

## ANALISIS TRANSIEN AKIBAT KEHILANGAN ALIRAN PENDINGIN PADA TERAS SILISIDA RSG-GAS MENGGUNAKAN KODE EUREKA-2/RR

Oleh

Muh. Darwis Isnaini

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN

### ABSTRAK

**ANALISIS TRANSIEN AKIBAT KEHILANGAN ALIRAN PENDINGIN PADA TERAS SILISIDA RSG-GAS MENGGUNAKAN KODE EUREKA-2/RR.** Telah dilakukan suatu analisis transien terhadap teras silisida RSG-GAS akibat kehilangan aliran pendingin (LOFA). LOFA dapat terjadi jika catu daya listrik pompa pendingin primer mati, maka laju alir pendingin berkurang. Pada saat laju alir pendingin berkurang 15% yang mengakibatkan sistem proteksi reaktor bekerja. Analisis dilakukan dengan menggunakan kode EUREKA-2/RR. Analisis ini ditekankan untuk mempelajari karakteristik keselamatan termohidrolika segera setelah reaktor scram dan setelah terjadi aliran balik akibat terbukanya katup sirkulasi alam. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi LOFA, scram terjadi 3,05 detik setelah awal kecelakaan. Suhu maksimum *meat* bahan bakar, kelongsong dan suhu keluaran pendingin pada kanal terpanas masing-masing adalah 143,94°C, 139,85°C dan 77,67°C, serta DNBR minimum 1,26. Suhu *meat*, kelongsong dan pendingin akan berkurang, seiring dengan berkurangnya laju alir pendingin. Katup sirkulasi alam membuka pada detik ke 68,2 setelah awal scram terjadi, dan terjadi perubahan aliran dari konveksi paksa ke konveksi alam. Perubahan ini menyebabkan suhu maksimum *meat* bahan bakar, kelongsong naik masing-masing mencapai 131,42°C dan 131,10°C terjadi 72,10 detik setelah reaktor trip, sedangkan suhu maksimum pendingin keluar teras mencapai 78,7°C terjadi pada 70,7 detik setelah reaktor trip, DNBR minimum sebesar 1,65 pada detik ke-69,2. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa operasi teras silisida RSG-GAS pada kondisi transien akibat kehilangan aliran pendingin masih selamat.

Kata kunci: analisis transien, teras silisida RSG-GAS, LOFA.

### ABSTRACT

**TRANSIENT ANALYSIS CAUSED OF LOSS OF FLOW ACCIDENT ON RSG-GAS SILICIDE CORE USING EUREKA-2/RR CODE.** Transient analysis against the silicide core of RSG-GAS caused of loss of flow accidents (LOFA) has been carried out. The LOFA would be occurred if the electricity supply for the primary coolant pump loosed, and it will make the primary coolant flow decreased. When the primary coolant flow decreased 15%, the trip signal will be initiated by reactor protection system. The analysis was done using EUREKA-2/RR code. The analysis was focused on thermal-hydraulic characteristic just after the reactor scram and after natural circulation flaps opened. The analysis results showed that the reactor scram takes place 3.05 sec after the accident is initiated. The fuel *meat* maximum temperature, fuel surface temperature and exit channel coolant temperature each were 143.94°C, 139.85°C and 77.67°C, respectively, and the minimum DNBR was 1.26. At parallel time, the fuel, cladding and coolant temperatures would decreased, followed the primary flow rate decreased. The natural circulation flaps opened at 68.2 second after the scram initiation, the flow rate changed from forced convection to natural convection. The reversal flow rate cause the fuel *meat* and cladding temperature increase and reach to the maximum temperatures of 131.42°C and 131.10°C, respectively, at 72.10 second after scram initiation, whereas the maximum exit coolant temperature reaches 78.7°C at 70.7 second and the minimum DNBR is 1.65. The results could be summarized that the operation of RSG-GAS silicide core on transient condition caused LOFA still operated safely.

*Key words: transient analysis, RSG-GAS silicide core, LOFA.*

### PENDAHULUAN

Untuk mendapatkan ijin operasi dari Badan Regulasi (BAPETEN), maka analisis keselamatan harus dibuat untuk meyakinkan kecukupan margin keselamatan pada kondisi normal dan abnormal dari reaktor, dan dituliskan di dalam Laporan

Analisis Keselamatan (LAK). Sebagai bagian dari analisis keselamatan RSG-GAS teras silisida, karakteristik termohidrolika selama kejadian transien yang diakibatkan diakibatkan oleh kehilangan pendingin aliran (*Loss of Flow Accidents-LOFA*) harus dilakukan.

Makalah ini merupakan bagian dari laporan kegiatan workshop Forum Kerjasama Nuklir di Asia (*Forum for Nuclear Cooperation in Asia – FNCA*) yang diselenggarakan di Beijing, China, pada tanggal 13 – 17 September 2010<sup>[1]</sup>. Forum ini diikuti oleh 8 negara yaitu Bangladesh, China, Indonesia, Jepang, Korea Selatan, Malaysia, Thailand dan Vietnam. Di dalam workshop dibahas laporan peserta dari masing-masing negara, tentang analisis keselamatan terhadap kejadian kecelakaan reaktivitas (*Reactivity Initiated Accident – RIA*) dan analisis akibat kecelakaan akibat kehilangan aliran pendingin (*Loss of Flow Accidents – LOFA*) dengan mengambil objek penelitian reaktor riset masing-masing Negara dengan menggunakan kode yang sama yakni EUREKA-2RR<sup>[2]</sup>. Dalam forum tersebut, peserta diharapkan mendapatkan pemahaman yang sama tentang konsep keselamatan reaktor, pemodelan dan analisis keselamatan reaktor baik pada kondisi tunak (*steady state*) dan transien.

