tersebut dapat terjadi secara alamiah maupun secara paksa. Konveksi alamiah terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara kelongsong elemen bakar dengan fluida pendingin<sup>[1]</sup>. General Atomics menentukan bahwa untuk reaktor jenis TRIGA dengan daya kurang dari 2 MW digunakan pendinginan secara konveksi alamiah (*natural convection*), sedang untuk daya yang sama dan lebih besar 2 MW digunakan konveksi paksa (*forced convection*). Kenyataan yang terjadi jika reaktor TRIGA

dioperasikan di atas daya 1,2 MW sudah terlihat adanya gelembung di dalam fluida pendinginnya, seperti pada reaktor TRIGA 2000 Bandung dan gelembung ini semakin banyak jika dayanya dinaikkan sampai 2 MW <sup>[2]</sup>. Hal ini membuktikan bahwa pendinginan dengan konveksi alamiah tidak cukup efektif karena aliran secara konveksi alamiah tidak cukup besar untuk memindahkan panas, sehingga perlu dilakukan penambahan aliran secara konveksi paksa untuk menambah efektivitas pendinginannya. Sistem konveksi paksa ini dilakukan dengan menambah besarnya aliran fluida pendingin ke dalam kanal teras reaktor melalui bantuan pompa <sup>[3]</sup>. Dalam hal ini penambahan aliran fluida pendingin dilakukan dengan menyemprotkan fluida kerja dari bawah ke atas teras (*Bottom-Up*).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh aliran paksa yang di semprotkan ke dalam teras terhadap efektivitas pendinginan melalui prediksi distribusi laju alir pendingin dan prediksi distribusi temperatur di dalam kanal teras reaktor.

Untuk mengetahui efektivitas pendinginan di dalam kanal teras reaktor sebenarnya diperlukan eksperimen untuk mengukur temperatur dan kecepatan fluida pendingin. Akan tetapi sampai saat ini pengukuran tersebut sulit dilakukan karena belum ada alat ukur yang dapat dipasang di dalam kanal teras reaktor. Oleh karena itu dilakukan analisis dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan solusi matematis pada perumusan persamaan dinamika fluida yang digunakan untuk menggambarkan fenomena aliran fluida tersebut.

Melalui penelitian ini diharapkan variabel-variabel perpindahan panas dalam teras reaktor seperti distribusi temperatur dan kecepatan fluida pendingin dapat diketahui, sehingga dapat diprediksi pengaruh penambahan aliran fluida pendingin terhadap efektivitas pendinginan teras reaktor TRIGA berdaya antara 1 MW hingga 2 MW.

Panas yang dihasilkan dalam reaktor penelitian dirancang sekecil mungkin, sehingga dapat dibuang ke lingkungan. Pengambilan panas pada reaktor dilakukan dengan sistem pendingin yang terdiri dari sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Panas yang berasal dari teras reaktor dibawa ke sistem pendingin primer kemudian dilewatkan melalui alat penukar panas dan selanjutnya panas dibuang ke lingkungan melalui sistem pendingin sekunder. Di dalam sistem pendingin primer proses perpindahan panas dari teras ke fluida pendingin berlangsung secara konveksi.

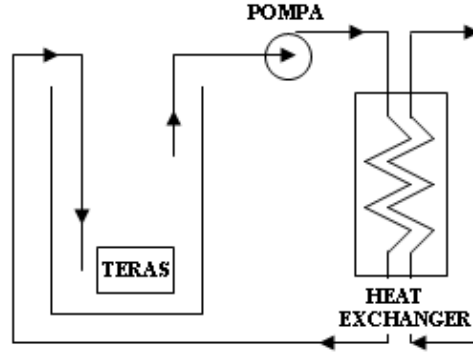
General Atomic telah menentukan bahwa untuk jenis reaktor TRIGA dengan daya kurang dari 2 MW akan aman menggunakan cara konveksi alamiah (*natural convection*) sedangkan untuk reaktor TRIGA dengan daya 2 MW atau lebih menggunakan konveksi paksa (*forced convection*). Skema diagram reaktor TRIGA menggunakan konveksi alamiah dan konveksi paksa ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2<sup>[4]</sup>.

