

ANALISIS KESELAMATAN MODA SATU JALUR PENDINGIN TERAS SILISIDA RSG-GAS

Endiah Puji Hastuti.

ABSTRAK

ANALISIS KESELAMATAN MODA SATU JALUR PENDINGIN TERAS SILISIDA RSG-GAS. Dalam rangka penghematan biaya operasi reaktor, pengoperasian reaktor dengan satu jalur sistem pendingin sedang dikaji. Penentuan daya maksimum reaktor, telah dilakukan langkah selanjutnya yang dilakukan adalah analisis keselamatan teras reaktor pada kondisi tunak dan transient. Perhitungan dilakukan dengan program termohidrolika teras reaktor, COOLOD-N, dan PARET. Program COOLOD-N menyelesaikan persamaan perpindahan panas termohidrolika teras reaktor berbahan bakar tipe MTR pada kondisi tunak (*steady state*), sedangkan program perhitungan PARET untuk penyelesaian kasus transient LOFA dan reaktivitas. Dengan menggunakan data masukan teras silisida dan *coast down flow* satu jalur pendingin, diperoleh parameter termohidrolika berupa suhu kelongsong, suhu bahan bakar dan margin keselamatan terhadap instabilitas aliran. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa batasan keselamatan operasi SAR RSG-GAS, pada kondisi tunak maupun transient tidak terlampaui apabila reaktor dioperasikan pada daya maksimum 17,1MW.

Kata kunci: sistem pendingin reaktor, daya maksimum, kriteria keselamatan.

ABSTRACT

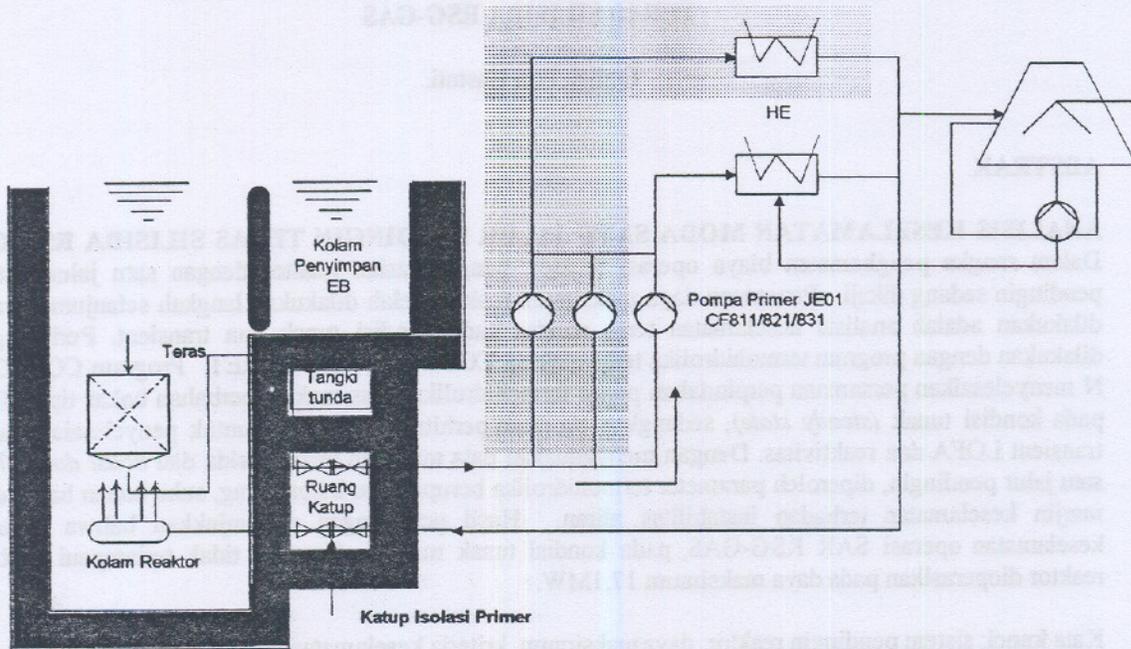
SAFETY ANALYSIS OF RSG-GAS SILICIDECORE USING ONE LINE COOLING SYSTEM. In the frame of minimizing the operation-cost, operation mode using one line cooling system is being evaluated. Maximum reactor has been determined and to continuing this program, steady state and transient analysis were done. The analysis was done by means of a core thermal hydraulic code, COOLOD-N, and PARET. The codes solves core thermal hydraulic equation at steady state conditions and transient, respectively. By using silicide core data and coast down flow rate as the input, thermal hydraulics parameters such as fuel cladding and fuel meat temperatures as well as safety margin against flow instability were calculated. Imposing the safety criteria to the results of steady state and transient analysis, maximum permissible power for this operation was obtained as much as 17.1 MW.

