

KAJI TEORITIK ASPEK TERMOHIDROLIK REAKTOR RISET PADA DAYA 2 MW

Reinaldy Nazar, Jurusan Rekayasa Energi Nuklir,
Fakultas Pasca Sarjana, Institut Teknologi Bandung

Aryadi Suwono, T.A. Fauzi Soelaiman
Lab. Termodinamika, PAU - Ilmu Rekayasa, Institut Teknologi Bandung

RINGKASAN

Peranan aspek termohidrolik pada reaktor nuklir sangat dominan karena sistem termohidrolik membatasi pengoperasian reaktor. Berkaitan dengan hal tersebut, dilakukan pengkajian secara teoritik terhadap aspek termohidrolik reaktor riset yang dioperasikan pada daya thermal 2 MW dengan bahan bakar yang disusun berbentuk konfigurasi heksagonal di dalam teras. Dengan mengasumsikan daya yang dibangkitkan pada setiap bahan bakar adalah sama dan penempatan fasilitas-fasilitas reaktor lainnya diabaikan, maka dari data keluaran paket program FLUENT V4.25 diperoleh informasi, bahwa secara teoritik reaktor riset tersebut dapat dioperasikan dengan aman pada daya thermal 2 MW.

ABSTRACT

The thermohydraulic aspect utilization on a nuclear reactor is very dominant, because the system gives limitation on the reactor operation. Regarding the problem, theoretical analysis of thermohydraulic aspect is done for a research reactor of 2 MW with hexagonal configuration of fuel elements. With an assumption that the power generation each fuel element is the same and the other facilities are neglected, the output of FLUENT V4.25 program gave information that theoretically this research reactor can be operated on thermal power of 2 MW.

Keywords : Research reactor, Thermohydraulic aspect, Hexagonal configuration, FLUENT V4.25.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masalah utama pada penggunaan reaktor nuklir adalah terbentuknya hasil fisi radioaktif yang berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Mengingat bahaya yang dapat ditimbulkannya, maka reaktor nuklir harus dioperasikan pada tingkat daya yang tepat, dimana sistem pendingin harus mampu mengeluarkan panas dari elemen bakar secara maksimum.

Berkaitan dengan keselamatan reaktor, maka peranan aspek termohidrolik di dalam reaktor nuklir sangat dominan karena sistem termohidrolik membatasi operasi reaktor [1]. Oleh karena itu, dalam perancangan dan analisis termohidrolik, dituntut suatu ketelitian yang sangat tinggi. Dengan demikian pengkajian aspek termohidrolik harus terus dilakukan.

Karena adanya keterbatasan informasi aspek termohidrolik reaktor yang dapat diperoleh dari eksperimen, maka perlu dilakukan kaji teoritiknya, sehingga dapat diketahui distribusi temperatur sepanjang

bahan bakar, dan distribusi temperatur serta kecepatan aliran air pendingin pada setiap tempat. Dengan demikian dapat diprediksi tingkat radiasi pada permukaan air tangki, dimana secara eksperimen hal ini sulit dilakukan.

1.2 Pokok Permasalahan

Sehubungan dengan meningkatnya intensitas penelitian yang memanfaatkan radiasi neutron dan kebutuhan akan produksi radioisotop, maka Pusat Penelitian Teknik Nuklir (PPTN-BATAN-BANDUNG) ingin mengoperasikan reaktor Triga Mark II pada tingkat fluks neutron yang lebih tinggi hingga mencapai daya operasi 2MW [2].

Secara teoritik, reaktor dapat dioperasikan pada tingkat fluks neutron berapa saja, tetapi dari aspek keselamatan, pengoperasian reaktor harus dibatasi hingga daya tertentu, karena reaktor yang dioperasikan pada daya yang lebih tinggi dengan sistem pembuangan panas yang tidak sesuai akan menyebabkan temperatur reaktor naik hingga melewati batas keselamatan [3].

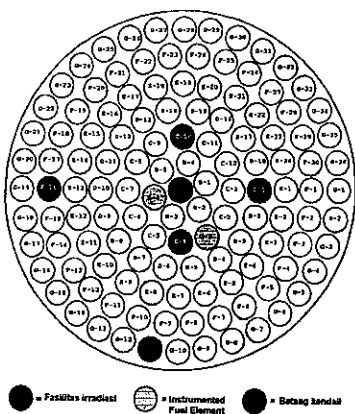
Dari hasil pengukuran dan perhitungan pada Tabel 1 diketahui, bahwa dengan menggunakan kondisi yang ada pada saat ini, maka reaktor tidak mampu untuk dioperasikan hingga mencapai daya 2 MW [4]. Hal ini disebabkan oleh beberapa kendala, yaitu :

1. Struktur material bahan bakar membatasi suhu maksimum pusat elemen bakar di dalam teras (bahan bakar pada *Ring B*) sampai 673 K, dan
2. Sistem pendingin primer yang ada saat ini dirancang untuk operasi reaktor hingga daya 1 MW.

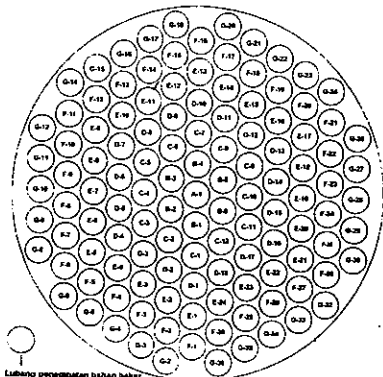
Tabel 1. Hubungan Daya Operasi Reaktor dengan Temperatur Pusat Bahan Bakar.

DAYA (kW)	TEMPERATUR PUSAT BAHAN BAKAR (K)			
	JUMLAH BAHAN BAKAR			
	109			121
	RING-B	RING-C	RING-G	RING-B
100	387	389	349	-
200	449	451	378	-
300	493	497	395	-
400	524	525	425	-
500	549	549	442	-
600	575	572	460	-
700	599	596	476	-
800	620	615	490	-
900	637	632	506	-
1000	645	639	506	-
1120 *	673 *	-	-	-
1087,8 **	-	-	-	645
1217,7 **	-	-	-	673

*) Data ekstrapolasi **) Data hasil hitungan



Gambar 1. Penampang susunan lingkaran bahan bakar di dalam teras silinder.



Gambar 2. Penampang susunan heksagonal bahan bakar di dalam teras silinder.

Berdasarkan kendala-kendala tersebut, maka upaya yang sedang dilakukan PPTN - BATAN untuk dapat mengoperasikan reaktor Triga Mark II hingga mencapai daya 2 MW adalah dengan mengubah cara penempatan bahan bakar di dalam teras reaktor, dari bentuk susunan lingkaran (Gambar 1) menjadi bentuk susunan heksagonal (Gambar 2) serta menambah jumlah air pendingin primer yang dipompakan ke dalam tangki.

Berkaitan dengan hal tersebut, maka dalam makalah ini dikemukakan hasil kajian teoritik aspek termohidrolik suatu model reaktor riset, yang dioperasikan pada daya 2 MW dengan menempatkan bahan bakar dalam bentuk susunan heksagonal di dalam teras berbentuk silinder. Dari kajian ini diharapkan dapat diperoleh informasi tambahan dalam usaha untuk mengoperasikan reaktor Triga Mark II pada daya 2 MW.

1.3 Metoda Pengkajian Masalah

Kaji teoritik aspek termohidrolik reaktor riset ini dilakukan dengan bantuan paket program FLUENT V4.25 yang dimiliki oleh Laboratorium Termodinamika, PAU-ITB, dimana telah dilakukan pengujian terhadap tingkat ketelitiannya [5, 7].

