

## PENGARUH PEMBANGKITAN DAYA PADA TEMPERATUR PERMUKAAN BAHAN BAKAR DAN FLUIDA TERAS REAKTOR

**Adolf Asih Supriyanto**

Lab Fisika Program Studi Teknik Mekatronika, Politeknik Enjineri Indorama, Purwakarta  
adolff@pei.ac.id

### INFO ARTIKEL

Diterima : 10 November 2016  
Direvisi : 15 Desember 2016  
Disetujui : 21 Januari 2017

#### Kata Kunci :

Bahan bakar, teras reaktor, pembangkitan daya, Fluent, sub-buluh, distribusi temperatur.

### ABSTRAK

Dalam merancang suatu reaktor nuklir terdapat beberapa faktor yang harus diperhitungkan diantaranya sifat neutronik, mekanik, termohidrolika, manajemen bahan bakar dan sifat-sifat yang lainnya. Pada penelitian ini telah dipelajari aspek termohidrolika teras reaktor mengenai temperatur permukaan 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 diperoleh menunjukkan bahwa teras reaktor yang dimodelkan memiliki temperatur bahan bakar dan fluida rendah

### I. PENDAHULUAN

Reaktor Triga Mark II yang berada di Bandung berdasarkan fungsinya termasuk jenis reaktor penelitian, dimana neutron hasil belah dimanfaatkan untuk berbagai penelitian, irradiasi dan produksi radioisotop [1-2]. Produksi radioisotop terutama Fission Product Molybdenum (FPM) dijadikan prioritas utama dari pendayagunaan reaktor dimasa mendatang [3-4].

Didalam setiap penggunaan reaktor nuklir selalu mengandung bahaya potensial dengan terakumulasinya zat-zat radioaktif sebagai hasil reaksi belah yang terjadi pada reaktor nuklir [5-6]. 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.

Informasi tentang aspek termohidrolika dari kajian eksperimen masih sangat terbatas. Oleh itu, kajian teoritik sangat diperlukan untuk menunjang kajian eksperimen. Dari kajian teoritik dapat diketahui tentang distribusi temperatur sepanjang bahan bakar serta temperatur dan kecepatan aliran fluida pendingin pada setiap tempat, sehingga hal tersebut dapat memprediksi tingkat paparan radiasi pada permukaan fluida dalam tangki. Data ini secara eksperimen sangat sulit dilakukan.

Semakin meningkatnya jumlah penelitian yang memanfaatkan sumber radiasi neutron untuk kajian bahan material dengan kaedah tidak merusak bahan (Non-Destructive Testing, NDT) dan jumlah permintaan akan produksi radioisotop,

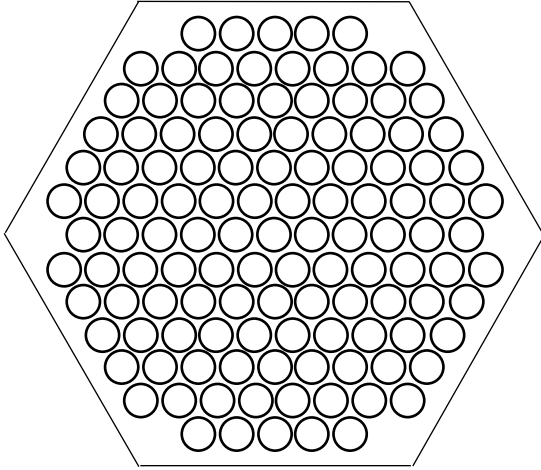
maka beberapa reaktor ingin meningkatkan fluks neutron yang lebih tinggi sehingga mencapai daya operasi beberapa puluh MW. Teoritiknya, pusat reaktor dapat dioperasikan dan menghasilkan tingkat fluks neutron berapa saja, namun mengingat aspek keselamatan reaktor maka pengoperasian reaktor harus dibatasi sehingga daya tertentu saja. Pengoperasian reaktor pada daya tinggi dengan sistem pembuangan panas yang tidak sesuai menyebabkan temperatur bahan bakar dan aliran fluida akan melampaui batas keselamatan.