Key words: reactor cooling system, maximum power, safety criteria.

PENDAHULUAN

Dalam rangka penghematan biaya operasi reaktor, pengoperasian reaktor dengan satu jalur sistem pendingin sedang dikaji. Pada moda operasi daya tinggi di atas 1% daya atau 300 KW dan pada pengoperasian reaktor sampai dengan daya nominal 30 MW, panas yang dibangkitkan oleh teras RSG-GAS didinginkan secara konveksi paksa dengan arah aliran dari atas ke bawah. Air pendingin yang berasal dari keluaran dua buah alat

penukar panas (*Heat Exchanger*), akan mengambil panas dari teras reaktor dan setelah melewati bak peluruh N-16 (*Delay Chamber = tangki tunda*), sistem pendingin primer ini akan melepas panasnya ke penukar kalor (*HE = Heat Exchanger*), dan selanjutnya HE akan melepas panasnya ke menara pendingin. Proses pendinginan teras reaktor dari untai primer hingga ke menara pendingin dilakukan dengan dua jalur. Diagram alir sistem pendingin reaktor RSG-GAS ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Pendingin Reaktor RSG-GAS

Pada proses pendinginan dengan satu jalur sistem pendingin, komponen utama yang beroperasi adalah satu buah pompa primer, satu buah HE dan tiga buah menara pendingin, dimana siklus pendinginan sama dengan siklus dua jalur pendingin. Kemungkinan penggunaan satu jalur sistem pendingin dilakukan apabila permintaan daya reaktor cukup rendah, sehingga akan menghemat biaya operasi. Antisipasi terhadap moda operasi seperti ini tidak boleh terlepas dari interpretasi batasan keselamatan yang diberlakukan di dalam laporan analisis keselamatan (SAR RSG-GAS). Schubungan dengan kemungkinan penggunaan satu jalur sistem pendingin, maka daya maksimum reaktor yang diijinkan untuk dioperasikan merupakan hal terpenting yang perlu diteliti, sehingga merupakan tujuan dibuatnya analisis ini.

Hipotesa yang akan dibuktikan di sini adalah apabila digunakan sistem pendingin satu jalur yang merupakan 50% dari kemampuan riil untuk pembuangan panas teras reaktor RSG-GAS, (dari daya nominal 30 MW), akan mencukupi untuk pengambilan panas apabila daya reaktor maksimum hanya 50% dari daya nominal, baik pada kondisi tunak maupun transien.

Perhitungan dilakukan menggunakan program COOLOD-N dan PARET masing-masing untuk kondisi tunak dan transien. Dalam perhitungan ini digunakan data masukan yang

dibuat berdasarkan kategori: batas keselamatan dan batas kondisi operasi. Dimana batas keselamatan bukan saja berdasarkan kondisi terparah akan tetapi juga perlu dilihat dari batas kondisi operasi yang diterapkan sebagai dasar penentuan sistem proteksi reaktor. Disamping untuk keperluan operasi perlu diperhitungkan analisis hasil perhitungan sistem pendingin sekunder sebagai umpan balik perhitungan keselamatan teras reaktor.

TEORI

Di dalam laporan analisis keselamatan (SAR = *safety analysis report*) RSG-GAS dikenal empat moda operasi, yaitu^[1]:

Moda operasi 1, operasi daya mulai dari *start-up* ke tingkat operasi daya $\geq 3\%$ dari daya penuh.

Moda operasi 2, *start-up* dan operasi daya rendah. Reaktor dioperasikan pada $\leq 1\%$ dari daya penuh, termasuk kondisi kritis dan subkritis

Moda operasi 3, reaktor dipadamkan dan batang kendali dihubungkan dengan sistem *scram* reaktor.

Moda operasi 4, penggantian elemen bakar, reaktor pada kondisi padam dan pompa pendingin primer mati serta sistem pendingin kolam beroperasi.

Dari keempat moda operasi tersebut belum terlihat adanya moda operasi dimana reaktor hanya

dioperasikan dengan satu jalur sistem pembuangan panas, atau apabila reaktor hanya dioperasikan dengan daya maksimum 50% dari kemampuan pembangkitan daya RSG-GAS.

Batas Operasi.

