

## Suhu Permukaan Bahan Bakar Teras Reaktor Pada Daya 375 KW

Adolf Asih Supriyanto<sup>1)</sup> dan Fatkur Rachmanu<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Prodi Teknik Mekatronika dan <sup>2)</sup>Prodi Teknik Mesin, Politeknik Enjinering Indorama

Jl. Kembangkuning, Jatiluhur, Purwakarta- Jawa Barat 41152

e-mail :adolf@pei.ac.id

e-mail : fatkur.rachman@gmail.com

### 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 yaitu tentang suhu permukaan bahan bakar dan fluida. Untuk itu telah dilakukan pemodelan susunan teras reaktor dan reflektor berbentuk heksagonal dan diasumsikan bahwa pembangkitan dayanya tetap pada 375 kwatt untuk masing-masing bahan bakar. Pengerjaan model teras reaktor dilakukan dengan paket program *Fluent* Versi 4.25 yang ada di Laboratorium Termodinamika PAU-IR ITB. Data pengamatan diperoleh dari distribusi suhu pada permukaan bahan bakar dan fluida, khususnya pada sub-buluh tengah, pinggir dan pojok. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa teras reaktor yang dimodelkan memiliki suhu bahan bakar dan fluida rendah.

*Kata kunci: teras reaktor, bahan bakar, sub-buluh*

### 1. Pendahuluan

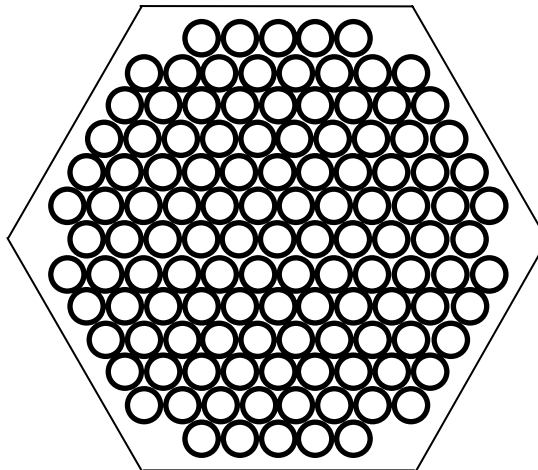
Pemerintah Indonesia memiliki beberapa reaktor nuklir yang berdasarkan fungsinya termasuk jenis reaktor penelitian. Umumnya reaktor penelitian memanfaatkan neutron hasil belah untuk berbagai keperluan seperti penelitian, irradiasi dan produksi radioisotop [1-2]. Dimasa mendatang diantara prioritas utama dari pendayagunaan reaktor adalah produksi radioisotop terutama *Fission Product Molybdenum* (FPM) [3-4].

Penggunaan reaktor nuklir selalu menimbulkan bahaya terakumulasinya zat-zat radioaktif sebagai hasil reaksi belah yang terjadi pada teras reaktor nuklir [5-6]. Oleh itu, didalam penggunaan reaktor nuklir harus dituntut dapat pengoperasian reaktor pada tingkat daya yang tepat dengan sistem pendingin yang mampu mengeluarkan panas dari teras reaktor secara maksimal. Untuk mengoperasikan reaktor nuklir perlu diterapkan persyaratan keselamatan yang sangat ketat. Berkaitan dengan persyaratan keselamatan, peranan aspek termohidrolika menjadi sangat penting karena aspek termohidrolika dapat membatasi operasi reaktor.

Kajian teoritik tentang aspek termohidrolika sangat diperlukan untuk menunjang kajian eksperimen karena informasi tentang aspek termohidrolika dari kajian eksperimen masih sangat terbatas. Data distribusi suhu sepanjang bahan bakar, suhu aliran fluida pendingin dan kecepatan aliran fluida pendingin pada setiap tempat dapat diketahui melalui kajian teoritik, sehingga data tersebut dapat memprediksi tingkat paparan radiasi pada permukaan fluida dalam tangki reaktor. Data tersebut sangat sulit diperoleh melalui kajian eksperimen.