Di dalam makalah ini hanya akan disajikan hasil perhitungan untuk transien karena kehilangan aliran pendingin (LOFA) pada daya 25 MW. Pemilihan daya 25 MW ditentukan karena adanya batas DNBR minimum 1,5 yang diminta dalam forum FNCA. Sedangkan dalam desain RSG-GAS, margin keselamatan ditentukan terhadap ketidakstabilan aliran S yang besarnya 3,38 pada daya nominal 30 MW. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melengkapi analisis keselamatan yang dipersyaratkan oleh BAPETEN dan forum FNCA, guna mendapatkan tingkat keyakinan yang lebih tinggi akan keselamatan operasi RSG-GAS.

Perhitungan dan analisis termohidrolika elemen bakar silisida dengan tingkat muat 2,96 gr U/cm<sup>3</sup> ( 250 gr U-235 per elemen bakar), pada kondisi tunak telah selesai dilakukan. Analisis tersebut

dikerjakan berdasarkan hasil perhitungan neutronik pada tingkat muat tersebut. Selain analisis keselamatan termohidrolika teras pada kondisi tunak, diperlukan pula jaminan keselamatan pada kondisi transien. Analisis karakteristik termohidrolika teras silisida RSG-GAS pada kondisi transien, dilakukan untuk 3 jenis kejadian yang termasuk dalam *design basis accident*. Kecelakaan akibat hilangnya aliran pendingin di sisi primer dapat terjadi misalnya jika catu daya listrik ke pompa pendingin primer mati, maka akan berakibat berkurangnya laju alir pendingin, dan apabila laju alir berkurang 15%, maka sistem proteksi reaktor bekerja, dan reaktor akan padam (*scram*) secara otomatis. Analisis dilakukan dengan menggunakan kode (paket program computer) EUREKA-2/RR.

Untuk membuat data masukan untuk kode EUREKA-2/RR, diperlukan keluaran hasil dari 3 program kecil tambahan yaitu:

- DISSUE adalah program yang dipakai menghitung faktor pembobot distribusi daya (faktor daya dan pembobot reaktivitas umpan balik) untuk masing-masing *heat slab*. Program ini mengkonversi output analisis neutronik ke form input EUREKA2/RR.
- ICETEA adalah program untuk menghitung suhu pendingin pada tiap-tiap *node* dan *junction* dari distribusi daya pada *heat slab*. Keluaran dari program ICETEA digunakan untuk data input EUREKA2/RR dan data input PREDISCO.
- PREDISCO adalah program untuk menghitung tekanan pendingin pada tiap-tiap *node* dari suhu yang dihasilkan (*output*) dari program ICETEA dan digunakan untuk data input EUREKA2/RR.

## DESKRIPSI RSG-GAS

RSG-GAS adalah reaktor penelitian berbentuk kolam terbuka dengan daya nominal desain 30 MW termal, menggunakan pendingin dan moderator air ringan, dan reflektor berilium. Pada awalnya teras RSG-GAS menggunakan bahan bakar  $U_3O_8$ -Al (bahan bakar oksida, kerapatan uranium 2.96 g/cm<sup>3</sup>) dengan pengkayaan rendah 19.75%, dengan elemen bakar berbentuk pelat. BATAN telah melakukan program konversi teras dari bahan bakar oksida menjadi bahan bakar silisida ( $U_3Si_2$ -Al dengan densitas yang sama 2.96 g/cm<sup>3</sup>). Pada program konversi teras tersebut, tidak terjadi perubahan yang signifikan<sup>[3]</sup>

Desain teras silisida RSG-GAS mirip dengan desain teras oksida. Dimensi elemen bakar dan elemen kendali silisida sama dengan elemen bakar dan elemen kendali oksida RSG-GAS. Berdasarkan hasil perhitungan neutronik, sangat dimungkinkan untuk mengkonversi bahan bakar dari oksida ke silisida dengan densitas uranium di dalam *meat* yang sama sebesar 2,96 g/cm<sup>3</sup>. Teras reaktor tersusun atas 40 elemen bakar standar (EB) dan 8 elemen kendali (EK) dengan penyerap neutron berbentuk garpu. Terdapat posisi iradiasi pusat (CIP) yang menempati 2 x 2 posisi kisi pelat, 4 posisi iradiasi (IP) dan 5 tempat untuk insersi iradiasi (*Rabbit System – RS*)

Setiap elemen bakar terdiri atas 21 pelat sejajar, dengan ketebalan *meat* bahan bakar 0,54 mm dan kelongsong 0,38 mm. Massa total U-235 per elemen bakar 250 g. Celah kanal yang terbentuk antar pelat bahan bakar mempunyai ketebalan 2,55 mm. Teras dikelilingi dengan blok reflektor berilium berbentuk L.

