



ID0200120

## PENGARUH PEMBANGKITAN DAYA PADA TEMPERATUR PERMUKAAN BAHAN BAKAR

Adolf Asih Supriyanto\*, Masrukan\*\*

\*Pusat Penelitian dan Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan - BATAN

\*\*Pusat Pengembangan Teknologi Bahan Bakar Nuklir dan Daur Ulang - BATAN

### ABSTRAK

PENGARUH PEMBANGKITAN DAYA PADA TEMPERATUR PERMUKAAN BAHAN BAKAR. Dalam merancang suatu reaktor nuklir terdapat beberapa faktor yang harus diperhitungkan di antaranya sifat netronik, mekanik, termohidrolika, manajemen bahan bakar dan sifat-sifat yang lainnya. Pada penelitian ini telah dipelajari aspek termohidrolika teras reaktor mengenai temperatur bahan bakar dan fluida. Telah dilakukan pemodelan susunan teras reaktor dan reflektor berbentuk heksagonal. Berikutnya, diasumsikan bahwa pembangkitan dayanya tetap pada 250 kwatt dan 375 kwatt untuk masing-masing bahan bakar. Data pengamatan diperoleh dari distribusi temperatur pada permukaan bahan bakar dan fluida, khususnya pada sub-buluh tengah, pinggir dan pojok. Pengerjaan model teras reaktor dilakukan dengan paket program Fluent Versi 4.25 yang ada di Laboratorium Termodinamika PAU-IR ITB. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa teras reaktor yang dimodelkan memiliki temperatur permukaan bahan bakar dan fluida rendah.

### ABSTRACT

*INFLUENCE OF POWER GENERATION TO FUEL SURFACE TEMPERATURE. In order to design a nuclear reactor, there are many factors that must be considered, namely neutronic, mechanic, thermohydraulic, fuel management, etc. In this experiment the study was focussed on reactor core thermohydraulic aspects, especially the fuel surface and fluid temperatures. Modelling of hexagonal configuration of reactor core and reflector was carried out. Then, the power generations were assumed constant at 250 kwatt and 375 kwatt for each fuel element. Simulation data were obtained from the fuel surface and fluid distribution temperatures, especially in the middle, edge and corner sub-channels. This model was prepared and analyzed using Fluent Version 4.25 package program in the Thermodynamic Laboratory of PAU-ITB. The result shows that this reactor core model gives low fuel surface and fluid temperatures.*

### PENDAHULUAN

Reaktor Triga Mark II berdasarkan fungsinya 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 dari pendayagunaan reaktor di masa mendatang [1]. Untuk itu, menurut rencana reaktor ini kapasitas dayanya akan dinaikan menjadi 2 MW.

Di dalam setiap penggunaan reaktor nuklir selalu mengandung bahaya potensial dengan terakumulasinya zat-zat radioaktif sebagai hasil reaksi belah yang terjadi pada reaktor nuklir [2,3]. Oleh karena itu pembangunan reaktor nuklir dan pengoperasiannya harus dilakukan dengan menerapkan persyaratan keselamatan yang sangat ketat. Salah satu aspek keselamatan yang terpenting adalah aspek termohidrolika, sehingga didalam perancangan dan analisisnya dituntut suatu ketelitian yang sangat tinggi.

Pada penelitian ini akan dikaji hanya pada aspek termohidrolikanya saja. Kajian hanya mencakup penentuan distribusi temperatur permukaan bahan bakar dan temperatur fluida pendingin.

Dalam pengkajian aspek termohidrolika ini telah dirancang sebuah model teras reaktor dengan susunan bahan bakar berbentuk heksagonal, dan pembuatan modelnya hanya mencakup 1/12 dari teras reaktor karena pertimbangan adanya faktor simetri. Selanjutnya kajian hanya difokuskan pada 3 daerah aliran saja yaitu aliran sub-buluh tengah, pinggir dan pojok. Kemudian model ini dianalisis dengan menggunakan paket program *Fluent Versi 4.25* yang ada di laboratorium PAU-IR, ITB Bandung.

