

ANALISIS TERMOHIDROLIKA TERAS REAKTOR SUSUNAN HEKSAGONAL

Adolf Asih S.⁽¹⁾, Aryadi Suwono⁽²⁾, Toto Hardianto⁽²⁾

⁽¹⁾PPSM – BATAN, Kawasan Puspiptek Serpong-Tangerang-15310

⁽²⁾Laboratorium Termodinamika, PPAU-Ilmu Rekayasa, ITB

Ringkasan

Pada penelitian ini telah dipelajari aspek termohidrolika teras reaktor susunan heksagonal mengenai distribusi temperatur permukaan bahan bakar serta temperatur dan kecepatan arah aksial fluida. Pengamatan data hanya dilakukan pada sub-buluh tengah, pinggir dan pojok. Pada penelitian ini telah dilakukan pemodelan susunan teras reaktor dan reflektor berbentuk heksagonal. Pembangkitan daya untuk masing-masing bahan bakar diasumsikan tetap, yaitu pada 250 kwatt, 375 kwatt dan 500 kwatt. Analisis model teras reaktor dilakukan dengan paket program Fluent Versi 4.25 yang ada di Laboratorium Termodinamika PPAU-IR ITB. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa teras reaktor yang dimodelkan memiliki temperatur permukaan bahan bakar dan fluida rendah. Hasil penelitian ini merupakan langkah awal dari analisis termohidrolika reaktor Triga Mark II di BATAN.

Abstract

In this experiment, the study focusses on reactor core thermohydraulic aspects especially the distributions of fuel surface temperature, fluid temperature and fluid axial velocity. Simulation data were obtained in the middle, at the edge and at the corner sub-channels. In this experiment, modeling of hexagonal configuration of reactor core and reflector was carried out. The power generations were assumed constant at 250 kwatt, 375 kwatt and 500 kwatt for each fuel element. This model was prepared and analyzed using Fluent Version 4.25 package program available at the Thermodynamic Laboratory of IURC-ES. The result shows that this reactor core model gives low fuel surface and fluid temperatures.

Keywords: reactor core, thermohydraulic, temperature distribution

1. PENDAHULUAN

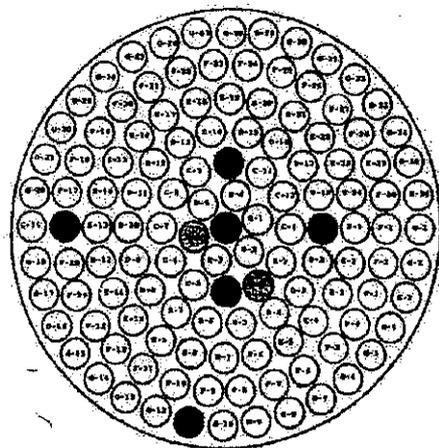
1.1. Latar Belakang

Reaktor Triga Mark II dipasang oleh General Atomic, San Diego, California, USA pada tahun 1963 di Pusat Penelitian Teknik Nuklir BATAN, Bandung. Sejak bulan Oktober 1964, reaktor ini dioperasikan pada daya 250 kWatt. Pada tahun 1971, daya reaktor ini ditingkatkan menjadi 1 MW dengan cara memperluas teras reaktor, yang semula hanya sampai ring F menjadi sampai ring G, seperti yang ditampilkan pada Gambar 1 [1,7].

Reaktor Triga Mark II termasuk jenis reaktor penelitian, dimana neutron hasil belah dimanfaatkan untuk berbagai penelitian, irradiasi dan produksi radioisotop. Produksi radioisotop, terutama *Fission Product Molybdenum* (FPM), dijadikan prioritas utama pendayagunaan reaktor di masa datang [1]. Untuk mendukung rencana tersebut, saat ini sedang diupayakan untuk dinaikkan kapasitas daya reaktor Triga Mark II menjadi 2 MW dengan cara mengubah susunan bahan bakar di dalam teras reaktor, dari bentuk susunan lingkaran (Gambar 1) menjadi susunan heksagonal seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2 [8].

