

ANALISIS RIA PADA ELEMEN BAKAR UJI SILISIDA TINGKAT MUAT TINGGI DI TERAS RSG-GAS

Endiah Puji Hastuti

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - PTRKN-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310
Email: endiah@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS RIA PADA BAHAN BAKAR UJI SILISIDA TINGKAT MUAT TINGGI DI TERAS RSG-GAS. Teknologi pabrikan bahan bakar silisida tingkat muat tinggi yang dilakukan oleh PT BATEK telah memasuki tahap uji iradiasi. Dua buah elemen bakar uji (EBU) berisi masing-masing 3 buah pelat disisipkan diantara 18 pelat elemen dummy dengan tingkat muat 4,8gU/cc dan 5,2gU/cc, diiradiasi di posisi iradiasi (*IP=irradiation position*) teras RSG GAS, yang saat ini berbahan bakar silisida dengan tingkat muat 2,96gU/cc. Tahap iradiasi EBU di RSG-GAS dilakukan melalui serangkaian analisis perhitungan keselamatan teras reaktor yang selanjutnya disusun dalam bentuk laporan analisis keselamatan (LAK) dan disampaikan kepada badan regulasi guna perijinan. Inseri bahan bakar uji berisi uranium tingkat muat tinggi akan menambah reaktivitas teras, sehingga perlu dilakukan analisis dan strategi agar kesetimbangan neraca reaktivitas tetap terjaga. Untuk itu diperlukan pemilihan jenis analisis keselamatan. Analisis pengaruh inseri reaktivitas terbesar yang mungkin terjadi terhadap karakteristik elemen bakar uji dilakukan menggunakan program perhitungan transien teras reaktor. Metode yang dilakukan adalah melakukan simulasi penambahan reaktivitas menggunakan variabel daya awal reaktor saat terjadi kecelakaan, masing-masing 1W dan 15MW pada kedua jenis bahan bakar uji. Kondisi transien sejak penambahan reaktivitas diamati hingga terjadi *scram* akibat sistem proteksi terlampaui. Kecelakaan inseri reaktivitas (RIA) yang terjadi pada daya awal 1W akan menyebabkan reaktivitas dan daya maksimum yang dicapai lebih tinggi daripada daya awal 15MW. Inseri kedua EBU dengan tingkat muat 4,8g U/cm³ dan 5,2g U/cm³ dapat dilakukan dengan pola pemuatan EBU secara bergantian. Terdapat margin keselamatan terhadap instabilitas aliran yang cukup pada inseri kedua EBU.

Kata kunci: uranium tingkat muat tinggi, EBU silisida 4,8g U/cc, EBU silisida 5,2g U/cc, RIA, RSG-GAS

ABSTRACT

RIA ANALYSIS of SILICIDE TESTING FUEL ELEMENT with HIGH FUEL LOADING in RSG-GAS REACTOR CORE. *Fabrication technology to produce the high fuel loading of silicide fuel element that have been done by PT BATEK recently entering into irradiation test phase. Two testing fuel elements with each are 3 fuel plate of 4,8gU/cc between 18 dummy fuel plate and 5,2gU/cc, respectively are irradiated in irradiation position in RSG-GAS reactor core, currently use silicide fuel element of 2,96gU/cc. Irradiation of silicide testing fuel elements have been done thorough many calculation analysis of reactor core safety then preparing of safety analysis report to get the permit from regulatory body. Insertion of silicide testing fuel element with high fuel loading will rising the core reactivity, suppose the reactivity balance is maintained therefore are needed to develop analysis and strategy. The safety analysis are selected. Probability of biggest reactivity insertion fluency to the silicide testing fuel element analyzed by using reactor core transien calculation. The method applied is simulation of reactivity addition using initial reactor power level while accident, each are 1W and 15MW selected on both of silicide testing fuel element. Transien condition from accident began until scram due to protectio systemn, are observed. Initial power of reactivity insertion accident (RIA) on 1W will trigger the maximum reactivity and power higher than 15MW. Insertion of two testing fuel element can be done by loading management. From the safety aspect, there is enough safety margin for silicide fuel element with high fuel loading for both testing fuel element.*

Key words: high fuel loading uranium, silicide testing fuel element 4,8g U/cc, 5,2g U/cc, RIA, RSG-GAS

PENDAHULUAN

Sejak awal komisioning Reaktor Serba Guna GA Siwabessy telah menggunakan bahan bakar uranium dengan pengayaan rendah sebesar 19,75% dari jenis uranium oksida U₃O₈Al.

Penggunaan bahan bakar tingkat muat rendah ini sesuai dengan program RERTR (*Reduced Enrichment for Research and Testing Reactor*) yang telah dicanangkan untuk mengganti penggunaan bahan bakar uranium pengayaan

tinggi (> 93 % U-235) dengan uranium pengayaan rendah (< 20 % U-235). Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi penyalahgunaan uranium pengayaan tinggi untuk senjata nuklir [1]. Sebagai konsekuensi penggunaan bahan bakar uranium pengayaan rendah, U-235 yang dapat dimuatkan ke dalam bahan bakar dengan disain yang sama menurun menjadi hampir 1/5-nya. Untuk mengatasi hal itu maka perlu dipilih bahan bakar yang memiliki densitas tinggi yang dapat dijadikan sebagai alternatif, dan salah satu bahan bakar nuklir yang memenuhi persyaratan di atas adalah paduan uranium silisida. Bahan bakar U_3Si_2-Al mempunyai keunggulan diantaranya adalah mampu diproduksi dengan tingkat muat uranium lebih tinggi dengan tingkat kegagalan produksi rendah dan stabil selama proses iradiasi di dalam reaktor [1]. Karena kehandalannya tersebut, maka bahan bakar U_3Si_2-Al dikembangkan ke arah densitas tinggi. Paduan U_3Si_2 telah berhasil difabrikasi dan dikualifikasi untuk tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ oleh *US Nuclear Regulatory Commission* pada 1988 [2].