Di dalam SAR RSG-GAS dikenal apa yang dinamakan batas keselamatan dan batas operasi. Batas keselamatan digunakan untuk menganalisis keselamatan pada kondisi yang paling aman, sedangkan batas operasi diterapkan pada sistem proteksi reaktor. Batas keselamatan dan batas operasi yang dicantumkan di sini adalah batasan dari aspek keselamatan termohidrolika.

a. Batas keselamatan antara lain adalah:

1. Suhu maksimum pendingin masuk ke teras reaktor 44,5°C.
2. Laju alir pendingin minimum masuk ke teras reaktor 85% dari laju alir total sistem pendingin primer.
3. Batas minimum keselamatan terhadap instabilitas aliran (S) pada operasi daya lebih (114% dari daya nominal) sebesar 2,67.

b. Batas operasi antara lain adalah:

1. Suhu maksimum pendingin masuk ke teras reaktor 42°C.
2. 114% daya reaktor.
3. Laju alir minimum 85% dari laju alir total sistem pendingin primer
4. Batas minimum keselamatan terhadap instabilitas aliran (S) pada operasi daya nominal sebesar 3,38.

Program COOLOD-N yang digunakan dalam analisis ini merupakan program perhitungan termohidrolika 1 dimensi yang dikembangkan untuk menganalisis termohidrolika teras reaktor riset yang menggunakan elemen bakar tipe MTR pada kondisi tunak (*steady state*). Program yang dibuat oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*) ini telah digunakan untuk menganalisis JRR2, JRR3 dan JRR4^[2]. Dan telah terverifikasi dengan baik untuk perhitungan termohidrolika teras reaktor RSG-GAS^[3].

Program komputer PARET-ANL^[2] merupakan penggabungan dari aspek-aspek neutronik, hidrodinamik dan perpindahan panas. Program ini dirancang untuk memprediksi kejadian dan akibat dari suatu kecelakaan teras reaktor pada kondisi tunak dan transien. Pada awalnya program ini, digunakan untuk menganalisis reaktor riset dan reaktor uji yang menggunakan bahan bakar berbentuk pelat. PARET-ANL versi awal ini telah dibandingkan secara luas dengan hasil eksperimen-eksperimen SPERT-I (Woodruff, 1984)^[3]. Pada

pengembangannya paket program PARET-ANL dapat digunakan untuk memodelkan reaktor dalam bentuk geometri silinder ataupun persegi. PARET-ANL dapat dimodelkan untuk menganalisis daerah teras menjadi empat bagian/daerah (*region*) dengan masing-masing tingkat daya dan juga aliran pendingin yang berbeda. Pada masing-masing daerah, kearah radial dapat direpresentasikan sebanyak 44 titik (42 daerah elemen bakar dan 1 daerah pendingin), sedangkan ke arah aksial dapat direpresentasikan sampai dengan 21 titik aksial yang merepresentasikan perbedaan rapat daya yang berbeda.

Skenario Kegagalan Aliran pendingin dan Model Perhitungan

Kecelakaan akibat hilangnya aliran pendingin primer pada moda satu jalur diasumsikan terjadi dengan penyebab yang sama seperti pada moda operasi normal. Kecelakaan diasumsikan terjadi ketika reaktor sedang beroperasi pada daya nominal 15 MW, tiba-tiba motor penggerak pompa pendingin primer terhenti akibat putusnya suplai daya listrik atau sebab yang lain. Kejadian ini mengakibatkan penurunan laju alir, dimana aliran pendingin hanya berasal dari gaya inersia pompa. Laju alir pendingin berkurang hingga mencapai batas minimum, yang mengakibatkan sistem proteksi reaktor bekerja^[4]. Analisis dilakukan dengan cara membuat pemodelan kanal panas teras silisida yang saat ini dioperasikan (tingkat muat 2,96 g U/cm³) menjadi kanal rerata dan kanal panas sesuai hasil perhitungan neutronik. Selanjutnya perhitungan dilakukan dengan menggunakan paket program PARET-ANL.

Titik berat analisis adalah untuk mempelajari dua kondisi kritis karakteristik keselamatan termohidrolika teras reaktor RSG-GAS. Pertama adalah kondisi yang terjadi segera setelah reaktor *scram* (trip), karena sinyal akibat berkurangnya laju alir pendingin, dan kondisi kritis kedua yaitu ketika terjadi aliran balik akibat terbukanya katup sirkulasi alam.

