

KARAKTERISTIKA TERMOHIDROLIK DAN REAKTIVITAS TERAS RSG-GAS PADA KECELAKAAN AKIBAT PENYISIPAN AIR DINGIN

Endiah Puji Hastuti, Lily Suparlina, Tukiran Surbakti

ABSTRAK

KARAKTERISTIKA TERMOHIDROLIK DAN REAKTIVITAS TERAS RSG-GAS PADA KECELAKAAN AKIBAT PENYISIPAN AIR DINGIN. Pada kondisi operasi normal pendingin primer disirkulasi oleh 2 dari 3 pompa pendingin primer. Beroperasinya pompa cadangan tanpa dikehendaki akan menyebabkan penurunan suhu pendingin primer sebesar 5K. Penurunan suhu pendingin sebesar ini setara dengan penyisipan reaktivitas positif sebesar $\Delta\rho \leq 0,1\%$. Analisis kecelakaan akibat penyisipan air dingin di teras reaktor RSG-GAS dilakukan dengan menggunakan data teras silisida dengan tingkat muat $3,55 \text{ g U/cm}^3$. Model perhitungan dilakukan dengan dan tanpa beroperasinya batang kendali otomatis. Hasil perhitungan yang dilakukan pada kondisi terparah menunjukkan bahwa daya maksimum 28,52 MW tercapai pada detik ke 8,1 setelah terjadi penyisipan air dingin. Kondisi suhu maksimum elemen bakar, kelongsong dan pendingin ke luar kanal, masing-masing adalah 148,3 °C, 142,1 °C, dan 75,7 °C. Marjin keselamatan terhadap akhir pendidihan inti dan instabilitas aliran minimum mencapai 1,25 dan 4,20. Dibandingkan dengan marjin keselamatan RSG-GAS pada kondisi transien yang dipersyaratkan >1,48, maka marjin keselamatan masih mencukupi apabila trip daya proteksi reaktor dilakukan 114% dari 25 MW.

Kata kunci: penyisipan air dingin, transien, reaktivitas positif.

ABSTRACT

THERMALHYDRAULIC AND RSG-GAS CORE REACTIVITY CHARACTERISTIC DUE TO COLD WATER INSERTION ACCIDENT. Under normal operating condition, the primary coolant is circulated by 2 of the 3 primary coolant pump. Switch-on of the reserve pump would result in a temperature decrease of the recalculated primary less than 5K. The corresponding increase of reactivity amounts to $\Delta\rho \leq 0,1\%$. Using silicide core configuration data with 3.55 g U/cm^3 fuel loading, this analysis was done. The analysis modeling is done using with and without automatic system control rod. The calculation results which is done in the worst case condition, shows that reactor reached to the maximum power 28.52 MW at 8.1 seconds, after the accident occur. The maximum power was cause of *scram*. The maximum fuel element temperature, cladding and outlet coolant temperature each are 148.3 °C, 142.1 °C, and 75.7 °C. Safety margin for DNBR and flow instability reached 1.25 and 4.20, respectively. Comparing to the RSG-GAS safety margin at transient condition in which has requirement >1.48, therefore RSG-GAS have enough safety margin even if the power trip executed at 114% x 25 MW.

Key words: cold water insertion, transient, positive reactivity.

PENDAHULUAN

Pada kondisi normal, sistem pendingin primer RSG-GAS di sirkulasikan oleh 2 dari 3 pompa pendingin primer, dimana selama operasi daya tinggi 2 pompa beroperasi sedangkan sebuah pompa lagi selalu dalam keadaan siap dioperasikan (*stand by*). Beroperasinya pompa cadangan tanpa disengaja ketika reaktor sedang dioperasikan pada daya tinggi, akan menyebabkan terjadinya “penyisipan” (*insersi*) air dingin (PAD=penyisipan

air dingin). Kesenjangan suhu pendingin maupun elemen bakar secara perlahan akan berubah. “Penyisipan” air dingin tanpa sengaja ini merupakan suatu kecelakaan reaktivitas, karena mengakibatkan penurunan suhu pendingin dan akan memberikan perubahan reaktivitas positif. Meskipun kecelakaan ini tidak diharapkan terjadi pada suatu reaktor riset, akan tetapi kecelakaan ini dipostulasikan dan digunakan sebagai salah satu kecelakaan dasar desain (*DBA=design basic accident*).

Pemahaman dan kemampuan analisis terhadap kecelakaan dasar desain pada RSG-GAS sudah seharusnya dapat dilakukan sendiri oleh P2TRR, termasuk analisis terhadap akibat kecelakaan PAD ini. Dengan demikian maka diharapkan dapat meningkatkan kemampuan dalam menganalisis keselamatan reaktor, terutama reaktor riset. Pada saat ini RSG-GAS sedang melakukan penggantian elemen bakar dari Oksida menjadi silisida dengan tingkat muat yang sama, yaitu $2,96 \text{ g U/cm}^3$. Mengingat bahwa pada langkah selanjutnya RSG-GAS direncanakan akan menggunakan elemen bakar silisida dengan tingkat muat $3,55 \text{ g U/cm}^3$, maka analisis ini sekaligus dilakukan untuk teras reaktor berelemen bakar silisida dengan tingkat muat $3,55 \text{ g U/cm}^3$.

