

## **RESPON TEMPERATUR BAHAN BAKAR REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG PASCA LOCA**

V. I. S. Wardhani, Dudung A. Razak

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri – BATAN, Jl. Tamansari 71, Bandung  
Email: vero@batan-bdg.go.id

### **ABSTRAK.**

**RESPON TEMPERATUR BAHAN BAKAR REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG PASCA LOCA.** Perbandingan beda temperatur antara pusat bahan bakar dengan permukaan luar kelongsong terhadap beda temperatur antara permukaan luar kelongsong dengan temperatur curah fluida pendingin, ditunjukkan dengan bilangan Biot (Biot number). Untuk elemen bakar TRIGA 2000 Bandung,  $Bi$  itu jauh lebih besar daripada 0,1, sehingga elemen bakar itu tidak bisa dianggap sistem tergroupal, oleh sebab itu analisis transien temperatur pusat bahan bakar tidak menggunakan persamaan diferensial biasa. Metode resistansi-kapasitansi merupakan salah satu metoda numerik di mana elemen bakar dibagi-bagi dalam segmen yang cukup kecil, sedemikian hingga tiap segmen dapat dianggap sistem tergroupal. Tiap segmen mempunyai kapasitansi termal, dan terhubung dengan segmen lain dengan resistansi termal. Metode tersebut digunakan dalam analisis ini dan beberapa asumsi diambil untuk menyederhanakan perhitungan dan hasil yang lebih konservatif. Dengan diameter bocoran di dasar tangki reaktor 16 cm, laju alir ECCS 8 gpm yang dioperasikan 6 jam, maka temperatur maksimum pusat bahan bakar 467,83 °C pada saat 287.66 detik setelah ECCS berhenti operasi.

**Kata kunci:** temperatur pusat bahan bakar pasca LOCA

### **ABSTRACT.**

**FUEL TEMPERATURE RESPONSE OF THE BANDUNG TRIGA 2000 REACTOR FOLLOWING LOCA.** The ratio of temperature difference between fuel center to cladding external surface with temperature difference between the cladding external surface to coolant bulk temperature, is shown with Biot number ( $Bi$ ). The  $Bi$  number for the Bandung TRIGA 2000 fuel element is much more than 0,1, so that the fuel element cannot be assumed as lumped system, hence the ordinary differential equation is not used in this transient fuel center temperature analysis. Thermal resistance and capacity formulation method is one of the several numerical methods in which the fuel element is nodalized to be some small enough segment, in such a way that small segment can be assumed a lumped system. Each segment has thermal capacitance, which has interactions to the other segments by thermal resistances. That method used in this analysis with some assumptions in order to make simpler calculations and more conservative results. With break reactor tank base 16 cm in diameter, ECCS has 8 gpm in flow rate is operated during 6 hours, the maximum fuel center temperature is 467,83 °C at the time of 287.66 seconds after ECCS off.

**Key words:** fuel center temperature following LOCA

### **1. PENDAHULUAN**

ECCS (Emergency Core Cooling System = Sistem Pendingin Teras Darurat) reaktor

TRIGA 2000 Bandung, dirancang untuk mengantisipasi kenaikan temperatur bahan bakar yang dapat melebihi temperatur batas keselamatan, akibat adanya LOCA pada tangki

reaktor. Tepat setelah LOCA, sejalan dengan penurunan permukaan pendingin reaktor, proses perpindahan panas dari bahan bakar ke pendingin yang ada di dalam teras reaktor dibagi dalam tiga tahap, yaitu: *pertama* pendinginan dengan air yang masih ada di dalam tangki reaktor, *kedua* pendinginan dengan ECCS, *ketiga* pendinginan dengan udara.

Analisis tersebut telah dilakukan dengan memandang elemen bakar sebagai sistem tergumpal (*lumped system*), dengan menganggap distribusi temperatur bahan bakar merata pada nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata ini dihitung berdasarkan asumsi bahwa distribusi temperatur bahan bakar mengikuti pola parabola tertentu, sehingga respon temperatur bahan bakar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan diferensial biasa.

Elemen bakar dapat dianggap sebagai sistem tergumpal jika Bi (bilangan Biot) lebih kecil daripada 0,1. Padahal kenyataannya Bi ini jauh di atas nilai itu, perhitungannya ditunjukkan pada halaman 11. Oleh sebab itu analisis ini harus dilakukan dengan metode lain. Salah satu di antaranya metode formulasi resistansi dan kapasitansi termal yang melibatkan segmenisasi elemen bakar mulai dari pusat bahan bakar sampai fluida pendingin.

Sistem elemen bakar dan pendingin dibagi dalam segmen-segmen (*node-node*). Masing-masing *node* dipandang sebagai sistem tergumpal yang kecil dan memiliki kapasitansi terangkai dengan *node* tetangganya dengan resistansi termal. Seluruh sistem merupakan kapasitansi selama transien terjadi.