Sejak tahun 1989 PT. BATAN Teknologi (Persero) telah melakukan penelitian bahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat uranium $2,96 \text{ g/cm}^3$, dan pada tahun 1998 telah dialihkan sepenuhnya untuk memproduksi bahan bakar U_3Si_2-Al [3]. Hal ini dilakukan untuk memenuhi permintaan RSG-GAS sehubungan dengan rencana konversi bahan bakar teras reaktor dari jenis oksida menjadi silisida dengan tingkat muat yang sama. Hasil produksi ini memiliki kinerja yang baik terbukti telah digunakannya bahan bakar U_3Si_2-Al tingkat muat uranium $2,96 \text{ g/cm}^3$ di RSG-GAS selama ini. Sementara itu penggunaan bahan bakar tingkat muat tinggi telah digunakan di berbagai reaktor riset di dunia karena memiliki umur tinggal lebih lama daripada tingkat muat rendah sehingga berdampak pada nilai ekonomi bahan bakar reaktor nuklir. Untuk menanggapi peluang ekspor dan kemungkinan penggunaan bahan bakar tingkat muat tinggi di RSG-GAS, PT BATEK merencanakan akan memproduksi bahan bakar U_3Si_2-Al pengayaan <20% U_{235} tingkat muat uranium $4,8 \text{ g/cm}^3$ dan $5,2 \text{ g/cm}^3$ menjadi elemen bakar standard. Rencana tersebut memerlukan lisensi dan kualifikasi bahan bakar dengan tingkat muat tersebut [4,5]. Pengujian prototipe dilakukan dengan mengiradiasi elemen bakar uji di teras reaktor yang berbahan bakar standard $2,96 \text{ g/cm}^3$. Iradiasi elemen bakar uji dengan tingkat muat tinggi di posisi iradiasi akan menambah volume bahan bakar uranium dan berdampak pada penambahan reaktivitas teras reaktor. Jumlah pelat bahan bakar yang akan diiradiasi perlu dibatasi dan diatur waktu iradiasinya sehingga tidak mengganggu kesetimbangan neraca reaktivitas.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keselamatan teras RSG-GAS dan elemen bakar uji akibat insersi reaktivitas.

Analisis keselamatan iradiasi pada insersi elemen bakar uji terhadap RIA dilakukan dengan perhitungan simulasi kecelakaan reaktivitas pada dua daya awal yaitu daya rendah dan daya tinggi. Untuk simulasi kecelakaan pada daya rendah dipilih daya awal 1W, sedangkan pada daya tinggi dipilih daya awal maksimum 15MW. Perhitungan karakteristik elemen bakar uji dilakukan pada masing masing tingkat muat uranium yaitu $4,8 \text{ g/cm}^3$ dan $5,2 \text{ g/cm}^3$. Analisis dilakukan dengan menggunakan program dinamika transien reaktor riset.

TEORI DAN PEMODELAN

Analisis transien kecelakaan insersi reaktivitas terhadap kinerja bahan bakar uji dilakukan dengan menggunakan program PARET. Program ini merupakan penggabungan dari aspek-aspek neutronik, hidrodinamik dan perpindahan panas yang dirancang untuk memprediksi kejadian dan akibat dari suatu kecelakaan teras reaktor pada kondisi transien. Kasus transien dapat terjadi karena transien daya atau transien akibat penurunan laju alir pendingin reaktor. Transien daya disimulasikan dengan adanya insersi reaktivitas sebagai fungsi waktu atau daya merata teras reaktor sebagai *derivative* waktu, yang dinyatakan dengan persamaan di bawah ini [6]:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{R(t) - \beta}{\Lambda} P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta f_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t), i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (2)$$

Sedangkan energi yang dilepaskan, $E(t)$, ditentukan dengan korelasi:

$$\frac{dE(t)}{dt} = P(t) \quad (3)$$

dengan:

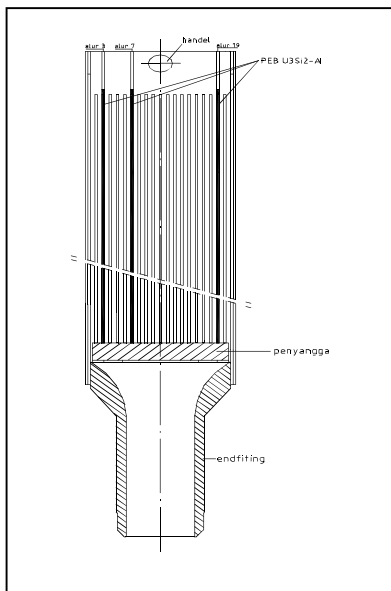
- Λ = waktu generasi neutron serempak
- λ_i = konstanta peluruhan prekursor neutron lambat grup i
- β = fraksi neutron lambat efektif
- C_i = konsentrasi prekursor neutron lambat grup I
- f_i = fraksi neutron lambat grup I, β_i/β
- $S(t)$ = sumber
- $P(t)$ = transien daya

