

## PERFORMA NEUTRONIK BAHAN BAKAR LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> PADA SMALL MOBILE-MOLTEN SALT REACTOR

S.N. Rokhman, A. Widiharto, Kusnanto  
Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.  
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281

Diterima editor 02 September 2011  
Disetujui untuk publikasi 03 Oktober 2011

### ABSTRAK

**PERFORMA NEUTRONIK BAHAN BAKAR LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> PADA SMALL MOBILE-MOLTEN SALT REACTOR.** Telah dilakukan analisis terhadap performa neutronik bahan bakar garam lebur LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> pada *Small Mobile-Molten Salt Reactor* (SM-MSR). Penyesuaian konfigurasi teras dan temperatur operasi harus dilakukan untuk penggunaan bahan bakar baru tersebut agar mencapai  $k_{\text{eff}} > 1$  dan CR (*conversion ratio*)  $> 1$  pada fraksi 0,5% <sup>233</sup>U, 20% <sup>232</sup>Th, 28% Li, 51,5% Be. Setelah didapat nilai  $k_{\text{eff}} \approx 1$  dan  $CR \approx 1$ , dilakukan analisis pengaruh perubahan Th terhadap Be dan Be terhadap Li yang terlihat dalam perubahan parameter  $k_{\text{eff}}$  dan CR. Setelah itu fraksi <sup>233</sup>U divariasikan antara 0,5–0,46% untuk memperoleh  $k_{\text{eff}} > 1$  dan  $CR > 1$ . Dalam perhitungan koefisien reaktivitas temperatur ( $\alpha_T$ ), temperatur teras dinaikkan sebesar +25K dan +50K, dan untuk koefisien reaktivitas void ( $\alpha_V$ ), densitas bahan bakar dikurangi hingga 90%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pengurangan Th terhadap Be menyebabkan penurunan nilai CR dan naiknya  $k_{\text{eff}}$  akibat berkurangnya material fertil. Sebaliknya penambahan Be terhadap Li mengakibatkan terjadi kenaikan nilai  $k_{\text{eff}}$  dan menurunkan CR, akibat laju serapan Li lebih besar dari Be. Pada 5 (lima) fraksi <sup>233</sup>U dalam rentang 0,5–0,49%, hasil perhitungan  $k_{\text{eff}}$  dan CR masing-masing bervariasi dalam rentang 1,00001 - 1,00327 dan 1,00016 - 1,00731. Untuk faktor puncak daya (PPF), hasil perhitungan memberikan nilai dalam rentang 2,4311 -2,4714. Sedangkan untuk parameter keselamatan, koefisien reaktivitas temperatur ( $\alpha_T$ ) dan reaktivitas void ( $\alpha_V$ ) masing-masing bernilai negatif dalam rentang  $4,972 \times 10^{-5}$  -  $5,909 \times 10^{-5}$  dan  $2,596 \times 10^{-2}$  -  $2,8287 \times 10^{-2} \Delta k/k/K$ . Dapat disimpulkan bahwa teras SM-MSR memberikan nilai negatif di kedua koefisien reaktivitas tersebut untuk setiap fraksi, sehingga memenuhi kriteria keselamatan dan keselamatan melekat.

Kata kunci: SM-MSR (*small mobile-molten salt reactor*), bahan bakar LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>, keselamatan melekat, koefisien reaktivitas temperatur, koefisien reaktivitas void

### ABSTRACT

**FUEL NEUTRONIC PERFORMANCE OF LiF-BE<sub>2</sub>-TH<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> ON A SMALL MOBILE MOLTEN SALT REACTOR.** The analysis of neutronic performance has been carried out for the molten salt fuel LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> on a *Small Mobile-Molten Salt Reactor* (SM-MSR). The core configurations and operating temperature should be adjusted in using the new fuel in order to get the calculated  $k_{\text{eff}}$  and CR (*conversion ratio*) are  $> 1$  in the fraction of 0.5% <sup>233</sup>U, 20% <sup>232</sup>Th, 28% Li, 51.5% Be. After obtained that  $k_{\text{eff}}$  and CR close to 1, then the analysis of changes in the Th to Be and Be to Li are carried out, it indicates the changes of  $k_{\text{eff}}$  and CR. Then the <sup>233</sup>U fraction is varied between 0.5–0.46% to obtain the condition  $k_{\text{eff}} > 1$  and  $CR > 1$ . To determine the temperature coefficient of reactivity ( $\alpha_T$ ), the temperature of core is changed about +25K dan +50K. To determine the void reactivity coefficient ( $\alpha_V$ ), fuel density is reduced to 90%. The result shows that the reduction of Th causes the decrease of CR and increase of  $k_{\text{eff}}$  due to the number fertile material is less. The addition of Be to Li will make the  $k_{\text{eff}}$  is increase and the CR is decrease, because the macroscopic absorption cross section of Li is greater than Be. From the five <sup>233</sup>U composition in the ranges 0.5–0.46%, the calculated  $k_{\text{eff}}$  and CR varies in the range of 1.00001 – 1.00327 and 1.00016 – 1.00731, respectively. For power peaking factor (PPF), the calculation results give the value in the range of 2.4311 -2.4714. However, for the safety parameters, the negative temperature reactivity coefficient ( $\alpha_T$ ) and negative void reactivity CR ( $\alpha_V$ ) in the range of  $4.972 \times 10^{-5}$  -  $5.909 \times 10^{-5}$  and  $2.596 \times 10^{-2}$  -  $2.8287 \times 10^{-2} \Delta k/k/K$ , respectively. It can be concluded that the SM-MSR core has negative value for those reactivity for all fractions, so the core fulfill the safety criteria and inherent safety.

Keywords: *small mobile molten salt reactor* (SM-MSR), LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> fuel, inherent safety, temperature coefficient reactivity, void coefficient reactivity.

## PENDAHULUAN

Seiring dengan bertambahnya penduduk Indonesia maka akan semakin bertambah pula kebutuhan akan listrik. Dalam rentang tahun 1971-1980 pertambahan penduduk Indonesia mencapai 1,24, sedangkan pada periode 1980-1990, 1990-1995, 1995-2000 dan 2000-2005 masing-masing sebesar 1,22, 1,09, 1,05 dan 1,07 [1]. Berdasarkan data penggunaan listrik tahun 2008, penjualan tenaga listrik terbesar dipergunakan untuk kebutuhan rumah tangga dan industri yang mencapai lebih dari 70% dari total tenaga listrik [2].

