

## PENGARUH NILAI BAKAR TERHADAP INTEGRITAS KELONGSONG ELEMEN BAKAR TRIGA 2000

Sudjatmi K.A.

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri – BATAN

Diterima editor 29 Agustus 2011  
Disetujui untuk publikasi 07 Oktober 2011

### ABSTRAK

**PENGARUH NILAI BAKAR TERHADAP INTEGRITAS KELONGSONG ELEMEN BAKAR TRIGA 2000.** Bentuk elemen bakar reaktor TRIGA Bandung adalah silinder padat yang merupakan campuran homogen paduan uranium dan zirkonium hidrida. Pada saat reaktor beroperasi, suhu elemen bakar akan bertambah, akibatnya akan menaikkan tekanan gas-gas yang ada di dalam kelongsong elemen bakar. Tekanan gas yang timbul dalam kelongsong elemen bakar merupakan penjumlahan tiga komponen tekanan yaitu tekanan akibat udara yang terperangkap antara kelongsong dengan bahan bakar, tekanan oleh gas hasil fisi yang terbentuk dari elemen bakar dan tekanan yang berasal dari pemisahan hidrogen dari paduan zirkonium hidrida. Gas hasil fisi yang terbentuk oleh bahan bakar sebanding dengan besarnya fraksi bakar oleh setiap elemen bakar dalam teras reaktor. Semakin besar fraksi bakar elemen bakar, semakin besar gas gas hasil fisi yang dihasilkannya, akibatnya semakin besar tekanan di dalam kelongsong yang disebabkan oleh gas gas hasil fisi tersebut. Perhitungan jumlah gas-gas hasil fisi dalam kelongsong yang merupakan fungsi dari nilai bakar dilakukan dengan menggunakan program ORIGEN-2. Program ORIGEN-2 adalah kode komputer yang banyak digunakan untuk menghitung hasil fisi, peluruhan dan pengolahan bahan radioaktif. Tampang lintang, presentase timbulnya hasil fisi, data peluruhan, dan data lainnya yang diperlukan disediakan dalam pustaka data selama eksekusi program. Dari hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa tekanan gas yang diakibatkan oleh gas hasil fisi adalah  $4,13 \cdot 10^{-3}$  psi dan tekanan gas yang diakibatkan udara yang terjebak di dalam kelongsong adalah 56,6 psi, yang mengakibatkan tegangan pada kelongsong sebesar 2080 psi dan nilai ini jauh lebih kecil dari setengah tegangan luluh bahan kelongsong sebesar 12.000 psi pada temperatur 750 °C atau sekitar 40.000 psi pada temperatur 138 °C. Akhirnya dapat disimpulkan bahwa dilihat dari sisi nilai bakar, maka elemen bakar layak digunakan sampai mencapai nilai bakar maksimum.

Kata kunci : TRIGA, nilai bakar, elemen bakar, kelongsong.

### ABSTRACT

**THE EFFECT OF BURNUP AGAINST TRIGA 2000 FUEL ELEMENT CLADDING INTEGRITY.** Bandung TRIGA reactor fuel element, which is a homogeneous mixture of uranium and zirconium hydride alloy shaped solid rod. At the time of reactor operation, the fuel temperature will increase with increasing high-power reactor, which will consequently increase the pressure of the gases that exist in the cladding. Pressures that arise in the fuel cladding is the sum of three components of the pressure, there are due to trapped air between the fuel cladding, fission gas pressure by forming and pressure stemming from the separation of hydrogen from zirconium hydride alloy. Fission gases generated by fuel depends on fuel burnup. The larger the value of a fuel burn, the greater the gaseous fission gases produced, consequently the greater the pressure inside the cladding caused by fission gas. The calculation of the amount of fission gases in the cladding which is a function of the fuel carried by using the program ORIGEN-2. ORIGEN-2 is a widely used computer code for calculating the build up, decay and processing of radioactive materials. The cross sections, fission product yields, decay data, decay photon data are either hard wired in the program or are made available as data libraries during the execution of the code. From the calculation results can be concluded that the gas pressure caused by fission gas is very small ( $4.13 \cdot 10^{-3}$  psi) compared to the gas pressure caused by air trapped in the cladding that is equal to 56.6 psi, which resulted the cladding stress at 2080 psi. To ensure the integrity of fuel element cladding, the stress that occurs in the fuel cladding must be less than half the yield stress of cladding material, 12,000 psi at a temperature of 750 °C or about 40,000 psi at a temperature of 138 °C. It can be concluded that from the side of the fuel, then the fuel possible for use until the fuel burnup reaches a maximum value, in other words, the age of the fuel does not depend on the burnup of the fuel element.