Dalam penelitian ini dibuat susunan bahan bakar berbentuk heksagonal dengan jumlah bahan bakar sebanyak 121 batang seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Diharapkan dari penelitian ini diperoleh data-data tambahan dalam usaha untuk meningkatkan pengoperasian reaktor nuklir.

Dalam penelitian ini dilakukan kajian pada aspek termohidroliknya saja. Model teras reaktor dibuat seperduabelas ( $\frac{1}{12}$ ) dari susunan bahan bakar teras reaktor saja karena faktor simetri dan pembangkitan daya untuk setiap bahan bakar diasumsikan tetap sebesar 375 kwatt. Adapun aliran fluida pendingin yang masuk kedalam teras reaktor adalah 1,8 dan 2 m/s pada suhu 305 K dan tekanan 1 atm. Kajian dilakukan untuk menentukan distribusi suhu permukaan bahan bakar dan fluida pendingin. Distribusi suhu bahan bakar dan fluida difokuskan pada daerah sub-buluh tengah, pinggir dan pojok. Distribusi suhu baik bahan bakar maupun fluida diperoleh dengan cara mereratakan nilai suhu pada masing-masing sub-buluh. Kajian dalam penelitian ini digunakan paket program *Fluent* Versi 4-25 yang dimiliki oleh Laboratorium Termodinamika, PAU-IR, Institut Teknologi Bandung, Bandung.



Gambar 1 Penampang susunan heksagonal bahan bakar di dalam teras reaktor yang dikaji.

## 2. Teori

*Fluent* versi 4.25 adalah suatu program paket komputer yang berguna untuk memodelkan aliran fluida, transfer panas dan reaksi kimia. Dalam penelitian ini, model susunan teras reaktor, kajian untuk menentukan distribusi suhu permukaan bahan bakar dan fluida pendingin digunakan *Fluent* versi 4.25.

### 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 konversi 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:

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

dengan  $\mu$  = viskositas

Persamaan Konservasi Energi

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j J_j' h_j' J_j' + \frac{\partial p}{\partial t} + v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + S_h \quad (4)$$

dengan  $T$  = suhu

$J_j'$  = 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, suhu 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:

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

dengan  $q_w''$  = pembangkitan panas

$k$  = konduktivitas termal fluida

$T$  = suhu

$w$  = 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:

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

dengan  $q_w''$  = pembangkitan panas

$k$  = konduktivitas termal fluida

$\Delta T = T_w - T_f$

$W$  = dinding

$F$  = fluida

$\text{Pr}$  = 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)

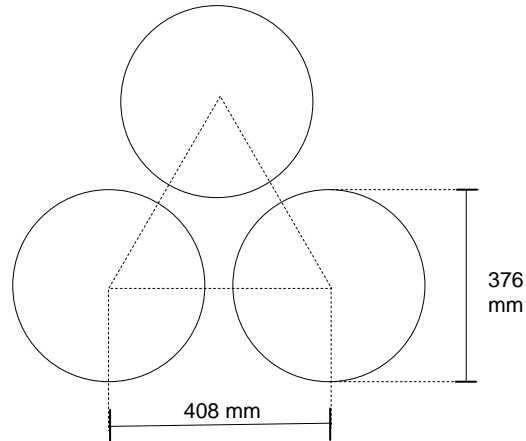
Proses penyelesaian persamaan-persamaan tersebut di atas yang dilakukan oleh paket program *Fluent* Versi 4-25 dapat merujuk kepada Nazar dkk, 1998 [11].