Di dalam setiap penggunaan reaktor nuklir selalu mengandung potensi bahaya dengan terakumulasinya zat-zat radioaktif sebagai hasil reaksi

belah yang terjadi pada reaktor [2,3]. Oleh karena itu, pembangunan reaktor nuklir dan pengoperasiannya harus dilakukan dengan menerapkan persyaratan keselamatan yang sangat ketat. Salah satu aspek keselamatan yang sangat penting adalah aspek termohidrolika.



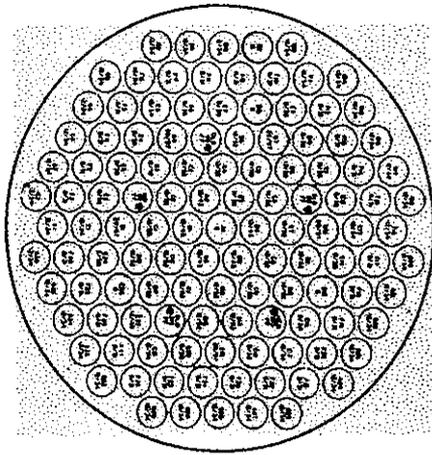
Gambar 1: Susunan bahan bakar berbentuk lingkaran dan teras reaktor berbentuk lingkaran.

1.2. Ruang Lingkup

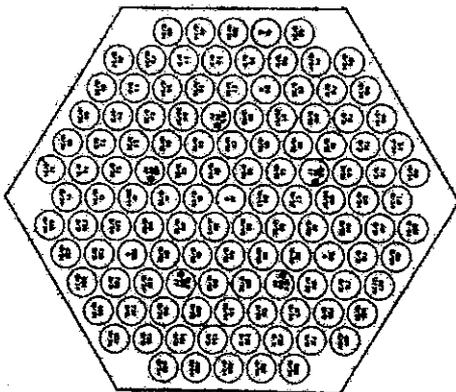
Untuk lebih mendekati kenyataan, pada penelitian ini dipilih model susunan bahan bakar

berbentuk heksagonal dan terasnya juga berbentuk heksagonal, seperti ditampilkan dalam Gambar 3.

Penelitian ini akan difokuskan pada aspek termohidrolika, yang mencakup penentuan distribusi temperatur permukaan bahan bakar, serta temperatur dan kecepatan fluida pendingin.



Gambar 2: Susunan bahan bakar berbentuk heksagonal dan teras reaktor berbentuk lingkaran.



Gambar 3: Susunan bahan bakar berbentuk heksagonal dan teras reaktor berbentuk heksagonal.

1.3. Metoda Pengkajian Masalah

Model bahan bakar dan teras reaktor berbentuk heksagonal dianalisis dengan menggunakan paket program *Fluent Versi 4.25* yang ada di Laboratorium Termodinamika PPAU-IR, ITB Bandung. Reinaldy dkk telah melakukan pengujian paket program ini dengan sangat teliti [8]. Dalam analisis yang dilakukan, diasumsikan bahwa fluida pendingin memiliki sifat sebagai fluida inkompresibel, aliran turbulen dengan kondisi tunak dan sifat-sifat fisika konstan.

1.4. Tujuan Analisis

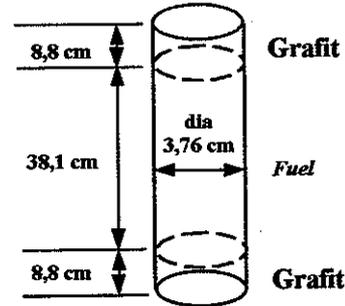
Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi memberikan gambaran yang jelas pada analisis termohidrolika reaktor Triga Mark II yang berupa distribusi temperatur permukaan bahan bakar, temperatur dan kecepatan arah aksial fluida pendingin sepanjang sub-buluh tengah, sub buluh pinggir dan sub buluh pojok yang diperoleh melalui paket program *Fluent Versi 4.25*.

Hasil penelitian ini merupakan langkah awal dari analisis termohidrolika reaktor Triga Mark II selanjutnya.

