

# ANALISIS SIFAT TERMAL TERHADAP UNJUK KERJA PIN BAHAN BAKAR NUKLIR TIPE PWR PADA KONDISI TUNAK

Edy Sulistyono<sup>1</sup>, Ety Marti Wigayati<sup>2</sup>

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15310

2. Pusat Penelitian Fisika - LIPI

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan

e-mail: edysulis@batan.go.id

(Naskah diterima: 16 April 2013, disetujui: 20 Mei 2013)

## ABSTRAK

**ANALISIS SIFAT THERMAL TERHADAP UNJUK KERJA PIN BAHAN BAKAR NUKLIR TIPE PWR PADA KONDISI TUNAK.** Telah dilakukan pembuatan sampel uji pin bahan bakar tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR) di Instalasi Elemen Bakar Ekperimen (IEBE). Untuk mengetahui unjuk kerja dari pin tersebut perlu dilakukan analisis dengan melakukan pengujian di *Power Ramp Test Facility* (PRTF). Analisis dilakukan dengan pemodelan program kode komputer menggunakan program FEMAXI-V. Dari pemodelan ini dapat diketahui unjuk kerja bahan bakar, antara lain adalah proses termal maupun proses mekanik pada kondisi tunak (*steady-state*). Keluaran (*output*) dari program tersebut diperoleh data entalpi, distribusi *burn-up*, distribusi temperatur ke arah aksial maupun radial pada pin bahan bakar secara kualitatif. Hasil pemodelan dengan program FEMAXI-V diketahui bahwa semakin lama elemen bakar diiradiasi nilai entalpi dan *burn-up* menunjukkan adanya peningkatan. Pola distribusi *burn-up* dan pola distribusi temperatur pada pin ke arah aksial nilai tertinggi di posisi node ke 5, sehingga untuk memprediksi unjuk kerja bahan bakar pin terhadap proses termal maupun mekanik dipilih pada posisi node ke 5. Hasil analisis proses iradiasi kondisi tunak dengan power 107 W/cm, waktu iradiasi hingga 38112,0 jam mengalami penurunan gap radial, tetapi belum terjadi kontak antara pelet dan kelongsong dan tidak terjadi tekanan kearah aksial maupun radial.

**Kata kunci:** elemen bakar nuklir, pin, kelongsong, pelet.

## ABSTRACT

**THERMAL PROPERTIES ANALYSIS ON THE PERFORMANCE OF PWR TYPE FUEL PIN AT A STEADY-STATE CONDITION.** A PWR fuel pin has been manufactured at the Experimental Fuel Element Installation of BATAN for performance test in Ramp Power Test Facility of the RSG-GAS Multipurpose Reactor. A pre-irradiation modeling was conducted using FEMAXI-V. The outputs of the steady-state modeling calculation include enthalpy data, burn-up distribution, and qualitative radial and axial temperature distribution. The modeling results show that longer irradiation time increases the value of enthalpy and burnup axially. The burn-up and temperature distribution pattern has the highest value at node 5, and this value is hence chosen for the prediction of fuel pin performance during thermal and mechanical processes. Analysis of steady state irradiation

---

*with a power of 107 W/cm and irradiation time up to 38112.0 hours shows radial gap decrease but not causing contact of the pellet and the cladding, and there is no indication of occurrence of pressure to axial and radial directions between the pellet and the cladding.*