Insersi reaktivitas akan menyebabkan kenaikan daya tak berhingga, tetapi dalam

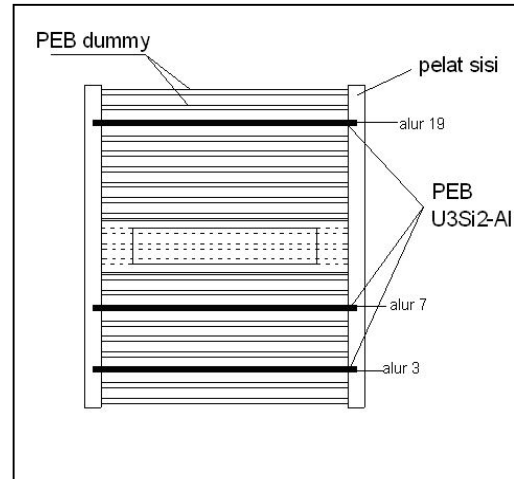
pengoperasian reaktor secara nyata hal ini tidak boleh terjadi, untuk mengatasinya maka reaktor dilengkapi dengan sistem proteksi. Dalam hal ini sistem proteksi RSG-GAS akan melindungi pengoperasian reaktor pada dua tingkat pengoperasian daya yaitu daya rendah dan daya tinggi. Pada daya rendah reaktor akan diproteksi pada 15% daya sedangkan pada rentang daya tinggi sebesar 112% dari daya *existing*. Untuk melihat karakteristik teras, pendingin dan bahan bakar akibat saat tercapainya kondisi *scram* akibat RIA maka dilakukan simulasi pada perbedaan daya yang ekstrim yaitu 1W dan 15MW. Daya 1W adalah daya terendah yang diasumsikan setelah reaktor kritis, sedangkan daya 15MW adalah pengoperasian reaktor pada daya eksisting.

Elemen Bakar Uji

Elemen bakar uji U_3Si_2-Al terdiri dari dua jenis tingkat muat, masing-masing adalah 4,8 dan 5,2g U/cm^3 . Setiap EBU tersusun dari 21 pelat elemen bakar dengan komposisi 18 pelat elemen bakar *dummy* dan 3 pelat elemen bakar U_3Si_2-Al 4,8 atau 5,2g U/cm^3 . PEB U_3Si_2-Al dirakit pada alur nomor 3; 7 dan 19 dengan cara menyisipkan ke dalam alur tersebut, sedangkan 18 pelat elemen bakar *dummy* dirakit dengan teknik rol gencet. Elemen bakar uji U_3Si_2-Al ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2 [7].



Gambar 1. EBU U_3Si_2-Al



Gambar 2. Pandangan atas EBU U_3Si_2-Al

Kedua elemen bakar dengan tingkat muat 4,8g U/cm^3 dan 5,2g U/cm^3 kemudian diiradiasi di posisi G-7 dan B-6, posisi ini dipilih karena dari hasil perhitungan neutronik dari keempat posisi IP (*IP=irradiation position*) RSG-GAS, kedua posisi ini memiliki faktor puncak daya yang terendah. Posisi iradiasi untuk EBU 5,2 g/ cm^3 ditempatkan di posisi IP B-6 agar memberikan dampak perubahan reaktivitas yang relatif kecil, sedangkan EBU 4,8g U/cm^3 di posisi G-7, keduanya memiliki faktor puncak daya radial yang sama yaitu 2,57. Konfigurasi teras RSG-GAS berbahan bakar 2,96g U/cm^3 tempat di mana kedua EBU akan diiradiasi ditunjukkan pada Gambar 3.

K	BS+	BE	BE		BE	BE	BE	BS+	BE	BE
J	BE	BS+	BE		BE	BE	BE	BE	BS+	BE
H	BE	EB	EB	EB	EB	EB	EB	BE	BE	BS+
G	BE	EB	EB	IP	EK	EB	EB	BE	BE	BE
F	EB	EB	EK	EB	EB	EK	EB	EB	BE	PN RS
E	EB	EK	EB		CIP		EB	IP	EB	BE
D	EB	IP	EB		EB	EK	EB	BE	BE	HY RS
C	EB	EB	EK	EB	EB	EK	EB	EB	BE	HY RS
B	BS+	EB	EB	EK	IP	EB	EB	BE	BE	HY RS
A	BE	EB	EB	EB	EB	EB	EB	BE	BS+	BE
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Beryllium Block Reflector

Keterangan :

- EB = Elemen bakar standar
- EK = Elemen bakar kendali
- BE = Elemen reflektor
- BS+ = Elemen reflektor dengan penyumbat
- IP = Posisi iradiasi
- CIP = Posisi iradiasi pusat
- PNRS = Sistem pneumatik
- HYRS = Sistem hidraulik

Gambar 3. Konfigurasi teras setimbang reaktor RSG-GAS

Pemodelan dan Asumsi

Analisis keselamatan iradiasi elemen bakar uji tingkat muat tinggi dilakukan dengan menggunakan data input hasil perhitungan fisika teras dan kesetimbangan neraca reaktivitas. Berdasarkan hasil tersebut dapat ditentukan faktor puncak daya radial terendah di posisi iradiasi agar fluks panas yang dibangkitkan tidak terlalu tinggi

mengingat elemen bakar uji yang diiradiasi memiliki tingkat muat yang lebih tinggi dibandingkan dengan elemen bakar eksisting, artinya bahwa fluks panas yang dihasilkan juga akan besar. Untuk menganalisis karakteristik elemen bakar uji digunakan spesifikasi termal elemen bakar uji dengan masing masing tingkat muat seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Fraksi volume bahan bakar, panas spesifik dan konduktifitas panas.