Beberapa faktor keselamatan yang membatasi pengoperasian reaktor Triga Mark II diantaranya adalah temperatur maksimum bahan bakar pada teras reaktor hanya 750°C [7] dan sistem pendingin primer dirancang untuk reaktor beroperasi pada daya sehingga 1 MW. Untuk meningkatkan daya menjadi 2 MW, dalam penelitian ini akan dilakukan modifikasi terhadap susunan bahan bakar di teras reaktor dari susunan bentuk semula lingkaran menjadi bentuk susunan heksagonal dengan jumlah bahan bakar sebanyak 121 batang seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Dari hasil penelitian ini diharapkan diperoleh data-data tambahan dalam usaha untuk meningkatkan pengoperasian reaktor Triga Mark II menjadi 2 MW.

Dalam melakukan kajian aspek termohidrolika terhadap reaktor riset, dalam penelitian ini, digunakan paket program Fluent Versi 4-25 yang dimiliki oleh Laboratorium Termodinamika, PAU-IR, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Dalam penelitian ini hanya dibatasi pada aspek termohidrolikanya saja. Dengan pertimbangan adanya faktor simetri daripada susunan bahan bakar teras reaktor yang dikaji maka pembuatan modelnya hanya mencakupi seperduabelas

(1/12) dari susunan bahan bakar teras reaktor saja. Selanjutnya kajian akan dilakukan untuk menentukan distribusi temperatur permukaan bahan bakar dan temperatur fluida pendingin. Distribusi temperatur tersebut hanya difokuskan pada daerah sub-buluh tengah, pinggir dan pojok. Nilai temperatur diperoleh dengan cara mereratakan nilai temperatur pada masing-masing sub-buluh tengah, pinggir dan pojok.



Gambar 1 Penampang susunan heksagonal bahan bakar di dalam

## II. TEORI

Fluent versi 4.25 adalah suatu program paket komputer yang berguna untuk memodelkan aliran fluida, transfer panas dan reaksi kimia. Dalam penelitian ini, Fluent versi 4.25 digunakan untuk memodelkan aliran fluida dalam teras reaktor susunan heksagonal.

### A. Persamaan Pengendali

Persamaan-persamaan dasar yang digunakan dalam paket program Fluent Versi 4-25 untuk menyelesaikan aspek termohidrolik sistem teras reaktor adalah [8-10]:

Persamaan konservasi massa

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

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

Persamaan konservasi momentum

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

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

Tensor stress diberikan oleh:

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

dengan  $\mu$  = viskositas

Persamaan Konservasi Energi

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

dengan  $T$  = temperatur  
 $J_j$  = fluks spesies  $j$   
 $K$  = konduktivitas termal campuran  
 $S$  = sumber

Paket program *Fluent* Versi 4-25 dalam menyelesaikan persamaan-persamaan di atas juga melibatkan faktor turbulensi ( $k-\epsilon$ ) pada korelasi tegangan *Reynolds*.

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

dengan  $\overline{u}$  = komponen kecepatan rata-rata  
 $k$  = energi kinetik turbulen  
 $\mu_t$  = viskositas turbulen  
 $\delta_{ij}$  = delta kroneker.  $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$

Formula turbulensi untuk energi entalpi:

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

### B. Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan dalam penggunaan paket program *Fluent* Versi 4-25 adalah masukkan, simetri dan dinding.

#### 1. Masukkan

Batasan masukkan adalah batasan aliran fluida yang masuk kedalam teras reaktor dengan kecepatan, temperatur dan besaran fisis yang diketahui. Besaran-besaran fisis fluida, dalam penelitian ini adalah air, adalah:

- Densitas,  $\rho = 9,583 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas,  $\mu = 2,822 \times 10^{-4} \text{ kg/m-s}$
- Konduktivitas panas,  $k = 6,77 \times 10^{-1} \text{ watt/m-K}$
- Panas jenis,  $c_p = 4,216 \times 10^3 \text{ Joule/kg-K}$