**Keywords:** nuclear fuel elements, pin, cladding, pellets

## PENDAHULUAN

Dalam rangka pengembangan teknologi bahan bakar nuklir dan perluasan sarana litbang iptek nuklir, di Serpong telah dibangun berbagai fasilitas instalasi nuklir antara lain Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) dan Reaktor Serba Guna GA Siwabessy (RSG-GAS). IEBE merupakan instalasi yang berfungsi untuk pengembangan pembuatan elemen bakar reaktor daya dan reaktor riset, sedangkan RSG-GAS menjadi pusat kegiatan ketenaganukliran BATAN di Serpong. Kegiatan yang dilakukan di RSG-GAS antara lain produksi radioisotop, pengujian material dan bahan bakar uji termasuk pin tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR). Salah satu fasilitas iradiasi yang tersedia di RSG-GAS adalah fasilitas pengujian *Power Ramp Test Facility* (PRTF)<sup>[1]</sup> yang dapat digunakan untuk pengujian unjuk kerja bahan bakar untuk mendapatkan standar kualitas yang baik serta aman digunakan pada saat iradiasi di reaktor perlu dilakukan beberapa analisis. Salah satu analisis yang dapat dilakukan dengan cara menggunakan perhitungan program komputer.

Untuk meramalkan atau memprediksi fenomena fisika, mekanik, kimia pada elemen bakar diperlukan suatu model<sup>[1]</sup>. Pemodelan elemen bakar dibutuhkan bentuk struktur yang dapat

memberikan pandangan secara detail dan memungkinkan dapat difabrikasi guna proses uji iradiasi. Untuk pemecahan permasalahan yang sangat kompleks, maka muncul teori peramalan dengan menggunakan kode komputer yang sering disebut *fuel rod performance codes*.

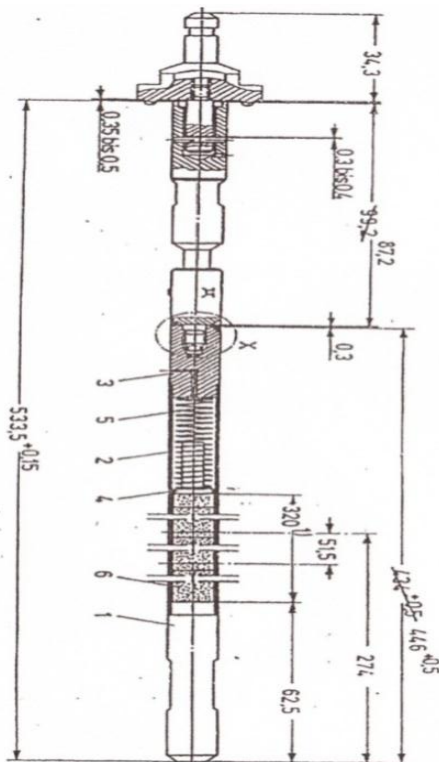
Kode komputer biasanya diklasifikasikan menjadi dua yaitu unjuk kerja secara keseluruhan dan secara lokal dari bahan bakar. Sebagai contoh kode komputer MIPAC, FEAST, FEMAXI<sup>[4]</sup> mampu mengevaluasi per bagian dari bahan bakar maupun interaksi antara bahan bakar dan kelongsong. Salah satu kode komputer yang telah dimiliki PTBN diharapkan dapat digunakan untuk menganalisis bahan bakar jenis PWR secara detail adalah program FEMAXI-V<sup>[2]</sup>

Analisis tersebut dapat memberikan informasi dan memprediksi secara rinci dampak proses termal dan mekanik terhadap bahan bakar uji sebelum dikenai uji iradiasi dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