Pada kenyataannya reaktor TRIGA dengan daya 2 MW jika menggunakan pendinginan secara konveksi alamiah sistem pendingin primernya tidak akan cukup untuk memindahkan panas dari permukaan kelongsong elemen bakar ke fluida pendingin, seperti yang terjadi di reaktor TRIGA 2000 Bandung. Hal ini terbukti jika reaktor TRIGA 2000 Bandung dioperasikan pada daya di atas 1,2 MW akan terlihat mulai adanya gelembung-gelembung udara yang keluar dari teras reaktor. Gelembung tersebut secara visual akan bertambah jumlahnya pada saat daya reaktor dinaikkan sampai mencapai maksimum 2 MW. Hal tersebut menunjukkan bahwa pendinginan cara konveksi alamiah tidak efektif. Oleh karena itu perlu dilakukan penambahan aliran pendingin dengan cara konveksi paksa<sup>[4]</sup>.

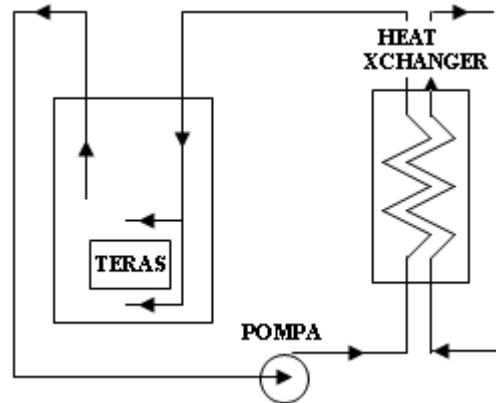
Dalam penelitian ini dilakukan analisis penambahan aliran konveksi paksa dengan menambahkan 7 buah pipa penyemprot yang diletakkan di bawah teras untuk mengalirkan fluida pendingin ke dalam kanal teras reaktor. Penambahan 7 pipa di bawah teras tersebut diharapkan mampu mempercepat laju pendinginan sehingga diperoleh temperatur fluida yang keluar teras menjadi lebih rendah, sehingga dapat mengurangi terjadinya gelembung di dalam teras reaktor.

Persamaan Navier-Stokes digunakan dalam analisis ini untuk memodelkan pergerakan aliran fluida yang menyangkut perpindahan panas. Oleh karena itu diperlukan suatu perangkat lunak yang disebut *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Perangkat lunak tersebut memprediksi aliran berdasarkan model matematika khususnya memecahkan persamaan Navier-Stokes menggunakan metoda beda hingga. Persamaan ini merupakan persamaan differensial non linier yang sangat sulit dicari solusi analitisnya, karena itu metoda solusi yang digunakan adalah metoda numerik yang memerlukan diskritisasi titik-titik yang tersusun secara teratur di sekitar

permukaan benda yang dialiri fluida yang disebut dengan grid. Persamaan Navier-Stoke terdiri dari persamaan persamaan kontinuitas, kekekalan momentum dan kekekalan energi, seperti tertulis pada persamaan 1, 2, 3, 4, 5.



**Gambar 1.** Blok diagram model pendingin primer reaktor TRIGA dengan konveksi alamiah



**Gambar 2.** Blok diagram model pendingin primer reaktor TRIGA dengan konveksi paksa

Persamaan kontinuitas :

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

Persamaan kekekalan momentum :

$$\text{Momentum arah x : } \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}_f} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$$\text{Momentum arah y : } \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}_f} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad (3)$$

$$\text{Momentum arah z : } \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w^2)}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}_f} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (4)$$

Persamaan kekekalan energi :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (E_T)}{\partial t} + \frac{\partial (uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial (vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial (wE_T)}{\partial z} = & - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} - \frac{1}{\text{Re}_f \text{Pr}_f} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \\ & \frac{1}{\text{Re}_f} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