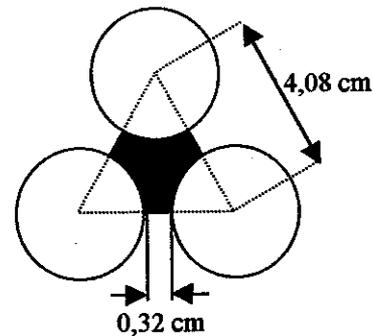
2. MODEL TERAS REAKTOR SUSUNAN HEKSAGONAL

2.1. Model Bahan Bakar

Susunan bahan bakar dimodelkan sebagaimana pada Gambar 3, dengan spesifikasi bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 4. Sedangkan jarak antar bahan bakar ditampilkan dalam Gambar 5.



Gambar 4: Spesifikasi bahan dan dimensi bahan bakar.



Gambar 5: Jarak antar bahan bakar arah melintang.

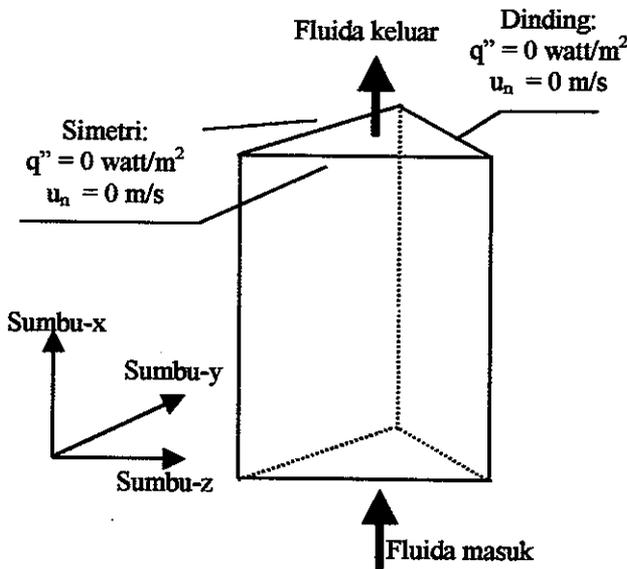
Bahan bakar terdiri dari bagian aktif (*fuel*) dan bagian yang tidak aktif. Bagian aktif (*fuel*) terdiri dari campuran homogen antara uranium, zirkonium dan hidrogen, sedangkan bagian yang tidak aktif terbuat dari grafit. Bagian aktif diapit oleh dua buah bagian yang tidak aktif. Pembangkitan daya pada setiap bahan bakar diasumsikan sama dan terdistribusi merata sepanjang bagian yang aktif. Dinding bagian luar pada setiap bagian yang tidak aktif diasumsikan sebagai dinding adiabatik.

2.2. Model Teras Reaktor

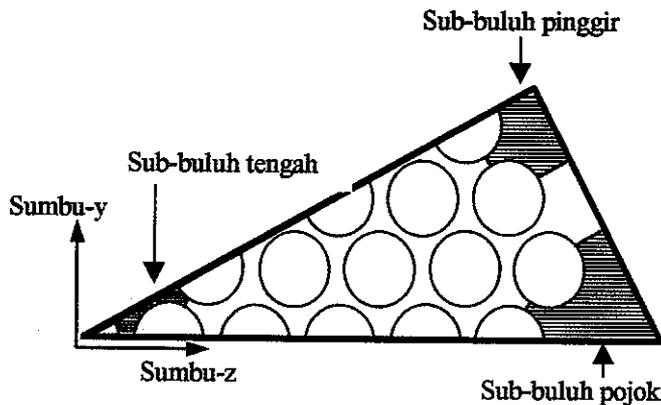
Model teras reaktor yang digunakan dalam kajian ini adalah berbentuk heksagonal, yaitu susunan bahan bakar berbentuk heksagonal dengan reflektor juga berbentuk heksagonal, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Di dalam kajian ini dinding bagian luar reflektor diasumsikan sebagai dinding adiabatik.

Karena adanya faktor simetri, maka selanjutnya dipilih model teras reaktor yang hanya 1/12 bagian saja sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 6 dan 7. Data pengamatan difokuskan pada sub-buluh tengah, pinggir dan pojok.