Temperatur pusat bahan bakar dihitung selama transien yang meliputi tiga kurun waktu pendinginan, mulai pendinginan dengan air yang masih ada di dalam tangki reaktor, kemudian pendinginan dengan ECCS, dan diakhiri dengan pendinginan udara. Selama pendinginan tersebut reaktor dalam keadaan tidak beroperasi (*shut down*), sehingga energi termal yang terdapat di dalam bahan bakar adalah energi termal peluruhan nuklir yang merambat dari pusat bahan bakar menuju pendingin.

Analisis perpindahan panas hanya dilakukan pada satu elemen bakar dengan daya tertinggi dan satu dimensi ke arah radial. Hal ini dilakukan untuk memperoleh perhitungan yang lebih sederhana dengan hasil yang lebih konservatif. Asumsi-asumsi yang diambil untuk memperoleh hasil perhitungan yang lebih konservatif antara lain: adanya celah (*gap*) antara bahan bakar dan kelongsong yang homogen, koefisien keluaran (*discharge coefficient*) bocoran tangki reaktor sama dengan

1 yang terletak di dasar tangki.

## 2. TEORI

Sebuah benda yang berada di dalam lingkungan fluida pendingin dapat dianggap sebagai benda berkapasitas tergumpal (*lumped capacity*) jika distribusi temperatur dari pusat sampai permukaan luar di dalam benda itu tidak terlalu curam. Hal ini ditandai dengan angka bilangan Biot ( $Bi$ )  $< 0,1$  [1, 2]. Jika distribusi temperatur tersebut cukup curam, maka untuk analisis termal, benda itu dapat dibagi menjadi segmen-segmen (*node*) yang cukup kecil, sehingga segmen itu dapat dianggap berkapasitas tergumpal.

Neraca energi di dalam sebuah segmen ditunjukkan Persamaan (1).

$$q_{di}^p + \sum_j \frac{T_j^p - T_i^p}{R_{ij}} = C_i \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta\tau} \quad (1)$$

dengan:

- $q_{di}^p$  = daya termal peluruhan yang muncul dari dalam segmen ( $i$ ) pada saat  $\tau$ ,
- $T_j^p$  = temperatur segmen  $j$  pada saat  $\tau$ ,
- $T_i^p$  = temperatur segmen  $i$  pada saat  $\tau$ ,
- $T_i^{p+1}$  = temperatur segmen  $i$  pada saat  $\tau + \Delta\tau$ ,
- $R_{ij}$  = hambatan termal antara segmen  $i$  dan segmen  $j$ ,
- $C_i$  = kapasitansi termal segmen  $i$ ,
- $\Delta\tau$  = selang waktu, ketika keseimbangan termal di dalam segmen dihitung sebagai sistem tergumpal,
- $p$  = superkrip bagi nilai variabel yang bersangkutan pada saat  $\tau$ ,
- $p + 1$  = superkrip bagi nilai variabel yang bersangkutan pada saat  $\tau + \Delta\tau$ .

Adapun daya termal peluruhan yang muncul dari dalam segmen bahan bakar nuklir adalah [3]:

$$q_{di} = 0,1P_0 [(\tau+10)^{-0,02} - 0,87(\tau+10^7)^{-0,02}] \quad (2)$$

dengan:

- $P_0$  = daya operasi reaktor sebelum *scram* atau *shutdown*,
- $\tau$  = kurun waktu setelah reaktor *scram* atau *shutdown*.

Sehingga Persamaan (1) dapat dikembangkan untuk menunjukkan secara eksplisit temperatur pusat segmen pada saat  $\tau + \Delta\tau$ , sebagai berikut:

$$T_i^{p+1} = \left( q_{di}^p + \sum_j \frac{T_j^p}{R_{ij}} \right) \frac{\Delta\tau}{C_i} + \left( 1 - \frac{\Delta\tau}{C_i} \sum_j \frac{1}{R_{ij}} \right) T_i^p \quad (3)$$

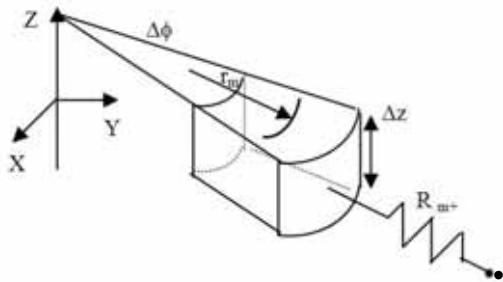
Persamaan (3) ini dapat disederhanakan menjadi:

$$T_i^{p+1} = \frac{\Delta\tau}{C_i} \left( q_{di}^p + \frac{T_i^p - T_j^p}{R_{ij}} \right) + T_i^p \quad (4)$$

Dari Persamaan (3) juga diperoleh batasan nilai  $\Delta\tau$  yang minimum, dengan:

$$\Delta\tau \leq \left( \frac{C_i}{\sum_j \frac{1}{R_{ij}}} \right)_{\text{MINIMUM}} \quad (5)$$

Hambatan dan kapasitansi termal tiap segmen dari pusat bahan bakar sampai dengan pendingin dihitung menurut sistem koordinat silinder sesuai dengan bentuk elemen bakar reaktor TRIGA 2000.