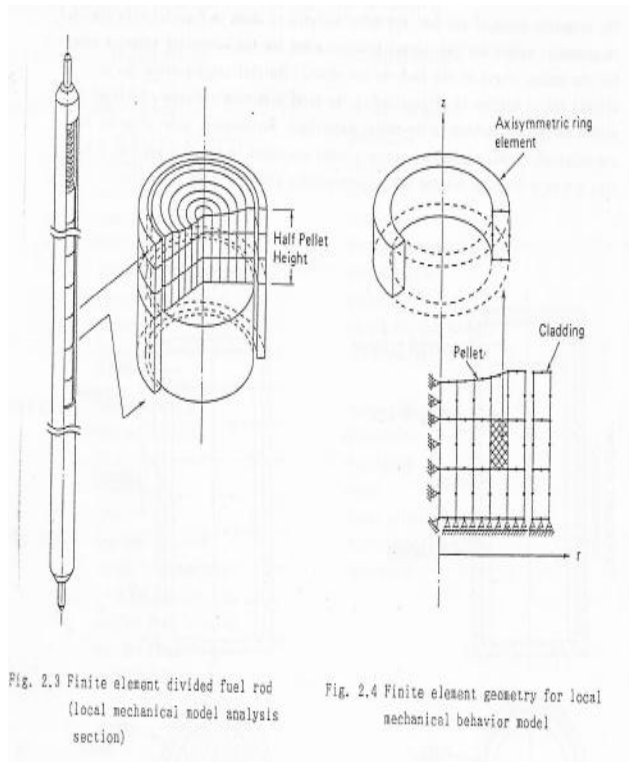
Program FEMAXI-V adalah suatu program untuk memprediksi unjuk kerja termal dan mekanik pin bahan bakar selama kondisi tunak dan transien, sehingga dapat menganalisis unjuk kerja sepanjang pin dan secara lokal dari sebagian kecil pin bahan bakar seperti terlihat dalam model geometri<sup>[3]</sup> pada Gambar 1 dan 2.

Tabel 1. Proses termal dan proses mekanikal dalam program FEMAXI.

Material	Proses termal	Proses mekanikal
Pelet	<i>Heat conduction</i>	<i>Thermal expansion</i>
	<i>Densification</i>	<i>Elasticity</i>
	<i>Swelling</i>	<i>Plasticity</i>
	<i>Fission gas release</i>	<i>Creep</i>
	<i>Creep</i>	<i>Cracking</i>
	<i>Cracking</i>	<i>Swelling</i>
	<i>Initial relocation</i>	<i>Hot pressing</i>
Kelongsong	<i>Elasticity</i>	<i>Thermal expansion</i>
	<i>Plasticity</i>	<i>Elasticity</i>
	<i>Creep</i>	<i>Plasticity</i>
	<i>Heat conduction</i>	<i>Creep</i>
	<i>Thermal expansion</i>	<i>Cracking</i>
Elemen Bakar	<i>Gap heat transfer</i>	<i>Mechanical Interaction</i>
	<i>Gas pressure</i>	
	<i>Surface heat transfer</i>	



Gambar 1. Pin Bahan Bakar Uji tipe PWR.