#### 2. Simetri

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

3. Dinding

Pada batasan dinding komponen kecepatan normal dipaksa sama dengan nol, dan harga fluks skalar dipilih tetap. Pada batasan dinding pembangkitan panas dinyatakan oleh:

$$q_w'' = k \frac{\Delta T}{\Delta n} = h_\infty (T_\infty - T_w) \tag{7}$$

dengan  $q_w''$  = pembangkitan panas

$k$  = konduktivitas termal fluida

$T$  = temperatur

$w$  = dinding

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

$\infty$  = cukup jauh dari dinding

Pembangkitan panas dari dinding untuk aliran turbulen dinyatakan dengan formula *log-law* sebagai berikut:

$$\frac{k \left( \frac{\Delta T}{\Delta n} \right)}{q''} = \frac{1}{\kappa y^+} \frac{Pr_f}{Pr} \ln(Ey^+) + \frac{1}{y^+} \left( \frac{Pr_f}{Pr} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{\left( \frac{\pi}{4} \right)}{\sin\left( \frac{\pi}{4} \right)} \left( \frac{A}{\kappa} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{Pr_f}{Pr} - 1 \right) \tag{8}$$

dengan  $q_w''$  = pembangkitan panas

$k$  = konduktivitas termal fluida

$\Delta T = T_w - T_f$

$W$  = dinding

$F$  = fluida

$Pr$  = bilangan Prandtl

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

$A$  = konstanta van-Driest (26)

$E$  = konstanta empiris (9,81)

$y^+$  = konstanta jarak dari dinding (11,225)

Proses penyelesaian persamaan-persamaan tersebut di atas yang dilakukan oleh paket program *Fluent* Versi 4-25 dapat merujuk kepada Nazar dkk, 1998 [11].

III. METODE PENELITIAN

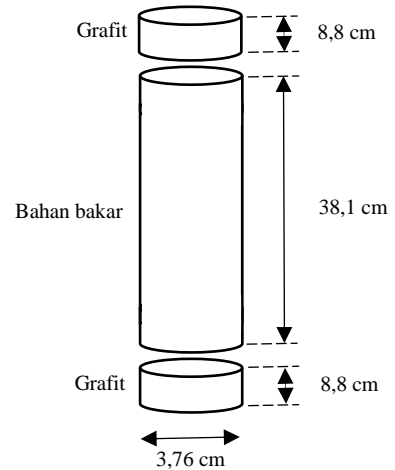
A. Bahan Bakar Reaktor

Dalam penelitian ini dipilih model bahan bakar reaktor dengan susunan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2. Jumlah semua bahan bakar reaktor ada 121 batang. Untuk lebih mendekati ukuran sebenarnya dari bahan bakar reaktor Triga Mark II, maka ukuran diameter dan panjang bahan bakar reaktor masing-masing yang dibuat adalah 3,76 dan 38,1 cm. Selongsong bahan bakar tersebut terbuat dari *stainless steel* yang diapit pada sisi bawah dan atas oleh grafit dengan diameter yang sama, tetapi panjang yang berbeda yaitu 8,8 cm.

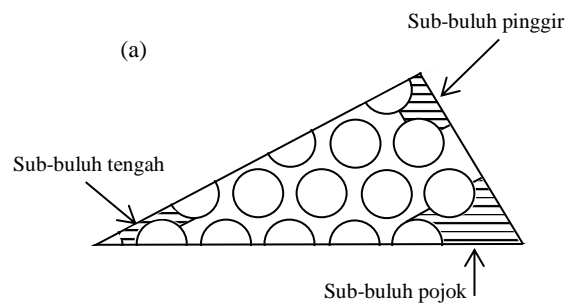
Daya yang dibangkitkan oleh setiap bahan bakar reaktor diasumsikan sama dan terdistribusi merata sepanjang bagian bahan bakar tersebut. Bagian luar dari bahan bakar adalah tidak aktif dan diasumsikan sebagai dinding adiabatik.