Data Masukan

Data masukan yang digunakan di dalam analisis ini adalah data hasil eksperimen dan data hasil perhitungan neutronik dan data teknis elemen bakar dan reaktor, seperti tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data masukan

Parameter	Nilai	
	Kanal rerata	Kanal panas
Pembangkitan panas di teras reaktor, MW	15	15
Tekanan pendingin ke teras, kg/cm^2	1,997	1,997
Suhu pendingin masuk ke teras, $^{\circ}\text{C}$	44,5	44,5
Laju alir pendingin ke teras, kg/s	477,8	477,8
Laju alir pendingin min. per elemen bakar, m^3/h	1734	1734
Konduktivitas U_3Si_2 , 2,96 gU/cc dengan porositas 7% ^[5] , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	107	107
Faktor-faktor puncak daya :		
Faktor puncak daya radial, F_R	2,398	2,398
F_{cool}	1,000	1,167
F_{film}	1,000	1,200
F_{hfbx}	1,000	1,200
$F_{\text{clad}}, F_{\text{bond}}, F_{\text{meat}}$	1,000	1,000
Faktor puncak daya aksial, F_A	1,5559	1,5559

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Data hasil perhitungan yang perlu dibandingkan di sini adalah parameter

termohidrolika pada daya 15 MW sedangkan daya 17,1 MW digunakan sebagai batas proteksi daya reaktor. Perlu dicermati di sini adalah batas keselamatan terhadap instabilitas aliran pada kondisi tunak sebesar 3,6.

Tabel 2 Hasil perhitungan kondisi tunak satu jalur.

PARAMETER	HASIL PERHITUNGAN	
Laju alir, kg/detik	418	
Daya total reaktor, MWt	15	17,1
Pembangkitan panas di dalam EB., %	100	100
Kenaikan suhu pendingin, $^{\circ}\text{C}$	36,24	41,30
Fluks panas maks, W/cm^2	112,01	127,69
Fluks panas rerata, W/cm^2	34,19	38,98
Kecepatan pendingin, m/detik	2,00	2,00
Suhu saturasi, $^{\circ}\text{C}$	119,74	119,74
Suhu maksimum pelat, $^{\circ}\text{C}$	134,28	138,20
Suhu maksimum "meat", $^{\circ}\text{C}$	138,31	142,80
$\Delta T_{\text{ONB}} = T_{\text{ONB}} - T_{\text{pelat}}$, $^{\circ}\text{C}$	-5,31	-9,10
ΔP_{loss} , kgf/cm^2	0,1465	0,1465
Parameter pelepasan gelembung, η_{minimum}	90	71,9
Batas keselamatan terhadap instabilitas aliran, S min	3,6	2,88

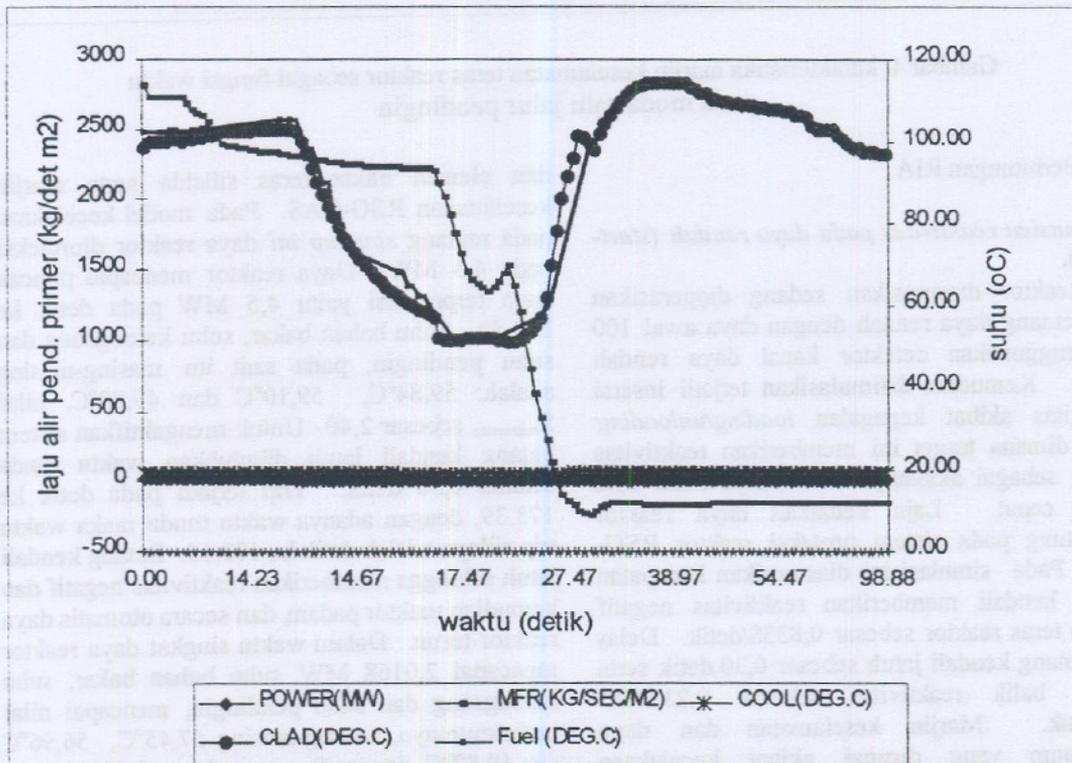
Hasil perhitungan parameter termohidrolika pada saat terjadinya LOFA ditunjukkan oleh Gambar 3 dan Gambar 4. Pada simulasi ini mula-mula reaktor dioperasikan pada daya 15 MW pada kondisi tunak. Karakteristika parameter teras reaktor pada kondisi tunak untuk suhu pendingin, suhu kelongsong, suhu bahan bakar, margin rasio pendidihan dan instabilitas aliran masing-masing adalah 65,52°C; 99,85°C; 102,31 °C; 10,30 dan 11,32.