1.4. Pembatasan Masalah

Mengingat kompleksnya permasalahan yang ada, maka pengkajian dibatasi pada aspek termohidroliknya saja, karena sistem termohidrolik merupakan sistem utama yang membatasi operasi reaktor.

Batas keselamatan operasi reaktor yang digunakan dalam pengkajian ini, adalah mengacu pada peraturan keselamatan dalam mengoperasikan reaktor Triga Mark II yang dikeluarkan oleh *General Atomic*, dimana untuk membatasi tingkat radiasi N^{16} pada permukaan tangki perlu dihindari terjadinya pendidihan inti air pendingin pada dinding luar bahan bakar. Pada pengoperasian reaktor Triga Mark II, pendidihan inti ini mulai terjadi jika temperatur dinding luar bahan bakar mencapai ± 423 K [6]. Dengan demikian batasan keselamatan operasi reaktor yang digunakan pada kajian ini adalah menjaga temperatur dinding luar bahan bakar < 423 K.

Karena keterbatasan jumlah sel volume atur dan bidang permukaan yang dapat dihitung oleh paket program FLUENT V4.25 yang terdapat di Laboratorium Termodinamika PAU-ITB saat ini, maka perhitungan yang dilakukan berangkat dari harga kondisi batas fluks panas pada setiap permukaan padatan yang diberikan. Dengan demikian analisis perpindahan panas konduksi dari pusat bahan bakar ke dinding luar bahan bakar tidak dilakukan.

Untuk mempermudah analisis digunakan juga asumsi-asumsi, bahwa air pendingin bersifat sebagai fluida inkompresibel, aliran turbulen dengan kondisi tunak dan sifat-sifat fisiknya konstan.

2. SISTEM REAKTOR YANG DIKAJI

2.1 Model Bahan Bakar Reaktor

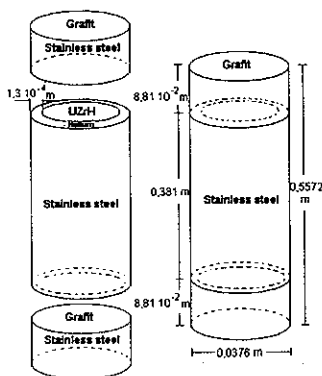
Spesifikasi bahan bakar reaktor Triga Mark II dinyatakan pada Tabel 2 dan Gambar 3.

Tabel 2. Spesifikasi Bahan Bakar Reaktor yang Dikaji.

SPEKIFIKASI BAHAN BAKAR	DATA
Panjang keseluruhan (m)	0.5572
Panjang bagian aktif (m)	0,381
Panjang bagian tidak aktif (grafit)(m)	0,0881
Diameter luar (m)	0,0376

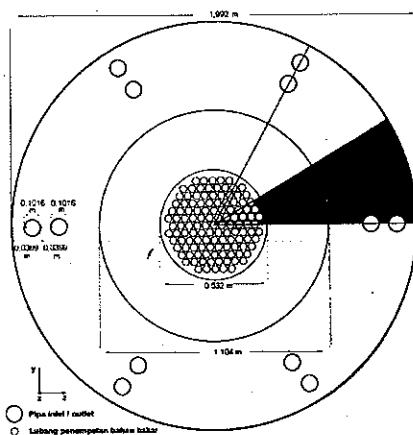
Bagian bahan bakar aktif mengandung campuran homogen antara Uranium, Zirkonium dan Hidrogen, dimana terjadi reaksi fisi dan menghasilkan panas sebagai hasil sampingan. Daya yang dibangkitkan terdistribusi secara sinusoidal sepanjang bagian bahan bakar tersebut [1]. Bagian bahan bakar tidak aktif berisi grafit yang berfungsi sebagai reflektor neutron, dimana tidak terjadi reaksi fisi, sehingga tidak terdapat pembangkitan panas.

Untuk lebih mendekatkan pada model reaktor Triga Mark II, dimensi dasar bahan bakar reaktor yang dikaji sama dengan dimensi dasar bahan bakar reaktor Triga Mark II, tetapi daya yang dibangkitkan pada setiap bahan bakar diasumsikan sama dan terdistribusi merata sepanjang bagian bahan bakar aktif. Sedangkan dinding luar bagian bahan bakar tidak aktif diasumsikan sebagai dinding adiabatik.



Gambar 3. Model bahan bakar reaktor yang dikaji.

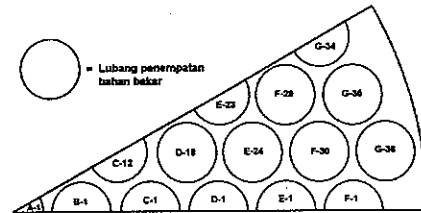
2.2 Model Reaktor yang Dikaji



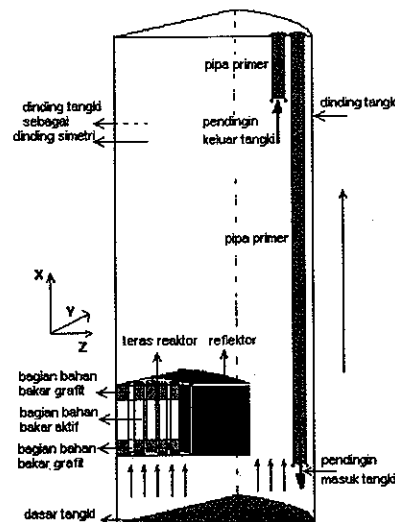
Gambar 4. Penampang horizontal reaktor yang dikaji.

Karena keterbatasan pada paket program FLUENT V4.25 yang ada pada saat ini, maka model reaktor riset yang dikaji mempunyai 12 pipa primer

dengan diameter 0,1016 m, yaitu 6 pipa untuk memasukkan air pendingin ke dalam tangki reaktor dan 6 pipa untuk memompakan air pendingin ke luar tangki. Pipa-pipa tersebut tersusun secara heksagonal (simetri - enam) sehingga pengkajian hanya dilakukan terhadap 1/12 bagian reaktor (lihat Gambar 4, 5 dan 6). Sedangkan penempatan batang kendali dan fasilitas reaktor lainnya diabaikan.

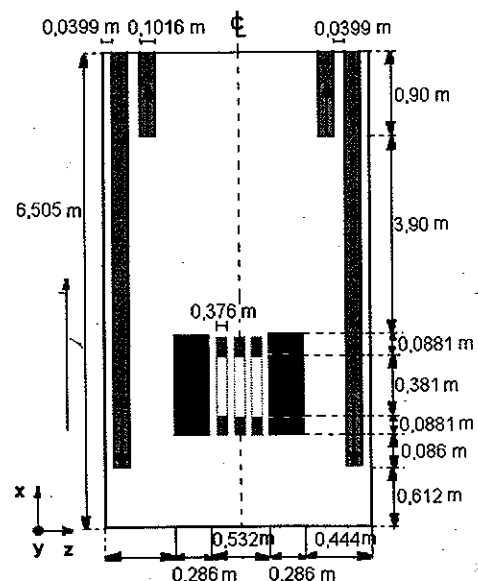


Gambar 5. Penampang 1/12 susunan heksagonal bahan bakar di dalam teras silinder.

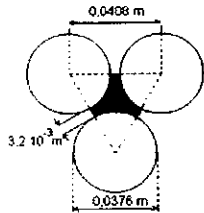


Gambar 6. Model sistem 1/12 reaktor yang dikaji.

2.3 Dimensi Dasar Reaktor yang Dikaji



Gambar 7. Dimesi dasar reaktor yang dikaji.