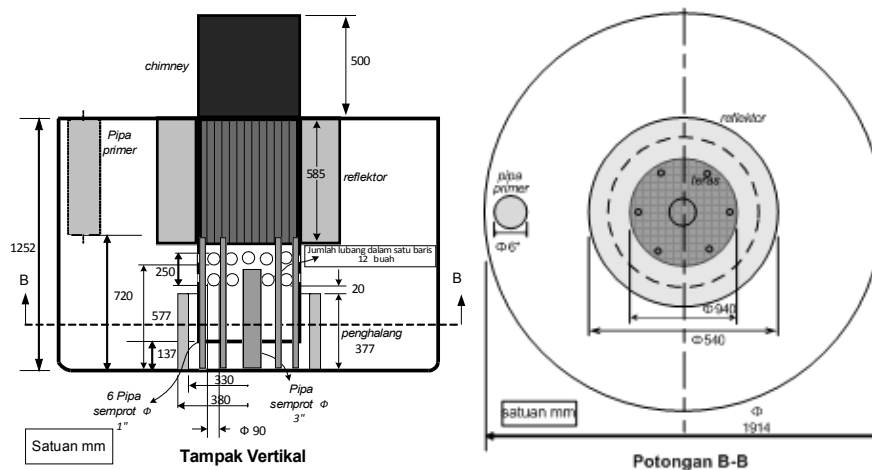
Persamaan-persamaan matematika ini dalam CFD diselesaikan secara iterasi. Setiap iterasi seperti yang diterangkan dalam algoritma akan menampilkan harga residu dari setiap persamaan yang diselesaikan. Harga

residu ini menggambarkan seberapa dekat setiap persamaan beda hingga dalam medan aliran dipenuhi. Residu pada setiap variabel aliran memberikan ukuran seberapa besar kesalahan solusi pada setiap iterasi. Hasil perhitungan dapat dikatakan konvergen bila semua persamaan pada setiap titik dalam domain solusi berada dalam kesetimbangan.

## METODOLOGI

Data-data tentang reaktor nuklir berelemen bakar silinder merupakan hal yang penting untuk diketahui karena akan berfungsi sebagai masukan dalam analisis termohidrolik, sebagai contoh dalam hal ini adalah data-data reaktor TRIGA yang berbahan bakar silinder<sup>[5]</sup>. Data-data tersebut akan dipergunakan untuk melakukan urutan tahap dalam proses analisis yang menggunakan perhitungan dinamika fluida (*computational fluid dynamics*). Reaktor TRIGA terdiri dari banyak struktur, sistem, dan komponen yang dirancang dan dibuat untuk menjalankan fungsinya masing-masing. Karena keterbatasan kemampuan komputer maka dalam melakukan analisis tidak harus melibatkan semua komponen yang ada, tetapi hanya komponen geometri yang dibutuhkan dengan keadaan batasnya.

### Pemodelan Geometri



Gambar 3. Model geometri dengan 7 buah pipa semprot

Pembuatan model geometri di sini hanya melibatkan komponen teras reaktor, 121 elemen bakar, *top plate*, *bottom plate*, bawah teras, refektor, penghalang aliran, pipa inlet primer, chimney dan ditambah 7 buah pipa semprot yang dipasang di bawah teras, satu di tengah disebut inlet semprot A dan enam di sekelilingnya disebut inlet semprot B, lihat Gambar 3. Karena keterbatasan memori computer maka dalam analisis ini modeling geometri dilakukan sebagai berikut :

1. Hanya pada sekitar kanal teras reaktor sepanjang arah aksial elemen bakar.
2. Melibatkan 121 elemen bakar di dalam teras reaktor, pipa inlet primer, *refektor*, penghalang aliran, *chimney* dan volume tangki dan 7 pipa penyemprot yang diletakan di bawah teras reaktor untuk mengalirkan fluida pendingin dari bawah ke atas teras reaktor.