Akibat suplai daya listrik terputus maka laju alir pompa pendingin primer reaktor menurun. Penurunan laju alir pendingin primer yang mencapai kondisi batas operasi (85%) menyebabkan reaktor mengalami trip, dalam analisis ini trip terjadi pada detik ke 14,44. Daya reaktor menurun dengan cepat, tercatat bahwa pada detik ke 14,44 mencapai 12,65 MW, detik ke 14,49 mencapai 5,62 MW dan detik ke 14,54 mencapai 3,87 MW. Suhu pendingin dan elemen bakar sebagai fungsi menurunnya aliran pendingin dan daya reaktor karena LOFA ditunjukkan oleh Gambar 3. Terlihat bahwa sesaat setelah reaktor trip kondisi maksimum suhu pendingin, suhu kelongsong, suhu bahan bakar, margin terhadap fluks panas kritis dan instabilitas aliran masing-

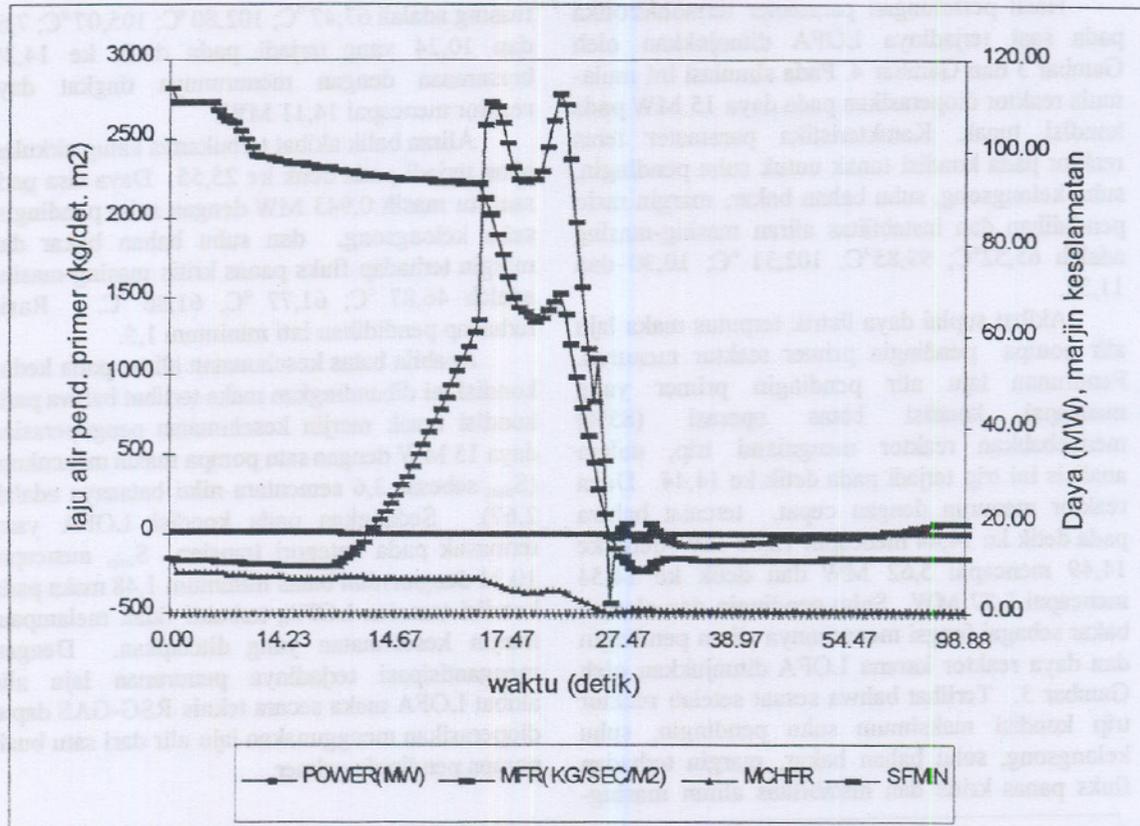
masing adalah 67,47°C; 102,80 °C; 105,07°C; 7,61 dan 10,24 yang terjadi pada detik ke 14,39, bersamaan dengan menurunnya tingkat daya reaktor mencapai 14,11 MW.