Gambar 8. Dimensi susunan bahan bakar.

3. MODEL PERSAMAAN PENGENDALI

3.1 Identifikasi Tipe Sel Volume Atur

Geometri reaktor pada Gambar 6 dibangun dengan menggunakan paket program FLUENT V4.25. Selanjutnya geometri tersebut dibagi menjadi 24080 sel volume atur, yang terdiri dari 35 sel arah x, 16 sel arah y dan 43 sel arah z. Distribusi sel volume atur dalam arah vertikal (arah x) dinyatakan pada Tabel 3.

Tabel 3. Distribusi sel volume atur arah vertikal (arah x)

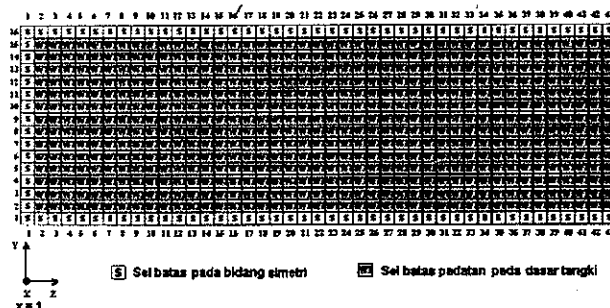
JARAK DARI DASAR TANGKI (meter)	JUMLAH LAPISAN SEL ARAH VERTIKAL (arah x)
0 - 0,612	6 lapis sel ($x = 1$ s/d $x = 6$)
0,612 - 0,698	2 lapis sel ($x = 7$, dan $x = 8$)
0,698 - 0,786	2 lapis sel ($x = 9$, dan $x = 10$)
0,786 - 1,1670	8 lapis sel ($x = 11$ s/d $x = 18$)
1,1670 - 1,255	2 lapis sel ($x = 19$, dan $x = 20$)
1,255 - 5,155	12 lapis sel ($x = 21$ s/d $x = 32$)
5,155 - 6,055	3 lapis sel ($x = 33$ s/d $x = 35$)

Adapun distribusi sel volume atur di dalam teras dinyatakan pada Tabel 4.

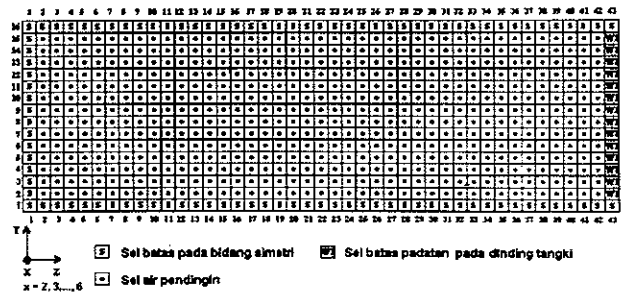
Tabel 4. Distribusi sel volume atur di dalam teras.

RING	DISTRIBUSI SEL VOLUME ATUR		
	SEL ARAH X	SEL ARAH Y	SEL ARAH Z
A	$x = 9$ s/d $x = 20$	$y = 1$ s/d $y = 16$	$z = 1$ s/d $z = 3$
B	$x = 9$ s/d $x = 20$	$y = 1$ s/d $y = 16$	$z = 4$ s/d $z = 7$
C	$x = 9$ s/d $x = 20$	$y = 1$ s/d $y = 16$	$z = 8$ s/d $z = 11$
D	$x = 9$ s/d $x = 20$	$y = 1$ s/d $y = 16$	$z = 12$ s/d $z = 15$
E	$x = 9$ s/d $x = 20$	$y = 1$ s/d $y = 16$	$z = 16$ s/d $z = 19$
F	$x = 9$ s/d $x = 20$	$y = 1$ s/d $y = 16$	$z = 20$ s/d $z = 23$
G	$x = 9$ s/d $x = 20$	$y = 1$ s/d $y = 16$	$z = 24$ s/d $z = 28$

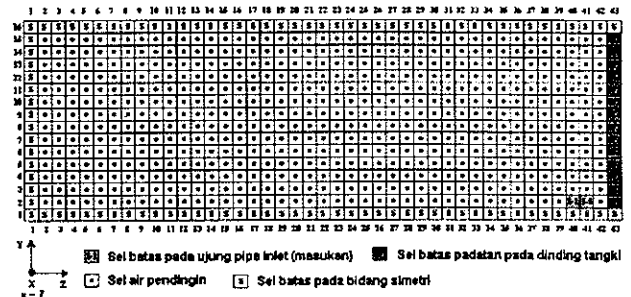
Tipe-tipe sel volume atur pada setiap lapisan arah vertikal (arah x) menurut Tabel 3 dinyatakan pada gambar-gambar berikut:



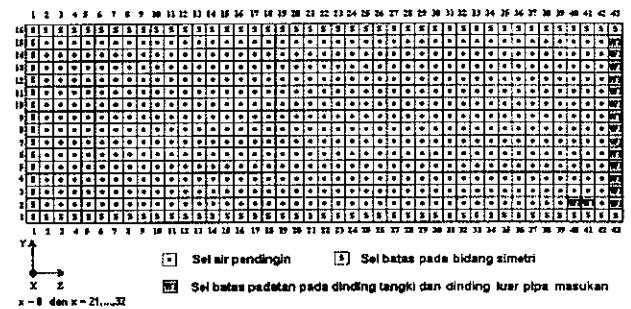
Gambar 9. Tipe sel volume atur pada $x = 1$.



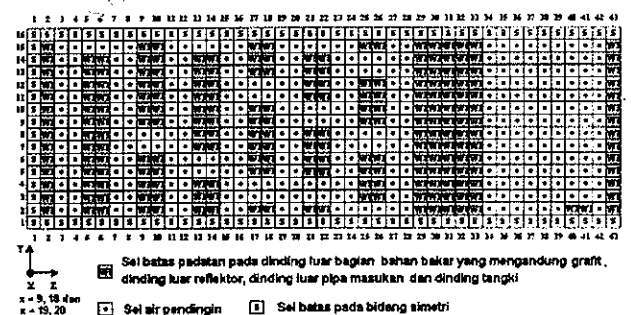
Gambar 10. Tipe sel volume atur pada $x = 2$ s/d $x = 6$.



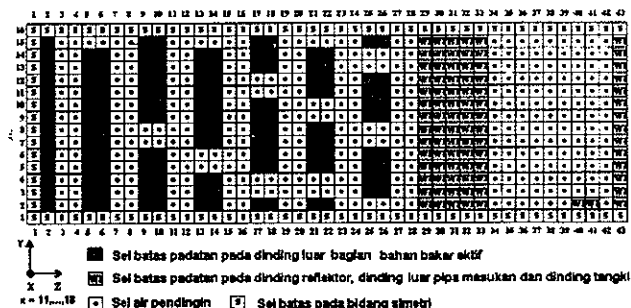
Gambar 11. Tipe sel volume atur pada $x = 7$



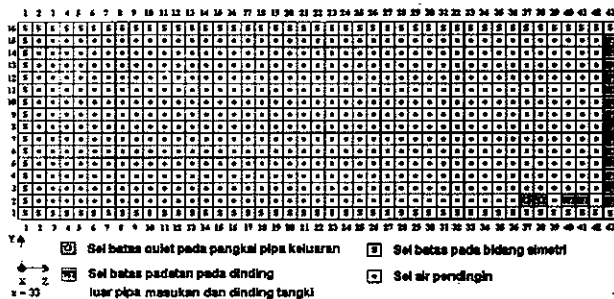
Gambar 12. Tipe sel volume atur pada $x = 8$ dan $x = 21$ s/d $x = 32$.