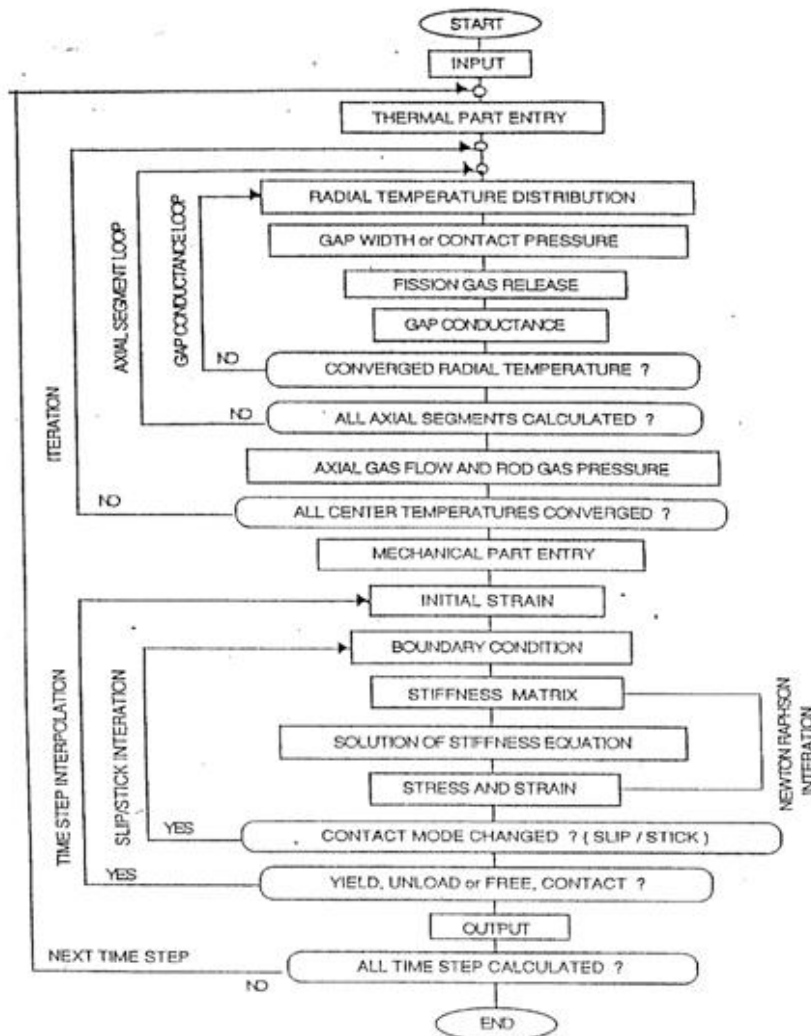


Gambar 2. Model Geometri Elemen Terbatas (*Finite Element*).

**TATA KERJA**

Metoda analisis yang dipergunakan adalah metoda yang dapat memprediksi unjuk kerja elemen bakar proses termal satu pin bahan bakar selama kondisi tunak.

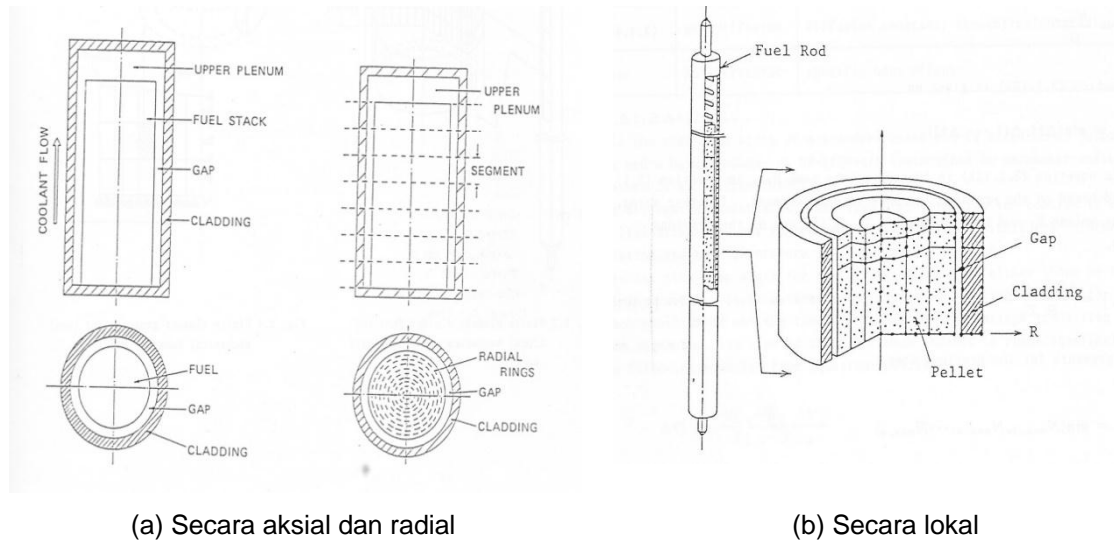
Model analisis dalam program komputer FEMAXI-V ini berdasarkan model geometri untuk unjuk kerja termal dan mekanikal<sup>[4]</sup>. Diagram alir kode komputer ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir FEMAXI-V.