**Gambar 1. Volume dan resistansi elemen (koordinat silinder)**

Volume elemen:

$$\Delta V_i = r_i \Delta r \Delta \phi \Delta z \quad (6)$$

Resistansi termal sebelah kanan (dari pusat) elemen:

$$R_{m+} = \frac{\Delta r}{\left( r_m + \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \phi \Delta z k} \quad (7a)$$

dengan  $k$  adalah koefisien konduktivitas termal. Resistansi termal sebelah kiri (dari pusat) elemen:

$$R_{m-} = \frac{\Delta r}{\left( r_m - \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta \phi \Delta z k} \quad (7b)$$

Resistansi termal konveksi di dalam gap:

$$R_f = \frac{1}{2 \pi r_F h_G} \quad (8)$$

dengan:

- $r_F$  = jari-jari permukaan luar bahan bakar,
- $h_G$  = koefisien konveksi termal di dalam gap.

Resistansi termal konveksi dari kelongsong ke pendingin:

$$R_f = \frac{1}{2 \pi r h} \quad (9)$$

dengan:

- $h$  = koefisien konveksi termal fluida pendingin.

Sedangkan kapasitansi termal elemen:

$$C_i = \rho_i c_i \Delta V_i \quad (10)$$

dengan:

- $\rho_i$  = massa jenis bahan elemen,
- $c_i$  = kalor jenis bahan elemen.

Untuk menghitung nilai koefisien konveksi termal air pendingin yang ada di dalam tangki reaktor digunakan Persamaan (11) sampai dengan Persamaan (13).

$$Ra = \frac{(g \beta \rho^2 c)}{\mu k} L^3 \Delta T \quad (11)$$

$$Nu = 0,1(Ra)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

$$h = \frac{Nu k}{L} \quad (13)$$

dengan:

- $Ra$  = bilangan Rayleigh,

- g = percepatan gravitasi,
- $\beta$  = koefisien temperatur konduktivitas termal,
- $\mu$  = viskositas dinamik,
- L = panjang permukaan perpindahan panas,
- $\Delta T$  = beda temperatur antara kelongsong dengan curah air pendingin,
- Nu = bilangan Nusselt.

Adapun selang waktu terjadinya perpindahan panas antara elemen bakar dengan air pendingin yang masih ada di dalam tangki reaktor digunakan persamaan [4]:

$$\tau_2 - \tau_1 = \frac{2A}{(Ca[2g]^{1/2})^2} \left[ Q_{in} \ln \left( \frac{Q_{in} - Q_1}{Q_{in} - Q_2} \right) + Q_2 - Q_1 \right] \quad (14)$$

$$Q = Ca(2gh)^{1/2} \quad (15)$$

dengan:

- $\tau_1$  = waktu ketika permukaan air pada ketinggian  $h_1$ ,
- $\tau_2$  = waktu ketika permukaan air pada ketinggian  $h_2$ ,
- A = luas penampang dalam tangki reaktor,
- C = koefisien keluaran (*discharge coefficient*) dari bocoran,
- $Q_{in}$  = laju alir masuk ke dalam tangki,
- $Q_1$  = laju alir ke luar tangki ketika ketinggian  $h_1$ ,
- $Q_2$  = laju alir ke luar tangki ketika ketinggian  $h_2$ ,
- h = ketinggian permukaan air pada tangki dari dasar tangki.

Untuk menghitung nilai koefisien konveksi termal air dari ECCS digunakan korelasi (15) dan Persamaan (16) [5].

$$Fc = 4,52 \times 10^4 \times (1 + 0,036 \Delta T_c Gp) \times \dots \frac{0,0705}{p} \dots (1 + 1,216 \log P)^{0,5} Gp \quad (16)$$

dengan:

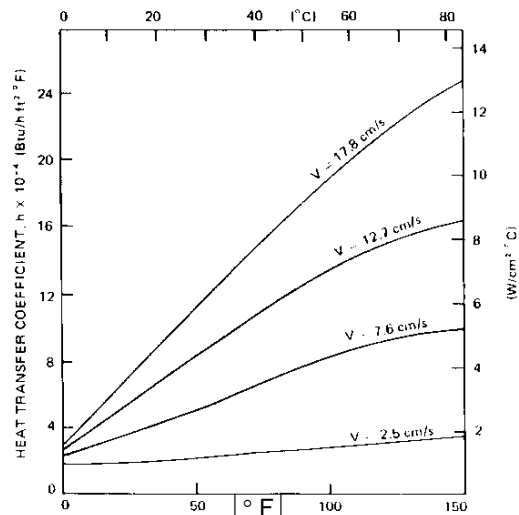
- Fc = fluks panas pada permukaan kelongsong,
- $\Delta T_c$  = temperatur subdingin pada daerah *quenching* dengan satuan derajat celsius (0-90°C),
- Gp = laju alir pendingin per satuan panjang keliling yang terbasahi,
- p = tekanan (dengan satuan bar).

$$Fc = 4,24 \times 10^4 A V^{0,15} (1 + V \Delta T^2 c)^a \quad (17)$$

dengan:

- A = luas permukaan perpindahan kalor ( $cm^2$ ),
- V = kecepatan aliran (cm/s),
- A = 1 dan a = 0,13 jika  $(1 + V \Delta T^2 c) \leq 40$ ,
- A = 0,4839 dan a = 0,346 jika  $(1 + V \Delta T^2 c) \geq 40$ .

Nilai koefisien konveksi dapat diambil dari Gambar 2.



Gambar 2. Variasi koefisien konveksi pada tekanan atmosfer

Untuk menghitung koefisien konveksi termal udara digunakan Persamaan (16).

$$h = 1,42 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

dengan:

- $\Delta T$  = beda temperatur antara permukaan kelongsong dengan udara,
- L = panjang vertikal luasan perpindahan panas.

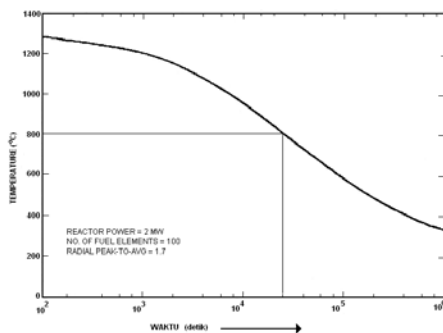
### 3. BAHAN DAN TATA KERJA

Diasumsikan bahwa LOCA terjadi karena sebuah bocoran pada dinding tangki reaktor

tepat di atas dasarnya, dengan diameter bocoran 16 cm sama dengan diameter *beam tube*.

Dengan Persamaan (13) dan (14), dapat dihitung selang waktu air pendingin sisa yang masih ada di dalam tangki reaktor, hasilnya 104 detik.

Setelah detik ke-104, pendinginan teras dilakukan dengan ECCS selama 6 jam (21600 detik), jika temperatur maksimum disain bahan bakar 800°C seperti ditunjukkan Gambar 3, untuk reaktor nuklir riset dengan perbandingan daya puncak terhadap daya rata-rata (*peak to average power ratio*) sama dengan 1,7 [7].



**Gambar 3.** Temperatur maksimum bahan bakar setelah ECCS berhenti operasi versus selang waktu ECCS beroperasi

Setelah ECCS berhenti beroperasi, kemudian teras reaktor didinginkan dengan udara selama 72 jam (259200 detik), sehingga pembagian waktu ketiga mode pendinginan teras ditunjukkan pada Tabel 1.

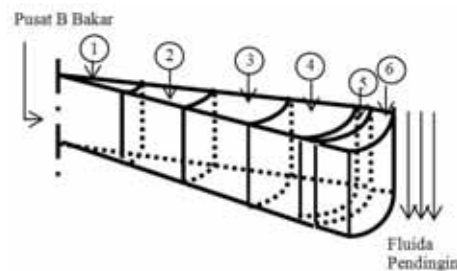
**Tabel 1.** Pembagian waktu pendinginan teras reaktor pasca LOCA

Modus Perpindahan Panas		Selang Waktu (detik) Sejak Mulai Terjadi LOCA
1.	Teras reaktor terendam air	$0 < \tau < 104$
2.	Teras didinginkan oleh ECCS	$104 < \tau < 21704$
3.	Teras didinginkan oleh udara	$21704 < \tau < 280904$

Node 1 sampai dengan 4 adalah bahan bakar, node 5 adalah celah (*gap*), node 6 adalah kelongsong, sedangkan di luar kelongsong adalah fluida pendingin:

- air yang masih ada di tangki reaktor
- air dari ECCS,
- udara

Penyesuaian arah perpindahan panas satu dimensi ke arah radial dari pusat bahan bakar dengan posisi satu elemen bakar tersebut terhadap posisi elemen bakar terdekat ditunjukkan Gambar 5. Bagian elemen bakar yang menghadap pusat kanal pendingin untuk satu sel segitiga sama dengan  $1/6$ , sedangkan untuk satu sel segienam  $1/3 = 2/6$ .