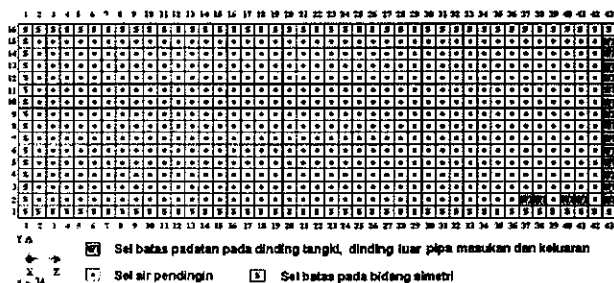
Gambar 13. Tipe sel volume atur pada $x = 9$, $x = 10$ dan $x = 19$ dan $x = 20$.



Gambar 14. Tipe sel volume atur pada $x = 11$ s/d $x = 18$.



Gambar 15. Tipe sel volume atur pada x = 33.



Gambar 16. Tipe sel volume atur pada x = 34.



Gambar 17. Tipe sel volume atur pada x = 35.

Identifikasi tipe sel volume atur di atas adalah sebagai berikut :

1. Tipe sel *wall-1* (W-1), menyatakan tipe sel volume atur untuk bidang batas padatan pada dinding tangki, dasar tangki, dinding pipa masukan, dinding pipa keluaran, dinding reflektor dan dinding luar bagian bahan bakar yang mengandung grafit (tidak aktif),
2. Tipe sel *wall-2* (W-2), menyatakan tipe sel volume atur untuk bidang batas padatan pada dinding luar bagian bahan bakar aktif,
3. Tipe sel *inlet-1* (I-1), menyatakan tipe sel volume atur untuk bidang batas pada ujung pipa masukan,
4. Tipe sel *oulet* (O), menyatakan tipe sel volume atur untuk bidang batas pada pangkal pipa keluaran,
5. Tipe sel *simetry* (S), menyatakan tipe sel volume atur untuk bidang batas pada bidang-bidang simetri,
6. Tipe sel *live* (.), menyatakan tipe sel volume atur untuk daerah-daerah yang ditempati air pendingin, dan
7. Tipe sel *dead* (D), menyatakan tipe sel volume atur untuk daerah-daerah di luar pembahasan.

3.2 Kondisi Batas yang Diberikan

Kondisi-kondisi batas yang diberikan pada masing-masing sel volume atur adalah :

1. Model aliran turbulen (k-ε) dengan kondisi tunak,

2. Sifat-sifat fisika air pendingin dievaluasi pada temperatur 373 K,
3. Pada tipe sel-sel volume atur *inlet -1* (I-1) diberikan kondisi batas temperatur pendingin ketika masuk tangki sebagai 305 K, tekanan operasi 1 atm, kecepatan aliran pendingin arah y dan z 0 m/s dan kecepatan aliran pendingin arah x diberikan sesuai dengan jumlah pendingin yang digunakan,
4. Pada tipe sel *wall-1* (W-1) diberikan kondisi batas fluks panas 0 watt/m² (dinding adiabatik) dan kecepatan arah x, y dan z aliran pendingin di daerah tersebut 0 m/s,
5. Mengubah tipe sel *wall-1* dan *wall-2* menjadi tipe sel *live* pada posisi lubang bahan bakar yang tidak digunakan (dikosongkan), dan
5. Pada tipe sel *wall-2* (W-2) diberikan kondisi batas kecepatan arah x, y dan z aliran pendingin di daerah tersebut 0 m/s dan fluks panas yang diberikan sesuai dengan jumlah bahan bakar yang digunakan untuk dapat membangkitkan daya total 2 MW berdasarkan persamaan di bawah ini.

$$\frac{2.10^6}{(\sum \text{Bahan bakar yang digunakan}) \cdot (\text{Luas selubung bahan bakar aktif})} \left(\frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right)$$

Jika perhitungan diterapkan untuk reaktor yang beroperasi pada daya total 2 MW dengan menempatkan bahan bakar pada semua posisi yang tersedia, yaitu 121 posisi untuk seluruh bagian reaktor (Gambar 2) atau 15 posisi untuk 1/12 bagian reaktor (Gambar 5), maka kondisi batas fluks panas yang diberikan pada tipe sel W-2 adalah :

$$\frac{2.10^6}{(121) \cdot (\text{luas selubung bagian bahan bakar aktif})} = 367267,02 \text{ watt / m}^2$$

Penempatan bahan bakar pada 114 posisi untuk seluruh bagian reaktor atau 13 posisi untuk 1/12 bagian reaktor dan lubang-lubang yang lain dikosongkan, maka dengan cara yang sama diperoleh kondisi batas fluks panas yang harus diberikan pada tipe sel W-2 adalah 389818,51 watt/m².

Jika penempatan bahan bakar dilakukan pada 102 posisi untuk seluruh bagian reaktor atau 12 posisi untuk 1/12 bagian reaktor dan lubang-lubang yang lain dikosongkan, maka kondisi batas fluks panas yang harus diberikan pada tipe sel W-2 adalah 435679,51 watt/m².

3.3 Persamaan Pengendali

Berdasarkan asumsi-asumsi dan kondisi batas yang digunakan, persamaan-persamaan pengendali (*Governing Equations*) yang digunakan FLUENT V4.25 untuk menganalisis aspek termohidrolik sistem reaktor yang ditinjau adalah sebagai berikut :

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum arah i

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i \quad (2)$$

Persamaan energi

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i h) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (k_f + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \bar{u}_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

Notasi : indeks i = 1, 2, 3

indeks j = 1, 2, 3

δ_{ij} = delta Kronecker = 1, jika i = j dan = 0, jika i ≠ j

dengan, $\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = 0$, pada semua dinding padatan

$\bar{u}_1 = \pm$ konstan dan $\bar{u}_2 = \bar{u}_3 = 0$, pada ujung pipa masukan

$\bar{q} = \frac{\partial T}{\partial n} = 0$, pada dinding padatan wall-1 (W-1)

$\bar{q} = \frac{\partial T}{\partial n} = \text{konstan}$, pada dinding padatan (W-2)

Dengan menerapkan model aliran turbulen (k-ε) pada korelasi tegangan Reynolds, maka

$$(\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Persamaan transport energi kinetik turbulen (k) untuk fluida dengan kerapatan konstan adalah :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \rho \epsilon \quad (4)$$

Persamaan laju disipasi energi kinetik turbulen (ε) untuk fluida dengan kerapatan konstan adalah :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{1,3} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + 1,44 \frac{\epsilon}{k} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - 1,92 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

dimana,

$$h = \int_{T_{ref}}^T C_p dT = C_p (T - T_{ref}) = \text{entalpi}$$

$$k_t = C_p \frac{\mu_t}{Pr_t} = \text{konduktivitas turbulen}$$

$$Pr_t = \frac{C_p \mu_t}{k_t} = \text{bilangan Prandtl turbulen}$$

$$\sigma_k = \mu_t \frac{C_p}{k_t}, \quad \mu_t = 0,09 \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

$\bar{u}$ = komponen kecepatan rata-rata

ρ = rapat massa, g = gravitasi

P = tekanan, k = energi kinetik turbulen

T = temperatur, P = tekanan

C_p = kapasitas panas spesifik

k_f = konduktivitas molekular fluida

μ = viskositas dinamik fluida

μ_t = viskositas turbulen

Proses penyelesaian yang dilakukan program FLUENT V4.25 dalam mencari solusi persamaan pengendali tersebut dapat dilihat pada Pustaka 5 dan 7.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Distribusi Air Pendingin di dalam Teras

Tabel 5. Data Perolehan Temperatur Maksimum Dinding Luar Bahan Bakar Terhadap Jumlah Penempatan Bahan Bakar pada 1/12 Bagian Reaktor.