Karena secara umum permasalahan pemenuhan energi dunia dan termasuk Indonesia akan terbentur kepada hal-hal di bawah [3]:

1. Akan selalu bertambahnya jumlah penduduk dunia dan industri.
2. Ketersediaan bahan bakar fosil yang mulai berkurang dan pada saatnya akan habis.
3. Dampak negatif dari penggunaan fosil terhadap lingkungan yang memicu kepada kerusakan lingkungan.

Oleh karena itu, pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) sebagai alternatif energi yang ramah lingkungan memiliki potensi besar untuk menggantikan PLT dari bahan bakar fosil yang dipakai di Indonesia.

Riset PLTN Generasi-IV sangat pesat dilakukan, karena sangat menjanjikan dari aspek keselamatannya dibanding reaktor Generasi-III. Salah satu aspek yang dikembangkan dalam riset Generasi-IV adalah jaminan pasokan bahan bakar (*fuel sustainability*). Sehingga fokus riset Generasi-IV tidak saja jenis reaktor pembangkit energinya tetapi juga keberagaman material bahan bakar yang digunakan. *Molten Salt Reactor* (MSR) merupakan salah satu sistem reaktor Generasi-IV.

Reaktor SM-MSR (*Small Mobile-Molten Salt Reactor*) merupakan salah satu inovasi dari pengembangan desain reaktor MSR yang menggunakan bahan bakar garam lebur. Modifikasi yang dipakai dalam jenis ini adalah berukuran modular sehingga dapat dimanfaatkan pada daerah kecil atau negara kecil. Pada konsep bahan bakar SM-MSR yang telah diteliti dalam makalah ini adalah penggunaan bahan bakar LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> yang merupakan pengembangan dari bahan bakar LiF-BeF<sub>2</sub>-UF<sub>4</sub>, yaitu dengan cara menambah bahan fertile thorium-232.

Tujuan dari perancangan reaktor ini adalah untuk merancang dan mengembangkan reaktor berdaya kecil yang hemat biaya, aman dan cocok untuk negara berkembang. Dari beberapa aspek yang ditargetkan adalah dapat tampil dengan inovasi yang lebih menguntungkan secara operasional maupun ekonomi, dioperasikan pada daya kecil, dapat dimanfaatkan untuk kogenerasi nuklir, dan memiliki *life-time* yang maksimal.

Makalah ini menyajikan penelitian tentang penentuan komposisi bahan bakar LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> yang optimal dari aspek performa neutronik. Parameter neutronik yang diperhatikan adalah faktor perlipatan efektif ( $k_{\text{eff}}$ ) dan *conversion ratio*. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan komposisi optimum bahan bakar LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> di reaktor SMMSR yang memenuhi kriteria keselamatan dan keselamatan melekat (*inherent safety*).

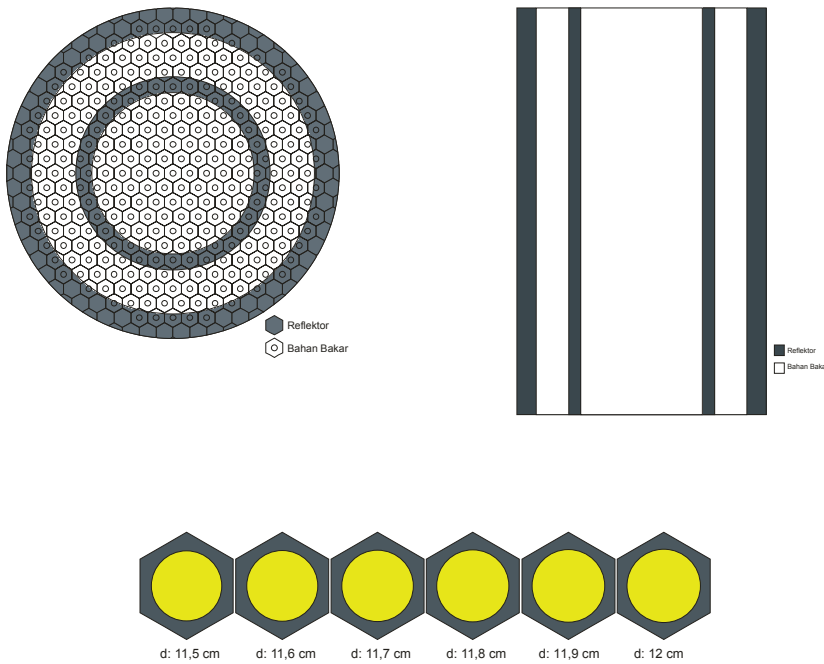
Penelitian dilakukan dengan perangkat analitis SRAC dengan pustaka data nuklir JENDL-3.3. Daya reaktor SMMSR yang dipilih adalah pada kelas daya kecil, yaitu kurang dari 300 MW<sub>th</sub>.

**METODOLOGI**

**Penyesuaian Konfigurasi Teras**

Secara umum konfigurasi SM-MSR di dalam penelitian ini hampir sama dengan penelitian sebelumnya oleh Casino [4]. Hasil penelitian Casino dipakai sebagai acuan dalam menyusun konfigurasi teras. Perbedaan yang mendasar dengan teras acuan adalah dipakainya thorium. Penambahan thorium bertujuan agar reaktor dapat menjadi *breeder reactor*. Oleh karena itu beberapa modifikasi dilakukan dengan mengubah diameter tengah blok prisma dan menaikkan temperatur operasi untuk mendapatkan  $CR > 1$  yang mengakibatkan bertambahnya temperatur titik lebur larutan garam.

Gambar 1- 2 dan Tabel 1 masing-masing menyatakan konfigurasi teras dan parameter desain teras acuan dan teras modifikasi.