TMU, g/cm ³	4,8	5,2
Fraksi volume U ₃ Si ₂ /daging, Fv	0,4243	0,4597
Fraksi berat U/(U ₃ Si ₂ -Al), WU	0,724376	0,749513
Panas spesifik=0,892+ 0,00046 T – Wu (0,749 + 0,00038 T); j/g	0,34944 + 0,000185*T	0,330615 + 0,000175*T
Konduktivitas panas; W/m/K	43 - 0,000012*T/300	40 - 0,000012*T/300

Skenario kecelakaan pada simulasi pemodelan pertama adalah sebagai berikut: Ketika reaktor sudah mencapai kondisi kritis dan sedang dioperasikan pada tingkat daya rendah tiba tiba terjadi kecelakaan akibat insersi reaktivitas, diasumsikan daya awal 1W, akibat terjadi reaktivitas positif maka daya akan meningkat, demikian pula dengan pendingin dan kelongsong serta *meat* elemen bakar. Daya reaktor akan meningkat hingga reaktor mengalami scram akibat mencapai proteksi daya rendah.

Pada simulasi kecelakaan kedua, diasumsikan reaktor sedang beroperasi pada tingkat daya tinggi yang saat ini dioperasikan oleh RSG-GAS yaitu 15MW, tiba tiba terjadi kecelakaan RIA, dampak yang sama akan terjadi yaitu peningkatan daya akibat bertambahnya reaktivitas bahan bakar, meningkatkan daya, temperatur pendingin dan kelongsong bahan bakar meningkat. Dalam simulasi saat terjadi kecelakaan reaktivitas baik pada daya awal yang rendah maupun tinggi, dianggap bahwa sistem pendingin primer maupun sekunder tetap beroperasi. Dampak kecelakaan insersi reaktivitas pada daya awal untuk karakteristik masing masing elemen bakar uji kemudian dianalisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat dua penambahan reaktivitas yang perlu dicermati yaitu penambahan reaktivitas akibat insersi EBU tingkat muat tinggi dan kecelakaan akibat insersi reaktivitas (RIA). Pada analisis neraca reaktivitas RSG-GAS akibat insersi dua EBU tingkat muat tinggi pada teras reaktor yang berisi 40 elemen bakar standard dan 8 elemen kendali dengan tingkat muat 2,96g U/cm³, telah dihitung dalam program perhitungan terpisah menggunakan WIMSD-4, Batan-EQUIL-

2D dan Batan-3DIFF [7]. Penentuan posisi iradiasi EBU yang terbaik dilakukan dengan syarat bahwa posisi terpilih merupakan posisi yang memiliki perubahan reaktivitas, perubahan pembangkitan panas dan faktor pembangkitan panas di EBU yang serendah mungkin, dan masuknya dua buah EBU masih menjamin dipenuhinya kriteria *one stuck rod* atau dapat diartikan bahwa margin padam reaktor harus ≥ 0,5% Δk/k [7,8]. Persyaratan ini terpenuhi dengan diperolehnya posisi iradiasi yang memiliki factor puncak daya dan perubahan reaktivitas yang terendah yaitu posisi B-6 dan G-7 dengan faktor puncak daya sebesar 2,57, serta dengan mengatur strategi insersi EBU, dengan mencabut pelat EBU satu persatu dan menggantinya dengan dummy setelah mencapai siklus tertentu. Dengan strategi ini maka neraca reaktivitas dan margin padam tetap terjaga.

Analisis keselamatan terhadap RIA dilakukan setelah diperoleh hasil perhitungan fisika teras guna menentukan faktor puncak daya total pada EBU dengan tingkat muat 4,8g U/cm³ dan 5,2g U/cm³, menggunakan sifat termik masing masing EBU.

Elemen Bakar Uji Tingkat muat 4,8g U/cm³

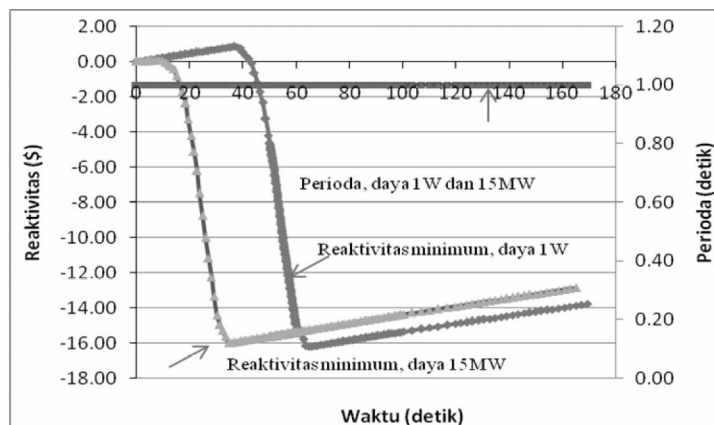
Elemen bakar uji dengan tingkat muat 4,8g U/cm³ diiradiasi di posisi IP G-7, dengan faktor puncak daya radial dan aksial masing masing sebesar 2,57 dan 1,294. Distribusi fluks panas sepanjang bahan bakar dilakukan dengan memperhitungkan kondisi terparah, yang mungkin terjadi. Sistem pendingin primer dalam kasus ini dianggap tetap beroperasi. Pada kecelakaan RIA yang terjadi pada daya 1W, daya reaktor akan meningkat hingga mencapai daya rendah terproteksi sebesar 2,25MW, sedangkan