Panas yang dibangkitkan di dalam teras dipindahkan oleh sistem pendingin primer ke untai sistem pendingin sekunder. Pada kondisi operasi

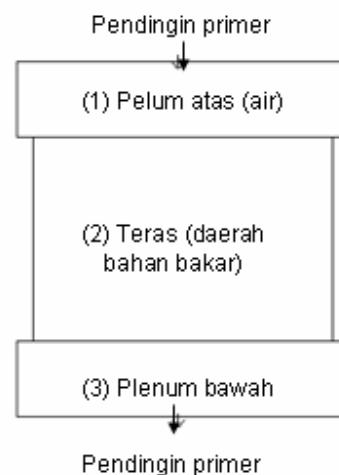
normal, pendingin di dalam teras mengalir dari arah atas ke bawah dengan laju alir minimum desain 800 kg/s, tetapi setelah reaktor padam (*shutdown*) dan pompa dimatikan, aliran akan berbalik arah dari bawah ke atas secara konveksi alam.

## METODOLOGI

Di dalam melakukan analisis transien RSG-GAS saat terjadi kecelakaan reaktivitas (RIA) dan kehilangan aliran pendingin (LOFA), dilakukan tata kerja sebagai berikut:

### Pembuatan model analisis dan data masukan

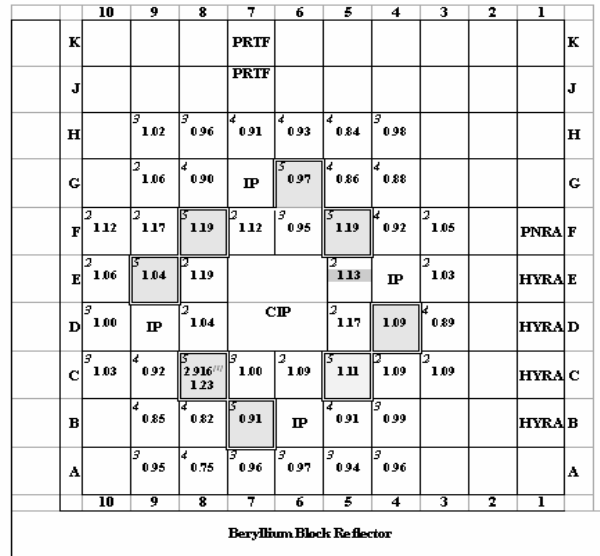
Di dalam analisis teras silisida RSG-GAS, bagian bahan bakar, plenum bawah dan bagian air di atas teras dimodelkan seperti pada Gambar 1. Di dalam model ini, elemen iradiasi, posisi iradiasi (IP dan CIP), reflektor berilium dan kanal bypass tidak ikut dimodelkan.



**Gambar 1.** Deskripsi model analisis RSG-GAS.

### Pembagian Kanal

Daerah bahan bakar dibagi menjadi 5 daerah menurut faktor puncak radial dan aksial ( $F_z$  dan  $F_R$ ). Distribusi faktor radial teras silisida RSG-GAS berdasarkan LAK RSG-GAS<sup>[3]</sup> revisi 9 dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi faktor puncak radial dalam teras silisida RSG-GAS

Dari faktor puncak radial aksial yang ada, maka dipilih satu pelat pada elemen kendali posisi C-8 sebagai kanal terpanas dengan satu kanal pendingin (kanal No. 1), sedangkan elemen bakar yang lain dibagi menjadi 3 kelompok kanal kanal No. 2, 3 dan 4, sedangkan elemen kendali dijadikan satu kelompok kanal No. 5.

Gambar 3 memperlihatkan pembagian Node dan Heat slab ke arah aksial, yang dibagi menjadi 10 segmen, yang disesuaikan dengan model analisis dengan kode EUREKA-2/RR.

**Perhitungan fraksi daya untuk masing-masing heat slab**

Fraksi daya untuk masing-masing heat slab

dihitung dengan menggunakan program DISSUE berdasarkan acuan hasil perhitungan neutronik, disajikan dalam Tabel 2.

Faktor pembobot untuk reaktivitas umpan balik dari efek suhu moderator, efek gelembung (void) dan efek doppler dihitung menggunakan program DISSUE berdasarkan hasil perhitungan distribusi fluks neutron, disajikan pada Tabel 3.