Gambar 2. Pincell blok prisma bahan bakar

Tabel 1. Parameter reaktor SM-MSR untuk acuan [4] dan modifikasi

Daya	240 MWt	240 MWt
Temperatur <i>inlet</i>	800 K	1100 K
Temperatur <i>outlet</i>	1000 K	1300 K
Geometri teras	Silinder	Silinder
Jari-jari aktif	150 cm	150 cm
Tinggi teras aktif	480 cm	480 cm

## Asumsi dan Metode Perhitungan

Dalam penelitian ini diberikan batasan permasalahan untuk kemudahan dalam penelitian. Adapun batasan-batasan tersebut adalah,

- Teras reaktor efektif dengan diameter 3 meter dan tinggi 4,8 meter dengan daya termal 240 MW.
- Tanpa adanya peracunan oleh *burnable poison*.
- Analisis hanya pada kondisi awal BOL (*begining of life*)
- Perhitungan menggunakan *software* SRAC dengan data pustaka dari JENDL-3.3.

Untuk mempermudah pencarian fraksi yang tepat pada setiap komposisi yang berpatokan pada fraksi  $^{233}\text{U}$ , maka dilakukan penelitian terhadap perubahan keff dan CR pada setiap komposisi dengan cara, pertama menjaga fraksi  $^{233}\text{U}$  dan Li tetap konstan dan memvariasi penurunan fraksi  $^{232}\text{Th}$  akibat penambahan fraksi Be. Kedua menjaga fraksi  $^{233}\text{U}$  dan  $^{232}\text{Th}$  tetap konstan dan memvariasi penambahan Be dan penurunan fraksi Li. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kecenderungan apakah ada perbedaan selisih perubahan keff dan CR akibat fraksi  $^{233}\text{U}$  yang berbeda.

Kekritisitas merupakan salah satu hal terpenting dalam pengendalian reaktor dan dapat dikendalikan dari beberapa aspek, yaitu geometri teras, material teras. Reaktivitas ditentukan dengan persamaan (1).

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (1)$$

Pada teras yang berbahan bakar garam lebur tidak diperlukan penggunaan bahan bakar yang mempunyai reaktivitas lebih tinggi. Hal ini dikarenakan bahan bakar leburan garam yang bersifat cair bisa diinjeksikan secara *online refueling*, sehingga penggunaan fraksi fisil dan fertile digunakan seperlunya, yaitu  $0 < \rho < \beta$ , di samping itu juga saat operasi pada MSR tidak dipersyaratkan menggunakan batang kendali karena dapat mengurangi reaktivitas lebih. *Conversion ratio* atau biasa disebut dengan *breeding ratio*, perbedaannya adalah, *conversion ratio* merupakan parameter kemampuan reaktor untuk menjadi pembiak, dengan kata lain laju hilangnya nuklida fisil lebih kecil dari produksi fertile menjadi nuklida fisil,

$$conversion\ ratio = \frac{\text{jumlah produksi fisil dari fertile}}{\text{jumlah konsumsi fisil}}$$

dan jika  $CR > 1$  ini yang dinamakan breeding ratio. Dalam kalkulasinya digunakan persamaan (2) [8].

$$CR_{core} = \frac{\sum a_i \times CR_i}{\sum \Sigma_{a,i}} \quad (2)$$

Distribusi daya pada teras reaktor ada 2-dimensi distribusi daya, secara radial dan aksial. Dan masing-masingnya memberikan kontribusi untuk menghitung daya teras secara keseluruhan, dirumuskan dengan persamaan (3) [13].

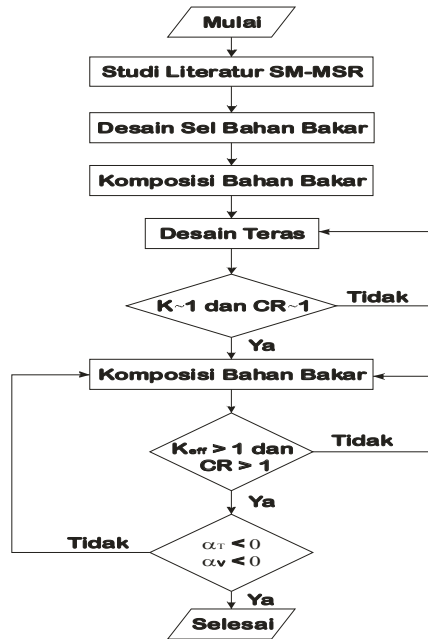
$$PPF_{total} = \frac{\text{densitas daya maksimum}}{\text{rerata densitas daya aksial}} \times \frac{\text{densitas daya maksimum}}{\text{rerata densitas daya radial}} \quad (3)$$

Faktor puncak daya juga memberikan kontribusi terhadap keselamatan reaktor, semakin rendah nilainya dan semakin datar distribusi daya maka semakin aman reaktor tersebut dari segi keselamatan. Hal ini dikarenakan tidak adanya pemuncakan daya pada teras yang menyebabkan pemanasan yang berlebih yang dapat mengakibatkan pendidihan

bahan bakar (pada reaktor bertipe MSR) sehingga menyebabkan void bahan bakar yang berdampak pada berkurangnya penghantaran panas.

Untuk mengetahui kemampuan teras terhadap koefisien reaktivitas temperatur, maka setiap komposisi bahan bakar akan diuji dengan perbedaan temperatur operasi +25 K dan +50 K. Koefisien reaktivitas void dilakukan dengan mengurangi densitas bahan bakar, diasumsikan menjadi void. Pada penelitian ini akan dilakukan perubahan densitas bahan bakar sebesar 10% - 90%.

Secara ringkas langkah di atas dapat disajikan dalam diagram alir yang tertera di Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir perhitungan parameter keselamatan reaktor

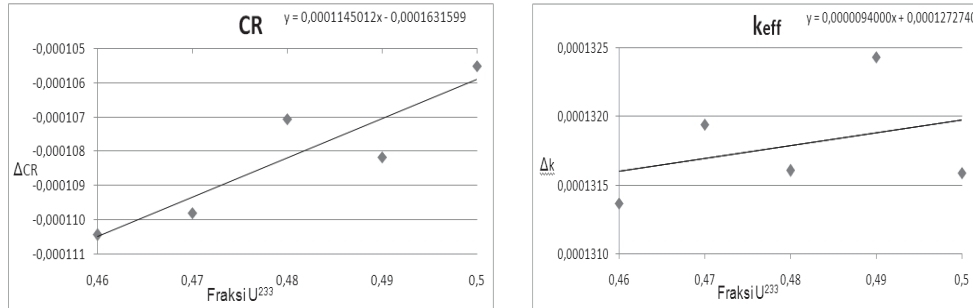
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penentuan Komposisi Awal

Untuk mencari jumlah fraksi bahan bakar yang memiliki karakteristik  $k_{eff} > 1$  dan  $CR > 1$ , maka dilakukan efek perubahan komposisi terhadap perubahan  $k_{eff}$  dan  $CR$ . Hasil perhitungan menunjukkan perubahan fraksi  $^{233}\text{U}$  akan menyebabkan meningkatnya  $k_{eff}$  dan menurunnya  $CR$  secara signifikan. Akan tetapi lain halnya dengan perubahan fraksi  $^{232}\text{Th}$  yang dapat mengakibatkan turunnya nilai  $k_{eff}$  dan naiknya  $CR$  secara signifikan pula. Maka perubahan kedua fraksi nuklida ini dikelompokkan sebagai perubah signifikan terhadap kedua paramater.