## 3. Metodologi

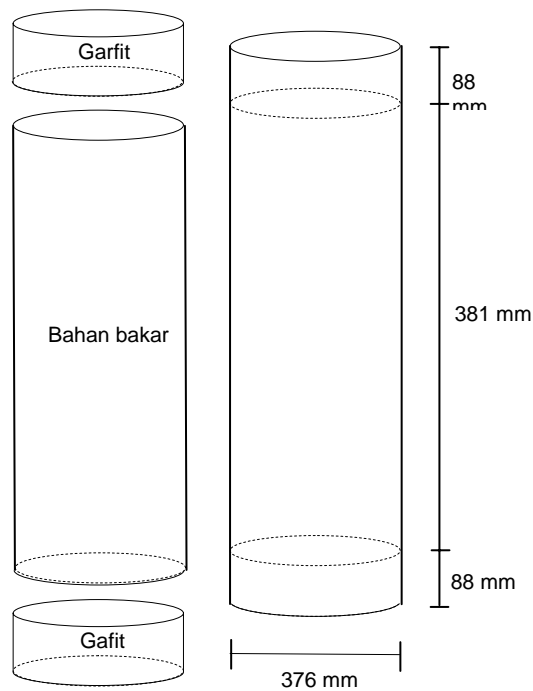
### A. Bahan Bakar Reaktor

Model susunan bahan bakar reaktor dalam penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 2 dan 3. Untuk lebih mendekatkan ukuran yang sebenarnya dari bahan bakar reaktor Triga Mark II yang berada di Bandung, semua bahan bakar reaktor berjumlah 121 batang. Ukuran diameter dan panjang bahan bakar reaktor masing-masing adalah 376 dan 381 mm. Jarak masing-masing bahan bakar dari titik pusatnya adalah 408 mm. Selongsong bahan bakar

tersebut terbuat dari *stainless steel* yang diapit pada sisi bawah dan atas oleh grafit dengan diameter yang sama, tetapi dengan panjang 88 mm.



Gambar 2 Model susunan bahan bakar reaktor dari teras reaktor.



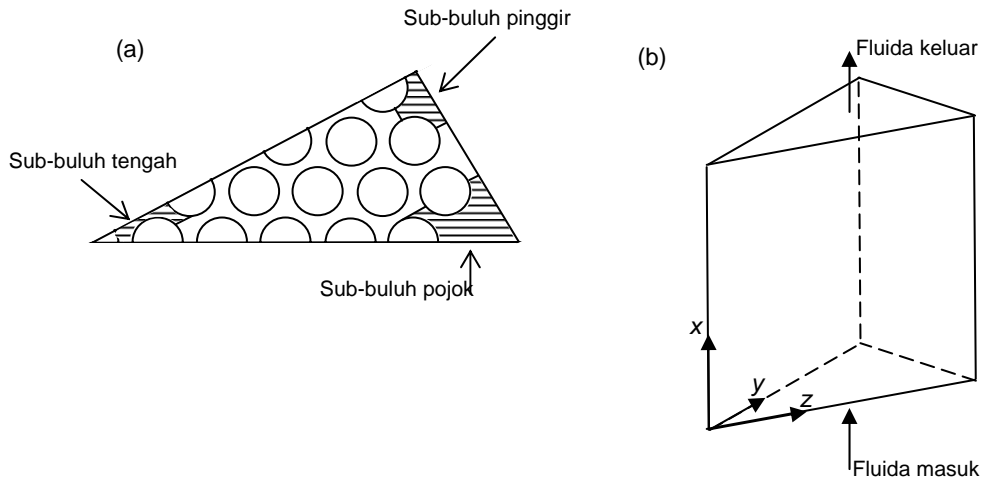
Gambar 3 Model bahan bakar reaktor dari teras reaktor.

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

Karena adanya faktor simetri maka pemodelan teras reaktor dibuat  $\frac{1}{12}$ -nya saja dengan bentuk dan ukuran seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4. Selanjutnya kajian hanya dibatasi untuk sub-buluh tengah, pinggir dan pojok seperti yang ditunjukkan dalam

Gambar 4a tampak dari atas, sedangkan Gambar 4b visualisasi geometri teras reaktor model 3-dimensi.



Gambar 4. 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 diatur seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1. Seterusnya dalam pembahasan sel volume diatur dalam sumbu- $x$  diganti dengan posisi. Visualisasi *grid* untuk I sama dengan 1, 7 dan 14 ditunjukkan dalam Gambar 5.

Tabel 1. Sel volume diatur dalam sumbu- $x$ .