**Gambar 4.** Nodalisasi elemen bakar untuk perpindahan panas

**Tabel 2.** Parameter-parameter perpindahan kalor dari elemen bakar sampai pendingin di dalam teras reaktor

No.	Simbol	Nilai
1.	$k_b$ (konduktifitas termal bahan bakar)	22,499 W/m.°C
2.	$\rho_b$ (massa jenis bahan bakar)	1249,054 kg/m <sup>3</sup>
3.	$c_{pb}$ (panas jenis bahan bakar)	248,09 J/kg °C
4.	$h_G$ (konveksi termal gap) <sup>[6]</sup>	5000 W/m <sup>2</sup> °C
5.	$h_a$ (konveksi termal air)	759,24 W/m <sup>2</sup> °C
6.	$h_{ECCS}$ (konveksi termal air ECCS), 8 gpm	454287,337 W/m <sup>2</sup> °C
7.	$h_{udara}$ (konveksi termal udara)	75 W/m <sup>2</sup> °C
8.	$k_c$ (konduktivitas termal kelongsong)	16 W/m °C
9.	$\rho_c$ (massa jenis kelongsong)	8027,338 kg/m <sup>3</sup>
10.	$c_{pc}$ (kalor jenis kelongsong)	503,355 J/kg °C

Dengan menggunakan Persamaan (7) sampai dengan Persamaan (12) dilakukan perhitungan resistansi dan kapasitansi termal tiap segmen pada elemen bakar, hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3.

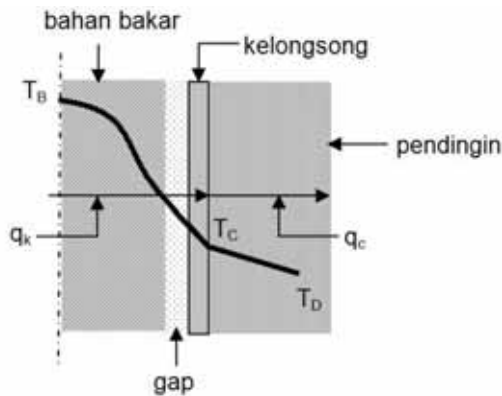
Tabel 3. Resistansi dan kapasitansi termal tiap segmen pada elemen bakar

Node	$R_{ij}$ (°C/Watt)	$\sum \frac{1}{R_{ij}}$	$C_i$	$\frac{C_i}{\sum 1/R_{ij}}$ , sekon
1.	0,037	105,263	7,680	0,073
2.	0,028	163,743	11,518	0,070
3.	0,015	277,778	38,38	0,138
4.	0,011	366,667	53,732	0,146
5.	0,004	250,102	0,0783	313,075
6.+ Air sisa	0,030	2799,163	812,250	0,290
6. + ECCS	0,001	23085,753	812,250	0,035
6. + Udara	2,982	2765,015	812,250	0,294



Gambar 5. Sel dasar TRIGA 2000

Angka Biot untuk Elemen Bakar TRIGA 2000 Bandung



Gambar 6. Distribusi temperatur di dalam elemen bakar dan pendingin

$$q_k = q_c$$

$$kA \frac{(T_B - T_C)}{d} = hA(T_C - T_D)$$

$$\frac{(T_B - T_C)}{(T_C - T_D)} = \frac{hd}{k} = Bi$$

Dari Tabel 2 dapat dihitung bilangan Biot sebagai berikut:

$$Bi = \frac{759,24(0,38)}{0,107} = 2696$$

Langkah-langkah perhitungan:

1. Untuk selang waktu dari  $0 < \tau < 104$  detik, pendinginan teras reaktor oleh air yang masih ada di dalam tangki reaktor  $\Delta\tau = 0,07$  detik,  $\tau = (p) 0,07$ , mulai dari  $p = \{0, 1, 2...1486\}$ :

- 1.1. Menghitung daya peluruhan dari segmen bahan bakar untuk sel dasar segitiga pada saat  $\tau$  setelah *scram*, supercrib  $p$  merupakan iterasi waktu:

$$q_d^p = 680 [(\tau + 10)^{-0,2} - 0,87 (\tau + 2 \times 10^7)^{-0,2}]$$

Untuk sel dasar segienam:

$$q_d^p = 1360 [(\tau + 10)^{-0,2} - 0,87 (\tau + 2 \times 10^7)^{-0,2}]$$

- 1.2. Menghitung daya kalor yang mengalir dari pusat bahan bakar sampai pendingin (air yang masih ada di dalam tangki reaktor),