Model yang didefinisikan tersebut di atas dianalisis dengan menggunakan paket program *Fluent Versi 4.25* yang ada di Laboratorium Termodinamika PPAU-IR, ITB.



Gambar 6: Model teras reaktor tampak dari samping.



Gambar 7: Model 1/12 teras reaktor susunan heksagonal.

3. PROSEDUR ANALISIS TERMOHIDROLIKA TERAS REAKTOR

3.1. Geometri Teras Reaktor

Paket program *Fluent Versi 4.25* digunakan untuk membuat geometri dari model teras reaktor (Gambar 6 dan 7) dengan dimensi yang telah disesuaikan dengan dimensi bahan bakar dan jarak antar bahan bakar (Gambar 4 dan 5).

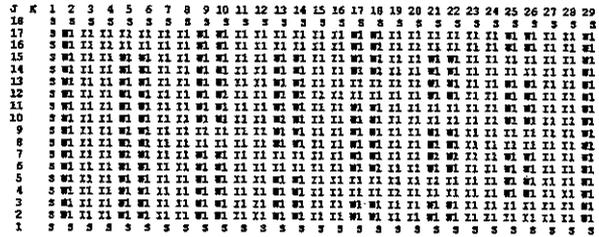
3.2. Jenis Sel Volume Atur

Geometri teras reaktor dibagi menjadi 7308 sel volume atur yang terdiri dari 14 sel dalam arah x, 18 sel dalam arah y dan 29 sel dalam arah z. Pembagian sel volume atur dalam arah x ditunjukkan seperti dalam

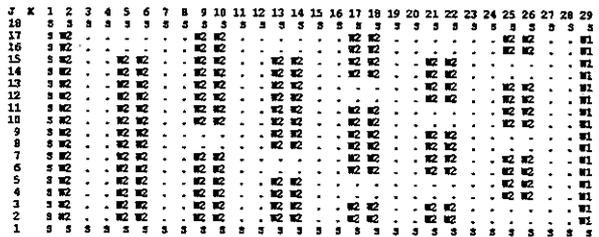
Tabel 1. Sedangkan jenis sel volume atur pada $x = 1$, $x = 7$ dan $x = 14$ ditampilkan dalam Gambar 8, 9 dan 10.

Tabel 1: Sel volume atur dalam arah x

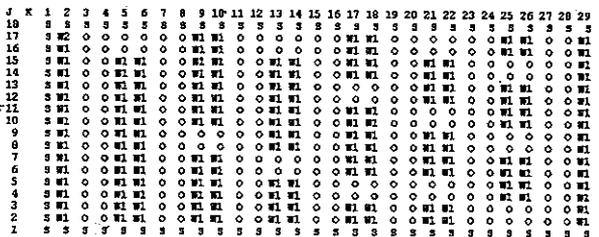
No.	Jarak dalam arah x (mm)	Jumlah sel volume atur
1	0 ~ 88	2
2	88 ~ 469	8
3	469 ~ 557	2



Gambar 8: Jenis sel volume atur bidang $x = 1$



Gambar 9: Jenis sel volume atur bidang $x = 7$



Gambar 10: Jenis sel volume atur bidang $x = 14$

Jenis sel pada Gambar 8, 9, dan 10 di atas dapat diterangkan sebagai berikut:

1. Jenis I (*inlet-1*) menyatakan jenis sel volume atur untuk bidang batas pada ujung teras masukan,
2. Jenis S (*simetry*) menyatakan jenis sel volume atur untuk bidang batas pada bidang simetri,
3. Jenis . (*live*) menyatakan jenis sel volume atur untuk bidang yang ditempati air pendingin,
4. Jenis W1 (*wall-1*) menyatakan jenis sel volume atur untuk bidang batas pada dinding grafit dan reflektor,
5. Jenis W2 (*wall-2*) menyatakan jenis sel volume atur untuk bidang batas pada dinding luar bagian bahan bakar yang aktif (*fuel*) dan
6. Jenis O (*outlet*) menyatakan jenis sel volume atur untuk bidang batas pada pangkal teras keluaran.