No.	Jarak dalam sumbu- $x$ (mm)	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 kajian ini data kecepatan, suhu dan tekanan aliran fluida yang masuk kedalam teras reaktor dibuat tetap masing-masing dengan nilai 1,8 dan 2 m/s, 305 K serta 1,5 atm. 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:

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

Dengan:  $W$  = pembangkitan daya

$P$  = daya

$Bb$  = bahan bakar

$A$  = luas selubung bahan bakar



Pembangkitan daya pada bahan bakar diatur untuk harga daya  $P$  sebesar 375 kwatt. Jika harga daya  $P$  tersebut dimasukkan kedalam persamaan 9, maka diperoleh harga pembangkitan daya  $W 6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>.

$I = 1$

K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
18	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
17	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
16	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
15	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
14	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
13	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
12	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
11	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
10	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
9	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
8	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
7	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
6	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
5	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
4	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
3	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
2	S	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>
1	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

$I = 7$

JK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
18	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
17	S	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>1</sub>
16	S	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>1</sub>
15	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>1</sub>	
14	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>1</sub>	
13	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
12	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
11	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
10	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
9	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>1</sub>	
8	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>1</sub>	
7	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
6	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
5	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
4	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	w <sub>1</sub>	
3	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>1</sub>	
2	S	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	w <sub>2</sub>	w <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	w <sub>1</sub>	
1	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	

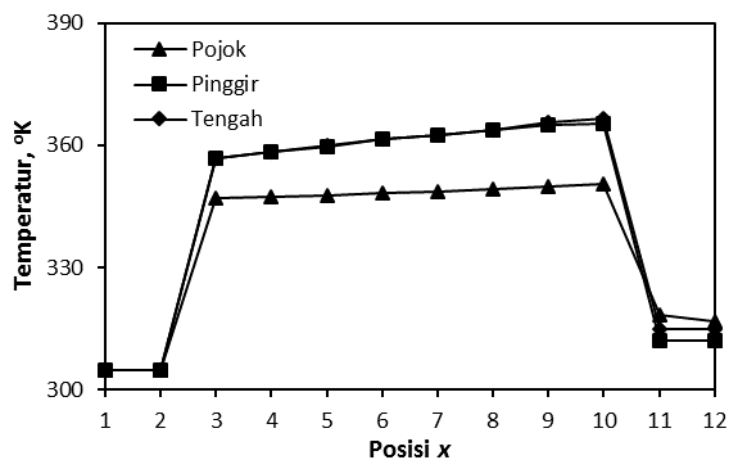
$I = 14$

JK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
18	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
17	S	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
16	S	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
15	S	w <sub>1</sub>	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	
14	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	
13	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
12	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
11	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
10	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
9	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>
8	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>
7	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
6	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
5	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
4	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>
3	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>
2	S	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	w <sub>1</sub>	w <sub>1</sub>	O	O	O	O	O	O	w <sub>1</sub>
1	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

#### A. Distribusi Suhu Bahan Bakar

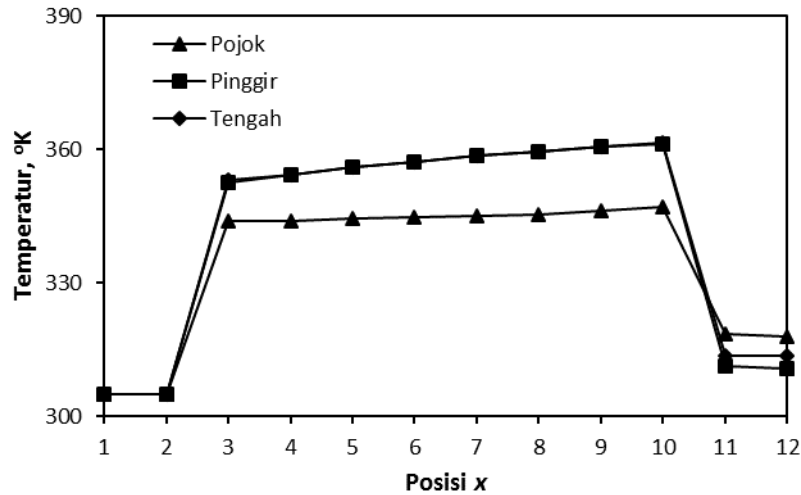
Distribusi suhu permukaan bahan bakar sepanjang posisi dalam arah sumbu- $x$  dengan kecepatan aliran fluida 1,8 m/s dan pembangkitan daya sebesar  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup> ditunjukkan dalam Gambar 6. Pada awal masuknya fluida kedalam teras reaktor suhu permukaan bahan bakar adalah konstan 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 suhu permukaan bahan bakar mulai naik menjadi 346,9 K pada sub-buluh pojok dan 356,8 K pada sub-buluh pinggir dan tengah. Suhu permukaan bahan bakar terus meningkat dengan meningkatnya posisi sampai dengan posisi 10 menjadi 350,4 K pada sub-buluh pojok, 365,2 K pada sub-buluh pinggir dan 366,4 K pada sub-tengah. Meningkatnya suhu 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. Suhu 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 suhu bahan bakar semakin berkurang. Terakhir suhu permukaan bahan bakar turun kembali karena fluida melewati grafit yang pembangkitan dayanya sama dengan 0 watt/m<sup>2</sup>.