$$q^p = \frac{T_m^p - T_\infty^p}{R_{TOTALI}} = \frac{T_m^p - 32,2}{0,125}$$

$(T_m)^p$  = temperatur pusat bahan bakar

$$q^p = \frac{T_m^p - T_1^p}{R_I} = \frac{T_m^p - T_1^p}{0,037}$$

$(T_1)$  = temperatur node 1

- 1.3. Menghitung temperatur pusat bahan bakar pada saat  $\tau + \Delta\tau$  :

$$T_m^{p+1} = \frac{\Delta\tau}{C_1} (q_d^p + \frac{T_1^p - T_m^p}{R_1}) + T_m^p$$

$$T_m^{p+1} = \frac{0,07}{7,680} (q_d^p - q^p) + T_m^p$$

$$T_m^{p+1} = 0,0091(q_d^p) - 0,0091(q^p) + T_m^p$$

- 1.4. Kembali ke langkah 1.1 sampai dengan 1.3 dengan iterasi berikutnya sampai  $\tau = 104$  detik.  
1.5. Tampilkan data  $\tau$ ,  $q_d^p$ ,  $q^p$ ,  $T_m^p$  untuk  $\tau = N \times 10,4$  detik, dengan  $N = \{0, 1, 2, \dots, 10\}$

- 2. Untuk selang waktu dari  $104 < \tau < 21704$  detik, pendinginan teras reaktor oleh air dari ECCS  $\Delta\tau = 0,03$  detik, maka langkah perhitungannya:**

- 2.1. Sama seperti 1.1.  
2.2. Menghitung daya kalor yang mengalir dari pusat segmen bahan bakar sampai air pendingin ECCS:

$$q^p = \frac{T_m^p - T_\infty^p}{R_{TOTALII}} = \frac{T_m^p - 100}{0,096}$$

$(T_m)^p$  = temperatur pusat bahan bakar

- 2.3. Sama seperti 1.3

$$T_m^{p+1} = 0,004 (q_d^p) - 0,004(q^p) + T_m^p$$

- 2.4. Kembali ke langkah 2.1 sampai dengan 2.3 dengan iterasi berikutnya sampai  $\tau = 21704$  detik.  
2.5. Tampilkan data  $\tau$ ,  $q_d^p$ ,  $q^p$ ,  $T_m^p$  untuk  $\tau = N \times 2170$  detik, dengan  $N = \{0, 1, 2, \dots, 10\}$

- 3. Untuk selang waktu dari  $21704 < \tau < 280904$  detik, pendinginan teras reaktor oleh udara  $\Delta\tau = 0,07$  detik, maka langkah perhitungannya :**

- 3.1. Sama dengan 1.1  
3.2. Menghitung daya kalor yang mengalir dari pusat segmen bahan bakar sampai air pendingin udara:

$$q^p = \frac{T_m^p - T_\infty^p}{R_{TOTAL III}} = \frac{T_m^p - 27}{3,077}$$

$(T_m)^p$  = temperatur pusat bahan bakar

- 3.3. Sama seperti 1.3

$$T_m^{p+1} = 0,0091(q_d^p) - 0,0091(q^p) + T_m^p$$

- 3.4. Kembali ke langkah 3.1 sampai dengan 3.3. dengan iterasi berikutnya sampai  $\tau = 280904$  detik.

- 3.5. Tampilkan data  $\tau$ ,  $q_d^p$ ,  $q^p$ ,  $T_m^p$  untuk  $\tau = N \times 228090$  detik, dengan  $N = \{0, 1, 2, \dots, 10\}$

Ketiga modus perpindahan panas peluruhan dari pusat bahan bakar sampai fluida pendingin dapat digambarkan dengan diagram alir berikut.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Di dalam analisis ini dilakukan langkah-langkah konservatif sebagai berikut.

Kebocoran tangki reaktor diasumsikan terjadi tepat di dasar dinding tangki, padahal kemungkinan besar terjadinya kebocoran itu pada *beam-port* dengan posisi vertikal di tengah-tengah teras reaktor, sehingga bila LOCA terjadi, level terendah fluida pendingin yang masih ada di dalam tangki reaktor sama dengan jejari *beam-port* di bawah pusat teras reaktor, sehingga dari level itu sampai dasar tangki reaktor teras reaktor masih terendam air pendingin. Akibatnya temperatur bahan bakar dapat dipertahankan jauh di bawah  $750^\circ\text{C}$  [7] (LAK revisi 3, BAB 13).

Koefisien keluaran (*discharge coefficient*) bocoran tangki reaktor diasumsikan sama dengan 1, sehingga waktu pendinginan teras reaktor dengan air berlangsung lebih cepat (104 detik) dibandingkan jika koefisien keluaran lebih kecil daripada 1 sesuai dengan kenyataannya, sehingga perpindahan energi termal dari bahan bakar ke air pendingin menurunkan temperatur bahan bakar lebih kecil, akhirnya temperatur bahan bakar lebih tinggi jika dihitung dengan nilai koefisien keluaran lebih kecil daripada 1.