Aliran balik akibat terbukanya katup sirkulasi alam terjadi pada detik ke 25,55. Daya sisa pada saat itu masih 0,943 MW dengan suhu pendingin, suhu kelongsong, dan suhu bahan bakar dan margin terhadap fluks panas kritis masing-masing adalah 46,87 °C; 61,77 °C, 61,86 °C. Rasio terhadap pendidihan inti minimum 1,5.

Apabila batas keselamatan aliran pada kedua kondisi ini dibandingkan maka terlihat bahwa pada kondisi tunak margin keselamatan pengoperasian daya 15 MW dengan satu pompa masih mencukupi (S_{min} sebesar 3,6 sementara nilai batasnya adalah 2,67). Sedangkan pada kondisi LOFA yang termasuk pada kategori transien S_{min} mencapai 10,21 dengan nilai batas minimum 1,48 maka pada kondisi transien LOFA, terbukti tidak melampaui margin keselamatan yang ditetapkan. Dengan mengantisipasi terjadinya penurunan laju alir akibat LOFA maka secara teknis RSG-GAS dapat dioperasikan menggunakan laju alir dari satu buah pompa pendingin primer.



Gambar 3. Karakteristika parameter termohidrolika teras reaktor sebagai fungsi waktu pada moda satu jalur pendingin



Gambar 4. karakteristik margin keselamatan teras reaktor sebagai fungsi waktu pada moda satu jalur pendingin

Hasil Perhitungan RIA

1. Transien reaktivitas pada daya rendah (*start-up*).

Reaktor diasumsikan sedang dioperasikan pada rentang daya rendah dengan daya awal 100 W menggunakan detektor kanal daya rendah JKT01. Kemudian disimulasikan terjadi insersi reaktivitas akibat kegagalan *loading/unloading* target dimana target ini memberikan reaktivitas positif, sebagai akibatnya maka daya akan naik secara cepat. Laju kenaikan daya reaktor bergantung pada sistem proteksi reaktor RSG-GAS. Pada simulasi ini diasumsikan kecepatan batang kendali memberikan reaktivitas negatif kepada teras reaktor sebesar 0,833\$/detik. Delay time batang kendali jatuh sebesar 0,30 detik serta umpan balik reaktivitas sebesar 0,21875E-01\$/detik. Margin keselamatan dan daya maksimum yang dicapai akibat kecelakaan reaktivitas pada daya rendah ini kemudian dianalisis.

Gambar C.6, dan C.7, menunjukkan transien perioda, reaktivitas, karakteristik suhu pendingin

dan elemen bakar teras silisida serta margin keselamatan RSG-GAS. Pada model kecelakaan pada rentang *start-up* ini daya reaktor diproteksi pada 4,5 MW. Daya reaktor mencapai puncak daya terproteksi yaitu 4,5 MW pada detik ke 173,20. Suhu bahan bakar, suhu kelongsong dan suhu pendingin, pada saat itu masing-masing adalah: 59,84°C, 59,10°C dan 49,83°C, nilai S_{minimum} sebesar 2,40. Untuk mengaktifkan sistem batang kendali jatuh dibutuhkan waktu tunda selama 0,30 detik. Trip terjadi pada detik ke 173,39, dengan adanya waktu tunda maka waktu trip riilnya adalah detik ke 173,69. Batang kendali jatuh sehingga memberikan reaktivitas negatif dan kemudian reaktor padam, dan secara otomatis daya reaktor turun. Dalam waktu singkat daya reaktor mencapai 2,0168 MW, suhu bahan bakar, suhu kelongsong dan suhu pendingin, mencapai nilai maksimumnya, masing-masing 57,45°C, 56,96°C dan 49,87°C, dengan S_{minimum} sebesar 2,80.