NO	JUMLAH BAHAN BAKAR	FLUKS PANAS TIAP BAHAN BAKAR (W/m ²)	LUBANG YANG DIKOSONGKAN	DEBIT (m ³ /s)	KECEPATAN ALIRAN AIR PADA PIPA MASUK (m/s)	PEROLEHAN TEMPERATUR MAKSIMUM PERMUKAAN BAHAN BAKAR (K)
1	15	367267,02	-	0,01201	3,29	1883
2	13	389818,51	A-1 dan C-12	0,01201	3,29	995,8
3	13	389818,51	A-1 dan C-12	0,02699	7,393	945,8
4	12	435679,51	A-1, C-12 dan D-18	0,02699	7,393	715,6
5	12	435679,51	A-1, C-12 dan D-18	0,06136	16,81	528,4
6	12	435679,51	A-1, C-12 dan D-18	0,1022	28,0	414,74

Untuk membatasi temperatur maksimum dinding luar bahan bakar < 423 K ketika reaktor dioperasikan pada daya 2 MW, dilakukan dengan mengoptimasi jumlah air pendingin primer yang harus dipompakan ke dalam tangki reaktor melalui pipa masukan, jumlah bahan bakar yang digunakan dan cara penempatan bahan bakar di dalam teras, sedemikian rupa akhirnya diperoleh temperatur maksimum dinding luar bahan bakar yang diharapkan.

Berdasarkan Tabel 5 diketahui, bahwa pengurangan jumlah bahan bakar cenderung dapat menurunkan temperatur maksimum dinding luar bahan bakar. Tetapi hal ini perlu pengkajian lebih lanjut tentang daya maksimum yang dapat dibangkitkan oleh

sebuah bahan bakar, sehingga dapat diketahui jumlah minimum bahan bakar yang dapat digunakan untuk mengoperasikan reaktor pada daya 2 MW.

Karena tujuan pengkajian ini adalah untuk mengetahui kondisi yang aman dalam mengoperasikan reaktor pada daya 2 MW, maka analisis hanya dilakukan terhadap kasus nomor 6 pada Tabel 5, yaitu kasus dengan temperatur dinding luar bahan bakar < 423 K.

Berdasarkan kasus tersebut diketahui, bahwa pengoperasian reaktor pada daya 2 MW dengan menempatkan bahan bakar pada 12 posisi untuk 1/12 bagian reaktor (102 posisi untuk seluruh bagian reaktor) dan memompakan pendingin 0,1022 m³/s ke dalam 1/12 bagian reaktor (1,2264 m³/s untuk seluruh bagian

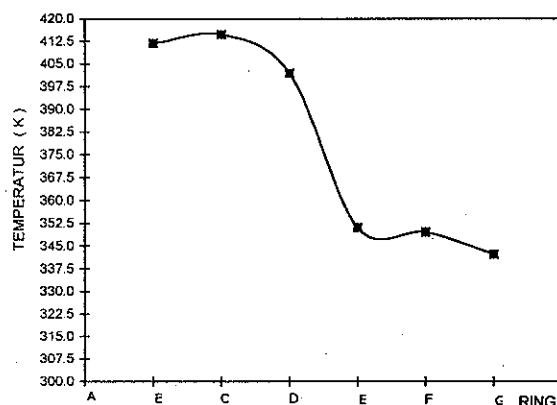
reaktor), dicapai temperatur maksimum dinding luar bahan bakar sebagai 414,74 K (< 423 K), artinya belum terjadi pendidihan inti. Dengan demikian pengoperasian reaktor aman secara termohidrolik.

Berdasarkan data distribusi air pendingin diketahui, bahwa 23,39 % pendingin yang dipompakan ke dalam reaktor masuk ke dalam teras dan 76,61 % masuk ke sisi teras. Jadi, cara penempatan pipa masukan seperti pada Gambar 6 mengakibatkan pemakaian air pendingin untuk mendinginkan teras reaktor tidak efektif dan jumlah air pendingin yang masuk ke dalam teras tidak merata.

4.2 Analisis Temperatur Maksimum Dinding Luar Bahan Bakar pada Setiap Ring

Akibat tidak seragamnya kecepatan aliran pendingin masuk ke dalam teras, akan menghasilkan temperatur dinding luar bahan bakar yang berbeda pula.

Temperatur maksimum dinding luar bahan bakar yang berada pada *Ring C* (bahan bakar C-1) lebih tinggi dari temperatur maksimum dinding luar bahan bakar yang berada pada *Ring B* (bahan bakar B-1). Hal ini disebabkan pengosongan lubang A-1, C-12 dan D-18 lebih mempengaruhi penurunan temperatur permukaan bahan bakar yang berada pada *Ring B* (Gambar 18).



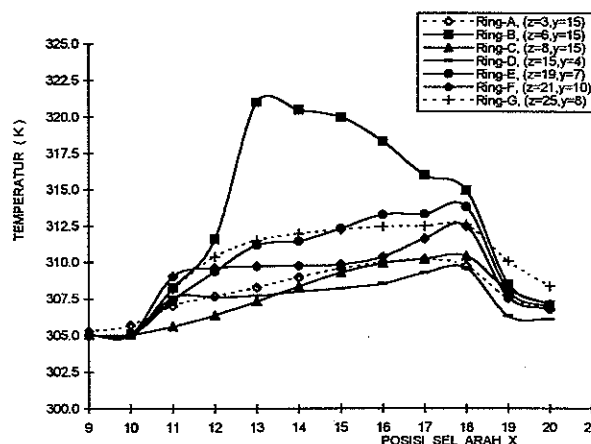
Gambar 18. Distribusi arah radial temperatur dinding luar bahan bakar.

Berdasarkan gambar tersebut diketahui juga, bahwa pengosongan bahan bakar pada lubang A-1 yang berada pada *Ring A* dan lubang C-12 yang terdapat pada *Ring C* menyebabkan temperatur maksimum dinding luar bahan bakar di dalam teras bergeser ke *Ring C* karena pengurangan bahan bakar pada daerah tersebut akan mengurangi pembangkitan panas.

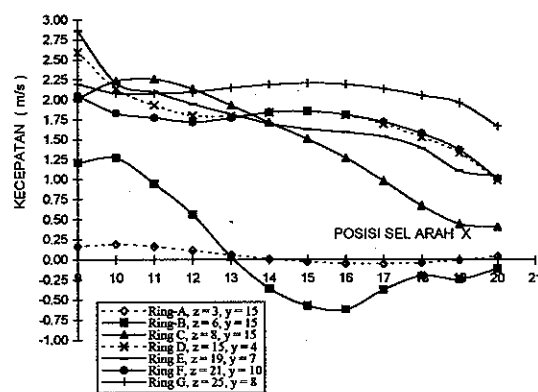
4.3 Analisis Temperatur Pendingin di dalam Teras

Gambar 19 menunjukkan, bahwa temperatur air pendingin pada *Ring A* mencapai maksimum pada posisi I = 17, kemudian turun hingga posisi I = 20. Temperatur air pendingin pada *Ring B* mencapai maksimum pada posisi I = 13, kemudian turun hingga posisi I = 20. Keadaan ini disebabkan pada daerah tersebut terdapat aliran pendingin yang masuk dari atas teras disamping

dari bawah teras (Gambar 20), sehingga mempengaruhi posisi temperatur maksimum air pendingin.



Gambar 19. Distribusi temperatur air pendingin arah aksial pada setiap ring.