3.3. Idealisasi

Dari volume atur di atas, diambil idealisasi sebagai berikut:

1. Diterapkannya model aliran turbulen ($k-\epsilon$) dengan kondisi tunak,

- Sifat-sifat fisika air pendingin dievaluasi pada temperatur 373 K,
- Untuk sel volume atur II, diberikan kondisi batas air pendingin masuk berupa: temperatur 305 K, tekanan operasi 1 atm, kecepatan arah x = 0,2 m/s dan kecepatan arah y dan z sama dengan 0 m/s.
- Untuk sel volume atur W1, tidak ada pembangkitan panas (0 watt/m²) dan tidak ada kecepatan air pendingin arah x, y dan z (0 m/s),
- Pada sel volume atur W2, pembangkitan panasnya divariasikan dengan pembangkitan daya total P berturut-turut adalah 250 kwatt, 375 kwatt dan 500 kwatt. Sehingga besarnya harga W2 dapat dihitung sebagai berikut:

$$W2 = P / (\sum \text{bahan bakar}) \cdot (\text{Luas selubung bahan bakar}) \text{ watt/m}^2 \quad (1)$$

Bila Pers.(1) diterapkan untuk reaktor seperti pada Gambar 3 dengan menggunakan seluruh bahan bakarnya yang berjumlah 121 dan diameter seperti pada Gambar 4 dan 5, maka harga W2 dapat dihitung dengan hasil seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2: Harga fluks panas W2

No.	Kasus	Daya P (kwatt)	W2 (10 ⁴ watt/m ²)
1	I	250	4,591
2	II	375	6,887
3	III	500	9,182

3.4. Persamaan-persamaan Dasar Konservasi

Persamaan-persamaan dasar yang digunakan untuk menyelesaikan model teras reaktor berbentuk heksagonal adalah:

1. Persamaan Konservasi Massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = S_m \quad (2)$$

dengan ρ = densitas fluida
 x_i = jarak dalam arah i
 v_i = komponen kecepatan arah i
 S_m = sumber massa

2. Persamaan Konservasi Momentum [3-6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

dengan p = tekanan statik
 g_i = percepatan gravitasi
 F_i = gaya luar
 τ_{ij} = tensor tegangan

dimana tensor tegangan diberikan oleh [3-6]:

$$\tau_{ij} = [\mu (\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (4)$$

dengan μ = viskositas

3. Persamaan Konservasi Energi, dalam bentuk entalpi h ditulis sebagai berikut [3-6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \sum_r h_r J_r + \frac{\partial p}{\partial t} + v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + s_h \quad (5)$$

dengan T = temperatur
 τ_{ij} = tensor tegangan
 J_r = fluks massa spesies j'
 k = konduktivitas termal
 s = sumber

Penyelesaian persamaan-persamaan di atas dengan paket program *Fluent* juga melibatkan faktor turbulensi. Dari formulasi aliran turbulen k- ϵ , tegangan Reynolds dinyatakan sebagai:

$$\rho (\overline{u_i u_j}) = \mu_t (\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

dengan \overline{u} = komponen kecepatan rata-rata
 ρ = densitas fluida
 g = gravitasi
 k = energi kinetik turbulen
 δ_{ij} = delta kroneker $i=1,2,3$
 $j=1,2,3$
 $\delta_{ij} = 1$ jika $i=j$
 $\delta_{ij} = 0$ jika $i \neq j$

Formulasi turbulensi untuk entalpi diberikan oleh [3-6]:

$$\rho (\overline{u_i h}) = \frac{-\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (7)$$

Notasi μ_t adalah viskositas turbulen.

Pembangkitan panas pada dinding dinyatakan sebagai berikut [3-6]:

$$q''_w = k \frac{\Delta T}{\Delta n} = h_w (T_w - T_\infty) \quad (8)$$

dengan: q'' = pembangkitan panas
 T = temperatur
 k = konduktivitas termal fluida
 Δn = jarak dari dinding ke titik nodal P dekat dinding
dengan arti subskrip:
 w = dinding
 ∞ = cukup jauh dari dinding