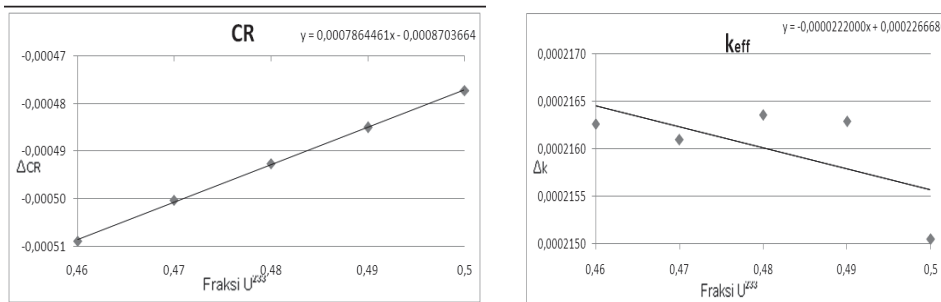
Sedangkan perubahan konsentrasi fraksi Be terhadap Li menyebabkan meningkatnya fraksi Be terhadap Li akan meningkatkan nilai  $k_{eff}$  dan menurunkan  $CR$  tidak signifikan, hal ini dikarenakan tampang lintang serapan Be lebih rendah dibandingkan dengan Li.

Gambar 4 menjelaskan ada kecenderungan perubahan CR dan  $k_{eff}$  terhadap pengurangan 1% fraksi Li dan penambahan 1% fraksi Be. Data diambil pada fraksi tetap  $^{232}\text{Th}$  20% dan rentang fraksi  $^{233}\text{U}$  0,46 - 0,5%, dengan cara perbandingan nilai CR dan  $k_{eff}$  dari kondisi pengkayaan sebelumnya ( $\Delta enrich$ ).



Gambar 4. Perubahan CR dan  $k_{eff}$  terhadap perubahan fraksi Be dan Li.

Penurunan selisih CR ( $\Delta CR$ ) pada pengkayaan yang lebih tinggi dan kenaikan selisih  $k_{eff}$  ( $\Delta k_{eff}$ ) menggambarkan bahwa pada kondisi ini penambahan Be sangat berpengaruh pada penurunan CR sedangkan kenaikan  $\Delta k_{eff}$  masih didominasi oleh lebih banyaknya fraksi  $^{233}\text{U}$ . Gambar 5 menjelaskan kecenderungan perubahan  $k_{eff}$  dan CR yang disebabkan karena 1% pengurangan Th dan 1% peningkatan Be. Data diambil pada fraksi Li konstan pada 28% dan rentang selisih perubahan  $^{233}\text{U}$  0,46 - 0,5% dengan cara perbandingan nilai CR dan  $k_{eff}$  dari kondisi pengkayaan sebelumnya ( $\Delta enrich$ ).



Gambar 5. Perubahan CR dan  $k_{eff}$  terhadap perubahan fraksi Th dan Be.

Dari gambar 5 dapat disimpulkan bahwa, semakin rendah komposisi fraksi  $^{233}\text{U}$  maka  $\Delta CR$  dan  $\Delta k_{eff}$  akan lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pengurangan Th dan penambahan Be pada fraksi  $^{233}\text{U}$  yang lebih tinggi akan mengakibatkan terjadinya perubahan  $\Delta CR$  dan  $\Delta k_{eff}$  yang kecil sehingga kekritisan maupun *conversion ratio* lebih stabil.

### Komposisi Bahan Bakar pada Temperatur Operasi

Dalam penelitian ini variasi fraksi  $^{233}\text{U}$  adalah dalam rentang 0,5 - 0,46 %. Dalam pencarian komposisi mula-mula dengan mengurangi fraksi Th terhadap Be. Penambahan beryllium dipilih karena titik leburnya lebih rendah dari Li sehingga bahan bakar mempunyai titik lebur lebih rendah pula dan tampang lintang serapan Be lebih rendah dibanding Li.

Setelah didapatkan CR dan  $k_{eff}$  yang proposional untuk mendapatkan komposisi tepat pada  $CR > 1$  dan  $k_{eff} > 1$ , penyesuaian fraksi dilakukan dengan perubahan fraksi Be terhadap Li. Dari rentang tersebut didapatkan hasil perhitungan seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Data kekritisan dan *conversion ratio* SM-MSR

Nuklida	Fraksi <sup>233</sup> U						
	0,5 %		0,49 %		0,48 %	0,47 %	0,46 %
Li	0,2800	0,2800	0,2800	0,2800	0,2760	0,2490	0,2280
Be	0,5190	0,5174	0,5196	0,5203	0,5270	0,5564	0,5799
Th	0,1991	0,1976	0,1955	0,1948	0,1922	0,1899	0,1875
U	0,0050	0,0050	0,0049	0,0049	0,0048	0,0047	0,0046
CR	1,00731	1,00016	1,00342	1,00005	1,00044	1,00016	1,00016
k	1,00008	1,00327	1,00010	1,00159	1,00001	1,00071	1,00076
ρ	0,000077	0,003255	0,000095	0,001589	0,000009	0,000711	0,000763

Dari data di atas dapat dilihat bahwa pada fraksi 0,5 % dan 0,49 % hanya digunakan perubahan Th terhadap Be, namun pada fraksi selanjutnya perubahan Th terhadap Be tidaklah cukup untuk menjadikan teras reaktor mencapai angka kekritisan dan menjadi reaktor pembiak, maka untuk mencapai angka yang demikian itu, digunakanlah peranan penambahan Be terhadap berkurangnya Th.