Key words : TRIGA, burnuup, fuel element, cladding.

## PENDAHULUAN

Reaktor TRIGA 2000 Bandung menggunakan elemen bakar berbentuk batang padat, yang merupakan campuran homogen dari paduan uranium dan zirkonium hidrida. Bahan bakar di dalam elemen bakar tersebut harus berada di dalam kelongsong yang dapat mencegah keluarnya gas hasil fisi. Fabrikasi bahan bakar juga harus dibuat sedemikian sehingga dapat mengungkung gas hasil fisi di dalam matriks bahan bakar. Tegangan pada kelongsong terutama disebabkan oleh tekanan gas yang berada antara kelongsong dengan bahan bakar. Gas hasil fisi yang dihasilkan oleh bahan bakar tergantung dari burnup atau nilai bakar yang dialami oleh elemen bakar. Semakin besar nilai bakar suatu bahan bakar, maka semakin besar pula gas hasil fisi yang dihasilkan, akibatnya semakin besar pula tekanan di dalam kelongsong yang disebabkan oleh gas hasil fisi tersebut.

Pada reaktor TRIGA 2000, elemen bakar yang memiliki nilai bakar melebihi 50% tidak boleh diletakkan di daerah tengah teras. Pada saat reaktor beroperasi, suhu elemen bakar akan bertambah tinggi dengan bertambahnya daya, sehingga tekanan gas di dalam kelongsong juga bertambah besar. Pada operasi normal, suhu elemen bakar dibatasi tidak boleh melebihi 750°C [1,2]. Temperatur di permukaan kelongsong yang bersentuhan dengan pendingin berkisar antara 133,58 °C – 137,97 °C dengan distribusi sesuai faktor puncak daya aksialnya [3].

Tekanan yang timbul dalam kelongsong elemen bakar merupakan penjumlahan tiga komponen tekanan yaitu tekanan akibat udara yang terperangkap antara kelongsong dengan bahan bakar, tekanan oleh gas hasil fisi yang terbentuk dan tekanan yang berasal dari pemisahan hidrogen dari paduan zirkonium hidrida. Secara keseluruhan, tekanan gas di dalam kelongsong elemen bakar ini akan meningkat dengan naiknya temperatur bahan bakar. Oleh karena itu perlu diperkirakan bagaimana pengaruh nilai bakar terhadap integritas kelongsong elemen bakar pada kondisi operasi.

Perhitungan pengaruh nilai bakar terhadap integritas kelongsong elemen bakar Reaktor TRIGA 2000 dilakukan pada elemen bakar tipe 118, yaitu elemen bakar yang mengandung uranium 20 w/o dengan pengayaan  $19,75 \pm 0,2\%$ , namun pengaruh korosi, umur elemen bakar ataupun pengaruh neutron terhadap integritas kelongsong elemen bakar tidak diperhitungkan. Perhitungan jumlah gas hasil fisi pada berbagai nilai bakar dilakukan dengan menggunakan paket program ORIGEN.

## METODE PERHITUNGAN

Reaktor TRIGA 2000 menggunakan tiga jenis bahan bakar yaitu tipe 8.5-20 (104), 12-20 (106) dan 20-20 (118). Ketiga elemen bakar tersebut masing masing mengandung 8,5 w/o, 12 w/o dan 20 w/o uranium, yang telah diperkaya sampai 20%. Spesifikasi bahan bakar tersebut dapat dilihat dalam Tabel 1. Bagian aktif elemen bakar TRIGA 2000 berdiameter 3,75 cm dan sepanjang 38,1 cm [1].