Dalam aliran turbulen, pembangkitan panas dari dinding dengan formula *log-law* dinyatakan sebagai berikut [3-6]:

$$\frac{k (\frac{\Delta T}{\Delta n})}{q} = \frac{1}{K y^*} \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}} \ln(E y^*) + \frac{1}{y^*} (\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}})^{1/4} \frac{\pi}{\sin \frac{\pi}{4}} (\frac{A}{K})^{1/4} (\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}} - 1) \quad (9)$$

dengan: $\Delta T = T_w - T_f$

Pr = bilangan Prandtl

Pr_t = bilangan Prandtl turbulen

A = konstanta van Driest (=26)

κ = konstanta von-Karman (=0,24)

E = konstanta empiris (=9,81)

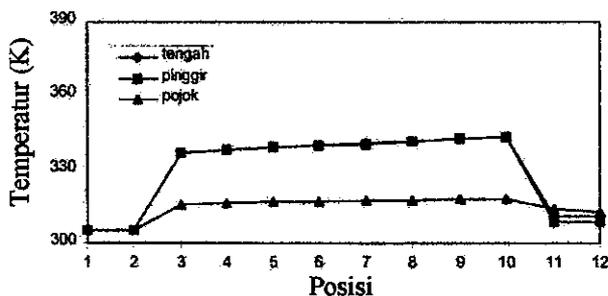
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengkajian dilakukan pada tiga kondisi pembangkitan daya total, yaitu 250 watt/m², 375 watt/m² dan 500 watt/m².

4.1. Analisis Temperatur Permukaan Bahan Bakar

Gambar 11 menunjukkan distribusi temperatur permukaan bahan bakar dalam arah sumbu x untuk Kasus I. Pada awalnya temperatur bahan bakar adalah konstan 305 K yang ditunjukkan dalam posisi 1 dan 2. Hal ini disebabkan karena fluida melewati grafit yang pembangkitan panasnya adalah 0 Watt/m², sehingga temperatur permukaannya konstan.

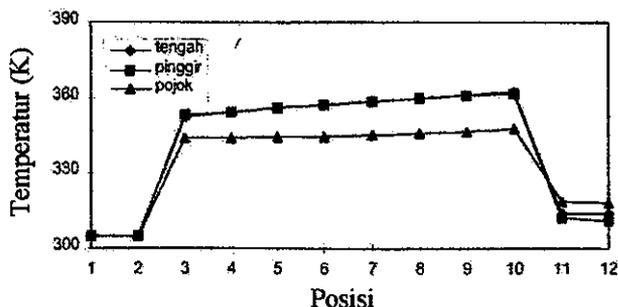
Mulai pada posisi 3, temperatur permukaan bahan bakar naik dan terus mengalami kenaikan secara linier sampai dengan posisi 10.



Gambar 11: Distribusi temperatur permukaan bahan bakar pada kasus I

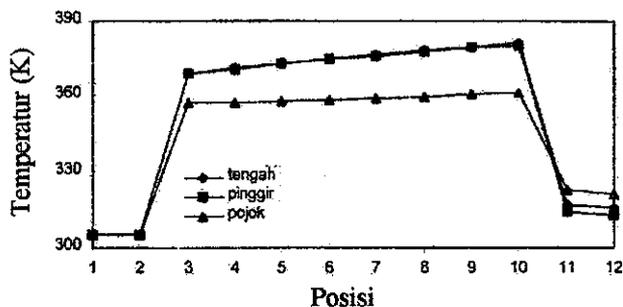
Hal ini disebabkan karena fluida yang melewati daerah bahan bakar mendapat tambahan kalor secara terus menerus.

Distribusi temperatur permukaan bahan bakar sub-buluh tengah dan pinggir berimpit, dengan harga temperatur yang lebih tinggi dari pada temperatur permukaan sub-buluh pojok. Selanjutnya, temperatur permukaan bahan bakar turun lagi karena fluida melewati daerah grafit yang pembangkitan panasnya sama dengan 0 watt/m².