### Koefisien Reaktivitas Temperatur

Hasil perhitungan koefisien reaktivitas temperatur untuk seluruh komposisi bahan bakar yang dihitung ditunjukkan dalam Tabel 3. Secara keseluruhan komposisi bahan bakar menunjukkan desain reaktor yang memenuhi kriteria keselamatan, yaitu dengan berkurangnya  $k_{eff}$  terhadap bertambahnya temperatur pada saat temperatur operasi optimal.

Tabel 3. Nilai koefisien reaktivitas temperatur dari setiap komposisi.

Fraksi <sup>233</sup> U	0,5 %	0,49 %	0,48 %	0,47 %	0,46 %
$\alpha_t (\Delta k/k/K)$	$-4,972.10^{-5}$	$-5,742.10^{-5}$	$-5,909.10^{-5}$	$-5,855.10^{-5}$	$-5,882.10^{-5}$

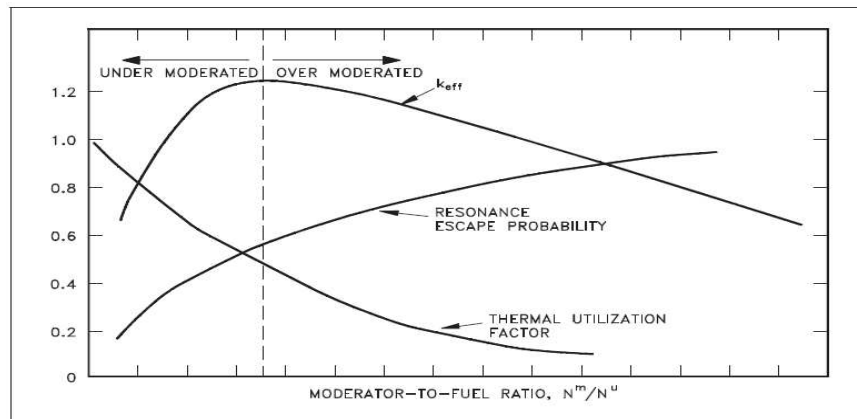
Menurunnya  $k_{eff}$  disebabkan karena peningkatan tampang lintang  $\Sigma_a$  akibat naiknya temperatur. sehingga terjadi peningkatan serapan neutron pada energi epitermal atau serapan resonansi.

Komposisi tertentu yang digunakan pada desain tertentu akan mencapai  $k_{eff} > 1$  pada kondisi temperatur tertentu pula. Jika dilihat dari diagram di atas, pada setiap fraksi merupakan karakteristik kekritisan pada temperatur operasi dan akan turun kekritisannya jika temperatur bertambah, ini berarti bahwa pada reaktor yang akan digunakan untuk operasi pada temperatur yang lebih tinggi dan tetap menjadi reaktor pembiak, maka harus meninggikan fraksi bahan bakar fisil terhadap fertil.

### Koefisien Reaktivitas Void ( $\alpha_v$ )

Void dapat terbentuk akibat pemanasan bahan bakar maka hingga titik didih bahan bakar sehingga menyebabkan terjadinya gelembung pada bahan bakar *Molten Salt Reactor*, secara termohidrolik hal ini merupakan salah satu hal yang dihindari dikarenakan void yang timbul pada dinding moderator akan mengurangi transfer panas. Sehingga timbulnya koefisien reaktivitas void mempunyai kaitan erat dengan koefisien reaktivitas temperatur.

Berdasarkan karakteristik reaktor, perbandingan antara moderator dan bahan bakar adalah salah satu topik yang harus diperhatikan, karena hal ini bersangkutan dengan salah satu faktor penunjang keselamatan reaktor. Pembahasan pada setiap jenis reaktor akan membentuk grafik yang identik dengan Gambar 6.



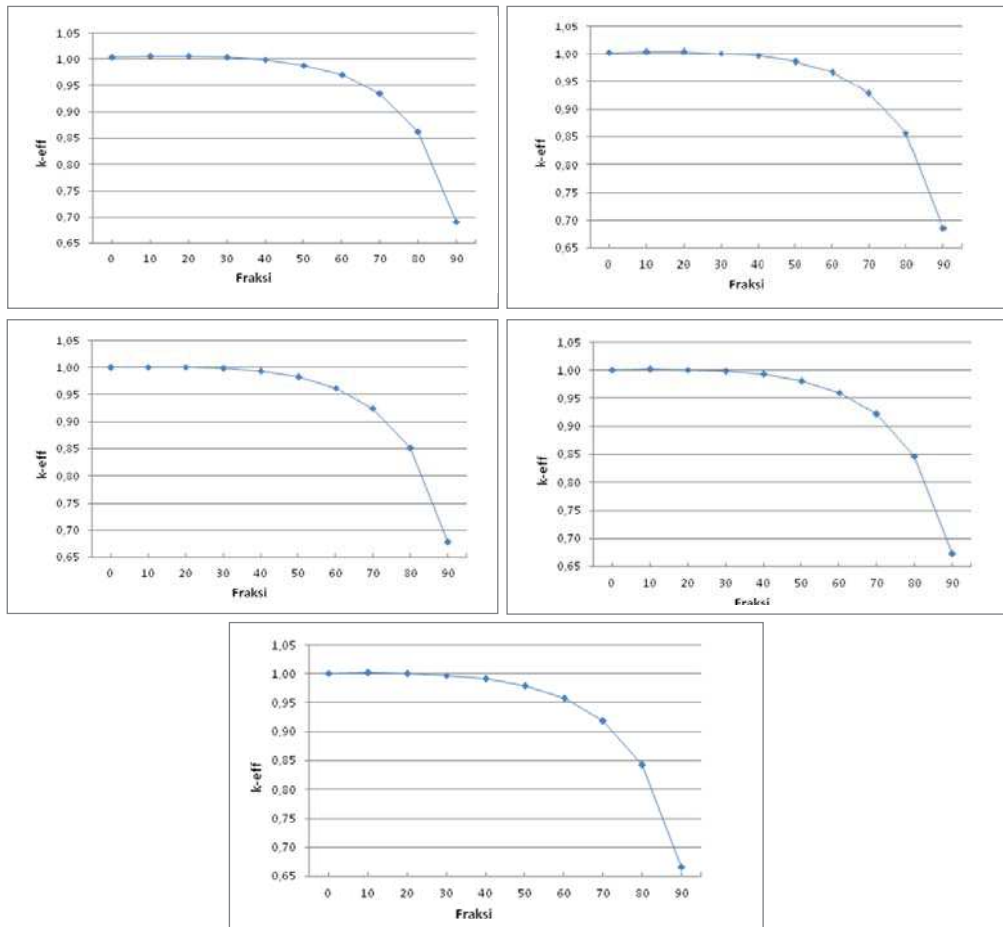
Gambar 6. Rasio moderator terhadap bahan bakar.