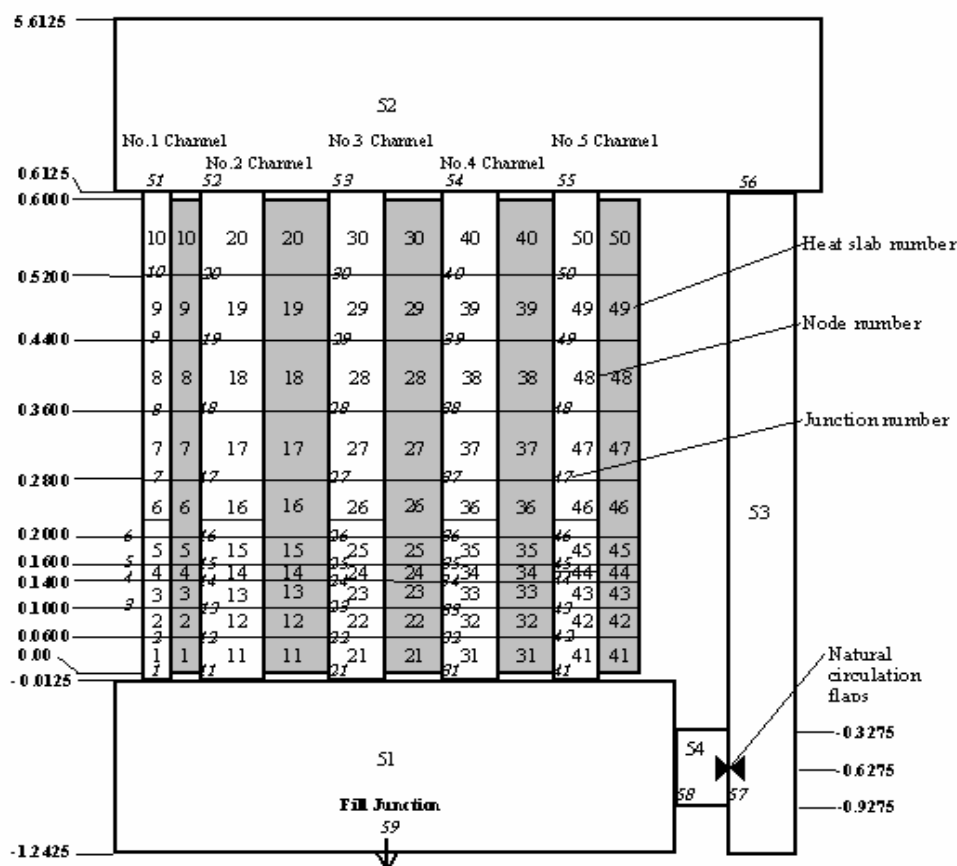
Sebagai data masukan untuk kode EUREKA-2/RR, perlu diisikan data parameter kinetik RSG-GAS, antara lain :

Fraksi neutron tunda efektif :  $\beta_{eff} = 0.00719$  (-)

Waktu hidup neutron serentak :  $\ell = 6.45 \times 10^{-5}$  (s)

**Tabel 1.** Jumlah pelat bahan bakar dan subkanal pendingin untuk masing-masing kanal model analisis EUREKA-2/RR untuk teras silisida RSG-GAS.

Jenis kanal	Jumlah pelat	Jumlah kanal pendingin	Posisi elemen bakar*
Kanal terpanas (1)	1	1	C8
Kanal rerata (2)	294	294	E8, F9, D5, E5, F7, F10, C6, C4, C3, G9, E10, F3, D8, E3
Kanal rerata (3)	273	273	C10, H9, D10, C7, B4, H4, A6, H8, A7, A4, F6, A9, A5
Kanal rerata (4)	273	273	H6, F4, C9, H7, B5, G8, D3, G4, G5, B9, H5, B8, A6
Elemen kendali (5)	119	119	B7, C8, C5, D4, E9, F8, F5, G6



Gambar 3. Model analisis teras silisida RSG-GAS untuk EUREKA-2/RR<sup>[4,5]</sup>

Tabel 2. Fraksi daya ( $\times 10^{-4}$ ) untuk masing-masing *heat slab*

Heat Slab No.	Kanal No.1	Heat Slab No.	Kanal No.2	Heat Slab No.	Kanal No.3	Heat Slab No.	Kanal No.4	Heat Slab No.	Kanal No. 5
10	1.725	20	129.396	30	157.861	40	141.342	50	76.721
9	2.347	19	260.451	29	214.817	39	192.338	49	104.403
8	3.018	18	334.914	28	276.234	38	247.323	48	134.251
7	3.517	17	390.338	27	321.947	37	288.258	47	156.469
6	4.174	16	463.224	26	382.063	36	342.083	46	185.686
5	3.239	15	359.473	25	296.490	35	265.464	45	144.095
4	1.797	14	199.394	24	164.458	34	147.249	44	79.928
3	3.431	13	380.764	23	314.051	33	281.188	43	152.630
2	3.075	12	341.223	22	281.437	32	251.988	42	136.780
1	3.985	11	442.275	21	364.783	31	326.611	41	177.286

Table 3. Faktor pembobot untuk reaktivitas umpan balik ( $\times 10^{-4}$ )

Heat Slab No.	Kanal No.1	Heat Slab No.	Kanal No.2	Heat Slab No.	Kanal No.3	Heat Slab No.	Kanal No.4	Heat Slab No.	Kanal No.5
10	1.78565	20	74.95319	30	54.84347	40	44.06947	50	29.97272
9	3.32050	19	139.37780	29	101.98318	39	81.94839	49	55.73489
8	5.46084	18	229.22130	28	167.72170	38	134.77250	48	91.66168
7	7.40615	17	310.87487	27	227.46833	37	182.78175	47	124.31434
6	10.49247	16	440.42826	26	322.26356	36	258.95366	46	176.12018
5	12.58294	15	528.16500	25	386.45829	35	310.54055	45	211.20465
4	7.72058	14	324.07521	24	237.12731	34	190.54419	44	129.59247
3	14.08103	13	591.05995	23	432.48087	33	347.51953	43	236.35562
2	11.32018	12	475.17364	22	347.68690	32	279.38248	42	190.01300
1	12.67017	11	531.82164	21	389.13443	31	312.69253	41	212.66597