Dengan menggunakan paket program *Fluent Versi 4.25* dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Membuat geometri dari model.
2. Membuat grid yang bersesuaian dengan geometri.

3. Menjalankan paket program *Fluent Versi 4.25*.
4. Mengambil data distribusi temperatur sepanjang permukaan bahan bakar.
5. Mengambil data distribusi temperatur fluida sepanjang sub-buluh.

Dari langkah-langkah di atas akan diperoleh distribusi temperatur permukaan bahan bakar dan temperatur fluida.

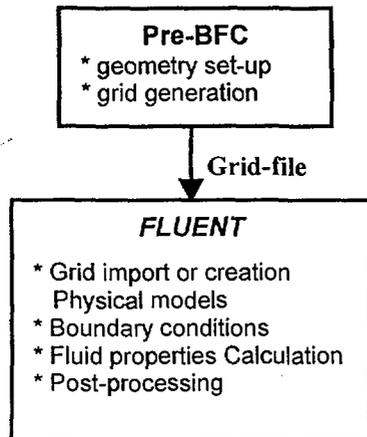
**FLUENT VERSI 4.25**

*Fluent versi 4.25* adalah suatu paket program komputer yang berguna untuk memodelkan aliran fluida, transfer panas dan reaksi kimia [4-6].

*Fluent versi 4.25* merupakan suatu paket solusi *Navier-Stokes* yang akan menyelesaikan persamaan-persamaan konservasi massa, momentum, energi dan spesies kimia. Masing-masing persamaan tersebut akan didiskretkan kedalam kurvalinier grid sehingga dapat dilakukan perhitungan komputasinya.

**Struktur Program**

*Fluent versi 4.25* dibagi dalam 2 program yaitu *preprocessor pre-BFC V4* (*BFC* kependekan dari *Body Fit Cubic*) dan modul utama *Fluent* seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Struktur program dasar *Fluent V- 4.25*.

*Pre-BFC V4* digunakan untuk membuat geometri 2-dimensi atau 3-dimensi dan struktur grid dari model yang dipilih. Pada Gambar 1 struktur grid dapat ditransfer dari *pre-BFC V4* ke *Fluent* melalui *Grid File*. Dengan *Fluent* dapat didefinisikan model-model fisik, sifat-sifat fluida/material dan kondisi batas sesuai dengan model yang dipilih. Definisi tersebut ditambah dengan

struktur grid disimpan kedalam *Case File*. Perhitungan dilakukan dengan menjalankan program dan hasilnya disimpan kedalam *Data File*.

**Persamaan-persamaan Dasar Konservasi**

Persamaan-persamaan dasar yang diselesaikan dalam *Fluent* adalah :

1. Konservasi massa
2. Konservasi momentum
3. Konservasi energi

1. Persamaan Konservasi Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = S_m \tag{1}$$

dengan

- $\rho$  = densitas fluida
- $x_i$  = jarak dalam arah  $i$
- $v_i$  = komponen kecepatan arah  $i$
- $S_m$  = sumber lain

2. Persamaan Konservasi Momentum [3]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i \tag{2}$$

dengan

- $p$  = tekanan statik
- $g_i$  = percepatan gravitasi
- $F_i$  = gaya luar
- $\tau_{ij}$  = tensor stres

Tensor stres diberikan oleh [3]:

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

dengan  $\mu$  = viskositas

3. Persamaan Konservasi Energi

Dalam bentuk energi entalpi  $h$  ditulis sebagai berikut [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} (k \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_j + \frac{\partial p}{\partial t} + v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + s_h \tag{4}$$

dengan  $T$  = temperatur

- $\tau_{ij}$  = tensor stres
- $J_j$  = fluks spesies  $j$
- $k$  = konduktivitas termal campuran
- $s$  = sumber

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

$$\overline{\rho(u_i u_j)} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

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

$\rho$  = rapat massa

$g$  = gravitasi

$k$  = energi kinetik turbulen

$\delta_{ij}$  = 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 energi entalpi diberikan oleh [3]:

$$\overline{\rho(u_i h)} = \frac{-\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (6)$$

Notasi  $\mu_t$  adalah untuk viskositas turbulen

#### Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan dalam penelitian ini adalah masukan (*inlet*), simetri dan dinding.