Titik sumbu X sebelah kiri adalah pada kondisi normal, yaitu bahan bakar tanpa void, dan titik paling kanan adalah bahan bakar sepenuhnya menjadi void. Rasio ini sering disebut dengan *MFR* (*moderator to fuel ratio*), *MFR* memberikan efek terhadap  $f$  (*utilization factor*) dan  $p$  (*resonance escape probability*) karena keduanya merupakan termasuk dari enam faktor multiplikasi neutron maka akan mempengaruhi nilai  $k_{eff}$  teras reaktor.

Naiknya temperatur bahan bakar hingga titik didih bahan bakar menyebabkan densitas bahan bakar turun. Menurunnya densitas bahan bakar menyebabkan berkurangnya energi resonansi neutron masuk ke bahan bakar dan kemudian terserap. Nilai *utilization factor* akan terus menurun seiring dengan meningkatnya *MFR*, hal ini dikarenakan menurunnya nuklida fisil terhadap seluruh nuklida yang ada pada teras sehingga reaksi fisipun menurun. Sedangkan nilai *resonance escape probability* akan meningkat dikarenakan peningkatan lolosnya neutron termal pada saat resonansi pada saat proses termalisasi. Peningkatan  $k_{eff}$  terjadi dikarenakan turunnya *utilization factor* dapat diatasi dengan dominannya peningkatan *resonance escape probability*, tahapan ini akan mencapai satu titik balik. Zona ini dinamai dengan *under moderated*. Sedangkan setelahnya, turunnya *utilization factor* lebih dominan dari peningkatan *resonance escape probability*, zona ini dinamai dengan *over moderated*.

Sebagai salah satu kriteria keselamatan reaktor adalah mempunyai karakteristik koefisien reaktivitas void ( $\alpha_v$ ) negatif sehingga timbulnya void akan menurunkan  $k_{eff}$ , sehingga reaktor berkarakteristik *inherent safety* dalam hal koefesien reaktivitas void. Hasil perhitungan koefesien reaktivitas void ditunjukkan dalam Gambar 7 dan Tabel 4.





Gambar 7. Reaktivitas void pada fraksi  $^{233}\text{U}$  0,5% (atas kiri), 0,49% (atas kanan), 0,48% (tengah kiri), 0,47% (tengah kanan) dan 0,46% (bawah).

Dari kelima grafik menunjukkan karakteristik yang sama, sesaat menunjukkan koefisien reaktivitas void positif dan akan turun setelahnya, pada fraksi  $^{233}\text{U}$  0,5 % dan 0,49 % pemuncakan terdapat pada saat terbentuknya void sebesar 20%, sedangkan untuk fraksi 0,48%, 0,47% dan 0,46% terjadi pemuncakan pada 10% pembentukan void. Hal ini menggambarkan bahwa semakin tinggi jumlah nuklida fisil dalam komposisi maka akan menggeser titik puncak  $k_{\text{eff}}$  kekanan. Meningkatnya fraksi bahan bakar berarti meningkatkan jumlah nuklida fisil, sehingga menyebabkan meningkatkan jumlah nuklida fisil dibanding dengan jumlah semua nuklida di dalam teras sehingga nilai *utilization factor* meningkat.

Tabel 4. Koefisien reaktivitas void setiap komposisi.

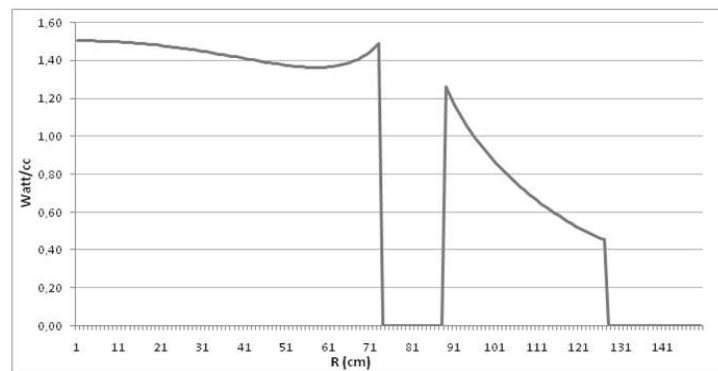
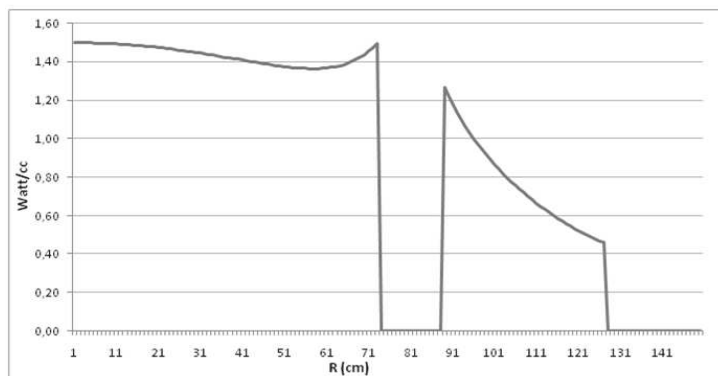
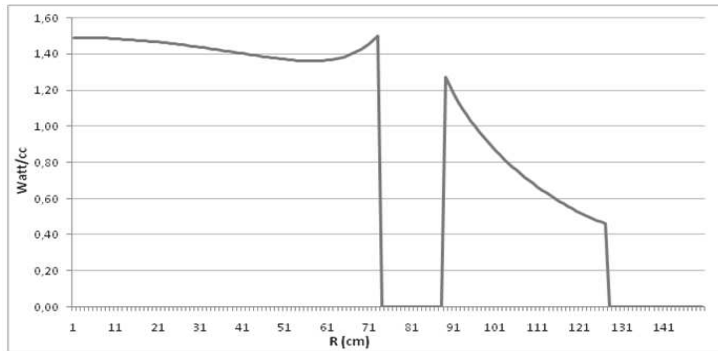
Fraksi $^{233}\text{U}$	0,5 %	0,49 %	0,48 %	0,47 %	0,46 %
$\alpha_v$ ( $\Delta k/k/K$ )	$-0,0259 \cdot 10^{-3}$	$-0,02645 \cdot 10^{-3}$	$-0,0269 \cdot 10^{-3}$	$-0,02764 \cdot 10^{-3}$	$-0,0282 \cdot 10^{-3}$