Koefisien reaktivitas umpan balik void :

$$-1.34\text{E-}03 \Delta k/k/\% \text{ void}$$

Koefisien suhu moderator :  $-1.14\text{E-}04 \Delta k/k/^{\circ}\text{C}$

Koefisien suhu bahan bakar (doppler):

$$-1.92\text{E-}05 \Delta k/k/^{\circ}\text{C}$$

Gambar 4 menunjukkan diagram alir sistem kendali reaktivitas RSG-GAS, di mana terdapat 8 batang kendali di dalam teras dan masing-masing mempunyai reaktivitas padam hampir sama (perbedaan yang tidak signifikan antara satu dengan yang lain). Kecepatan penurunan batang kendali maksimum selama moda operasi otomatis, didesain sebesar 3.384 cm/min (0.0564 cm/s).

Parameter utama dalam sistem kendali reaktivitas otomatis adalah:

- *Proportional gain of PID controller* : 0.37 (cm/min)/% (Gain 100)
- Kecepatan gerak batang kendali maksimum : 3.384 cm/min
- Waktu tunda motor CRDM : 0.03 sec

Beberapa data masukan yang lain antara lain :

- (a) Faktor teknis untuk kenaikan suhu bulk 1,167,
- (b) Faktor teknis untuk fluks panas 1,20, dan
- (c) Faktor teknis untuk kenaikan suhu film 1.260.

Data masukan laju alir berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan dengan kode CAUDVAP pada teras 10, diperoleh laju alir minimum tiap elemen bakar  $46.27 \text{ m}^3/\text{j}$

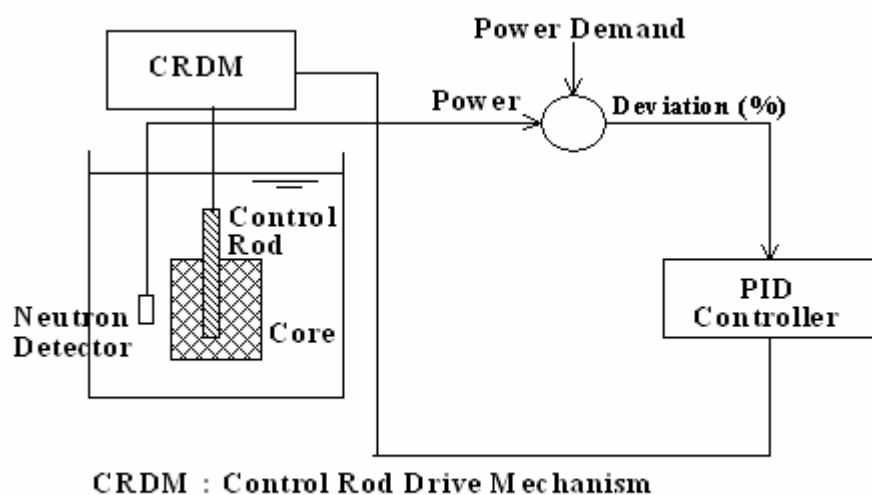
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil analisis termohidrolika teras silisida RSG-GAS kondisi steady state.

Hasil perhitungan termohidrolika teras silisida kondisi steady state dengan menggunakan kode COOLOD-N pada daya 25 MW disajikan pada Tabel 5. Analisis dilakukan pada suhu pendingin, suhu pelat bahan bakar, suhu *meat* bahan bakar.

Hasil analisis termohidrolika dengan kode COOLOD-N2 untuk kanal panas pada daya 25 MW menunjukkan bahwa kecepatan pendingin diperoleh sebesar 3,71 m/s dan penurunan tekanan sebesar  $0.618 \text{ kg/cm}^2$ .

Suhu maksimum permukaan pelat dan *meat* bahan bakar masing-masing sebesar 133.28 C dan 137.56 C. Beda suhu terhadap ONB pada puncak aksial, yaitu sebesar -3.86 C, hal ini berarti sudah terjadi awal pendidihan inti. Adapun margin keselamatan DNBR minimum sebesar 1.55 dan margin keselamatan terhadap ketidak-stabilan aliran S minimum sebesar 5.28.