B. Teras Reaktor

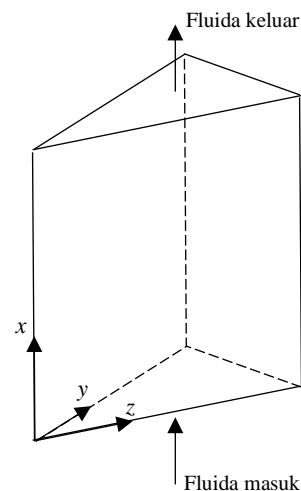
Pemodelan teras reaktor dibuat  $1/12$ -nya saja karena adanya faktor simetri dengan bentuk dan ukuran seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Selanjutnya penelitian hanya dibatasi untuk sub-buluh tengah, pinggir dan pojok seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3a tampak dari atas, sementara Gambar 3b visualisasi geometri teras reaktor model 3-dimensi.



Gambar 2 Model bahan bakar reaktor dari teras reaktor.



(a)



(b)

Gambar 3. Geometri  $1/12$  teras reaktor. (a) tampak dari atas dan (b) visualisasi geometri model 3-dimensi.

Fluida pendingin bergerak sepanjang sumbu-*x* arah vertikal, masuk dari bawah dan keluar ke atas dalam teras reaktor. Untuk memudahkan untuk menjalankan paket program *Fluent* Versi 4-25, dibuatlah *grid* dengan 14 nodal arah sumbu-*x*, 18 nodal arah sumbu-*y* dan 29 nodal arah sumbu-*z*. Sumbu-*x* adalah arah vertikal dan pembagian sel volume atur seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1. Seterusnya dalam pembahasan sel volume atur dalam sumbu-*x* diganti dengan posisi.

Tabel 1  
Sel volume atur dalam sumbu-*x*.

No.	Jarak dalam sumbu- <i>x</i> (cm)	Jumlah sel volume atur	Posisi
1	0 ~ 88	2	1 ~ 2
2	88 ~ 469	8	3 ~ 10
3	469 ~ 557	2	11 ~ 12

C. Data Masukkan

Dalam penelitian ini data masukan kecepatan, temperatur dan tekanan aliran fluida masuk dibuat tetap masing-masing dengan nilai 2 m/s, 305°K dan 1 atm. Demikian juga pembangkitan panas untuk grafit diatur sama dengan 0 watt/m<sup>2</sup>. Sedangkan untuk bagian bahan bakar, pembangkitan daya dihitung menurut perhitungan sebagai berikut:

$$W = \frac{P}{(\sum Bb)(A)} \text{ watt/m}^2 \tag{9}$$

- Dengan: *W* = pembangkitan daya
- P* = daya
- Bb* = bahan bakar
- A* = luas selubung bahan bakar

Pembangkitan daya pada bahan bakar diatur untuk dua harga daya *P* yang berbeda yaitu 250 dan 375 kwatt. Jika harga daya *P* tersebut dimasukkan kedalam persamaan 9, maka diperoleh harga pembangkitan daya *W* masing-masing sebesar 4,59×10<sup>4</sup> dan 6,89×10<sup>4</sup> watt/m<sup>2</sup>.

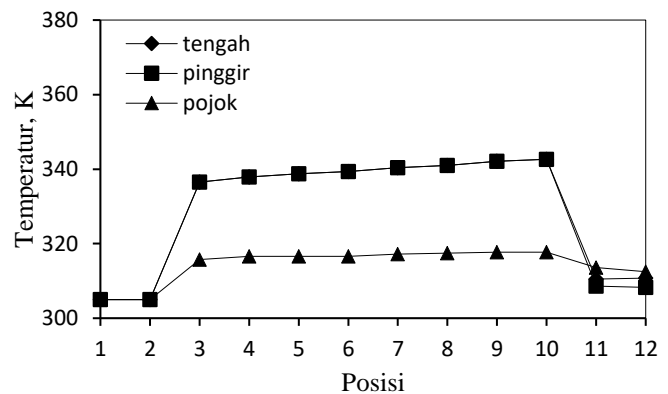
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dibuat reaktor beroperasi pada pembangkitan daya yang berbeda yaitu masing-masing sebesar 4,59×10<sup>4</sup> watt/m<sup>2</sup> untuk Kasus I dan 6,89×10<sup>4</sup> watt/m<sup>2</sup> untuk Kasus II.