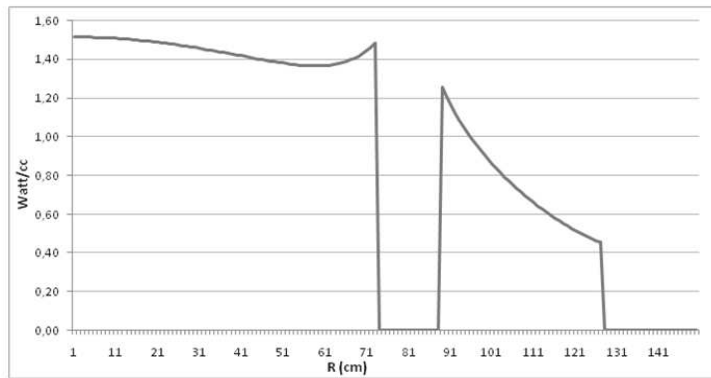
**Analisis Faktor Puncak Daya (PPF)**

Tabel 5 menunjukkan pembangkitan panas ke arah radial yang dihitung dari distribusi faktor puncak daya ( PPF) yang tertera pada Gambar 8 untuk tiap fraksi <sup>233</sup>U.

Tabel 5. Pembangkitan panas maksimum ke arah radial (W/cc)

Fraksi <sup>233</sup> U	0,5 %	0,49%	0,48%	0,47%	0,46%
PPF <sub>r</sub>	9,939063	9,886419	9,876965	9,825202	9,733859





Gambar 8. Distribusi PPF radial untuk fraksi  $^{233}\text{U}$  0,5% (atas kiri), 0,49% (atas kanan), 0,48% (tengah kiri), 0,47% (tengah kanan) dan 0,46% (bawah).

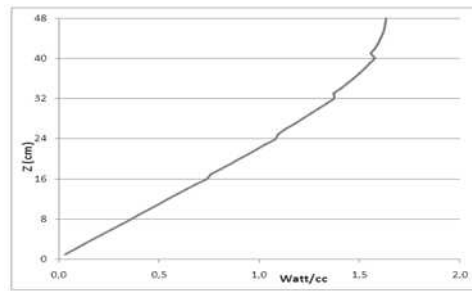
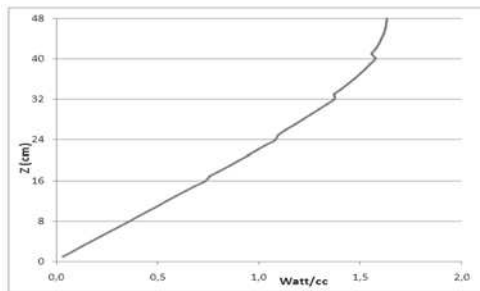
Pada sebuah dimensi komponen teras reaktor dapat menyebabkan arus neutron yang bocor dari teras. Untuk mengurangi neutron yang keluar dari sistem teras reaktor maka digunakanlah lapisan reflektor yang berfungsi untuk merefleksikan neutron kembali ke teras.

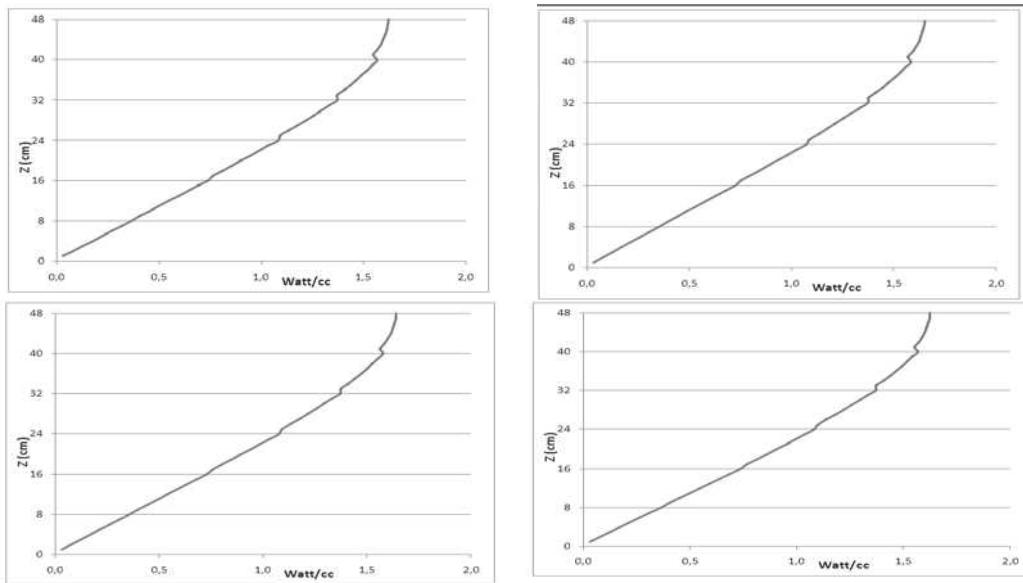
Dari kelima desain, fraksi 0,5% dan 0,49% mempunyai puncak daya radialnya pada puncak sebelum reflektor, sedangkan untuk fraksi 0,48%, 0,47% dan 0,46% mempunyai puncak daya radial pada pusat teras namun puncak sebelum refleksi juga hampir setinggi pemuncakan daya pusat aksial teras. Reflektor memberikan nilai lebih dalam hal perataan distribusi fluks teras dengan cara peningkatkan populasi neutron pada bagian terluar reflektor, neutron tersebut dipantulkan walupun ada yang ditangkap.