Gambar 12: Distribusi temperatur permukaan bahan bakar pada kasus II

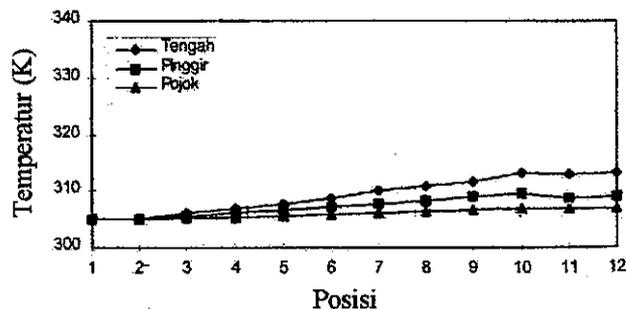
Gambar 12 menunjukkan distribusi temperatur permukaan bahan bakar dalam arah sumbu-x untuk kasus II. Dalam hal ini, kasus II memiliki kecenderungan yang sama dengan kasus I, yaitu bahwa temperatur permukaan bahan bakar dari posisi 3 sampai dengan posisi 10 terus naik secara linier. Demikian juga dengan kasus III yang ditunjukkan oleh Gambar 13, ternyata memiliki kecenderungan yang sama dengan Kasus I dan II. Perbedaan dari ketiga kasus tersebut ada pada harga temperatur, yaitu bahwa kasus III bertemperatur paling tinggi, diikuti oleh kasus II dan terakhir adalah kasus I. Hal ini mudah dimengerti karena dengan naiknya pembangkitan daya, maka temperatur permukaan bahan bakar akan mengalami kenaikan juga.



Gambar 13: Distribusi temperatur permukaan bahan bakar pada kasus III

4.2. Analisis Temperatur Fluida Pendingin

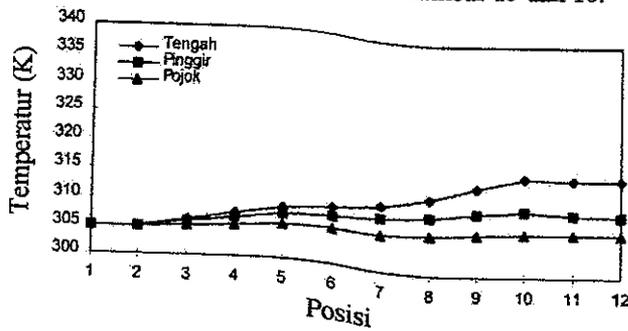
Gambar 14 menunjukkan distribusi temperatur fluida pendingin dalam arah sumbu x untuk kasus I. Temperatur fluida pada posisi 1 dan 2 adalah konstan dan rendah. Keadaan ini mudah dimengerti karena fluida melewati grafit tanpa pembangkitan panas. Kemudian temperatur fluida mulai naik pada posisi 3 sampai dengan posisi 10, yang disebabkan oleh terakumulasinya panas bahan bakar yang diberikan ke fluida. Akhirnya temperatur fluida tidak naik lagi karena fluida melewati grafit yang pembangkitan panasnya 0 watt/m², seperti yang ditunjukkan dalam posisi 11 dan 12.



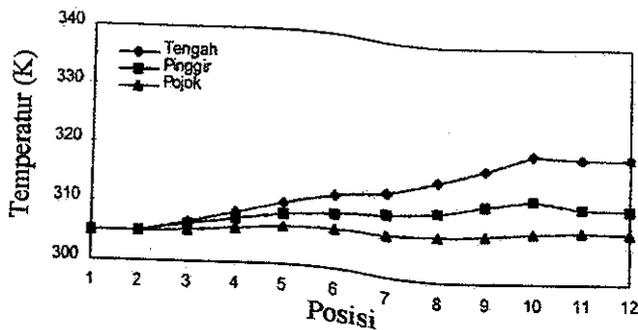
Gambar 14: Distribusi temperatur fluida pada kasus I

Kasus II dan kasus III adalah kasus-kasus dengan pembangkitan panas yang lebih tinggi dari pada kasus I, yaitu secara berturut-turut 4,59 watt/m² dan 6,89 watt/m². Berdasarkan hasil penelitian ini, kasus II dan III memiliki kecenderungan yang sama dengan Kasus I,

tetapi dengan harga temperatur fluida mengalami sedikit kenaikan seperti ditunjukkan dalam Gambar 15 dan 16.