Gambar 7 adalah distribusi suhu permukaan bahan bakar dengan kecepatan aliran fluida 2 m/s. Distribusi suhu permukaan bahan bakar pada Gambar 7 memiliki kecenderungan yang sama dengan distribusi suhu permukaan bahan bakar pada Gambar 6. Suhu permukaan bahan bakar terus meningkat dengan meningkatnya posisi yaitu dari posisi 3 sehingga 10. Pada posisi 3 suhu permukaan bahan bakar mulai naik menjadi 344,0 K pada sub-buluh pojok dan 352,4 K pada sub-buluh pinggir dan 353,0 K pada sub-tengah. Suhu permukaan bahan bakar pada masing-masing sub-buluh pada Gambar 6 lebih tinggi daripada Gambar 7. Hal ini karena semakin besar kecepatan aliran fluida yang masuk maka semakin besar juga yang diambil.



Gambar 6 Distribusi suhu permukaan bahan bakar dengan kecepatan fluida 1,8 m/s.



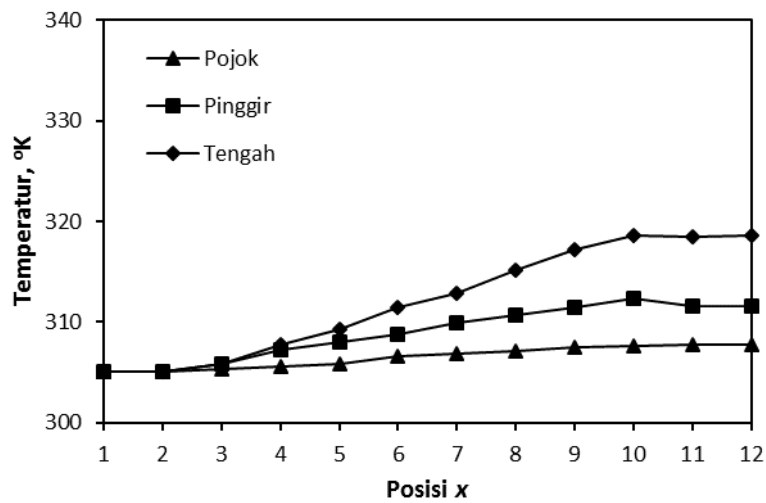


Gambar 7 Distribusi suhu permukaan bahan bakar dengan kecepatan fluida 2 m/s.