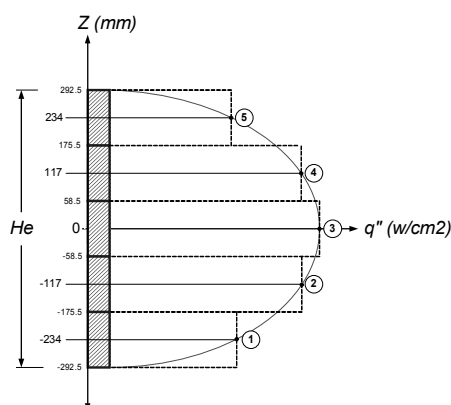
### Spesifikasi Rancangan Termohidrolika Teras Reaktor

1. Daya : 2000 kW
2. Temperatur fluida pendingin masuk tangki :  $T_{\text{masuk}} = 32^{\circ}\text{C}$ .
3. Massa jenis air pendingin :  $\rho = 998,2 \text{ kg / m}^3$
4. Keadaan operasi :
  - a. Debit sistem pendingin primer :  $Q = 600 \text{ Gpm} = 2271 \text{ lpm} = 0.0378 \text{ m}^3/\text{s}$ .
  - b. Laju aliran massa inlet primer :  $\dot{m} = \rho \cdot Q = 998,2 \times 0.0378 = 38 \text{ kg/s}$

5. Penambahan 7 buah pipa penyemprot dengan laju alir yang divariasikan seperti terlihat pada Tabel 1. Alasan penambahan 7 buah pipa penyemprot selain disesuaikan dengan dimensi dan tempat juga diharapkan dapat menurunkan temperatur kanal teras reaktor.
6. Panas yang dibangkitkan dalam elemen bahan bakar akan dipindahkan ke dalam fluida pendingin. Karena kecepatan pembangkitan panas berbanding langsung dengan fluks neutron dan fluks neutron bervariasi harganya ke arah aksial maupun radial dalam teras reaktor, maka kecepatan pembangkitan panas dalam elemen bahan bakar akan tergantung pada letak elemen bahan bakar dalam teras reaktor. Untuk menyederhanakan analisis diasumsikan bahwa aliran panas arah radial merata ke segala arah, sedangkan distribusi fluks panas arah aksial tidak merata sesuai dengan hasil perhitungan neutronik dalam program Citation. Distribusi fluks panas arah aksial dalam elemen bakar pada dasarnya merupakan fungsi cosinus seperti digambarkan pada Gambar 4.

**Tabel 1.** Keadaan operasi pada keadaan modifikasi

| No | Inlet Primer     |         | Inlet Semprot A |           | Inlet Semprot B |          |
|----|------------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|----------|
|    | Q                | m       | Q               | m         | Q               | m/6      |
| 1  | 600 gpm/2271 lpm | 38 kg/s | 2000 lpm        | 33,3 kg/s | 2000 lpm        | 5,6 kg/s |
| 2  | 600 gpm/2271 lpm | 38 kg/s | 3000 lpm        | 50 kg/s   | 3000 lpm        | 8,3 kg/s |
| 3  | 600 gpm/2271 lpm | 38 kg/s | 4000 lpm        | 66 kg/s   | 2000 lpm        | 5,6 kg/s |
| 4  | 600 gpm/2271 lpm | 38 kg/s | 5000 lpm        | 83 kg/s   | 2000 lpm        | 5,6 kg/s |
| 5  | 600 gpm/2271 lpm | 38 kg/s | 5000 lpm        | 83 kg/s   | 3000 lpm        | 8,3 kg/s |