Gambar 1. Elemen bakar TRIGA 2000[4]

Tabel 1. Spesifikasi bahan bakar nominal untuk batang bahan bakar baru[1]

Dimensi	Spesifikasi
Panjang keseluruhan	720 mm (28,37 in)
Diameter luar kelongsong	37,5 mm (1,475 in)
Berat keseluruhan	~3,4 kg (~7,5 lb)
Diameter luar bahan bakar	36,4 mm (1,435 in)
Panjang bahan bakar	381 mm (15,0 in)
Komposisi bahan bakar	U-ZrH <sub>x</sub> atau U-ZrH <sub>x</sub> -Er
Berat U-235	38 g (8,5 wt-%); 55 g (12 wt-%); 99 g (20-20)*
Kandungan Uranium	8,5 wt-%, 12 wt-%, 20 wt-%
Pengkayaan Uranium-235	19,75 ± 0,2%
Ratio Hidrogen terhadap Zirkonium	≈ 1,6
Kelongsong :	
Material	Jenis SS-304
Tebal kelongsong	0,508 mm (0,020 in)
Panjang	561,3 mm (22,10 in)

### Perhitungan Gas Hasil Fisi Dalam Kelongsong

Perhitungan jumlah gas hasil fisi pada berbagai nilai bakar dilakukan dengan menggunakan paket program ORIGEN-2, yang merupakan bagian dari paket program SCALE. Program ORIGEN-2 adalah kode komputer yang banyak digunakan untuk menghitung hasil fisi, peluruhan dan pengolahan bahan radioaktif.

Tampang lintang, presentase timbulnya hasil fisi, data peluruhan, dan data lainnya yang diperlukan disediakan dalam pustaka data selama eksekusi program. Program ORIGEN-2 memiliki skema masukan yang sangat fleksibel yang memungkinkan pengguna untuk menghitung nilai bakar dan hasil fisi reaktor nuklir yang dihasilkan selama reaktor beroperasi ataupun setelah reaktor tidak beroperasi. Program ini menghasilkan berbagai jenis keluaran seperti jumlah masing isotop dan elemen yang dihasilkan (gram), jumlah molekul (gram-atom), radioaktivitas (Curie) dan daya termal (watt)[5].

Perhitungan ini dilakukan untuk elemen bakar standard 20-20 (tipe118). Elemen bakar ini mengandung 402 gram U-238, 99 gram U-235, 1996 gram Zirkonium, 33 gram Hidrogen dan 12 gram Erbium. Gas hasil fisi yang digunakan pada perhitungan integritas kelongsong adalah Kr, I, dan Xe. Fraksi produk fisi yang lepas dari bahan bakar U-ZrH telah

dianalisis oleh General Atomics. Hasil analisis menunjukkan bahwa fraksi xenon dan kripton yang lepas dari matriks bahan bakar sekitar  $1,5 \times 10^{-5}$  pada temperatur sampai  $850^\circ\text{C}$  dan fraksi xenon dan kripton yang lepas ini akan meningkat sampai  $1,5 \times 10^{-2}$  bila temperturnya mencapai  $1100^\circ\text{C}$ [2,6].

### Perhitungan Tekanan Gas-gas Dalam Kelongsong Elemen Bakar

Tekanan yang timbul dalam kelongsong elemen bakar merupakan penjumlahan tiga macam tekanan yaitu:

1. Tekanan yang diakibatkan oleh udara yang terperangkap antara kelongsong dengan bahan bakar,
2. Tekanan oleh produk fisi yang terbentuk dan
3. Tekanan yang berasal dari pemisahan hidrogen dari paduan zirkonium hidrida.

Udara yang terperangkap dalam kelongsong elemen bakar mempunyai massa dan volume yang tetap. Tekanan udara yang terperangkap dalam celah antara bahan bakar dengan kelongsong adalah[7] :

$$P V = n R T \quad (1)$$

Jadi :

$$P_{udara} = \frac{14,7}{273} T_2 \quad (psi) \quad (2)$$

dengan,

$P_{udara}$  = tekanan udara dalam celah antara elemen bakar dengan kelongsong  
 $T_2$  = temperatur udara dalam kelongsong elemen bakar

### Perhitungan Tekanan Gas Produk Fisi

Selama reaktor beroperasi, akan dihasilkan gas-gas hasil fisi. Gas hasil fisi ini akan lepas sebagian dari matriks bahan bakar dan selanjutnya terperangkap di celah antara bahan bakar dengan kelongsongnya. Jumlah inti atom dalam celah dihitung berdasarkan fraksi produk fisi yang lepas dari matriks bahan bakar. Fraksi xenon dan kripton menempati celah antara kelongsong dan bahan bakar yaitu sekitar  $1,5 \times 10^{-5}$  untuk temperatur sampai  $750^\circ\text{C}$ .