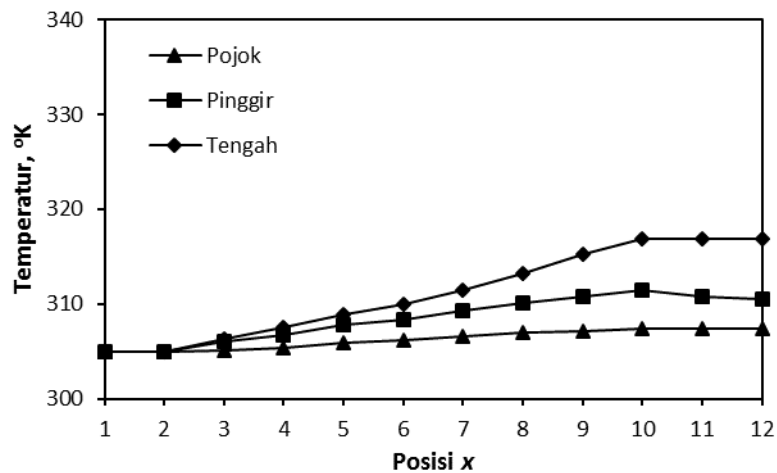
Antariksawan dkk pada 2000 telah melakukan perhitungan terhadap suhu bahan bakar teras reaktor dan mereka memperoleh hasil 134,7°C [4]. Kemudian, Sudjatmi pada tahun 2011 melakukan kajian mengenai suhu permukaan kelongsong bahan bakar dan didapati 138°C [7]. Sedangkan dalam kajian ini diperoleh suhu bahan bakar tertinggi adalah 366,4 K (~93,4°C) pada sub-tengah, sehingga boleh dikatakan suhu permukaan bahan bakar tersebut masih dalam katagori aman untuk mengoperasikan reaktor dengan pembangkitan daya  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup>.

#### B. Distribusi Suhu Fluida

Distribusi suhu fluida sepanjang posisi dalam arah sumbu-x dengan pembangkitan daya sebesar  $6,89 \times 10^4$  watt/m<sup>2</sup> dan kecepatan aliran fluida 1,8 m/s ditunjukkan dalam Gambar 8. Pada awal masuknya fluida kedalam teras reaktor suhu fluida adalah konstan 305 K seperti yang ditunjukkan dalam posisi 1 dan 2 dalam Gambar 8 karena fluida melewati grafit dengan pembangkitan daya 0 watt/m<sup>2</sup>. Kemudian pada posisi 3 suhu fluida mulai naik masing-masing pada sub-buluh pojok, pinggir dan tengah menjadi 305,4 K, 305,9 K dan 305,9 K. Suhu fluida terus meningkat dengan meningkatnya posisi sampai dengan posisi 10 masing-masing pada sub-buluh pojok, pinggir dan tengah menjadi 307,6 K, 312,4 K dan 318,6 K. Meningkatnya suhu fluida tersebut terhadap meningkatnya posisi disebabkan terakumulasinaya panas bahan bakar yang diberikan ke fluida. Terakhir suhu 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 8.



Gambar 8 Distribusi suhu fluida dengan kecepatan fluida 1,8 m/s.

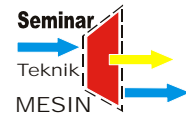


Gambar 9 Distribusi suhu fluida dengan kecepatan fluida 2 m/s.

Gambar 9 adalah distribusi suhu fluida dengan pembangkitan daya  $6,89 \times 10^4 \text{ watt/m}^2$  dan kecepatan aliran fluida 2 m/s. Distribusi suhu fluida pada Gambar 9 memiliki kecenderungan yang sama dengan distribusi suhu fluida pada Gambar 8. Suhu fluida terus meningkat dengan meningkatnya posisi yaitu dari posisi 3 sehingga 10. Namun suhu fluida pada masing-masing sub-buluh pada Gambar 8 lebih tinggi daripada Gambar 9. Hal ini karena semakin meningkat kecepatan aliran fluida semakin menurun suhu fluida. Suhu fluida tertinggi adalah 318,6 K pada sub-buluh tengah.

#### 4. Kesimpulan dan Saran

Hasil kajian yang telah dilakukan terhadap model teras reaktor dengan memasukkan kecepatan, suhu dan tekanan fluida konstan masing-masing 1,8 m/s dan 2 m/s, 305 K dan 1,5 atm serta pembangkitan panas  $6,89 \text{ watt/m}^2$  diperoleh kesimpulan bahwa suhu permukaan



bahan bakar pada posisi 1 dan 2 adalah tetap 305°K karena fluida melewati grafit, suhu permukaan bahan bakar pada posisi 3 sampai dengan 10 mengalami kenaikan secara linier dan suhu permukaan bahan bakar pada posisi 11 dan 12 turun lagi karena fluida melewati grafit. Hasil suhu 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.