Proses analisis dilakukan sesuai diagram alir FEMAXI-V pada Gambar 3, diawali dengan perhitungan proses termal yang diuraikan dalam dasar teori dan model<sup>[3]</sup>. Pemodelan unjuk kerja dibagi menjadi dua bagian yaitu analisis secara utuh satu pin dan secara lokal bahan bakar

seperti pada Gambar 4 (a) dan (b). Dalam perhitungan model pin dibagi menjadi 10 node ke arah aksial, pelet dibagi menjadi 10 ring ke arah radial dan kelongsong dibagi menjadi 3 ring ke arah radial. adalah 10,78 dan 11,26%.

Gambar 4. Model Axisimetrik Elemen Terbatas (*Finite Element*).

Model perpindahan panas pada permukaan pin bahan bakar dengan kondisi operasi berdasarkan temperatur pendingin konstan untuk sepanjang pin. Asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan proses termal bahwa kenaikan temperatur entalpi pendingin, temperatur masuk, kecepatan aliran tidak ditentukan selama periode analisis tetapi input data dapat diberikan sebagai variabel, tekanan dan kecepatan massa konstan pada arah aksial.

Entalpi pendingin (air atau uap) dihitung dengan persamaan

$$h_{n+1} - h_n = \frac{2 \pi r q_n l_n}{G A} \quad (1)$$

dengan  $h_n$  = entalpi pada node  $n$  (J/kg),  $r$  = diameter eksternal pin bahan bakar (m),  $l_n$  = panjang segmen  $n$  (m),  $G$  = kecepatan massa (=  $p.v$ ) ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ),  $A$  = luas aliran ( $\text{m}^2$ ),  $q_n$  = flux segmen  $n$  ( $\text{J/m}^2\text{s}$ )

Persamaan yang digunakan pada model perpindahan panas merupakan gabungan dari persamaan Dittus-Boelter dan persamaan Jens-Lottes sebagai berikut:

$$q_n = h (T_n - T_s) \quad (2)$$

dengan  $q_n$  adalah heat fluks,  $h$  adalah entalpi,  $T_n$  = temperatur pada node ke  $n$  dan

$T_s$  adalah temperatur pada permukaan kelongsong.

Koefisien perpindahan panas pada permukaan kelongsong mengikuti persamaan Jens-Lottes :

$$h_w = 0,1263 \cdot \text{Exp} \left( \frac{P_w}{6,201 \times 10^6} \right) q^{0,75} \quad (3)$$

Persamaan Dittus-Boelter :

$$h_w^* = 0,023 \frac{K (De Vp)^{0,2}}{De \cdot \mu} \cdot (Pr)^{0,4} \quad (4)$$

dengan  $h_w$  = koefisien tranfer panas permukaan ( $\text{W/m}^2\text{k}$ ),  $K$  = termal konduktiviti air pendingin ( $\text{W/mk}$ ),  $De$  = diameter ekuivalen (m),  $V$  = kecepatan alir air pendingin (m/s),  $P$  = densitas air pendingin ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu$  = viskositas air pendingin ( $\text{kg/ms}$ ),  $Pr$  = Prandtl number,  $h_w = h_w^* \cdot 10^{-4}$

### Metode analisis

Data hasil fabrikasi pin bahan bakar uji pada Tabel 2, digunakan sebagai data masukan perhitungan proses termal pin yang dioperasikan pada kondisi tunak, daya 107 W/cm dengan asumsi pin dibagi dalam 28 step, 10 node.

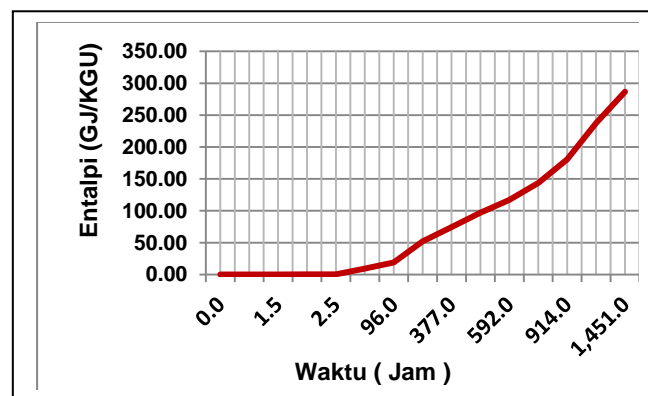
Tabel 2. Data hasil fabrikasi pin bahan bakar uji.