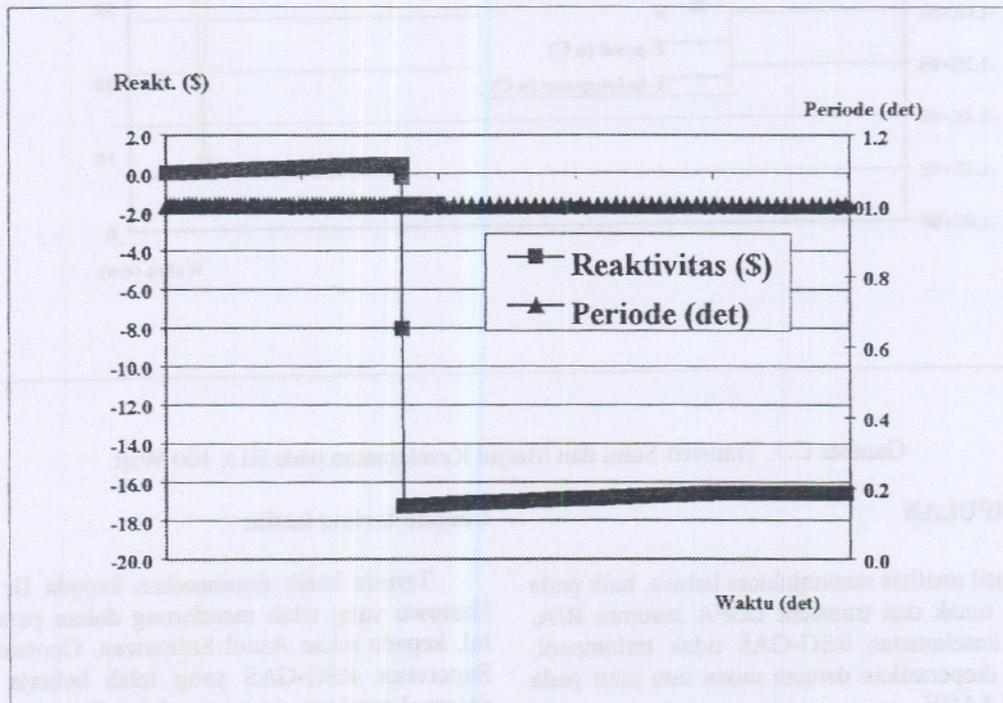
Transien reaktivitas selama kecelakaan. Reaktivitas total merupakan gabungan dari reaktivitas akibat kenaikan suhu pendingin dan reaktivitas Doppler. Peningkatan insersi

reaktivitas ini berpengaruh langsung pada kenaikan daya reaktor. Reaktivitas total pada awal kecelakaan sama besarnya dengan insersi reaktivitas dan baru ketika terjadi scram, reaktivitas ini mengalami penurunan.

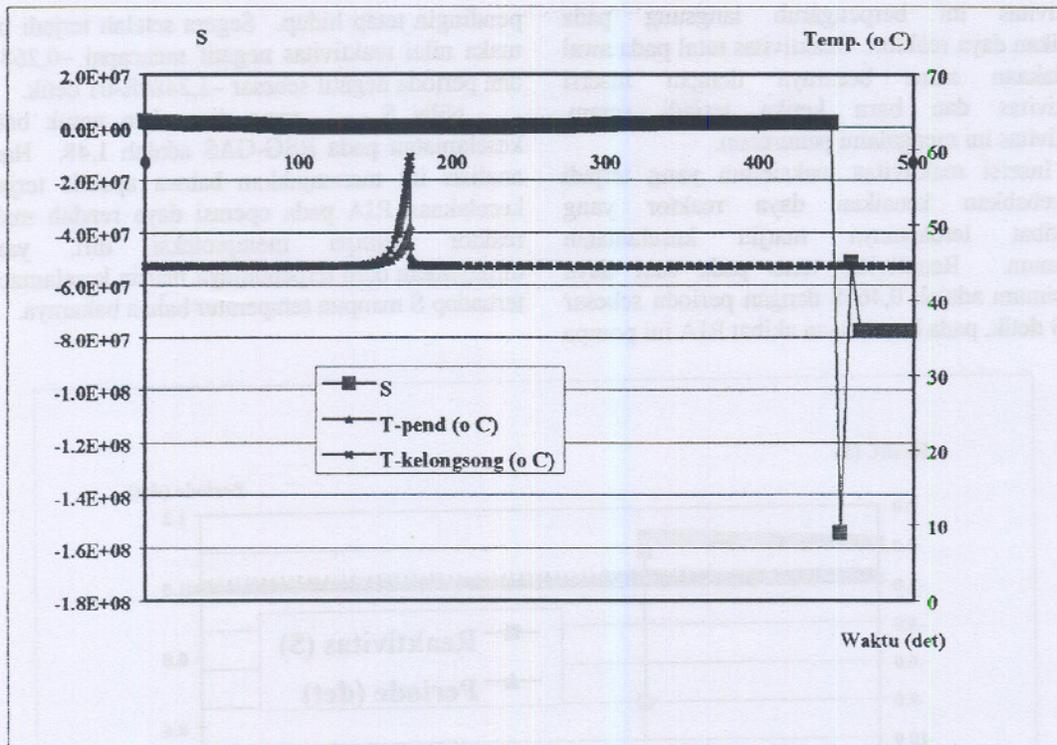
Insersi reaktivitas maksimum yang terjadi menyebabkan kenaikan daya reaktor yang berakibat tercapainya margin keselamatan minimum. Reaktivitas teras pada saat daya maksimum adalah 0,461\$ dengan perioda sebesar 6,963 detik, pada kecelakaan akibat RIA ini pompa