RIA yang terjadi saat reaktor sedang beroperasi pada daya eksisting 15MW, akan terproteksi pada daya 17,2MW. Yang dimaksud dengan terproteksi di sini adalah sistem keselamatan disetting/diatur pada tingkat daya tersebut, sehingga reaktor akan padam dengan sendirinya (*scram*) ketika mencapai batas tersebut. Hasil perhitungan yang dilakukan pada masing masing daya awal terjadinya RIA dapat dilihat pada Gambar 4 s.d Gambar 7.

Pada saat RIA daya rendah 1W tampak bahwa terjadi penambahan reaktivitas positif, trip karena *over power* terjadi pada detik ke 38,47,

dimana terdapat reaktivitas positif pada daya trip 2,74MW. Reaktivitas maksimum mencapai 0,846\$ terjadi sebelum reaktor trip yaitu detik ke 36,63. Segera setelah reaktor trip reaktivitas reaktor mengalami penurunan tajam mencapai nilai minimumnya -16,2\$.

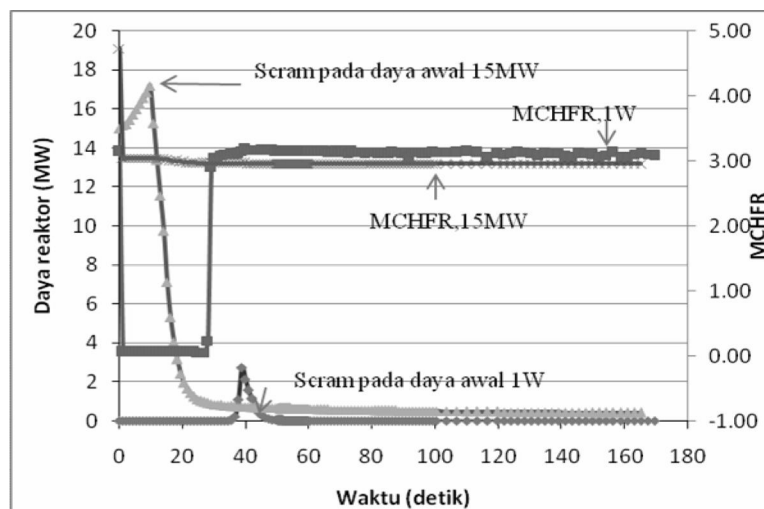
RIA daya tinggi dengan daya awal 15MW, reaktivitas positif mencapai nilai maksimumnya sebesar 0,067\$ pada saat reaktor *trip* pada detik ke 9,70, penurunan tajam mencapai nilai reaktivitas negatif minimum pada detik ke 35,2 kondisi ini berlangsung sangat cepat (Gambar 4).



Gambar 4. Transien reaktivitas dan perioda teras reaktor pada EBU 4,8g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Transien daya sebagai akibat reaktivitas positif menyebabkan peningkatan daya dari 15MW hingga mencapai daya terproteksi 17,16MW yang mengakibatkan *scram* pada detik ke 9,70. Waktu tercapainya kondisi *scram* pada daya awal 15MW jauh lebih cepat daripada RIA dengan daya awal 1W (detik 36,63). Marjin

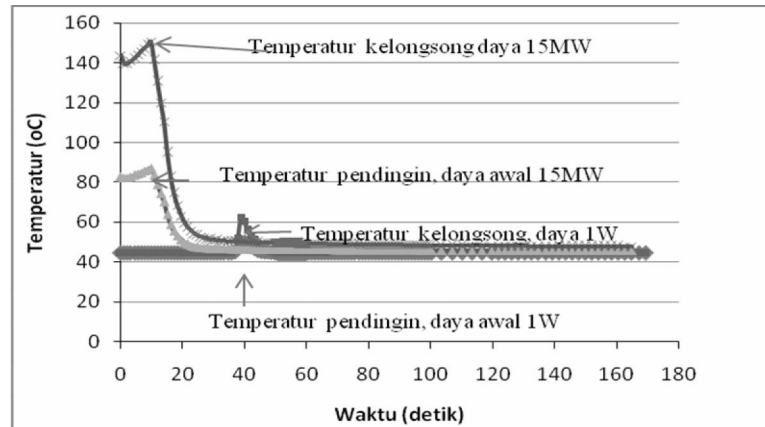
terhadap fluks panas kritis pada RIA daya rendah sempat mencapai nilai minimumnya sebesar 3,15, sebelum kembali pada kondisi awal sebesar 14. Pada RIA daya tinggi hal ini menunjukkan nilai yang cenderung stabil karena transien menuju daya terproteksi hanya berlangsung sebentar (Gambar 5).