#### 1. Masukan

Batasan masukan adalah batasan aliran yang masuk dengan kecepatan, komposisi dan temperatur diketahui. Besaran fisis fluida (yaitu air biasa) yang dimasukkan adalah sebagai berikut :

- \* Densitas (massa jenis,  $\rho$ ) = 958,3 (Kg/m<sup>3</sup>)
- \* Viskositas,  $\mu = 2,822 \cdot 10^{-4}$  (Kg/m-s)
- \* Konduktivitas panas,  $k = 0,677$  (W/m-K)
- \* Panas jenis,  $c_p = 4216$  (Joule/Kg-K)

#### 2. Simetri

Batasan simetri adalah batasan dimana gradien normal sama dengan nol untuk semua variabel kecuali komponen normal kecepatan. Kecepatan normal akan hilang pada kondisi batasan simetri.

#### 3. Dinding

Pada batasan dinding komponen kecepatan normal dipaksa sama dengan nol. Harga fluks skalar pada batasan ini dipilih tetap.

Pembangkitan panas pada dinding dinyatakan sebagai berikut [3]:

$$q''_w = k \frac{\Delta T}{\Delta n} = h_\infty (T_\infty - T_w) \quad (7)$$

Dengan notasi :

$q''$  = pembangkitan panas

$T$  = temperatur

$k$  = konduktivitas termal fluida

$w$  = dinding

$f$  = fluida

$\infty$  = cukup jauh dari dinding

$\Delta n$  = jarak dari dinding ke titik nodal P dekat dinding

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

$$\frac{k(\frac{\Delta T}{\Delta n})}{q''} = \frac{1}{K y^+} \frac{Pr_t}{Pr} \ln(E y^+) + \dots(8)$$

$$\frac{1}{y^+} \left( \frac{Pr_t}{Pr} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{\frac{\pi}{4}}{\sin \frac{\pi}{4}} \left( \frac{A}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{Pr}{Pr_t} - 1 \right)$$

dengan notasi :

$\Delta T = T_w - T_f$

$Pr$  = bilangan Prandtl

$Pr_t$  = bilangan Prandtl turbulen

$A$  = konstanta van Driest (26)

$\kappa$  = konstanta von-Karman (0,24)

$E$  = konstanta empiris (9,81)

#### Penyelesaian Persamaan

Fluent di dalam menyelesaikan persamaan-persamaan konservasi massa, momentum dan energi menggunakan teknik volume atur. Teknik volume atur ini terdiri dari :

1. Pembagian domain ke dalam volume atur diskrit menggunakan *grid* kurvalinier.
2. Integrasi persamaan-persamaan konservasi di atas untuk menyusun persamaan-persamaan aljabar.
3. Penyelesaian persamaan-persamaan di atas.

Penyelesaian persamaan akan selesai apabila harga residual telah mencapai harga tertentu. Harga residual normalisasi pada suatu titik tertentu P tersebut dinyatakan [3]:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sum_P |A_P \phi_P|} \quad (10)$$