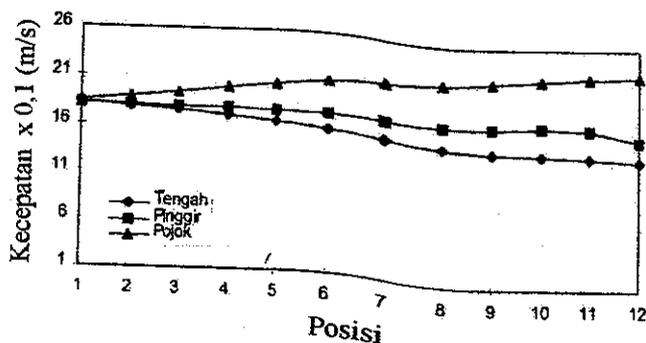
Gambar 15: Distribusi temperatur fluida pada kasus II



Gambar 16: Distribusi temperatur fluida pada kasus III

4.3. Analisis Kecepatan Fluida Pendingin

Distribusi kecepatan fluida pendingin ditunjukkan dalam Gambar 17. Distribusi kecepatan pada sub-buluh pojok menunjukkan adanya kenaikan dari posisi 1 sampai dengan 12, dan harganya lebih tinggi dari pada sub-buluh pinggir dan tengah. Distribusi kecepatan sub-buluh pinggir memiliki kecenderungan konstan mulai dari posisi 1 sampai dengan posisi 11, kemudian turun sedikit karena terjadi turbulensi. Walaupun demikian distribusi kecepatan sub-buluh pinggir lebih tinggi dari pada sub-buluh tengah.



Gambar 17: Distribusi kecepatan fluida

5. KESIMPULAN

Dari kajian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur permukaan bahan bakar dan fluida pendingin pada daerah grafit di bawah daerah aktif bahan bakar adalah tetap.
2. Temperatur permukaan bahan bakar dan fluida pendingin pada daerah aktif bahan bakar mengalami kenaikan.
3. Temperatur permukaan bahan bakar pada daerah grafit di atas daerah aktif bahan bakar adalah menurun karena fluida pendingin melewati daerah grafit.
4. Temperatur fluida pendingin pada daerah grafit di atas daerah aktif bahan bakar cenderung tetap karena fluida pendingin melewati daerah grafit.
5. Temperatur permukaan bahan bakar sub-buluh tengah dan pinggir sama dan lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur permukaan bahan bakar sub-buluh pojok pada daerah aktif bahan bakar.
6. Temperatur fluida pendingin sub-buluh tengah lebih tinggi dibandingkan dengan sub-buluh pinggir dan pojok.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.A. Supriyanto, "Analisis Termohidrolika Teras Reaktor Susunan Heksagonal", Tugas Akhir Program Pasca Sarjana pada Fakultas Ilmu dan Rekayasa Nuklir, ITB, Bandung, Januari 1997.
- [2] A. Suwono, "Pendekatan Model Media Berpori Sub-buluh Dalam Analisis Termodinamika Berkas Bakar Reaktor Nuklir", PPTKR-BATAN, Serpong, 1994.
- [3] M.A. Waskito dkk, "Rencana Studi Karakteristik Termohidrolik Sub-buluh dalam Berkas Bahan Bakar Reaktor pada Untai Uji Nilo I", PPTKR-BATAN, Serpong, 1994.
- [4] Anonim, "Computational Aided Design", Fluent User's Guide, Version 4.2, Fluent Inc., Lebanon, NH USA, 1993.
- [5] Anonim, "Pre-BFC User's Guide", Version 4.2, June 1993, Fluent Inc., Lebanon, NH USA.
- [6] Anonim, "Fluent Tutorial Guide", Version 4.2, June 1993, Fluent Inc., Lebanon, NH USA.
- [7] Anonim, "Safety Analysis Report", General Atomic, San Diego, 1996.
- [8] Reinaldy N, dkk, "Kaji Teoritik Aspek Termohidrolik Reaktor Riset Pada Daya 2 MW", Jurnal Teknik Mesin - ITB, Vol. XIII, No. 1, Bandung, Maret 1999.