Gambar 5. Transien daya dan MCHFR pada EBU 4,8g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Temperatur pendingin dan kelongsong EBU tingkat muat 4,8g U/cm³ ditunjukkan pada Gambar 6. Meskipun transien berlangsung lebih lama, RIA pada daya awal 1W menyebabkan temperatur pendingin dan kelongsong maksimum masing masing sebesar 50,18°C dan 62,34°C, kedua temperatur ini lebih rendah daripada RIA

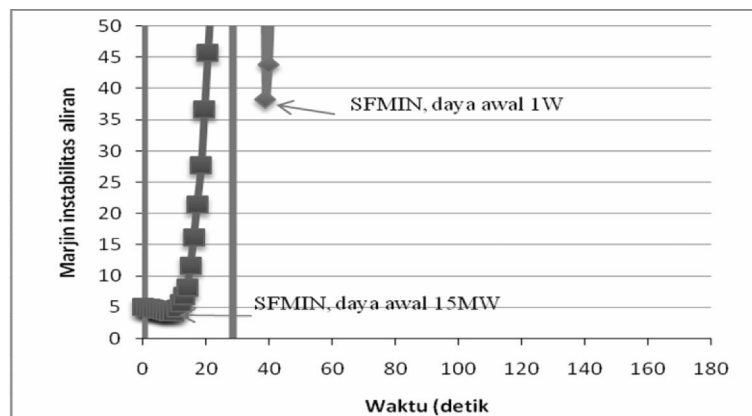
pada daya tinggi, 87,06°C dan 150,54°C. Perbedaan temperatur maksimum cukup signifikan pada daya awal RIA disebabkan karena beda pengaturan daya terproteksi. Pendingin primer yang tetap beroperasi menyebabkan temperatur maksimum yang dicapai tidak menyebabkan pelelehan kelongsong.



Gambar 6. Transien pendingin dan kelongsong pada EBU 4,8g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Transien reaktivitas dan temperatur pendingin dan kelongsong menyebabkan transien margin instabilitas aliran. Minimum margin instabilitas aliran yang merupakan salah satu parameter keselamatan teras, pada daya awal 1W

mencapai 38,49, sementara pada daya tinggi sebesar 4,10. Parameter hasil analisis perhitungan RIA pada EBU 4,8g U/cm³ dirangkum pada Tabel 2.



Gambar 7. Margin instabilitas aliran pada EBU 4,8g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Tabel 2. Hasil perhitungan insersi reaktivitas teras RSG-GAS tingkat muat 4,8g U/cm³

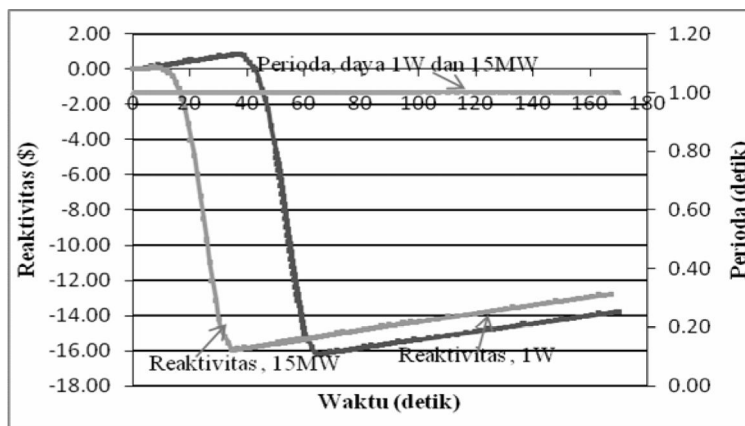
Daya saat insersi	Daya maksimum yang tercapai MW	Reaktivitas total maks. \$	Temp. Pendingin °C	Temp. Kelongsong/ b.bakar °C	Margin instabilitas aliran minimum
1W	2,74	0,846	50,18	62,34/64,16	38,29
15MW	17,16	0,067\$	87,06	150,54/162,64	4,10

Elemen Bakar Uji Tingkat muat 5,2g U/cm³

Elemen bakar uji dengan tingkat muat 5,2g U/cm³ yang diuji di sini belum digunakan oleh reaktor riset manapun, penelitian ini merupakan langkah maju yang dilakukan PT BATEK. Hasil simulasi perhitungan yang dilakukan untuk mendukung penyusunan laporan analisis keselamatan dilakukan dengan metode yang sama seperti EBU dengan tingkat muat 4,8g U/cm³. Faktor puncak daya yang diperoleh dari hasil perhitungan neutronik memberikan hasil bahwa faktor puncak daya radial dan aksial masing masing di posisi iradiasi B-6 masing masing sebesar 2,57 dan 1,509. Hasil analisis

perhitungan menggunakan faktor nuklir dan teknis EBU dengan tingkat muat 5,2g U/cm³ ditunjukkan pada Gambar 8 s.d Gambar 11.