A. Distribusi Temperatur Bahan Bakar

Distribusi temperatur permukaan bahan bakar sepanjang posisi dalam arah sumbu-*x* dengan pembangkitan daya 4,59×10<sup>4</sup> watt/m<sup>2</sup> ditunjukkan dalam Gambar 4. Pada awal masuknya fluida kedalam teras reaktor temperatur permukaan bahan bakar adalah konstan 305 K seperti yang ditunjukkan dalam posisi 1 dan 2 dalam Gambar 4 karena fluida melewati grafit dengan pembangkitan daya 0 watt/m<sup>2</sup>. Kemudian pada posisi 3 temperatur permukaan bahan bakar mulai naik menjadi 315,7°K pada sub-buluh pojok dan 336,9°K pada sub-buluh

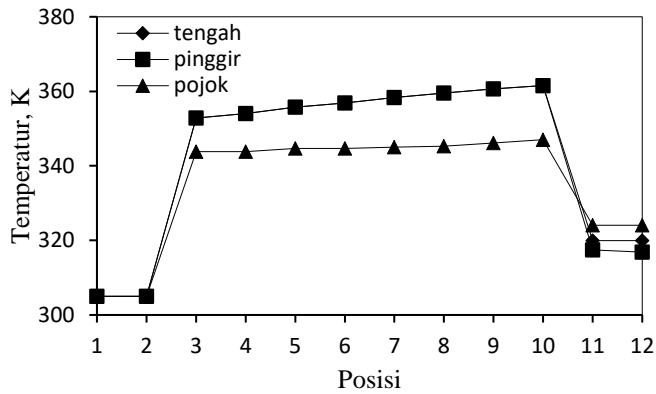
pinggir dan tengah. Temperatur permukaan bahan bakar terus meningkat dengan meningkatnya posisi sampai dengan posisi 10 menjadi 317,6°K pada sub-buluh pojok dan 342,8°K pada sub-buluh pinggir dan tengah. Meningkatnya temperatur permukaan bakar tersebut terhadap meningkatnya posisi disebabkan fluida yang melewati bahan bakar mendapat tambahan panas secara terus-menerus sehingga fluida tidak dapat menyerap panas lebih banyak dari permukaan bahan bakar. Temperatur permukaan bahan bakar pada sub-buluh pojok lebih rendah daripada sub-buluh pinggir dan tengah. Hal ini karena volume fluida yang melewati sub-buluh pojok lebih besar sehingga fluida dapat menyerap panas lebih banyak yang menyebabkan temperatur bahan bakar semakin berkurang. Terakhir temperatur permukaan bahan bakar turun kembali karena fluida melewati grafit yang pembangkitan dayanya sama dengan 0 watt/m<sup>2</sup>.



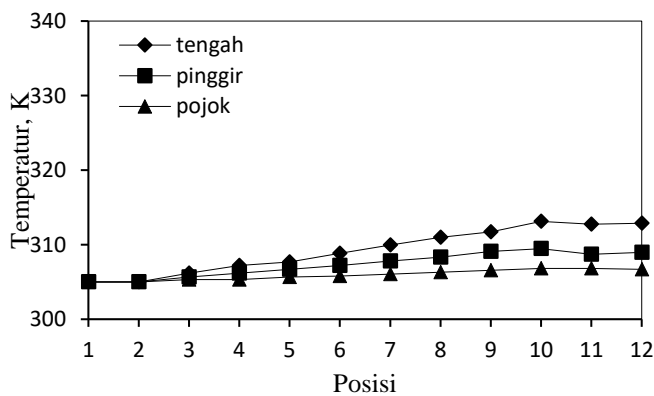
Gambar 4 Distribusi temperatur permukaan bahan bakar dengan pembangkitan daya 4,59×10<sup>4</sup> watt/m<sup>2</sup>.