Daya termal elemen bakar yang dianalisis tertinggi, yaitu  $1,7 \times 2 \text{ MW} / 100 = 34 \text{ kWatt}$ . Jika reaktor dioperasikan dengan daya batas atas 120 % dari 2 MW, maka daya termal elemen bakar tertinggi sama dengan 40,8 kWatt.

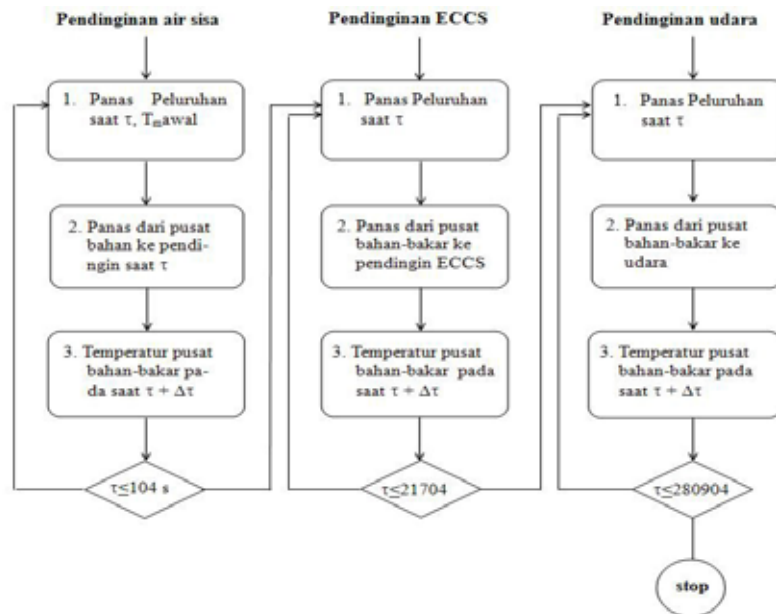
1/6 atau 2/6 dari daya ini diasumsikan berpindah seluruhnya ke arah radial di mana terdapat pendingin, walaupun kenyataannya sebagian daya itu berpindah juga ke arah aksial.

Diasumsikan bahwa di dalam elemen bakar terdapat celah (*gap*) antara permukaan luar bahan bakar dan permukaan dalam kelongsong yang tak bersentuhan, padahal kenyataannya kedua permukaan tersebut bersentuhan di beberapa tempat karena keduanya tidak merata, sehingga hambatan termal pada perhitungan lebih besar dan pada saat LOCA terjadi,

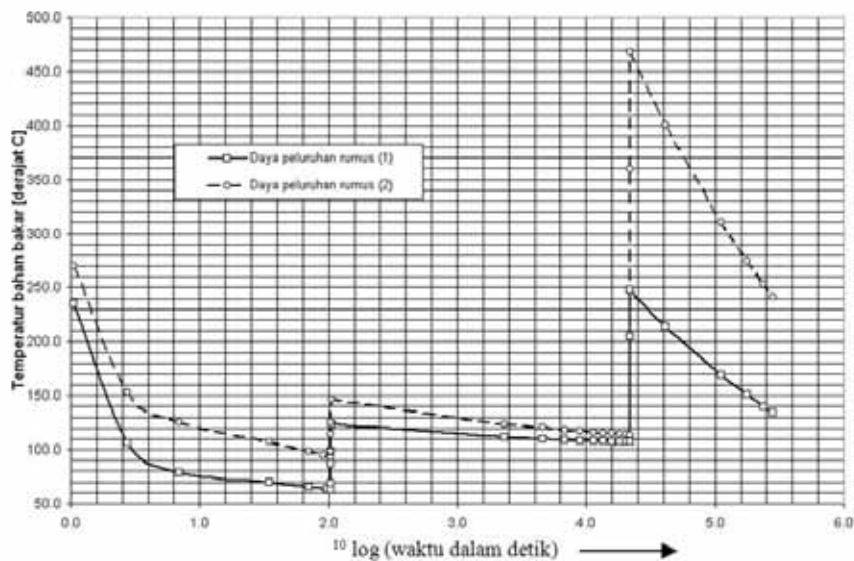
temperatur pusat bahan bakar akan lebih tinggi daripada apabila kondisi celah yang sesungguhnya diperhitungkan.

Dari hasil perhitungan diperoleh temperatur maksimum pusat bahan bakar terjadi pada detik ke 21887,66 setelah LOCA, untuk sel dasar segitiga adalah 247,43°C, dan untuk sel dasar segienam 467,83°C.

Respon temperatur pusat bahan bakar TRIGA 2000 Bandung ditunjukkan Gambar 8 dan Tabel 4.