pendingin tetap hidup. Segera setelah terjadi trip maka nilai reaktivitas negatif mencapai $-0,268$ \$ dan perioda negatif sebesar $-1,2480E-01$ detik.

Nilai S_{minimum} yang digunakan untuk batas keselamatan pada RSG-GAS adalah 1,48. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa apabila terjadi kecelakaan RIA pada operasi daya rendah maka reaktor mampu memproteksi diri, yang ditunjukkan oleh terpenuhinya margin keselamatan terhadap S maupun temperatur bahan bakarnya.



Gambar C.6. Transien Reaktivitas dan Perioda



Gambar C.7. Transien Suhu dan Marjin Keselamatan pada RIA 100 Watt

KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa, baik pada kondisi tunak dan transient LOFA maupun RIA, marjin keselamatan RSG-GAS tidak terlampaui, apabila dioperasikan dengan moda satu jalur pada daya 17,1 MW.

Ucapan terima kasih:

Terima kasih disampaikan kepada Dr Hudi Hastowo yang telah mendorong dalam penelitian ini, kepada rekan Asnul Sufmawan, Operator dan Supervisor RSG-GAS yang telah bekerja sama dalam eksperimen penurunan laju alir.

Daftar Pustaka:

1. E.P. HASTUTI, I. KUNTORO, M.D.ISNAINI, *Penentuan Daya Maksimum RSG-GAS Pada Moda Operasi Daya Dengan Satu Jalur Sistem Pendingin*, Prosiding Seminar Sains dan Teknologi Nuklir Peran Sains dan Teknologi Nuklir Dalam Pemberdayaan Potensi Nasional, Bandung, 11-12 Juli 2000.
2. KAMINAGA, M., COOLOD-N: A Computer code for the analysis of steady-state thermal-hydraulics in plate-type research reactors, JAERI-M 90-021, February 1990.
3. SUKMANTO DIBYO, Analisis Kemampuan Penukar Kalor Pada Moda Operasi Satu Jalur Sistem Pendingin RSG-GAS, No. Ident. TRR.TR.35.06.30.00, Rev.0, P2TRR-BATAN, 2000.
4. WOODRUFF, W.L., 1984, "A User Guide for the Current ANL Version of the PARET Code", NESC.
5. OBENCHAIN, C.F., *PARET-A Program for the Analysis of Reactor Transients*, IDO-17282, January 1969.
6. BATAN, *Safety Analysis Report of the Indonesian Multipurpose Reactor GA-Siwabessy*, Rev.8, Maret 1999.
7. G.L. HOFMAN and J.L. Snelgrove, Nuclear Materials: Dispersion Fuels, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Germany.

8. E.P. HASTUTI, M.D.ISNAINI, Pengukuran Penurunan LA Pompa RSG-GAS, Maret 2001.
9. PRSG-BATAN, Pengkajian Keselamatan: Laporan Analisis Keselamatan Penggantian Elemen Bakar U3O8 ke U3Si2 Tingkat muat 2,96 g U/cc, No. Ident. RSG.OTH/LAK/01/98.

Penanya : Taswanda Taryo

Pertanyaan :

Seberapa besar % ketelitian perhitungan yang dilakukan ?

Jawaban :

Ketidaktelitian berasal dari equation yang dipilih yaitu sebesar 5%

1. E.P. HASTUTI, M.D. ISNAINI, Pengantar, Penerbit: PT. Rineka Cipta, Bandung, 2001.
2. PRIGBATA, Pengantar Keselamatan, Penerbit: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2001.
3. BAHU, UGRI, Pengantar, Penerbit: PT. Rineka Cipta, Bandung, 2001.

Penerbit : Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

Penerbit :

Sebagai dasar & ketelitian penelitian yang dilakukan :

Amalan :

Ketelitian hasil dari penelitian yang ditulis yaitu sebagai :