**Gambar 4.** Distribusi fluks panas arah aksial

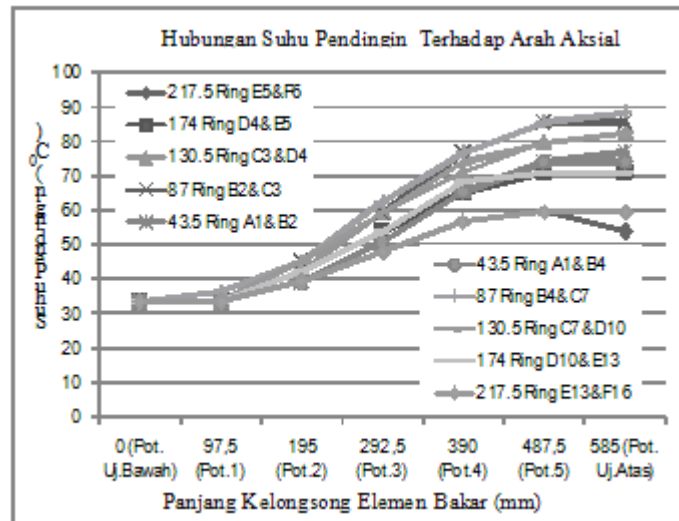
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh aliran paksa yang dialirkan ke dalam teras terhadap efektivitas pendinginan reaktor. Oleh karena itu perlu diketahui perbedaan unjuk kerja antara pendinginan teras sebelum dan setelah ditambah 7 buah penyemprot. Tujuh buah penyemprot mengalirkan fluida pendingin dari bawah ke atas teras sehingga akan menambah besarnya aliran fluida di dalam kanal teras reaktor.

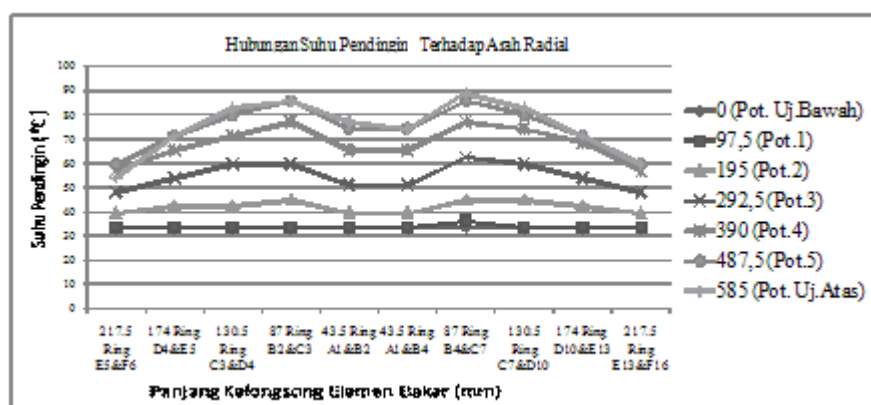
### Dinamika aliran fluida pada kondisi teras reaktor sebelum ditambah penyemprot

Aliran fluida pendingin dari pipa primer diasumsikan tidak memberikan pengaruh terhadap aliran fluida dalam kanal teras reaktor tetapi hanya berfungsi supaya tidak terjadi penumpukan panas di dalam tangki reaktor dengan cara memindahkan panas dari tangki reaktor ke fluida pendingin, sehingga dapat dipertahankan temperatur masuk teras reaktor pada temperatur rancangannya (32 °C). Besarnya laju alir pendingin primer 600 gpm akan memberikan kecepatan sekitar 2,3 – 2,42 m/s, pada saat fluida berada pada teras reaktor terjadi penurunan kecepatan, menjadi 0,484 – 0,605 m/s. Hal ini disebabkan karena fluida pendingin primer yang masuk teras hanya dapat masuk dari arah samping melalui 24 lubang di bawah teras, lihat Gambar 3. Sedangkan aliran di dalam teras sendiri terjadi karena pengaruh dari proses perpindahan panas secara konveksi alamiah

dari elemen bakar ke fluida pendingin. Fluida pendingin di dalam kanal dekat kelongsong elemen bakar akan terpanaskan sehingga kerapatannya berkurang menjadi lebih kecil dibandingkan dengan fluida yang jauh dari dinding elemen bakar, akibatnya fluida tersebut akan bergerak ke atas. Karena kecepatan fluida yang bergerak ke atas rendah maka perpindahan panasnya kurang efektif. Akibatnya temperatur air pada kanal teras reaktor naik sampai mendekati titik jenuhnya, sehingga dapat mengakibatkan terjadinya gelembung.