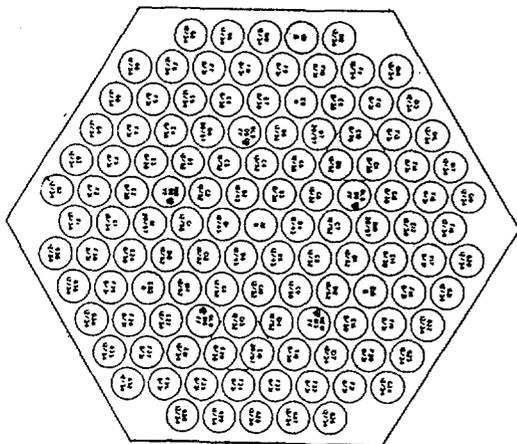
Notasi  $\bar{R}$  = residual

$A_P$  = koefisien konveksi

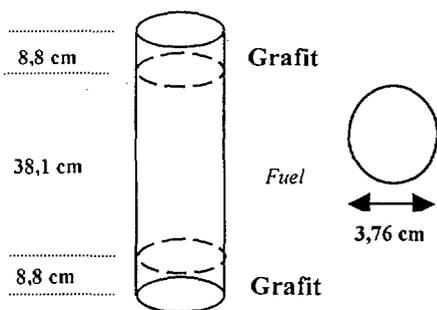
$\phi_P$  = sebarang variabel

**TATA KERJA**

Pada penelitian kali ini dipilih model teras reaktor berbentuk heksagonal dan susunan bahan bakarnya juga berbentuk heksagonal. Jumlah bahan bakar seluruhnya sebanyak 121 batang seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2. Ukuran diameter bahan bakar 3,76 cm dan panjang bahan bakar (fuel) 38,1 cm yang diapit oleh grafit dengan tebal 8,8 cm seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Kemudian pemodelan teras reaktor hanya dibuat 1/12 saja seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4. Sedangkan Gambar 5 adalah visualisasi geometri dari model dalam 3-dimensi beserta kondisi batasnya. Kajiannya hanya mencakup distribusi temperatur bahan bakar dan temperatur fluida.



**Gambar 2.** Model teras reaktor arah horisontal.

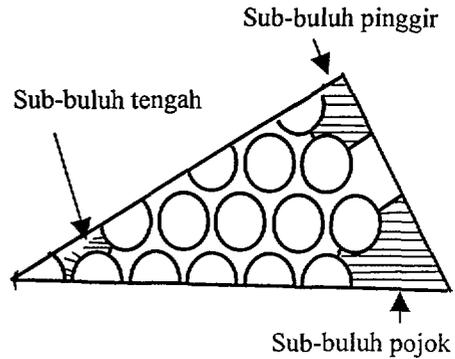


**Gambar 3.** Diameter bahan bakar.

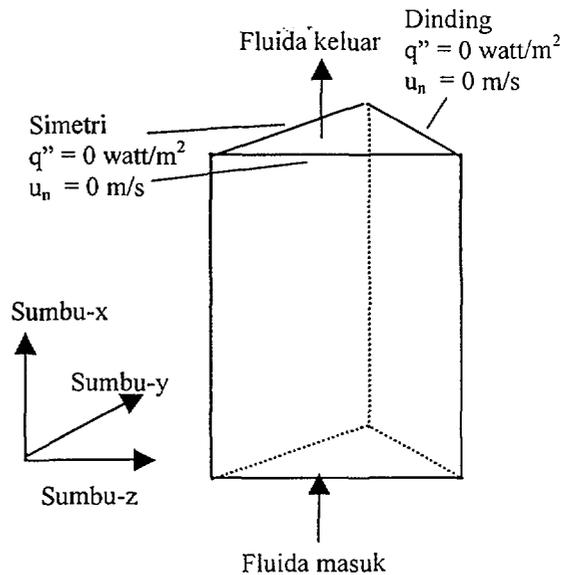
Untuk menjalankan program *fluent* ini diperlukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Membuat geometri dari model yang dipilih dengan langkah kerja ditunjukkan dalam Gambar 6. Pada kajian ini dibuat model 1/12 teras reaktor berbentuk heksagonal dengan bentuk dan ukuran

seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3, 4 dan 5.