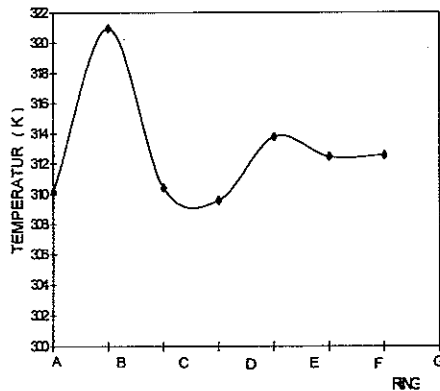
Gambar 20. Distribusi kecepatan aliran pendingin arah x.

Kondisi demikian hanya terjadi pada daerah *ring* bagian dalam. Hal ini disebabkan kecepatan aliran pendingin dan jumlah air pendingin yang masuk daerah tersebut lebih kecil dari daerah *ring* bagian luar, sesuai dengan posisinya terhadap pipa primer.

Pada Gambar 21 temperatur air pendingin pada *Ring A* paling rendah dari *ring* lain. Hal ini terjadi karena pada *Ring A* tidak ditempatkan bahan bakar. Temperatur maksimum air pendingin di dalam teras berada pada *Ring B*. Hal ini disebabkan pada daerah tersebut mempunyai luas penampang aliran dan jumlah air pendingin yang lebih rendah dibandingkan dengan daerah-daerah *ring* bagian luarnya, sedangkan lubang-lubang penempatan bahan bakar pada daerah tersebut diisi seluruhnya dengan bahan bakar. Temperatur air pendingin pada *Ring C* dan *Ring D* lebih rendah dari temperatur air pendingin pada *ring* sebelah luarnya. Hal ini terjadi karena pengaruh pengosongan lubang C-12 dan D-18 yang menjadikan jumlah pendingin yang masuk pada daerah tersebut menjadi lebih besar.

Meskipun temperatur pendingin di dalam teras lebih besar pada daerah-daerah *ring* sebelah dalam,

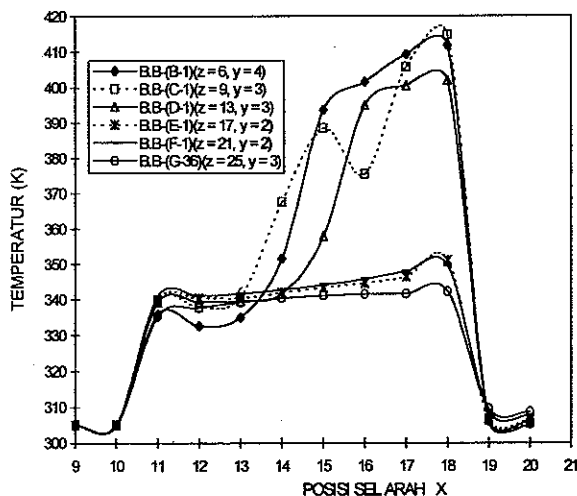
tetapi temperatur air pendingin waktu keluar teras lebih tinggi pada daerah *ring* terluar. Hal ini disebabkan adanya aliran pendingin pada daerah *ring* bagian dalam yang berasal dari atas teras dan menahan aliran pendingin yang masuk dari bawah teras, sehingga air pendingin yang masuk dari bawah teras dan telah mengambil panas dari bahan bakar di daerah tersebut tidak dapat mencapai permukaan teras.



Gambar 21. Distribusi temperatur air pendingin arah radial di dalam teras.

4.4 Distribusi Temperatur Dinding Luar Bahan Bakar Arah Aksial dan Kondisi Penyebabnya

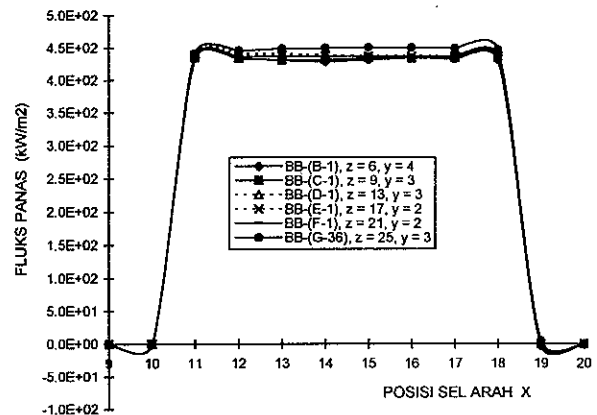
Posisi $I = 9$ dan $I = 10$ merupakan daerah bahan bakar tidak aktif, dimana pada daerah ini tidak terjadi pembangkitan panas dan dinyatakan sebagai dinding adiabatik. Karena temperatur pendingin ketika masuk teras 305 K, maka dari hasil perhitungan FLUENT V4.25 terlihat adanya perpindahan panas dari pendingin ke dinding bahan bakar tersebut. Hal ini diketahui dari harga fluks panas hasil hitungan akhir pada dinding tersebut berharga negatif (Gambar 23). Keadaan yang sama terdapat pada posisi $I = 19$ dan $I = 20$.



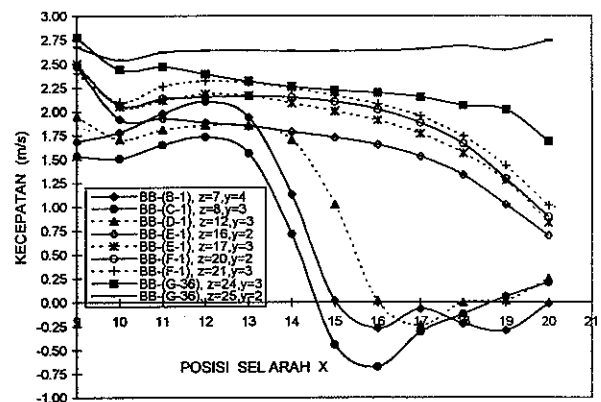
Gambar 22. Distribusi temperatur dinding luar bahan bakar B-1, C-1, D-1, E-1, F-1, dan G-36 arah aksial.

Pada Gambar 22, temperatur permukaan bahan bakar D-1, E-1, dan G-36 cenderung naik mulai MESIN Vol. XIII No. 1

dari posisi $I = 11$ hingga posisi $I = 18$ dan turun pada daerah grafit ($I = 19$ dan $I = 20$). Keduanya disebabkan komponen kecepatan arah x aliran pendingin pada daerah tersebut mempunyai kecenderungan turun (Gambar 24), sehingga pengambilan panas oleh pendingin dari dinding bahan bakar di daerah tersebut berkurang sesuai dengan turunnya komponen kecepatan arah x aliran pendingin yang bersangkutan. Kondisi ini dapat juga dilihat pada kecenderungan yang terdapat pada distribusi aksial koefisien perpindahan panas di dinding luar bahan bakar yang ditinjau (Gambar 25).

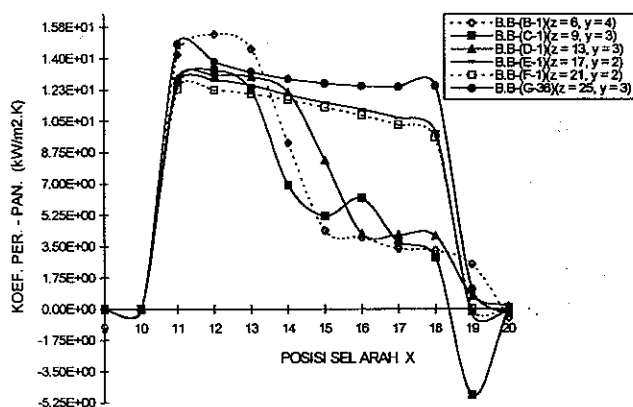


Gambar 23. Distribusi fluks panas arah aksial di dekat dinding luar bahan bakar yang ditinjau.