Tabel 6 dan Gambar 9 menunjukkan pembangkitan panas ke arah aksial. Nilai pembangkitan panas yang tertera di Tabel 6, seperti untuk ke arah radial, nilai pembangkitan panas maksimum ke arah aksial dihitung berdasarkan hasil perhitungan PPF pada Gambar 9.

Tabel 6. Pembangkitan panas maksimum ke arah aksial (W/cc)

Fraksi $^{233}\text{U}$	0,5 %	0,49%	0,48%	0,47%	0,46%
PPF <sub>r</sub>	9,167964	9,138267	8,968065	9,028257	9,084031





Gambar 9. Distribusi PPF ke arah aksial fraksi  $^{233}\text{U}$  0,5% (atas kiri, 0,49% (atas kanan), 0,48% (tengah kiri), 0,47% (tengah kanan) dan 0,46% (bawah).

Kelima grafik mencapai titik puncak daya pada posisi puncak teras, hal ini dikarenakan ukuran silinder pada setiap blok prisma tempat larutan garam semakin keatas semakin mengecil, sehingga mendukung peningkatan kekritisitas teras dan temperatur pada setiap zona. Secara umum karakteristik dari setiap fraksi pada distribusi radial maupun aksial tidak menunjukkan perbedaan bentuk, hal ini dikarenakan desain teras yang digunakan oleh kelima fraksi tersebut adalah sama.

Sedangkan pembangkitan panas maksimum di Tabel 7 merupakan pembangkitan panas yang terjadi di suatu posisi reaktor. Sedangkan Tabel 8 menunjukkan PPF total untuk tiap fraksi  $^{233}\text{U}$  yang merupakan perkalian PPF ke arah radial (Gambar 8) dan PPF ke arah aksial (Gambar 9)

Tabel 7. Pembangkitan panas maksimum di teras (W/cc)

Fraksi $^{233}\text{U}$	0,5 %	0,49%	0,48%	0,47%	0,46%
PPF <sub>max</sub>	14,946200	14,820230	14,789650	14,806360	14,755720

Tabel 8. Harga puncak daya total setiap komposisi

Fraksi $^{233}\text{U}$	0,5%	0,49%	0,48%	0,47%	0,46%
PPF <sub>total</sub>	2,451564	2,431124	2,469412	2,471446	2,462392

Untuk mendapatkan nilai PPF<sub>total</sub> yang ideal adalah bilamana dapat membuat distribusi di dalam teras adalah rata secara radial dan aksial. Untuk mendapatkan hal tersebut salah satunya adalah dengan melapisi bagian luar teras dan zona dekat pusat radial teras dengan material berbahan reflektor. Zona dekat pusat radial berfungsi untuk mendaratkan daya yang memuncak pada pusat teras, sedangkan bagian terluar teras berfungsi untuk merefleksikan kemungkinan kebocoran neutron pada bagian terluar teras reaktor.

## KESIMPULAN

Pada penggunaan bahan bakar  ${}^7\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$  sebagai bahan bakar pada modifikasi  ${}^7\text{LiF-BeF}_2\text{-UF}_4$  pada SM-MSR membutuhkan modifikasi ukuran diameter silinder di dalam blog prisma sehingga mencapai tujuan penambahan  $\text{ThF}_4$  sebagai bahan bakar fertil untuk pembiakan fertil menjadi fisil. Penambahan fraksi  ${}^{233}\text{U}$  sangat sensitif untuk kenaikan  $k_{\text{eff}}$  dan penurunan CR. Dan penambahan fraksi  ${}^{232}\text{Th}$  sangat sensitif untuk kenaikan CR dan penurunan  $k_{\text{eff}}$ . Penambahan fraksi Be terhadap Li menyebabkan kenaikan  $k_{\text{eff}}$  dan penurunan CR kurang sensitif yang bergantung pada fraksi  ${}^{233}\text{U}$  dan  ${}^{232}\text{Th}$ , sehingga dapat digunakan untuk penyesuaian semua fraksi agar mencapai  $k_{\text{eff}} > 1$  dan  $\text{CR} > 1$ . Merubah fraksi Be terhadap Li pada fraksi  ${}^{233}\text{U}$  yang lebih tinggi menyebabkan mengecilnya pengaruh perubahan CR namun perubahan  $k_{\text{eff}}$  lebih signifikan. Kelima komposisi dapat memenuhi syarat  $k_{\text{eff}} > 1$  dan  $\text{CR} > 1$  (reaktor *breeder*). Kestabilan nilai  $k_{\text{eff}}$  dan CR didapat pada fraksi 0,5% dan 0,49%  ${}^{233}\text{U}$  dengan indikasi rentang antara  $k_{\text{eff}}$  dan CR yang lebih lebar dari fraksi di bawahnya. Kelima komposisi memenuhi syarat keselamatan neutronik dari segi koefisien reaktivitas temperatur dan void sehingga memenuhi prinsip keselamatan melekat.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Pusat Statistik. Available from [http://www.bps.go.id/tab\\_sub/view.php?tabel=1&daftar=1&id\\_subyek=12&notab=1](http://www.bps.go.id/tab_sub/view.php?tabel=1&daftar=1&id_subyek=12&notab=1). Accessed 24 Juni 2010.
2. Laporan Tahunan 2008 Annual Report PT.PLN (Persero). Available from:URL: <http://www.pln.co.id/dataweb/AR/ARPLN2008.pdf>. Accessed 24 Juni 2010.
3. Dr. Ir. Andang Widi Harto, M. T. Diktat Teknologi Reaktor Nuklir Maju. Diktat. Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada; 2009.
4. William A Casino, Kirk Sorensen, Christopher A Whitener. A small mobile molten salt reactor (SM-MSR) for underdeveloped countries and remote locations. Nuclear Engineering Department the University of Tennessee; 2007.
5. Thomas J. Connolly. Foundation of nuclear engineering. John Wiley & Sons. New York, Santa Barbara, Chinchester, Brisbane, Toronto; 1978.
6. Alexander Agung. Diktat analisis reaktor nuklir. Diktat. Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada; 2008.
7. James.J.Duderstadt dan Louis J.Hamilton. Nuclear reactor analysis. John Wiley&Sons. United States of Amerika; 1976.
8. Zuyyina Bimar'atash Sholikhah. Skripsi Sarjana. Jurusan Teknik Fisika. Universitas Gadjah Mada, Indonesia ; 2010.