**Gambar 4.** Geometri 1/12 teras reaktor.



**Gambar 5.** Visualisasi geometri model 3-dimensi.

2. Membuat *grid* yang dalam kajian ini dibuat 14 nodal arah sumbu-x, 18 nodal arah sumbu-y dan 29 nodal arah sumbu-z. Sumbu-x adalah arah vertikal dengan pembagian sel volume atur seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1. Untuk selanjutnya di dalam pembahasan sel volume atur dalam arah x diganti dengan posisi. Langkah pembuatan *grid* ditunjukkan dalam Gambar 7.
3. Memasukkan data awal kasus per kasus.
  - (a) Kasus I dengan
    - Kecepatan aliran masuk : 0,18 m/s
    - Temperatur aliran masuk : 305 K
    - Tekanan aliran masuk : 1 atm
    - Pembangkitan daya :  $4,59 \times 10^4 \text{ watt/m}^2$

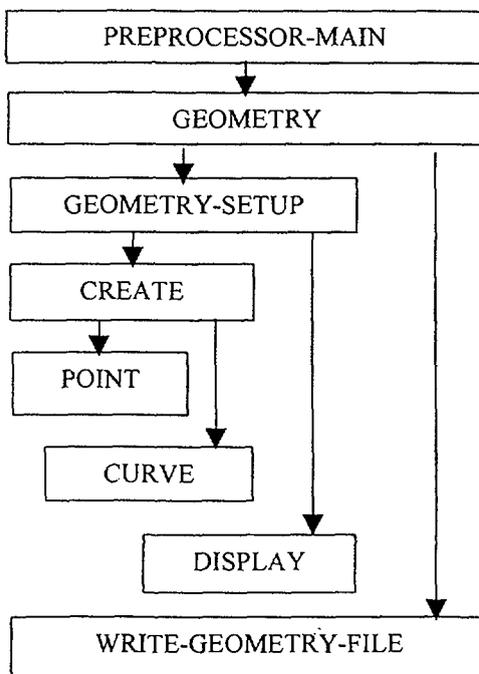
- (b) Kasus II dengan  
Kecepatan aliran masuk : 0,18 m/s  
Temperatur aliran masuk : 305 K  
Tekanan aliran masuk : 1 atm  
Pembangkitan daya :  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>

Pembangkitan panas untuk grafit diatur sama dengan 0 watt/m<sup>2</sup> dan untuk bahan bakar dihitung menurut perhitungan sebagai berikut :

$$W = P / [(\Sigma \text{bahan bakar}) \cdot (\text{Luas selubung bahan bakar})] \text{ watt/m}^2 \quad (11)$$

Dengan memasukkan harga daya P adalah 250 kwatt pada Kasus I dan 375 kwatt pada Kasus II maka diperoleh harga pembangkitan daya W seperti di atas.