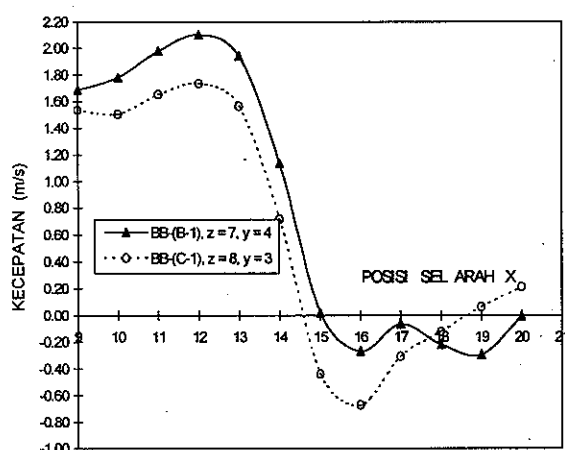


Gambar 24. Distribusi aksial kecepatan aliran pendingin arah x di dekat dinding luar bahan bakar yang ditinjau.

Temperatur dinding luar bahan bakar C-1 naik mulai posisi $I = 11$ hingga posisi $I = 15$, turun pada posisi $I = 16$ dan kemudian naik lagi hingga posisi $I = 18$. Hal ini disebabkan harga mutlak komponen kecepatan aliran pendingin arah x pada posisi $I = 16$ lebih besar dibandingkan pada posisi $I = 15$ dan $I = 17$. Hal ini muncul karena terdapatnya aliran separasi mulai posisi $I = 14$ hingga posisi $I = 18$.



Gambar 25. Distribusi aksial koefisien perpindahan panas dinding luar bahan bakar yang ditinjau.

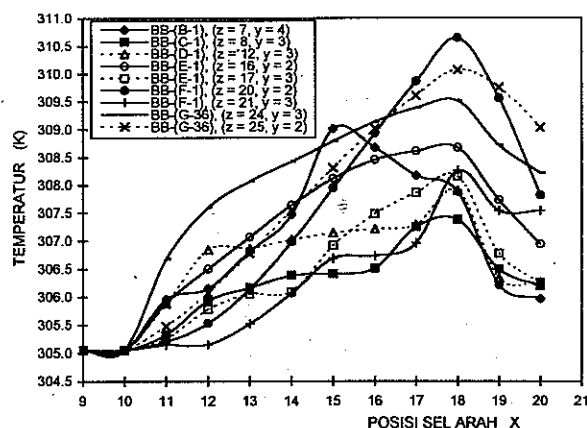


Gambar 26. Distribusi arah aksial komponen kecepatan arah x aliran pendingin di dekat dinding luar bahan bakar B-1 dan C-1 yang ditinjau.

Kondisi yang sama juga terjadi pada bahan bakar B-1 (Gambar 22), dimana temperatur dinding luar naik hingga posisi $I = 11$ lalu turun pada posisi $I = 12$ dan kemudian naik lagi dari posisi $I = 13$ hingga posisi $I = 18$, karena komponen kecepatan aliran pendingin arah x pada posisi $I = 12$ lebih besar dibandingkan dengan kecepatan pada sel sebelah bawah dan sel sebelah atasnya (Gambar 26).

Distribusi arah aksial temperatur air pendingin di dekat dinding luar bahan bakar C-1, D-1, E-1, F-1, dan G-36 yang ditinjau pada Gambar 22, mempunyai kecenderungan naik dari posisi $I = 9$ hingga posisi $I = 18$ dan turun pada posisi $I = 19$ hingga posisi $I = 20$ (daerah grafit) (Gambar 27). Temperatur air pendingin yang berada di dekat dinding luar bahan bakar B-1 yang ditinjau, naik mulai posisi $I = 9$ hingga posisi $I = 15$, kemudian turun dari posisi $I = 16$ hingga posisi $I = 20$. Keadaan ini disebabkan komponen kecepatan aliran pendingin arah x berharga negatif dari posisi $I = 16$ hingga posisi $I = 20$ (lihat Gambar 24 dan 26). Artinya, terdapat aliran pendingin yang berasal dari atas teras.

Masuknya pendingin dari atas teras disebabkan oleh kecepatan aliran pendingin pada daerah *Ring A* dan *Ring B* relatif lebih kecil dari kecepatan pada *ring* lainnya, sehingga memberikan kemudahan bagi air pendingin yang terdapat di atas teras untuk masuk ke dalam teras. Hal ini terlihat pada data-data komponen kecepatan aliran pendingin arah x pada posisi $I = 16$ hingga posisi $I = 20$ di daerah *Ring A* dan *Ring B* yang sebagian besar berharga negatif.



Gambar 27. Distribusi arah aksial temperatur pendingin di dekat dinding luar bahan bakar yang ditinjau.

Dengan demikian, pada permukaan bahan bakar B-1 yang ditinjau, untuk posisi $I = 9$ hingga $I = 15$ perpindahan panas yang terjadi adalah antara permukaan bahan bakar dengan pendingin yang masuk dari bawah teras dan untuk posisi $I = 16$ hingga $I = 20$ perpindahan panas yang terjadi adalah antara permukaan bahan bakar dengan pendingin yang masuk dari atas teras.

4.5 Analisis Air Pendingin pada Sisi Teras

Besarnya jumlah air pendingin yang masuk dari sisi teras (Bagian 4.1) mengakibatkan kecepatan aliran pendingin pada daerah tersebut ke arah permukaan tangki menjadi tinggi. Sehingga akan mendorong aliran air pendingin yang keluar dari teras dan mengandung radiasi N^{16} mencapai permukaan tangki.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengatasi hal di atas adalah dengan mengarahkan (memompakan) aliran pendingin langsung ke dalam teras, sehingga diharapkan jumlah air pendingin yang dipompakan dari pipa primer sebagian besar masuk ke dalam teras. Dengan demikian jumlah air pendingin yang harus dipompakan ke dalam reaktor dapat dikurangi dan tentunya hal ini juga akan menurunkan tingkat radiasi pada permukaan tangki yang disebabkan oleh dorongan aliran air pendingin yang mengalir melalui sisi teras.

4.6 Analisis Temperatur Air Pendingin yang Berada di Atas Teras

Temperatur maksimum air pendingin ketika keluar teras adalah 309 K. Dengan demikian terjadi

kenaikan temperatur air pendingin sebesar 4 K dari temperatur ketika masuk teras. Pada ketinggian 3,3 m dari permukaan teras temperatur semua air pendingin turun menjadi 305 K, sehingga temperatur air pendingin ketika keluar dari reaktor 305 K. Dengan demikian resin yang terpasang saat ini yang digunakan untuk memurnikan air pendingin primer yang berasal dari reaktor tidak perlu diganti, karena resin tersebut mempunyai temperatur operasi 350 K.