No	Material	Hasil ukur	Satuan
1	Diameter pelet	8,9	mm
2	Panjang pelet	9,4	mm
3	Diameter <i>dish</i> pelet	7,7	mm
4	Kedalaman <i>dish</i> atas pelet	0,32	mm
5	Kedalaman <i>dish</i> bawah pelet	0,32	mm
6	Fraksional densitas pelet	0,928	-
7	<i>Grain size</i>	6,9	µm
8	<i>Surface Rougness</i> pelet	0,74	µm
9	Berat pelet	6,04	gram
10	Berat total pelet	205,2771	gram
11	Diameter luar kelongsong	10,75	mm
12	Diameter dalam kelongsong	9,33	mm
13	<i>Surface Rougness</i> kelongsong	0,30	µm
14	Panjang kelongsong	366,5	mm
15	Panjang total pin	446,3	mm
16	Volume plenum	2376,4	mm <sup>3</sup>
17	Tekanan gas Helium	1	bar
18	<i>Leak test</i> He	< 10 <sup>-8</sup>	mbar cc/detik

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan perpindahan panas ditetapkan pada daya 107 W/cm kondisi tunak dengan asumsi pin dibagi kedalam

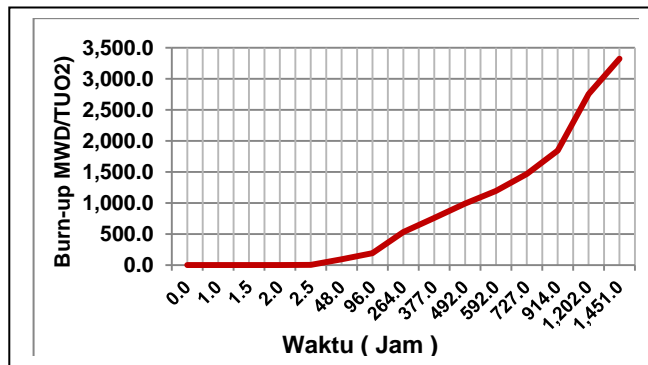
28 step, 10 node dan hasil pengolahan data dengan program FEMAXI-V terhadap analisis termal ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pola peningkatan entalpi setelah iradiasi.

Peningkatan entalpi terjadi adanya perpindahan panas akibat kenaikan temperatur dalam entalpi air pendingin yang dipindahkan dari pelet ke permukaan pin

bahan bakar, sedangkan kajian waktu iradiasi terhadap *burn-up* bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 6.

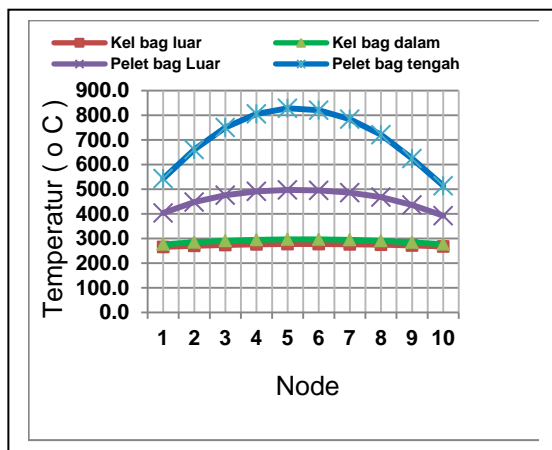


Gambar 6. Pola peningkatan nilai *burnup*.