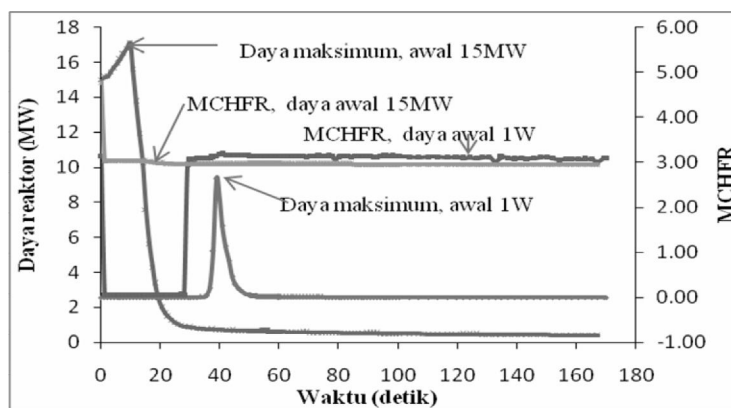
Transien reaktivitas pada daya awal 1W pada EBU memberikan reaktivitas maksimum sebesar 0,846\$ yang terjadi pada detik ke 38,53, trip reaktor menyebabkan penurunan reaktivitas negatif minimum hingga mencapai -15,6\$ pada detik ke 90,7. Sedangkan RIA pada daya awal 15MW menyebabkan reaktivitas positif maksimum sebesar 0,066\$, segera setelah *scram* reaktivitas negatif minimum mencapai -15,9\$ pada detik ke 35,2 (Gambar 8)



Gambar 8. Transien reaktivitas dan perioda teras reaktor pada EBU 5,2g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Transien RIA dengan daya awal 1W mencapai daya *trip* 2,63MW pada detik ke 38,53 lebih lambat daripada *trip* RIA daya 15MW pada detik ke 9,91 dengan daya maksimum 17,13MW. Marjin terhadap fluks panas kritis pada daya awal

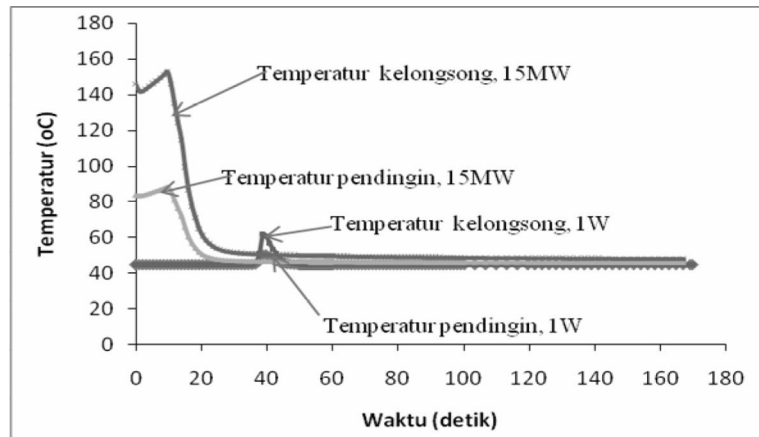
1W mencapai nilai minimum sebesar 2,9. Sedangkan pada daya awal 15MW, nilai ini relatif stabil (Gambar 9).



Gambar 9. Transien daya dan MCHFR pada EBU 5,2g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Transien pendingin dan kelongsong EBU mengikuti sifat transien daya reaktor. Pada RIA dengan daya awal 1W terlihat bahwa temperatur puncak terjadi saat reaktor mencapai daya maksimum sebelum scram, temperatur pendingin dan kelongsong masing masing sebesar

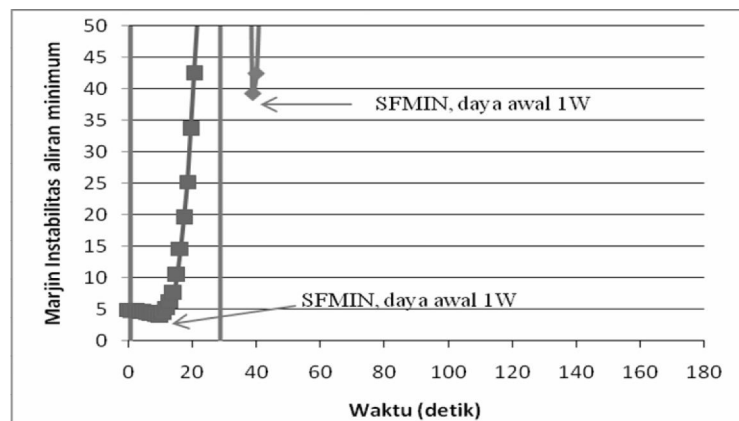
50,06°C dan 61,98°C. Kondisi yang sama terjadi pada daya awal 15MW masing masing sebesar 88,25°C dan 152,81°C. Perbedaan temperatur yang signifikan terjadi karena daya awal pengoperasian reaktor (Gambar 10).



Gambar 10. Transien pendingin dan kelongsong pada EBU 5,2g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Marjin terhadap instabilitas aliran pada kedua RIA daya awal menunjukkan perbedaan yang signifikan masing masing sebesar 39,18 dan 3,97. Keduanya berada jauh di atas marjin minimum

transien yang dipersyaratkan yaitu 1,48 (Gambar 11). Rangkuman hasil analisis perhitungan RIA pada EBU 5,2g U/cm³ ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 11. Marjin instabilitas aliran pada EBU 5,2g U/cm³, daya awal 1W dan 15MW

Tabel 3. Hasil perhitungan insersi reaktivitas teras RSG-GAS tingkat muat 5,2 U/cc