Gambar 5. Distribusi temperatur fluida pendingin arah aksial sebelum ditambah penyemprot.



Gambar 6. Distribusi temperatur fluida pendingin arah radial sebelum ditambah penyemprot.

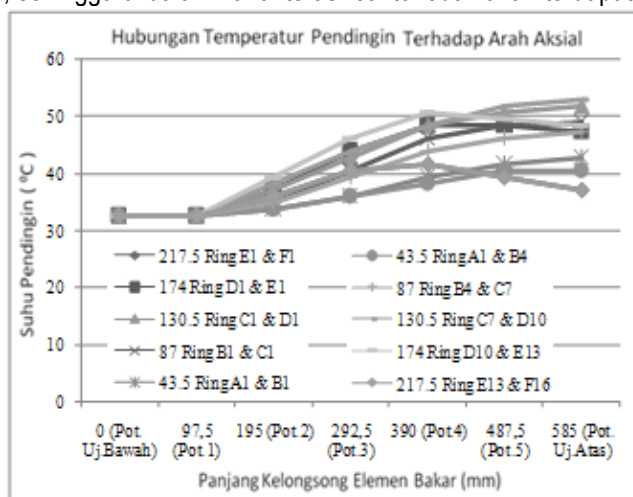
Distribusi temperatur arah aksial di dalam kanal teras reaktor pada saat sebelum ditambah penyemprot dapat digambarkan pada Gambar 5. Di sini terlihat bahwa temperatur fluida keluaran teras di ring B-4 dan C-7 tinggi yaitu 88,55 °C. Hal ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas konveksi alamiah pada saat sebelum ditambah penyemprot kurang efektif, karena kecepatan fluida pendinginnya sangat rendah sehingga kurang banyak memindahkan energi dalam bentuk panas.

Distribusi temperatur fluida arah radial pada kanal teras reaktor memiliki karakteristik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Pada kanal di ring E dan F temperaturnya rendah, kemudian naik ke arah ring C dan B, tetapi di ring A turun karena di ring A tidak ada elemen bakar.

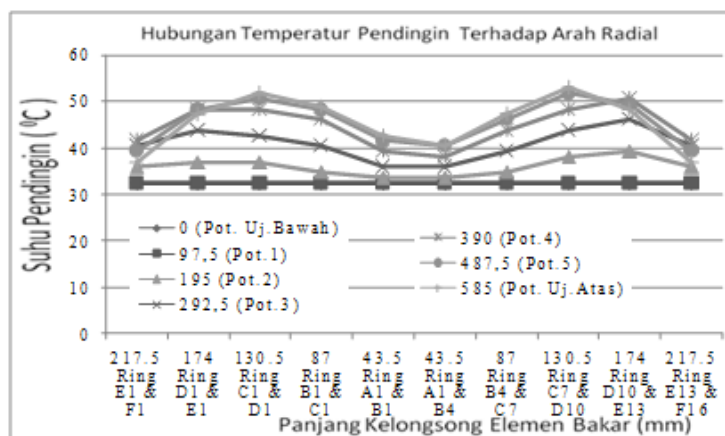
#### Dinamika aliran fluida pada kondisi teras reaktor setelah ditambah 7 buah penyemprot