**Gambar 4.** Sistem kontrol reaktivitas otomatis

**Table 4.** Hasil analisis termohidrolika teras silisida RSG-GAS kondisi tunak

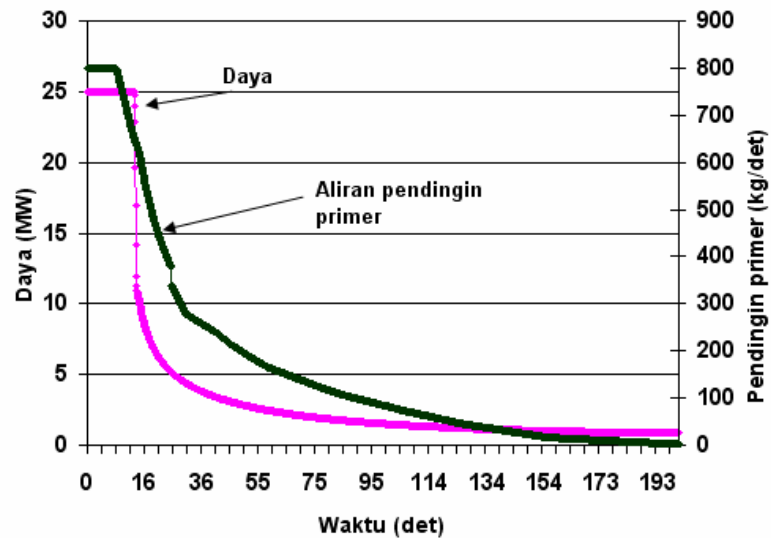
No.	PARAMETER	Daya 25 MW			
		Daya nominal		Daya lebih	
	MASUKAN ( <i>INPUT</i> )				
1.	Daya netto dibangkitkan di teras, MW	25.0		28.5	
2.	Tekanan masukan, kg/cm <sup>2</sup>	2.036		2.036	
3.	Suhu masukan, C	44.5		44.5	
4.	Laju alir teras, kg/s	800.0		800.0	
5.	Laju alir min di elemen bakar, m <sup>3</sup> /jam	46.27		46.27	
6.	Faktor puncak daya :				
	Faktor puncak radial Fr	2.314		2.314	
	Faktor puncak aksial Fz	1.770		1.770	
	Faktor teknis kenaikan suhu <i>bulk</i> Fb	1.167		1.167	
	Faktor teknis kenaikan suhu <i>film</i> Ff	1.260		1.260	
	Faktor teknis untuk fluks panas Fq	1.200		1.200	
	KELUARAN ( <i>OUTPUT</i> )				
		Rerata	Kanal Panas	Rerata	Kanal Panas
1.	Kecepatan pendingin, m/s		3.71		3.72
2.	Penurunan tekanan sepanjang teras, kg/cm <sup>2</sup>		0.618		0.618
3.	Tekanan pada keluaran pelat b.b., kg/cm <sup>2</sup>		1.805		1.806
4.	Suhu saturasi pada keluaran kanal, C		116.42		116.43
5.	Kenaikan suhu sepanjang kanal, C	9.87	26.63	11.25	30.36
6.	Suhu maks. pelat, C	80.38	133.28	85.21	138.64
7.	Suhu maks. Meat bahan bakar, C	82.23	137.56	86.44	141.48
8.	Fluks panas rerata, W/cm <sup>2</sup>	34.58	34.58	39.43	39.43
9.	Fluks panas maks. W/cm <sup>2</sup>	61.21	178.48	69.70	203.46
10.	Beda suhu terhadap ONB ( $\Delta T_{ONB}$ ), C		-3.86		-8.89
11.	Margin keselamatan :				
	DNBR		1.55		1.36
	$S = \eta / \rho c$		5.28		4.42

Hasil analisis di atas dipergunakan untuk penyesuaian kondisi tunak perhitungan menggunakan kode EUREKA-2/RR.

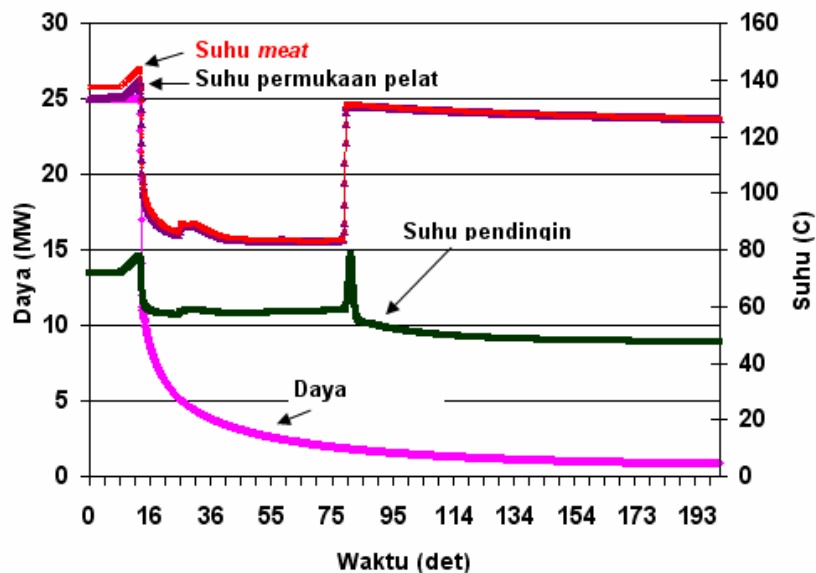
#### Hasil analisis LOFA pada RSG-GAS

Hasil analisis LOFA ditunjukkan pada Gambar 5 sampai Gambar 7. Gambar 6 menunjukkan suhu kanal panas dan daya selama transien mulai dari awal kejadian sampai kondisi tunak setelah aliran berbalik arah. Reaktor akan padam (scram) secara otomatis setelah 3,05 detik setelah sinyal laju alir tercapai  $\leq 85\%$ . Luncuran aliran ke bawah (*coast down flow*) akibat adanya momen inersia roda gila akan mengambil panas sisa. Suhu kanal panas akan menurun dengan tajam, karena penurunan daya. DNBR minimum 1,26 terjadi pada saat scram terjadi.