Gambar 7. Diagram alir perhitungan temperatur pusat bahan bakar pasca LOCA



Gambar 8. Temperatur pusat bahan bakar pasca LOCA TRIGA 2000 Bandung



Tabel 4. Temperatur pusat bahan bakar hasil perhitungan

Selang waktu setelah LOCA (detik)	Temperatur Pusat Bahan Bakar (° C)	
	Sel dasar segi 3	Sel dasar segi 6
.00	558.0000000	558.0000000
.07	523.4395433	527.1573282
.98	247.6744856	280.6550155
1.05	235.6334015	269.8584078
2.73	106.4337039	153.0880573
6.93	78.7642997	125.0328046
35.00	69.5098772	106.8197537
70.00	65.1069033	98.0138058
97.93	63.0236878	94.7574407
104.02	62.6559665	93.1119322
104.05	68.4089766	98.1910773
104.17	86.4593932	114.1259194
104.29	98.5770528	124.8213920
106.54	123.2362272	146.4938894
106.57	123.2362648	146.4939033
106.60	123.2361759	146.4936692
2311.18	111.8881324	123.7762648
4559.58	110.1324926	120.2649852
6793.46	109.2065829	118.4131657
9041.04	108.5865097	117.1730194
11311.55	108.1244746	116.2489491
13582.06	107.7622331	115.5244662
15852.57	107.4662484	114.9324967
18066.97	107.2229127	114.4458255
20264.24	107.0144923	114.0289846
21703.98	106.8921129	113.7842258
21704.01	106.8921105	113.7842210
21732.06	204.6212223	359.8505732
21887.59	247.4278600	467.8274059
21887.66	247.4278605	467.8274067
21887.73	247.4278604	467.8274063
41100.13	213.9126390	400.8252779
111412.60	168.7487516	310.4975033
176097.00	150.8713859	274.7427718
238597.00	139.8968837	252.7937674
280904.00	134.2750364	241.5500728

Terdapat perbedaan temperatur pusat bahan bakar setiap saat di antara kedua analisis untuk sel dasar segi 3 (untuk ring C ke pinggir) dan sel dasar segi 6 (untuk ring A dan ring B), ini disebabkan perbedaan bagian volume bahan bakar sebagai sumber panas yang terekspos ke arah pendingin.

## 5. KESIMPULAN

Analisis respon temperatur bahan bakar TRIGA 2000 Bandung pasca LOCA ini dilakukan mengikuti ketentuan teoritis bahwa perpindahan panas dari pusat bahan bakar sampai dengan fluida pendingin dengan distribusi temperatur yang cukup curam sehingga bilangan Bi melebihi 0,1, maka dalam kondisi transien temperatur bahan bakar dianalisis dengan metoda numerik di mana elemen bakar dibagi dalam beberapa segmen. Tiap segmen mempunyai kapasitansi termal dihubungkan dengan segmen yang lain dengan hambatan (resistansi) termal, sehingga metode ini juga disebut resistansi-kapasitansi.

Elemen bakar dibagi menjadi 5 segmen, cukup sederhana dalam perhitungan dan secara teknis cukup teliti di dalam hasil perhitungannya. Asumsi-asumsi dilakukan selain untuk menyederhanakan perhitungan, juga ditujukan untuk memperoleh hasil yang konservatif, sehingga dengan pendinginan

ECCS selama 6 jam, temperatur maksimum pusat bahan bakar di ring B setinggi 467,83°C, berarti jauh di bawah 750°C sebagai temperatur rancangan batas keselamatan.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

1. **HOLMAN, J.P.**, "Heat Transfer: Thermal Resistance and Capacity Formulation", 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Kogakusha Ltd. (1976) 129-131.
2. **INCROPERA, F.P. and DEWITT, D.P.**, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, Inc. (1990) 229-231.
3. **HAROLD, E.**, "Nuclear Engineering Handbook", First Edition, McGraw-Hill Co. (1958).
4. **BAUMEISER, T. and AVALLOE, E.A.**, "Marks Standard Handbook for Mechanical Engineers: Flow of Liquids From Tank Openings", 8<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Book Company (1978) 3-69.
5. **DELHAYE, J.M. et al.**, "Thermohydrolics of Two-Phase Systems for Industrial Design And Nuclear Engineering: Parametric Dependence and Empirical Rewetting Correlation", McGraw-Hill Book Company (1981) 340-41.
6. **DUDERSTADT, J.J. and HAMILTON, L.J.**, "Nuclear Reactor Analysis: Heat Transfer in Cylindrical Fuel Elements",

- John Wiley & Sons Inc. (1976) 476-81.
7. Laporan Analisis Keselamatan Reaktor TRIGA 2000, Tabel 17-1 Bab 17 Revisi 3 (2006) 14.