Gambar 5 adalah distribusi temperatur permukaan bahan bakar dengan pembangkitan daya 6,89×10<sup>4</sup> watt/m<sup>2</sup>. Distribusi temperatur permukaan bahan bakar pada Gambar 5 memiliki kecenderungan yang sama dengan distribusi temperatur permukaan bahan bakar pada Gambar 4. Temperatur permukaan bahan bakar terus meningkat dengan meningkatnya posisi yaitu dari posisi 3 sehingga 10. Namun temperatur permukaan bahan bakar pada masing-masing sub-buluh pada Gambar 5 lebih tinggi daripada Gambar 4. Hal ini karena semakin besar pembangkitan daya maka semakin besar juga temperatur permukaan bahan bakar. Temperatur permukaan bahan bakar tertinggi yang diperoleh adalah 361,5°K pada sub-buluh tengah.

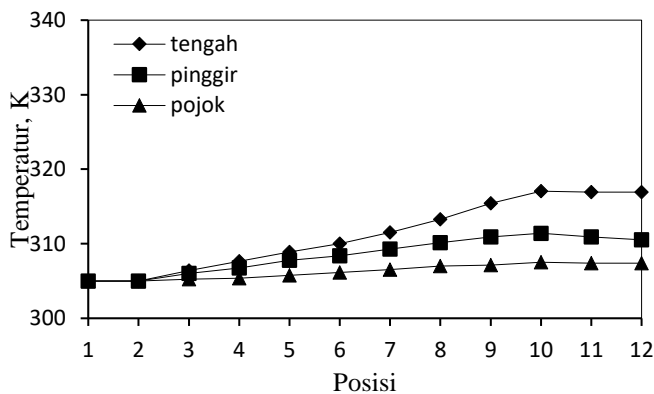
Antariksawan dkk pada 2000 telah melakukan perhitungan terhadap temperatur bahan bakar teras reaktor dan mereka memperoleh hasil 134,7° C [4]. Kemudian, Sudjatmi pada tahun 2011 melakukan kajian mengenai temperatur permukaan kelongsong bahan bakar dan didapati 138° C [7]. Sedangkan dalam kajian ini diperoleh temperatur bahan bakar tertinggi adalah 361,5°K pada sub-buluh pinggir dan tengah, sehingga boleh dikatakan temperatur permukaan bahan bakar tersebut masih dalam kategori aman untuk mengoperasikan reaktor dengan pembangkitan daya 6,89×10<sup>4</sup> watt/m<sup>2</sup>.



Gambar 5 Distribusi temperatur permukaan bahan bakar dengan pembangkitan daya  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>.



Gambar 6 Distribusi temperatur fluida dengan pembangkitan daya  $4,59 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>.



Gambar 7 Distribusi temperatur fluida dengan pembangkitan daya  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>.

### B. Distribusi Temperatur Fluida

Distribusi temperatur fluida sepanjang posisi dalam arah sumbu- $x$  dengan pembangkitan daya  $4,59 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup> ditunjukkan dalam Gambar 6. Pada awal masuknya fluida kedalam teras reaktor temperatur fluida adalah konstan 305°K seperti yang ditunjukkan dalam posisi 1 dan 2 dalam Gambar 6 karena fluida melewati grafit dengan pembangkitan daya 0 watt/m<sup>2</sup>. Kemudian pada posisi 3 temperatur fluida mulai naik masing-masing pada sub-buluh tengah, pinggir dan pojok menjadi 306,2°K, 305,7°K

dan 305,3°K. Temperatur fluida terus meningkat dengan meningkatnya posisi sampai dengan posisi 10 masing-masing pada sub-buluh tengah, pinggir dan pojok menjadi 313,1 K, 309,5 K dan 306,8 K. Meningkatnya temperatur fluida tersebut terhadap meningkatnya posisi disebabkan terakumulasinya panas bahan bakar yang diberikan ke fluida. Terakhir temperatur fluida tidak naik lagi karena fluida melewati grafit yang pembangkitan dayanya sama dengan 0 watt/m<sup>2</sup>, seperti yang ditunjukkan dalam posisi 11 dan 12 pada Gambar 6.