Besarnya tekanan gas yang berasal dari produk fisi ( $P_{fp}$ ) tergantung pada jumlah inti yang ada.

$$P_{fp} = \frac{(\text{jumlah inti dalam celah})RT}{A.V} \quad (3)$$

dengan,

A = bilangan Avogadro  
V = volume gas dalam celah

Volume gas ditentukan dengan,

$$V = 0,3175\pi R_i^2 \quad (4)$$

dengan :

$R_i$  = jari-jari dalam kelongsong (1,824 cm)

## Perhitungan Tekanan Gas Hydrogen

Untuk zirkonium hidrida dengan ratio H/Zr lebih besar dari 1,58 tekanan gas hidrogen ( $P_h$ ) dapat didekati dengan persamaan[1].

$$P_h = \exp[1,767 + 10,3014x - 19740,37 / T_k] \quad (5)$$

dengan:

X = ratio H/Zr

$T_k$  = temperatur bahan bakar (K)

Harga H/Zr untuk reaktor TRIGA Mark II sebesar 1,60, sehingga persamaan (5) menjadi :

$$P_h = 8,425 \times 10^7 \exp[-19740,37/T_k] \quad (6)$$

Tekanan total gas di dalam kelongsong pada temperatur bahan bakar maximum pada saat reaktor beroperasi, yaitu 750°C diperoleh dengan menggabungkan tekanan akibat tekanan udara, produk fisi dan gas hidrogen.

$$P_{total} = P_{udara} + P_{fp} + P_h \quad (7)$$

## Integritas Kelongsong Elemen Bakar

Tekanan gas di dalam kelongsong elemen bakar akan menimbulkan tegangan pada kelongsong elemen bakarnya, sehingga parameter yang mempengaruhi besarnya tekanan gas secara tidak langsung juga mempengaruhi besarnya tegangan yang timbul pada kelongsong elemen bakar.

Pada perhitungan ini diasumsikan bahwa temperatur bahan bakar sama dengan temperatur kelongsong. Tegangan kelongsong elemen bakar akibat adanya tekanan gas di dalam kelongsong dapat dihitung dengan persamaan[8]:

$$\sigma_{\theta} = \frac{p r}{b} \quad (8)$$

dengan,

P = tekanan gas dalam kelongsong

R = jari-jari luar kelongsong (1,875 cm)

B = tebal kelongsong (0,051 cm)

Bila dimasukkan nilai jari-jari luar kelongsong dan nilai tebal kelongsong, maka persamaan (8) menjadi :

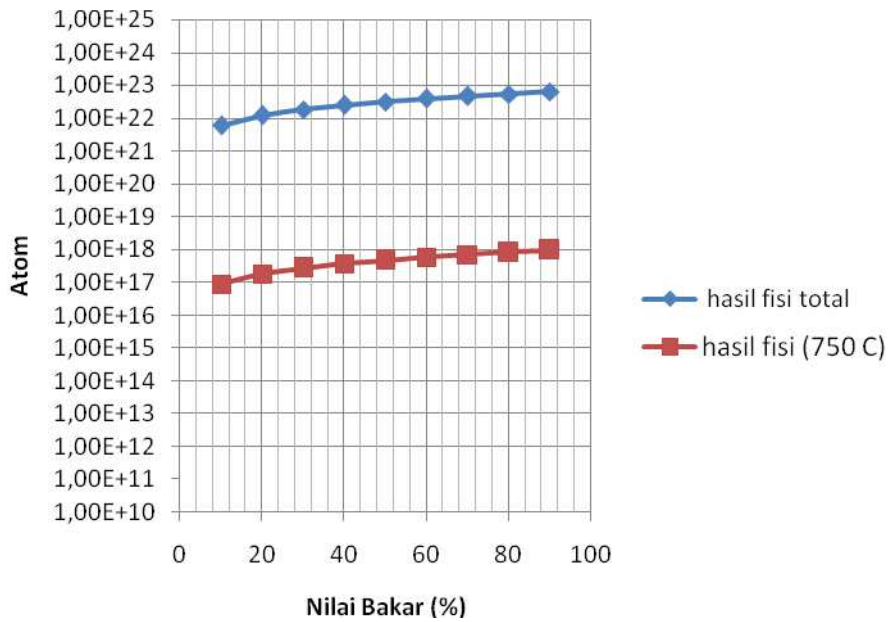
$$\sigma_{\theta} = 36,7P \quad (9)$$

Untuk menjamin keutuhan kelongsong elemen bakar maka tegangan yang terjadi dalam kelongsong elemen bakar harus lebih kecil dari setengah tegangan luluh bahan kelongsong. Pada operasi reaktor, temperatur kelongsong elemen bakar adalah sekitar 138 °C. Kekuatan kelongsong SS 304 pada suhu 750°C adalah sekitar 24.000 psi atau sekitar 80.000 psi pada temperatur 138°C[9].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