Daya saat insersi	Daya maksimum yang tercapai MW	Reaktivitas total maks. \$	Temp. Pendingin °C	Temp. Kelongsong °C	Marjin instabilitas aliran minimum
1W	2,63	0,846	50,06	61,98/63,95	39,18
15MW	17,13	0,066	88,25	152,81/166,42	3,97

KESIMPULAN

Dari analisis yang dilakukan pada EBU tingkat muat $4,8\text{g U/cm}^3$ menunjukkan bahwa RIA pada daya rendah 1W berlangsung lebih lama dan menghasilkan reaktivitas positif yang lebih besar daripada RIA yang terjadi pada daya awal 15MW, akan tetapi adanya pembatasan proteksi daya pada pengoperasian reaktor pada daya rendah, menunjukkan bahwa antisipasi transien ini masih memenuhi margin keselamatan yang diijinkan. Margin keselamatan terhadap instabilitas aliran minimum pada daya awal 15MW menunjukkan nilai 3,97, meskipun cukup rendah dibandingkan dengan daya awal 1W, akan tetapi margin ini masih memenuhi persyaratan transien sebesar 1,48.

Pada analisis yang dilakukan pada EBU dengan tingkat muat $5,2\text{g U/cm}^3$ menunjukkan bahwa reaktivitas positif akibat RIA pada daya 1W adalah 0,846\$ jauh lebih tinggi daripada RIA pada daya 15MW sebesar 0,66\$. Umpan balik reaktivitas terjadi sehingga reaktor dapat memproteksi diri untuk kembali mencapai nilai reaktivitas negatifnya.

Inseri kedua EBU dengan tingkat muat $4,8\text{g U/cm}^3$ dan $5,2\text{g U/cm}^3$ dapat dilakukan dengan pola pemuatan EBU secara bergantian. Terdapat margin keselamatan terhadap instabilitas aliran yang cukup pada inseri kedua EBU.

UCAPAN TERIMA KASIH

Analisis ini merupakan bagian dari Program Insentif dengan judul "Penguasaan Dan Pengembangan Teknologi Fabrikasi Elemen Bakar U₃Si₂-Al Tingkat Muat Uranium 4,8 dan $5,2\text{ g/cm}^3$ " dengan biaya RISTEK. Terima kasih kami ucapkan kepada RISTEK selaku pemberi dana, Ir. Budi Briyatmoko M.Eng, selaku peneliti utama, rekan rekan peneliti, Ir Suparjo, MT, Dr. Suwardi, Ir. Tagor Malem Sembiring, Dr. Sigit, Abdul Rojak S.Si. atas kerjasamanya.

DAFTAR PUSTAKA

1. LANGUILLE, J.P. DURAND and A. GAY, "New High Density MTR Fuel The CEA-CERCA-COGEMA Development Program", Transaction of The 2nd Topical Meeting on RRFM Bruges, Belgia 1998.
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission: Safety Evaluation Report Related to the Evaluation of Low Enriched Uranium Silicide Aluminum Dispersion Fuels for Use in Non Power Reactors, U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG-1313 (July 1988).
3. SURIPTO, A., SIGIT, MUTHALIB, ADIWARDYO, SUPARJO, RERTR-Related Program in Indonesia, 2003

International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor, Chicago, Illinois, October 5-10, 2003.

4. BUDI BRIATMOKO dkk, "Pengembangan Bahan Bakar Silisida Tingkat Muat Tinggi", Riset Insentif, PTBN-BATAN, Serpong, 2006.
5. SUPARDJO, H NASUTION, A.ROJAK, B.G SUSANTO, BOYBUL DAN E.P.HASTUTI, "Percobaan Pembuatan PEB (PEB) U₃Si₂-Al TMU 4,80 dan 5,20 g/cm^3 dengan perkayaan 19,89% U-235 Untuk Sampel Uji Iradiasi", Prosiding Seminar Nasional Daur Bahan Bakar, Serpong, 27 Agustus 2003
6. WOODRUFF, W.L., 1984, "A User Guide for the Current ANL Version of the PARET Code", NESC.
7. ENDIAH PH, TAGOR MS, SUPARJO, SUWARDI., "Laporan Analisis Keselamatan Inseri EBU Silisida Densitas 4,8 dan 5,2 g U/cm^3 di Teras RSG-GAS", Serpong, 2008.
8. BATAN, "Safety Analysis Report of the Indonesian Multipurpose Reactor GA-Siwabessy", Rev.8, Maret 1999.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

1. Apakah peningkatan tingkat muat bahan bakar akan mengubah konfigurasi bentuk teras RSG GAS
(Endang Susilowati, PRSG-BATAN)
2. Apakah *enrichment* tetap?
3. Prospek penerapannya?
(Syahrir, PTLR-BATAN)

Jawaban :

1. Peningkatan tingkat muat bahan bakar RSG GAS akan memperpanjang waktu tinggal sehingga lebih ekonomis, *grid* teras RSG GAS tidak berubah dengan adanya peningkatan muat bahan bakar.
2. *Enrichment* tidak berubah (19,75%) karena sudah menjadi ketentuan IAEA untuk menggunakan bahan bakar tingkat muat rendah (*low enrich uranium*)
3. Bahan bakar tingkat muat 4,8 gr U/cc sangat prospektif untuk diproduksi oleh PT BATEK apabila tahap penelitian dan sertifikasi dicapai, karena telah digunakan diberbagai reaktor riset di dunia, demikian pula RSG GAS nantinya.