Gambar 7 adalah distribusi temperatur fluida dengan pembangkitan daya  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>. Distribusi temperatur fluida pada Gambar 7 memiliki kecenderungan yang sama dengan distribusi temperatur fluida pada Gambar 6. Temperatur fluida terus meningkat dengan meningkatnya posisi yaitu dari posisi 3 sehingga 10. Namun temperatur fluida pada masing-masing sub-buluh pada Gambar 7 lebih tinggi daripada Gambar 6. Hal ini karena semakin meningkat pembangkitan daya semakin meningkat juga temperatur fluida. Temperatur fluida tertinggi adalah 318°K pada sub-buluh tengah.

## V. KESIMPULAN

Hasil kajian yang telah dilakukan terhadap model teras reaktor dengan memasukkan kecepatan, temperatur dan tekanan fluida konstan masing-masing 0,2 m/s<sup>2</sup>, 305 K dan 1,5 atm serta variasi pembangkitan panas 4,59 watt/m<sup>2</sup> dan 6,89 watt/m<sup>2</sup> diperoleh kesimpulan bahwa temperatur permukaan bahan bakar pada posisi 1 dan 2 adalah tetap 305°K karena fluida melewati grafit, temperatur permukaan bahan bakar pada posisi 3 sampai dengan 10 mengalami kenaikan secara linier dan temperatur permukaan bahan bakar pada posisi 11 dan 12 turun lagi karena fluida melewati grafit. Hasil temperatur permukaan bahan bakar yang diperoleh masih dalam katagori aman untuk mengoperasikan reaktor dengan pembangkitan daya  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sudjatmi, K.A., Hastuti, E.P., Widodo, S. dan Nazar, R. Analisis Konveksi Alam Teras Reaktor Triga Berbahan Bakar Tipe Pelat Menggunakan Coolod-N2. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, Vol. 17, No. 2, 2015, pp. 67 – 78.
- [2] Mandala, G.A. Simulasi Modifikasi Reaktor Triga 2000 Bandung dengan Bahan Bakar Jenis Pelat. *Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir*, Yogyakarta, 2010, pp. 769 – 776.
- [3] Rosyid, M., Hidayat, N. dan Jumari. Simulator Reaktor Kartini Sebagai Alat Peraga Ooperasi Reaktor Penelitian Tipe Triga Mark II. *Seminar Nasional IX SDM Teknologi Nuklir*, Yogyakarta, 2013, pp. 118 – 124.
- [4] Antariksawan, A. R., Aliq, Puradwi dan Handoyo, I. Evaluasi Disain Sistem Pendingin Reaktor Triga Mark II Bandung Daya 2 MW. *Prosiding Presentasi Ilmiah*

- Teknologi Keselamatan Nuklir-V*, Serpong, 2000, pp. 237 – 246.
- [5] A. Suwono. Pendekatan Model Media Berpori Sub-buluh dalam Analisis Termodinamika Berkas Bahan Bakar Reaktor Nuklir, *PPTKR-BATAN*, Serpong, 1994.
- [6] M. A. Waskito dkk. Rencana studi Karakteristik Termohidrolik Sub-buluh dalam Berkas Bahan Bakar Reaktor pada untai Uji Nilo I. *PPTKR-BATAN*, Serpong, 1994.
- [7] Sudjatmi, K.A. Pengaruh Nilai Bakar terhadap Integritas Kelongsong Elemen Bakar Triga 2000. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, Vol. 13 No. 3, 2011, pp. 186 – 193.
- [8] Anonim. Pre-BFC User's Guide. *Version 4.2, Fluent Inc.*, Lebanon, NH USA, 1993.
- [9] Anonim. Fluent Tutorial Guide. *Version 4.2, Fluent Inc.*, Lebanon, NH USA, 1993.
- [10] Anonim. Computational Added Design, Fluent User's Guide. *Version 4.2, Fluent Inc.*, Lebanon, NH USA, 1993.
- [11] Nazar, R., Suwono, A. dan Soelaiman, T. A. F. Kaji Teoritik Aspek Termohidrolik Reaktor Riset pada Daya 2 MW. *Jurnal Teknik Mesin*, ITB, Vol. XIII-1, 1998, pp. 20 – 30.