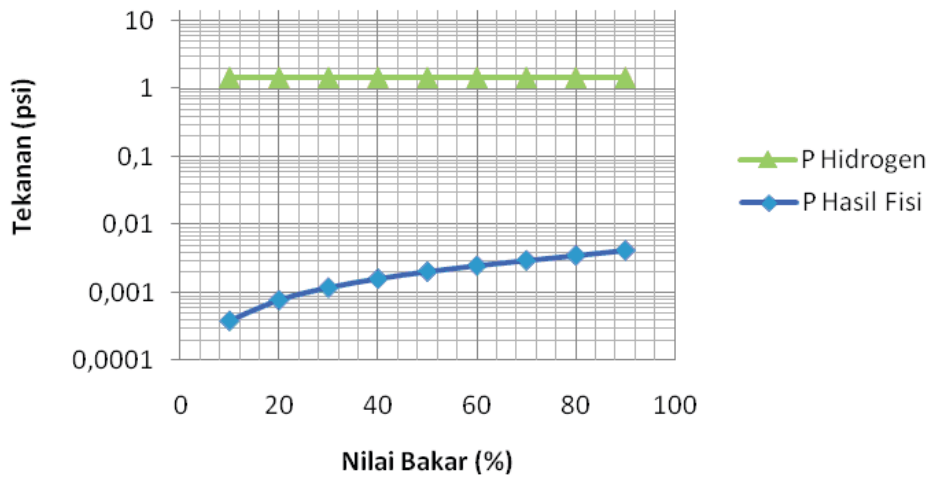
Perhitungan hasil fisi pada nilai bakar 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% telah dilakukan dengan menggunakan program ORIGEN, yang merupakan bagian dari paket program SCALE. Sebagai masukan, digunakan elemen bakar TRIGA tipe 118, yaitu elemen bakar yang mengandung uranium 20 w/o dengan pengayaan  $19,75 \pm 0.2\%$ . Gas hasil fisi yang digunakan pada perhitungan integritas kelongsong adalah Kr, I, dan Xe. Fraksi

xenon dan kripton yang lepas dari matriks bahan bakar sekitar  $1,5 \times 10^{-5}$  pada temperatur sampai  $850^{\circ}\text{C}$  digunakan dalam perhitungan. Hasil perhitungan produk fisi yang menempati celah antara kelongsong dengan bahan bakar pada nilai bakar antara 10 % sampai dengan 90 % pada suhu  $750^{\circ}\text{C}$  dapat dilihat pada Gambar 2. Semakin besar nilai bakar, semakin besar pula produk fisi yang dihasilkan. Pada Gambar 2 juga dapat dilihat bahwa semakin besar nilai bakar, pertambahan hasil fisi yang dihasilkan semakin landai. Hal ini disebabkan karena pada pengoperasian reaktor pada daya yang sama, diperlukan waktu yang lebih lama untuk mendapatkan nilai bakar yang lebih besar, sehingga semakin besar pula peluruhan yang terjadi pada hasil fisi.



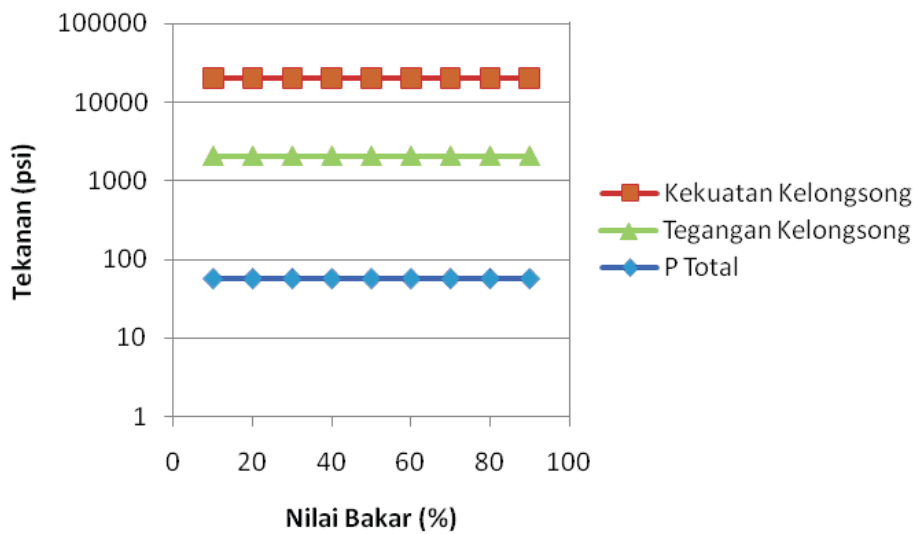
Gambar 2. Jumlah atom gas hasil fisi dalam kelongsong pada berbagai nilai fraksi bakar