4. Menjalankan program



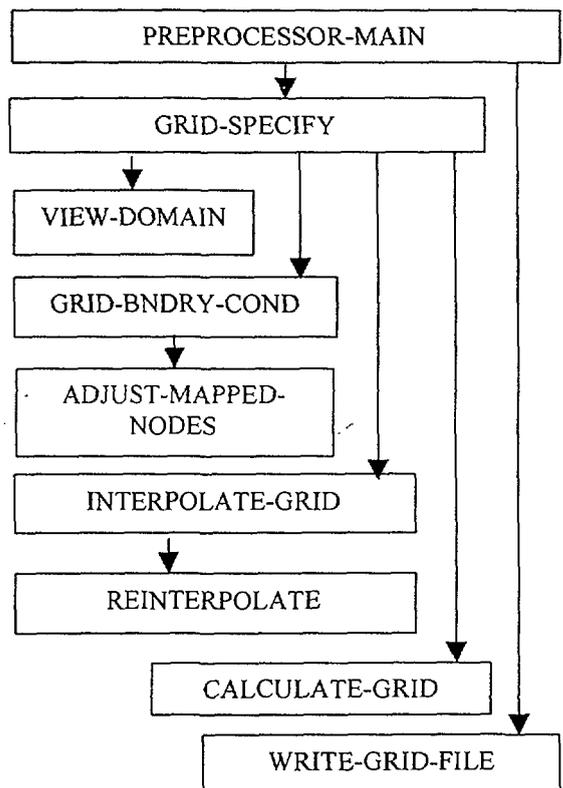
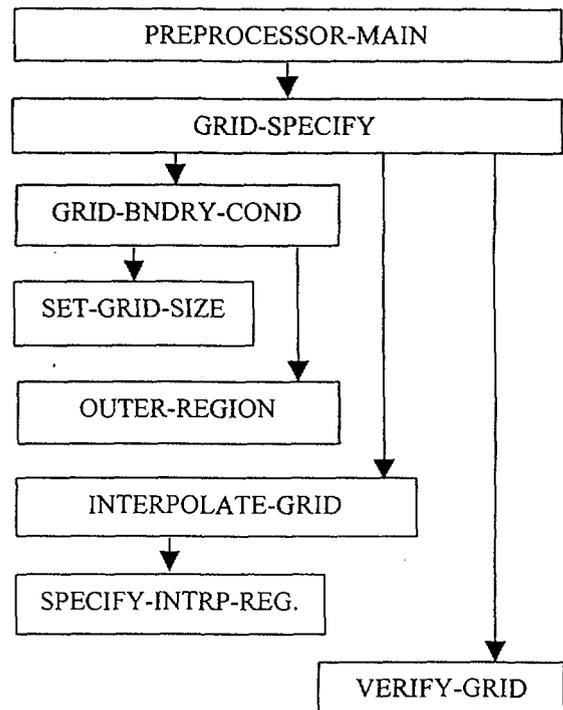
Gambar 6. Diagram alir pembuatan geometri.

Tabel 1. Sel volume atur dalam arah x.

No.	Jarak dalam arah x (mm)	Jumlah sel volume atur
1	0 ~ 88	2 (posisi 1 s/d 2)
2	88 ~ 469	8 (posisi 3 s/d 10)
3	469 ~ 557	2 (posisi 11 s/d 12)

HASIL DAN BAHASAN

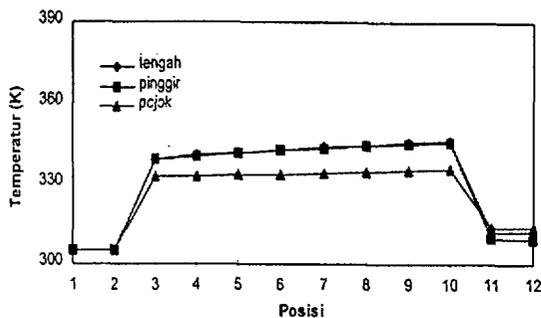
Pengkajian dilakukan pada kondisi pembangkitan daya yang berbeda yaitu masing-masing  $4,59 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup> untuk Kasus I dan  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup> untuk Kasus II.



Gambar 7. Diagram alir pembuatan grid.

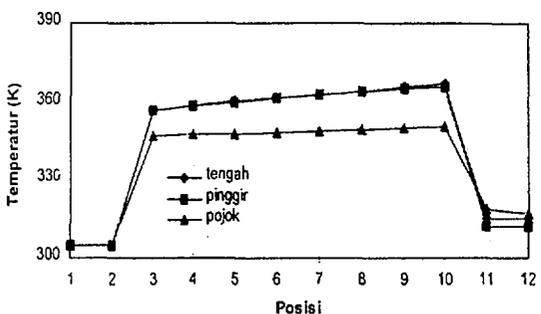
Gambar 8 menunjukkan gambar distribusi temperatur permukaan bahan bakar sepanjang posisi dalam arah sumbu-x pada Kasus I. Pada awalnya temperatur bahan bakar adalah konstan 305 K yang ditunjukkan dalam posisi 1 dan 2 karena pada daerah itu

fluida melewati grafit yang pembangkitan panasnya diatur 0 watt/m<sup>2</sup>, sehingga temperatur permukaannya juga tetap konstan.