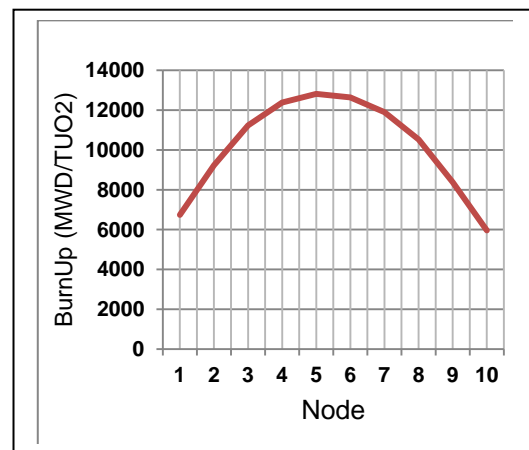
Fenomena pola peningkatan nilai *burn-up* yang dibangkitkan (Gambar 6) adalah sama dengan Gambar 5, sehingga data keluaran hasil perhitungan ini dapat digunakan untuk memprediksi waktu yang dibutuhkan untuk iradiasi pin bahan bakar tersebut.

Hasil pemodelan perpindahan panas bila ditinjau dari proses thermal ke arah aksial dengan mengikuti Model Aksimetrik Elemen Terbatas (*Finite Element*) seperti pada Gambar 4 dengan

daya 107 W/cm kondisi tunak, dipilih pin dibagi 10 node pada tahap (*stage*) no. 45, waktu iradiasi 14176 jam atau 19,7 bulan dan temperatur pendingin 255°C memberikan keluaran informasi pola distribusi temperatur pada pelet bagian tengah/ pusat, pelet bagian luar, kelongsong bagian dalam dan kelongsong bagian luar terhadap posisi node dan *burn-up* ke arah aksial (Gambar 1) ditunjukkan pada Gambar 7 (a) dan (b)



(a)

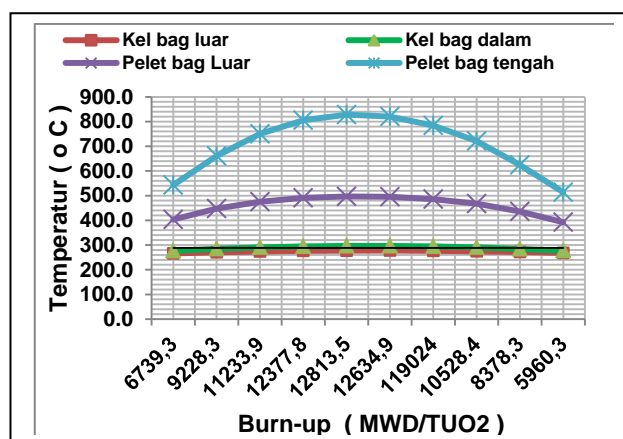


(b)

Gambar 7. Pola distribusi temperatur dan *burn-up* terhadap posisi node.

Pola distribusi temperatur dan burnup terhadap posisi node (Gambar 7 a dan b) menunjukkan bahwa nilai tertinggi di node ke 5 atau posisi tengah sepanjang pin bahan

bakar, sehingga untuk mengetahui pola distribusi temperatur ke arah radial (Gambar 4) dipilih posisi pelet di node 5 yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pola distribusi temperatur terhadap *burn-up*.

Pola Gambar 8 menunjukkan distribusi temperatur nilai tertinggi pada burnup 12813,5 MWD/TUO<sub>2</sub>, bila dibandingkan dengan posisi *burn-up* nilai tertinggi (Gambar 7 b) posisi berada di tengah sepanjang pin bahan bakar atau node ke 5. Hal ini menunjukkan bahwa kebolehjadian terjadi ketidaksesuaian tertinggi terhadap kriteria keberterimaan pada posisi node 5 sehingga untuk memprediksi terhadap sifat termal maupun mekanik selanjutnya dipilih

pada posisi node ke 5 dalam perhitungan. Pemodelan ke arah radial dipilih node ke 5, pelet dibagi menjadi 10 ring dan kelongsong dibagi menjadi 3 ring memberikan keluaran informasi distribusi temperatur secara radial pada node no. 5 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Data informasi hasil perhitungan final pada proses termal ditunjukkan pada Tabel 3 dan untuk proses mekanik pada Tabel 4.