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa tekanan yang paling berpengaruh terhadap tekanan kelongsong elemen bakar adalah tekanan udara yang terjebak dikelongsong elemen bakar yaitu sebesar 56,6 psi, sedangkan tekanan gas yang disebabkan oleh gas hasil fisi sangat kecil yaitu  $4,13 \times 10^{-3}$  untuk nilai bakar 90%, sehingga dapat diabaikan.



Gambar 3. Tekanan pada kelongsong terhadap fraksi bakar

Pada nilai bakar 90%, terlihat bahwa tekanan total pada kelongsong adalah 56,6 psi. Hal ini mengakibatkan tegangan yang terjadi pada kelongsong adalah 2.080 psi (Gambar 4). Nilai ini masih sangat jauh dibandingkan dengan kekuatan kelongsong, yaitu sekitar 24.000 psi pada temperatur 750 °C atau sekitar 80.000 psi pada temperatur 138 °C. Untuk menjamin keutuhan kelongsong elemen bakar maka tegangan yang terjadi dalam kelongsong elemen bakar harus lebih kecil dari setengah tegangan luluh bahan kelongsong yaitu 12.000 psi pada temperatur 750 °C atau sekitar 40.000 psi pada temperatur 138 °C.



Gambar 4. Kekuatan kelongsong

## KESIMPULAN

Pada nilai bakar 90%, tegangan yang terjadi pada kelongsong adalah 2.080 psi. Nilai ini masih sangat jauh dibandingkan dengan kekuatan kelongsong, yaitu sekitar 24.000 psi pada temperatur 750 °C atau sekitar 80.000 psi pada temperatur 138 °C. Untuk menjamin keutuhan kelongsong elemen bakar, tegangan yang terjadi dalam kelongsong elemen bakar harus lebih kecil dari 12.000 psi pada temperatur 750 °C atau sekitar 40.000 psi pada temperatur 138 °C.

Tekanan yang paling berpengaruh terhadap tekanan kelongsong elemen bakar adalah tekanan udara yang terjebak dikelongsong elemen bakar yaitu sebesar 56,6 psi, sedangkan tekanan gas yang disebabkan oleh gas hasil fisi sangat kecil yaitu  $4,13 \cdot 10^{-3}$  untuk nilai bakar 90%. Dapat disimpulkan bahwa dilihat dari sisi nilai bakar, maka elemen bakar masih aman digunakan sampai mencapai nilai maksimum, dengan kata lain umur elemen bakar tidak tergantung pada nilai bakar

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonym. Laporan analisis keselamatan akhir reaktor TRIGA 2000 Bandung, revisi 3; 2006; p.15-7.
2. Generic Procedures for Response to a Nuclear or Radiological emergency at Triga Research Reactors, EPR-TRIGA Research Reactor, 2011; p. 5-7.
3. Sudjatmi K.A., Endiah Puji Hastuti. Aplikasi program coolod-n2 untuk analisis termohidrolik teras reaktor TRIGA. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknik Nuklir, P3TkN – BATAN Bandung , 14 – 15 Juni 2005; p. 317
4. TRIGA Research Reactor; Available from:URL: <http://www.ga-esi.com/triga/products/fuel.php>. Accessed June 2010
5. ORIGEN-2. Isotope Generation and Depletion Code, ORNL TM-7175; July 1980.
6. Anonym. Safety analysis report for upgrade of TRIGA Mark II Reactor at Center for Nuclear Techniques Research Bandung, Indonesia. General Atomic, June 1996; p. 5-14.
7. Jearl Walker. Fundamental of physics. John Wiley & Sons, Inc. Eight Edition, 2007; p. 509.
8. David Roylance. Pressure vessels department of material science and engineering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, August 23, 2001; p. 3.
9. Product Data Bulletin, 304/304L Stainless Steel, 08-01-07; p. 4.