Gambar 5 menerangkan kejadian akibat LOFA pada daya 25 MW dengan laju alir desain 800 kg/detik. Hasil perhitungan kondisi tunak (*steady state*) menunjukkan bahwa suhu *meat* bahan bakar, kelongsong dan pendingin keluaran kanal masing-masing adalah 137,77°C, 133,67°C dan 71,88°C, serta DNBR minimum sebesar 1,54. Kecelakaan diawali akibat catu daya listrik untuk pompa pendingin primer mati, maka laju alir pendingin primer akan berkurang mengikuti penurunan momen inersia dari roda gila (*fly wheel*). Ketika laju pendingin primer menurun hingga mencapai 85% dari laju alir minimal (800 kg/det.) reaktor mengalami trip yang berasal dari sinyal laju alir minimum. Padamnya reaktor ini terjadi pada detik ke-2,45 setelah awal kecelakaan, akan tetapi karena



**Gambar 5.** Transien daya dan laju alir selama kecelakaan akibat hilang aliran pendingin pada daya operasi 25 MW.



**Gambar 6.** Transien suhu pendingin, kelongsong dan *meat* bahan bakar, serta daya selama kejadian LOFA pada daya 25 MW

adanya waktu tunda antara sinyal dan trip selama 0,5 detik, maka pada keadaan riil trip baru terjadi 3,05 detik setelah awal kecelakaan.

Penurunan laju alir mengakibatkan pendinginan elemen bakar berkurang selama kurun waktu tersebut, sehingga meningkatkan suhu pendingin maupun elemen bakar, yang merupakan kondisi kritis pertama. Hasil perhitungan menunjukkan

bahwa suhu bahan bakar, kelongsong dan pendingin keluaran kanal masing-masing adalah 143,94°C, 139,85°C dan 77,67°C, serta DNBR minimum sebesar 1,26. Seiring berkurangnya laju alir pendinginan paksa yang berasal dari putaran roda gila (*fly wheel*) hingga aliran pendingin sisa tinggal 15% dari laju alir minimal, daya hisap dari pendingin primer tidak mampu menahan gaya



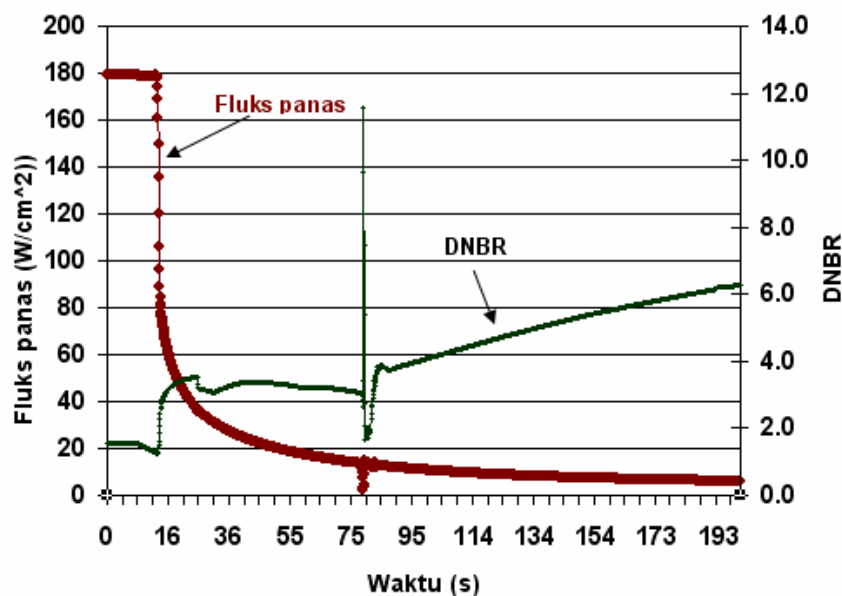
berat dari katup sirkulasi alam, sampai akhirnya katup sirkulasi alam terbuka. Pada saat katup sirkulasi alam membuka maka terjadi aliran balik, terbukanya katup sirkulasi alam terjadi pada detik ke-68,2 setelah reaktor trip. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa suhu bahan bakar, kelongsong dan pendingin keluaran kanal masing-masing adalah 83,72°C, 83,41°C dan 68,77°C, serta DNBR minimum sebesar 3,05. Dengan terbukanya katup sirkulasi alam, maka mekanisme pendinginan di elemen bakar berubah dari konveksi paksa di mana aliran mengalir dari atas ke bawah menjadi konveksi bebas di mana aliran mengalir dari bawah ke atas karena gaya apung yang ditimbulkan dari perbedaan densitas air pendingin reaktor, dan kondisi perubahan ini disebut kondisi transisi. Pada saat transisi, aliran pendingin di dalam kanal akan terhenti sesaat, sehingga menyebabkan suhu *meat* bahan bakar, kelongsong dan pendingin yang sebelumnya sudah turun akan meningkat kembali.

Hasil perhitungan menunjukkan suhu *meat*

bahan bakar, kelongsong dan pendingin akan mencapai puncak yang kedua masing-masing sebesar 131,42°C, 131,10°C dan 67,64°C serta DNBR minimum sebesar 1,735 pada detik ke-69,8. Karakteristik suhu *meat* bahan bakar, kelongsong dan pendingin keluaran kanal ditunjukkan pada Gambar 6.