Untuk menurunkan temperatur kanal teras reaktor diperlukan penambahan laju alir fluida pendingin, yaitu dengan menambah 7 buah penyemprot yang dipasang di bawah teras reaktor. Penyemprotan fluida pendingin dilakukan dengan beberapa variasi laju alir seperti terlihat pada Tabel 1. Kecepatan masuk fluida pada masukan

penyemprot A adalah 20,4 – 21,4 m/s, sedang yang keluar teras sebesar  $8.85 \times 10^{-4}$  - 1,07 m/s. Bertambahnya laju alir fluida yang masuk ke kanal teras reaktor akan menyebabkan aliran fluida pendingin menjadi lebih besar sehingga pemindahan energi dalam bentuk panas akan lebih efektif dan dapat mengurangi penumpukan panas, yang berakibat berkurangnya terjadinya gelembung di dalam teras. Distribusi temperatur arah aksial pada saat digunakan 7 buah penyemprot dapat dilihat di Gambar 7. Dengan penambahan penyemprot tersebut temperatur keluaran teras di ring B-4 dan C-7 turun menjadi 47,35 °C. Temperatur ini jelas berada jauh di bawah temperatur jenuh dari fluida pendingin, sehingga di dalam kanal teras reaktor tidak akan terdapat gelembung.



**Gambar 7.** Distribusi temperatur fluida pendingin arah aksial setelah ditambah penyemprot.



**Gambar 8.** Hubungan temperatur pendingin arah radial terhadap panjang kelongsong

Distribusi temperatur arah radial setelah ditambah penyemprot dapat digambarkan seperti pada Gambar 8. Secara keseluruhan terlihat bahwa temperatur pendingin di dalam kanal turun setelah ditambah penyemprot, dengan puncak tertingginya adalah 53 °C di ring C-7 dan D-10. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur di dalam kanal teras reaktor jika ditambah penyemprot akan jauh di bawah temperatur jenuhnya, yang berarti belum terjadi gelembung.

## KESIMPULAN

Setelah di lakukan analisis tampak pada keadaan sebelum ditambah penyemprot, temperatur tertinggi terjadi pada kanal antara ring B-4 dan C-7 88.55 °C. Hal ini menunjukkan bahwa sebelum ditambah penyemprot proses perpindahan panas yang terjadi adalah konveksi alamiah, sehingga pendinginanya kurang efektif dan

dapat mengakibatkan terjadinya gelembung. Sedangkan pada saat ditambah penyemprot terjadi perpindahan panas konveksi paksa, sehingga temperatur tertinggi pada kanal antara ring B-4 dan C-7 menjadi 47,35 °C. Dengan penambahan penyemprot ini temperatur tertinggi di dalam kanal teras yang diperoleh jelas berada jauh di bawah temperatur jenuh dari fluida pendingin, sehingga di dalam kanal teras reaktor tidak akan terdapat gelembung.

Pada arah radial temperatur tertinggi sebelum ditambah penyemprot adalah 88,55 °C di ring B-4 dan C-7, sedangkan pada saat ditambah penyemprot temperatur tertingginya adalah 53 °C di ring C-7 dan D-10. Berdasarkan hasil analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan adanya penambahan 7 buah penyemprot yang dipasang di bawah teras reaktor akan sangat bermanfaat, karena dapat menurunkan temperatur fluida pendingin dan dapat menurunkan timbulnya gelembung di kanal teras reaktor.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

1. PATRICK H. OOSTHUIZEN and DAVID NAYLOR, Introduction to Convective Heat Transfer Analysis, Mechanical Engineering Series, Mc Graw-Hill International Edition, (1999); 1-4.
2. Report on ANSTO Assignment to Indonesia Bandung TRIGA Mark II Reactor Primary Water Boiling, Australia, (2005), 9-10.
3. YUNUS A QENGEL., Heat Transfer : a practical approach second edition in SI units, Mc Graw-Hill, (2004); 486-487.
4. <http://www.ansn.org/ansn.org/common/documents/training>, IAEA Triga reactor main system, Education and training nuclear safety and security, Produced for the nuclear installation safety division of the IAEA, (2004).
5. TEUKU ALFA, Drs, p MSc., Karakteristik desain reaktor TRIGA 2000, Pelatihan penyegaran operator dan supervisor reaktor TRIGA 2000, Bandung, (2005).