4.7 Analisis Tingkat Radiasi N^{16} pada Permukaan Tangki

Pada ketinggian 8,5 cm di atas permukaan teras semua air pendingin yang posisinya berhadapan langsung dengan teras mempunyai komponen kecepatan aliran arah x berharga positif, dimana komponen kecepatan aliran arah $x > |$ komponen kecepatan aliran arah $y|$ dan komponen kecepatan aliran arah $x > |$ komponen kecepatan aliran arah $z|$. Dengan demikian dapat dikatakan, bahwa semua air pendingin pada posisi tersebut mengalir ke arah permukaan tangki. Tetapi pada ketinggian 26,5 cm dari permukaan teras, air pendingin mulai mengalami aliran balik ke arah teras. Keadaan ini terlihat dengan adanya komponen kecepatan arah x berharga negatif di beberapa tempat. Pada ketinggian 2,77 m dari permukaan teras, seluruh air pendingin yang berada pada daerah yang berhadapan langsung dengan teras mempunyai komponen kecepatan aliran arah $x < 0$, dimana $|$ komponen kecepatan aliran arah $x| > |$ komponen kecepatan aliran arah $y|$ dan $|$ komponen kecepatan aliran arah $x| > |$ komponen kecepatan arah $z|$. Hal ini berarti, bahwa semua air pendingin yang keluar dari teras tidak dapat mencapai permukaan tangki pada daerah-daerah yang berhadapan langsung dengan teras.

Berdasarkan analisis vektor kecepatan diketahui juga, bahwa air pendingin yang keluar dari teras dan didorong oleh air pendingin lain yang datang melalui sisi teras tidak mencapai permukaan tangki. Sedangkan air pendingin yang terdapat pada permukaan tangki hanya berasal dari pipa masukan yang mengalir melalui sisi teras.

Karena pembentukan N^{16} berlangsung di dalam teras reaktor sebagai hasil penembakan neutron cepat terhadap O_2 yang terdapat pada air pendingin di dalam teras, maka air pendingin yang keluar dari teras reaktor mengandung radiasi N^{16} dengan waktu paruh 7,1 detik [8]. Tingginya tingkat radiasi N^{16} pada permukaan tangki yang dibawa oleh air pendingin dari teras akan menghalangi aktifitas kegiatan eksperimen yang dilakukan di atas permukaan tangki reaktor, karena radiasi N^{16} ini berbahaya bagi manusia dan lingkungannya. Tetapi dari analisis vektor kecepatan aliran pendingin di atas diketahui, bahwa tingkat radiasi N^{16} pada permukaan tangki cukup rendah, karena aliran air pendingin yang berasal dari teras dan mengandung radiasi N^{16} tidak mencapai permukaan tangki reaktor. Dengan demikian berdasarkan aspek termohidrolik dan tingkat radiasi N^{16} pada permukaan tangki, maka model reaktor riset yang ditinjau dapat dioperasikan dengan selamat.

5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengkajian secara teoritik terhadap aspek termohidrolik suatu model reaktor riset yang dilakukan dengan menggunakan paket program FLUENT V4.25, dapat ditarik beberapa kesimpulan berikut:

1. Secara teoritik reaktor riset yang dikaji dapat dioperasikan dengan selamat hingga mencapai daya 2 MW, dengan menggunakan 102 bahan bakar yang ditempatkan dengan bentuk susunan heksagonal di dalam teras silinder dan jumlah total pendingin primer yang dipompakan ke dalam tangki 1,2264 m³/s atau 19438,89 gpm.
2. Cara penempatan pipa primer pada dinding tangki untuk mengalirkan air pendingin primer ke dalam tangki akan mengakibatkan:
 - A. Air pendingin yang dipompakan ke dalam tangki sebagian besar masuk ke sisi teras. Dengan demikian penggunaan air pendingin menjadi tidak efektif karena akan menyebabkan biaya pengoperasian reaktor menjadi mahal dan kecepatan aliran pendingin dari sisi teras ke arah permukaan tangki menjadi tinggi sehingga akan berpengaruh terhadap tingkat radiasi N^{16} pada permukaan tangki.
 - B. Kecepatan air pendingin yang masuk ke dalam teras tidak merata, dimana kecepatan air pendingin makin kecil ke arah *ring* dalam. Oleh karena itu temperatur permukaan bahan bakar pada *ring* dalam lebih tinggi dari *ring* luar dan temperatur air pendingin pada *ring* dalam lebih rendah dari *ring* luar.
3. Perlu terlebih dahulu menentukan jumlah maksimum air pendingin yang dapat dipompakan ke dalam tangki reaktor untuk mengendalikan radiasi N^{16} pada permukaan tangki, sehingga temperatur permukaan bahan bakar dapat dibatasi dengan mengurangi jumlah penempatan bahan bakar di dalam teras.
4. Tingginya temperatur permukaan bahan bakar yang berada pada *ring* bagian dalam juga disebabkan karena adanya aliran air pendingin dari atas teras yang menahan aliran pendingin dari bawah teras serta adanya aliran silang dari *ring* bagian luar ke arah *ring* bahagian dalam. Dengan demikian panas terakumulasi di daerah *ring* bagian dalam. Kondisi-kondisi ini muncul karena kecepatan aliran pendingin ke arah teras tidak merata, yaitu makin kecil ke arah *ring* dalam serta jumlah air pendingin yang masuk pada daerah *ring* dalam lebih kecil dari daerah *ring* sebelah luar. Hal ini disebabkan oleh cara penempatan pipa primer masukan pada dinding tangki.
5. Temperatur air pendingin yang keluar dari daerah *ring* terluar relatif lebih tinggi jika dibandingkan dengan temperatur air pendingin yang keluar dari daerah *ring* dalam, karena adanya aliran pendingin dari atas teras pada daerah *ring* dalam yang menahan aliran pendingin yang berasal dari bawah teras. Oleh karena itu air pendingin yang telah mengambil panas

dari bahan bakar bagian bawah tidak dapat mencapai permukaan teras.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan perubahan cara penempatan pipa primer untuk mengalirkan air pendingin ke dalam tangki, sedemikian rupa sehingga air pendingin yang dipompakan langsung diarahkan ke dalam teras. Hal ini dapat mengurangi biaya pengoperasian reaktor, menurunkan tingkat radiasi N^{16} pada permukaan tangki dan temperatur teras lebih merata.
2. Sebaiknya lubang penempatan bahan bakar pada *ring A* tidak diisi dengan bahan bakar atau fasilitas reaktor lainnya, karena penempatan bahan bakar pada *Ring A* akan memperkecil luas penampang aliran pendingin pada daerah *ring* dalam, sehingga mengakibatkan temperatur bahan bakar pada daerah tersebut menjadi tinggi.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Todreas, N.E and Kazimi, M.S, *Nuclear System I - Thermal Hydraulic Fundamentals*, Hemisphere Publishing Co, New York, 1976.
2. Anonymous, *Proposal for 2000 kW Upgrading of Bandung Triga[®] Mark II Reactor*, Pusat Penelitian Teknik Nuklir, Bandung, 1994.
3. El Wakil, M.M, *Nuclear Power Engineering*, McGraw-Hill Books Company, New York, 1962.
4. K. Kamajaya, "Peningkatan Daya Reaktor Triga Mark II Bandung Menjadi 2000 kW Ditinjau dari Aspek Distribusi Daya dan Suhu dalam Elemen Bakar", *Proc. Seminar Sains dan Teknologi Nuklir PPTN - BATAN*, Bandung, 1995.
5. Reinaldy N., *Kaji Teoritik Aspek Termohidrolis Reaktor Riset - 2 MW*, Tesis Magister, Jurusan Rekayasa Energi Nuklir - ITB, 1997.
6. Anonymous, *Safety Analysis Report*, General Atomic, San Diego, 1996.
7. Reinaldy, N., A. Suwono, T.A.F. Soelaiman, "Analisis Teoritik Aliran Air Pendingin pada Berkas Empat Pipa Pemanas Susunan Sebaris Menggunakan Paket Program FLUENT V4.25, *Jurnal Teknik Mesin - ITB*, Vol. XI, No. 3, Bandung, 1996.
8. James Wood, *Computational Method in Reactor Shielding*, Pergamon Press, Oxford, 1982.