Gambar 8. Distribusi temperatur permukaan bahan bakar, Kasus I.

Mulai pada posisi 3 temperatur permukaan bahan bakar naik dan terus mengalami kenaikan secara linier sampai dengan posisi 10. Keadaan ini dikarenakan fluida yang melewati bahan bakar mendapat tambahan panas secara terus menerus, sehingga tidak dapat menyerap panas lebih banyak dari permukaan bahan bakar. Distribusi permukaan temperatur bahan bakar sub-buluh tengah dan pinggir berimpit dan lebih tinggi daripada distribusi temperatur permukaan sub-buluh pojok. Kemudian temperatur permukaan bahan bakar turun lagi karena fluida melewati grafit yang pembangkitan panasnya sama dengan 0 watt/m<sup>2</sup>.

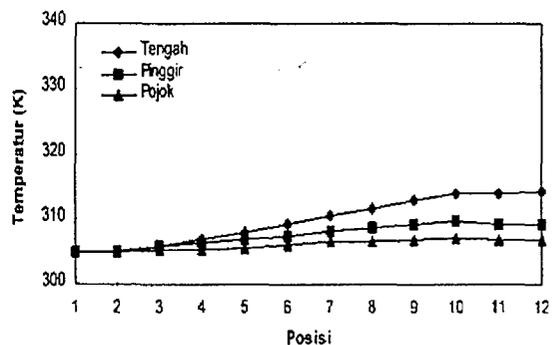


Gambar 9. Distribusi temperatur permukaan bahan bakar, Kasus II.

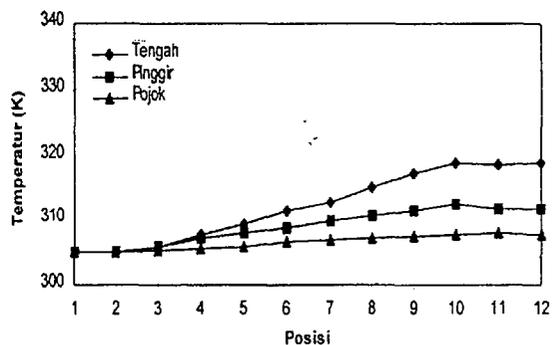
Gambar 9 menunjukkan gambar distribusi temperatur permukaan bahan bakar sepanjang posisi dalam arah sumbu-x pada Kasus II. Pada Kasus II memiliki kecenderungan yang sama dengan Kasus I, yaitu pada posisi 3 sampai posisi 10 temperatur permukaan bahan bakar terus naik secara linier. Namun pada Kasus II masing-masing sub-buluh lebih tinggi daripada Kasus I. Hal ini mudah dimengerti karena dengan naiknya pembangkitan daya

maka temperatur permukaan bahan bakar akan mengalami kenaikan.

Gambar 10 adalah gambar yang menunjukkan distribusi temperatur fluida sepanjang posisi dalam arah sumbu-x pada Kasus I. Pada awalnya temperatur fluida konstan seperti yang ditunjukkan dalam posisi 1 dan 2. Keadaan ini mudah dimengerti karena fluida melewati grafit yang pembangkitan panasnya sama dengan 0 watt/m<sup>2</sup>. Kemudian temperatur fluida mulai naik pada posisi 3 sampai dengan posisi 10 karena terakumulasinya panas bahan bakar yang diberikan ke fluida. Akhirnya temperatur fluida tidak naik lagi karena fluida melewati grafit yang pembangkitan panasnya 0 watt/m<sup>2</sup>, seperti yang ditunjukkan dalam posisi 11 dan 12.



Gambar 10a. Distribusi temperatur fluida, Kasus I.



Gambar 10b. Distribusi temperatur fluida, Kasus II.

Karena pembangkitan panasnya dinaikkan maka Kasus II memiliki kecenderungan yang sama dengan Kasus I dengan temperatur fluida mengalami sedikit kenaikan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 10.