Setelah kondisi kritis kedua ini tercapai, berangsur-angsur temperatur kanal terpanas menurun kembali dan mencapai kondisi stabil. Kronologi simulasi kecelakaan akibat hilangnya aliran pendingin primer secara keseluruhan sejak kondisi stabil setelah reaktor mengalami trip hingga kondisi stabil setelah katup sirkulasi alam membuka, ditunjukkan oleh Gambar 6.

Karakteristik fluks panas dan DNBR sejak kondisi tunak hingga terjadinya LOFA ditunjukkan oleh Gambar 7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa fluks panas yang dibangkitkan segera meluruh ketika reaktor mengalami trip karena sinyal laju alir minimum.



Gambar 7. Transien fluks panas dan DNBR selama kejadian LOFA pada daya 25 MW

Pada saat yang sama batas keselamatan terhadap DNBR mencapai nilai minimum 1,26. Fluks panas pada kondisi transien terus meluruh secara eksponensial sebagai fungsi waktu, sampai akhirnya pendingin primer tinggal 15% dan katup sirkulasi alam membuka. Kemampuan pengambilan panas oleh laju alir sisa ditunjukkan oleh peningkatan nilai DNBR. Sesaat ketika terjadi aliran balik karena terbukanya katup sirkulasi alam, nilai DNBR mengalami osilasi dan mencapai nilai minimum 1,65. Pengambilan panas peluruhan oleh aliran balik terbukti meningkatkan nilai batas DNBR ke tingkat yang lebih aman.

Perhitungan fluks panas pada saat umpan balik, dimana suhu pendingin masukan lebih besar dari suhu pendingin keluaran kanal tidak mungkin terjadi dan tidak dikenal dalam perhitungan numerik program EUREKA-2/RR. Sehingga dalam Gambar 7, penurunan fluks panas yang semula sebesar  $1,16E+05$  W/cm<sup>2</sup> menjadi minimum  $9,61E+04$  W/cm<sup>2</sup> merupakan nilai semu, atau tidak perlu diperhatikan karena bukan mewakili keadaan yang sebenarnya. Di dalam grafik ditunjukkan oleh nilai DNBR yang sangat fluktuatif, untuk itu diperlukan suatu analisis hasil perhitungan yang cermat.

## KESIMPULAN

Dari hasil analisis transien yang dilakukan terhadap keselamatan reaktor akibat kehilangan pendingin primer (LOFA) pada disain teras silisida RSG-GAS, dapat disimpulkan bahwa:

- Kondisi kritis ke-1 terjadi pada saat reaktor mengalami trip (*scram*) yang terjadi 3,05 detik setelah pompa primer mati, di mana hasil perhitungan menunjukkan suhu bahan bakar, kelongsong dan pendingin keluaran kanal masing-masing adalah 143,94°C, 139,85°C dan

77,67°C, serta DNBR minimum sebesar 1,26.

- Kondisi kritis ke-2 terjadi saat katup sirkulasi alam terbuka (detik ke-68,2). Dari hasil perhitungan diperoleh suhu bahan bakar, kelongsong dan pendingin keluaran kanal masing-masing adalah 83,72°C, 83,41°C dan 68,77°C, serta DNBR minimum sebesar 3,05.
- Kondisi kritis ke-3 terjadi saat transisi dari sirkulasi paksa ke sirkulasi alam (detik ke-69,8). Dari hasil perhitungan diperoleh suhu bahan bakar, kelongsong dan pendingin keluaran kanal masing-masing adalah 131,42°C, 131,10°C dan 67,64°C, serta DNBR minimum sebesar 1,74.
- Setelah reaktor *scram*, diperoleh suhu maksimum pendingin keluar kanal mencapai 78,7°C terjadi pada detik ke-70,7, sedangkan DNBR minimum sebesar 1,65 pada detik ke-69,2.
- Dari ketiga kondisi tersebut, kondisi terburuk terjadi pada saat reaktor *scram*.
- Dari hasil tersebut menunjukkan karakteristik termohidraulika teras silisida RSGGAS akibat LOFA, masih memenuhi batas kriteria keselamatan yang dipersyaratkan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. M. Darwis ISNAINI, "Safety Analysis of RIA and LOFA of the Multi-Purpose Research Reactor RSG-G.A.Siwabessy 2.96 G/Cc U Silicide Core Using EUREKA-2/RR Code" FNCA Workshop on Research Reactor Technology, Beijing, China, September 13th – 17th, 2010
2. Masanori KAMINAGA, "EUREKA-2/RR: A Computer code for the Reactivity Accident Analysis in Research Reactors", JAERI-Memo-08-208, Japan (1996).

3. Anonim, the Multi Purpose Reactor of G.A. Siwabessy Safety Analysis Report, Rev. 9, National Nuclear Energy Agency (BATAN), 1999
4. Masanori KAMINAGA, "Reactivity Initiated Analysis of the Multi-Purpose Research Reactor RSG-GA.Siwabessy Silicide Core Using EUREKA-2/RR Code", JAERI Expert Activity Report, STA Scientist Exchange Program (STA-SEP), PRSG-BATAN, Indonesia, February 1999.
5. Endiah Puji Hastuti and Masanori Kaminaga, "Thermal Hydraulics Transient Accident Analysis of the RSG-GAS Silicide Core Design By Using EUREKA-2/RR Code", Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), April 1998.