Tabel 3. Informasi data termal pin bahan bakar kondisi tunak dengan daya 107 w/cm pada node ke 5.

No	Stage ke	Waktu (jam)	Burn-up (MWD/TUO <sub>2</sub> )	Gap radial (micron)	Tekanan gas (MPA)
1	12	48,0	16,4	123,40	0,00
2	45	14176,8	12813,5	107,33	0,00
3	78	29094,7	25733,0	90,58	0,00
4	103	38085,6	32849,8	85,41	0,00
5	110	38112,0	32859,1	96,96	0,00

Tabel 4. Informasi data mekanik pin bahan bakar terhadap deformasi antara bahan bakar dan kelongsong pada node ke 5.

No	Stage ke	Waktu (jam)	Burn-up (MWD/TUO <sub>2</sub> )	Gap radial Posisi atas (micron)	Tekanan kontak aksial (MPA)	Tekanan kontak radial (MPA)
1	12	48,0	16,4	86,62	0,00	0,00
2	45	14176,8	12813,5	70,22	0,00	0,00
3	78	29094,7	25733,0	53,49	0,00	0,00
4	103	38085,6	32849,8	46,34	0,00	0,00
5	110	38112,0	32859,1	57,55	0,00	0,00



Pada Tabel 3 dan 4 terlihat bahwa proses iradiasi kondisi tunak dengan power 107 W/cm, waktu iradiasi hingga 38112,0 jam mengalami penurunan gap radial tetapi belum terjadi kontak antara pelet dan kelongsong dan tidak terjadi tekanan kearah aksial maupun radial, maka pin dalam kondisi aman dan selamat untuk diiradiasi di *Power Ramp Test Facility* (PRTF)

## SIMPULAN

Peningkatan entalpi diakibatkan kenaikan temperatur air pendingin disebabkan adanya perpindahan temperatur dari pelet ke permukaan pin bahan bakar sehingga mempengaruhi unjuk kerja pin secara keseluruhan. Pola distribusi temperatur terhadap posisi node nilai tertinggi adalah pada node ke 5 atau posisi tengah sepanjang pin bahan bakar. Kebolehjadian terjadi ketidaksesuaian atau kerusakan pada posisi node 5 sehingga untuk memprediksi terhadap proses termal maupun mekanik selanjutnya dipilih pada posisi node tersebut. Hasil analisis proses iradiasi kondisi tunak dengan daya 107 W/cm, waktu iradiasi hingga 38112,0 jam mengalami penurunan gap radial belum terjadi kontak antara pelet dan kelongsong dan tidak terjadi tekanan kearah aksial maupun radial. Hasil analisis dengan FEMAXI-V dapat menampilkan data secara kualitatif, detail dan dapat memberikan informasi sebagai bahan pertimbangan

tahapan yang perlu dilakukan selama uji paska iradiasi dan fabrikasi

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada bapak Ir. Tri Yulianto, Bapak Eddy Indarto, bapak Suryadi dan anggota tim Laporan Analisis Keselamatan uji iradiasi bahan bakar U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al yang telah banyak membantu pekerjaan analisis.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Hari Sudirdjo. (2011). Uji Fungsi Power Ramp Test Facility ( PRTF) RSG-GAS Paska Perbaikan. Proseding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir – PTAPB.
- [2]. Suzuki Motoe. (1999). FEMAXI-V : A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods, JAERI.
- [3]. Anonim. (1992). FEMAXI-IV: A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods. JAERI Fuel Reliability Laboratory CRC Research Institute, Inc.
- [4]. Edy Sulistyono. (1994). Analisa Unjuk Kerja Elemen Bakar Reaktor Daya Jenis LWR(Light Water Reactor), Buletin Reaktor Serba Guna TRI DASAMEGA vol 3 no 1.