### SIMPULAN

Dari kajian yang telah dilakukan dengan kecepatan, temperatur dan tekanan

fluida masuk konstan masing-masing 0,18 m/s, 305 K dan 1 atm serta variasi pembangkitan panas 4,59 watt/m<sup>2</sup> dan 6,89 watt/m<sup>2</sup> diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Temperatur permukaan bahan bakar pada posisi 1 dan 2 adalah tetap karena fluida melewati grafit.
2. Temperatur permukaan bahan pada posisi 3 sampai dengan posisi 10 mengalami kenaikan secara linier.
3. Temperatur permukaan bahan bakar pada posisi 11 dan 12 turun karena fluida melewati grafit.
4. Temperatur permukaan bahan bakar sub-buluh tengah dan pinggir sama dan lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur permukaan bahan bakar sub-buluh pojok.
5. Temperatur fluida pada posisi 1 dan 2 adalah tetap karena fluida melewati grafit.
6. Temperatur fluida posisi 3 sampai dengan posisi 10 mengalami kenaikan.
7. Temperatur fluida posisi 11 sampai dengan posisi 12 tidak mengalami kenaikan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Bersama ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Yth. Bapak DR. Ir. Aryadi Suwono dan DR. Ir. Toto Hardianto atas kesabarannya memberi arahan dan bimbingannya. Tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada Yth. Bapak DR. Ir. T. A. Fauzi Soelaiman atas bantuannya memperkenalkan dan mengajarkan paket program Fluent.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] SUPRIYANTO, A.A., *Analisis Termohidrolika Teras Reaktor Susunan Heksagonal*, Tugas Akhir Program Pasca Sarjana Pada Fakultas Ilmu dan Rekayasa Nuklir, ITB, Bandung, (1997) 1-7.
- [2] SUWONO, A., *Pendekatan Model Media Berpori Sub-buluh Dalam Analisis Termodinamika Berkas Bahan Bakar Reaktor Nuklir*, PPTKR-BATAN, Serpong, (1994).

- [3] WASKITO, M.A., SUHENDAR, KAMAJAYA, K., SUWONO A., ISMUNTOYO, R.P.H., *Rencana Studi Karakteristik Termohidrolik Sub-buluh Dalam Berkas Bahan Bakar Reaktor Pada Untai Uji Nilo I*, PPTKR-BATAN, Serpong, (1994).
- [4] ANONIM, *Computational Added Design, Fluent User's Guide*, Version 4.2, Fluent Inc., Lebanon, NH USA, (1993) 831-879.
- [5] ANONIM, *pre-BFC User's Guide*, Version 4.2, Fluent Inc., Lebanon, NH USA, (1993) 1-12.
- [6] ANONIM, *"Fluent Tutorial Guide"*, Version 4.2, Fluent Inc., Lebanon, NH USA, (1993) 14-24.

#### TANYA JAWAB

Bambang Herutomo

- Apakah model yang ditinjau juga memperhatikan efek aliran silang (*crossflow*) yang disebabkan oleh perbedaan densitas pendingin akibat adanya distribusi daya dalam arah radial teras?
- Berdasarkan hasil perhitungan tentang temperatur maksimum kelongsong dan permukaan bahan bakar untuk level daya yang ditinjau, apakah keselamatan operasi reaktor masih terjamin?

Adolf Asih

- Ya, digunakan model aliran silang.
- Masih aman, karena temperatur bahan bakar sekitar 360 K masih lebih rendah dari yang dipersyaratkan

Masdin

- Kenapa bentuk geometri Triga Mark II berupa hexagonal?
- Laju aliran pendingin tetap atau bervariasi? Berapa besarnya?
- Kenapa distribusi aksial temperatur bahan bakar yang dihasilkan terlihat mendatar?

Adolf Asih

- Untuk meningkatkan daya dari 1 MW menjadi 2 MW
- Laju alir pendingin dibuat tetap sebesar 0,18 MW
- Karena pembangkitan panasnya dibuat konstan