Untuk mempelajari dan menganalisis kecelakaan akibat PAD, dilakukan secara simulasi menggunakan paket program komputer. Program yang digunakan dalam analisis ini adalah program perhitungan EUREKA-2/RR. Dalam simulasi ini akan dihitung karakteristik termohidrolika dan perubahan reaktivitas teras RSG-GAS akibat beroperasinya pompa pendingin primer cadangan. Perhitungan dilakukan secara transien, sejak keadaan setimbang hingga terjadinya gangguan hingga tercapai kondisi setimbang kembali. Dalam perhitungan ini dapat diamati parameter seperti perubahan daya, suhu pelat elemen bakar, suhu pendingin dan reaktivitas.

TEORI

Program EUREKA-2/RR

EUREKA-2/RR adalah suatu paket program yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)*. Program ini digunakan untuk menganalisis karakteristik transien akibat kecelakaan termohidrolika dan reaktivitas pada teras reaktor riset berbahan bakar pelat, yang dioperasikan pada tekanan dan suhu rendah. Program perhitungan EUREKA-2/RR dilengkapi dengan persamaan-persamaan untuk menyelesaikan perhitungan kondisi transien dari segi netronik, karakteristik kecelakaan termohidrolika akibat hilangnya pendingin primer dan kecelakaan karena penyisipan reaktivitas^[1]. Program perhitungan EUREKA-2/RR menyelesaikan persamaan kesetimbangan massa dan energi, dengan asumsi bahwa setiap volume nodal terdiri dari fluida satu dimensi, yang berisi uap dan air yang homogen dan berada dalam kesetimbangan termodinamika.

Skenario Kecelakaan

Model kecelakaan penyisipan air dingin yang disebabkan oleh karena beroperasinya pompa primer cadangan tanpa sengaja dimodelkan sebagai berikut. Pada saat reaktor sedang beroperasi pada daya tinggi 25MW teras reaktor didinginkan dengan dua pompa pendingin primer dengan laju alir $3200 \text{ m}^3/\text{jam}$, tiba-tiba pompa ketiga yang merupakan pompa cadangan beroperasi tanpa sengaja. Kejadian ini mengakibatkan air primer yang disirkulasi mengalami penurunan suhu, maksimum 5 K. Dengan asumsi tidak terjadi percampuran antara suhu air kolam reaktor dan air pendingin teras reaktor, maka suhu air pendingin masuk ke teras dianggap mengalami penurunan suhu pendingin sebesar 5 K pula. Penurunan suhu sebesar ini akan menyebabkan peningkatan reaktivitas teras reaktor sebesar $\Delta\rho \leq 0,1\%$ ^[2].

Dalam pemodelan kasus DBA akibat kecelakaan karena penyisipan air dingin ini sistem saling mengunci (*interlock*) antar pompa pendingin primer dianggap gagal, atau dengan kata lain sinyal trip dianggap tidak efektif. Sehingga dalam pembuatan data masukan, sinyal trip yang menyebabkan reaktor *scram* dianggap hanya berasal dari densitas fluks neutron $\geq 114\%$.

TATA KERJA / PEMODELAN

Pemodelan perhitungan transien termohidrolika dan reaktivitas teras reaktor dilakukan dengan dua metode.

1. Penyisipan air dingin tanpa beroperasinya batang kendali otomatis (*Base case*)
Perhitungan transien termohidrolika dan reaktivitas dilakukan tanpa menggunakan batang kendali otomatis. Reaktor dibiarkan terganggu oleh adanya reaktivitas positif akibat penurunan suhu pendingin, baru kemudian batang kendali menyisip.
2. Penyisipan air dingin dengan beroperasinya batang kendali otomatis
Dalam model perhitungan ini perubahan daya dan reaktivitas teras akibat PAD, dikompensasi langsung oleh batang kendali otomatis.

Data Masukan

Kedua pemodelan di atas menggunakan data masukan hasil perhitungan teras silisida dengan tingkat muat $3,55 \text{ g U/cm}^3$ yang ditampilkan dalam tabel di bawah ini^[3].

Tabel 1. Data masukan perhitungan penyisipan air dingin.

PARAMETER	NILAI
Daya reaktor, MW	25
Termohidrolika	
Tin, °C	44,5
Pin, kg/cm ²	2,036
Laju alir, kg/det	900,791
Faktor puncak daya nuklir maks.	
Radial	2,391
Aksial	1,914
Faktor teknis	
Faktor kenaikan suhu pendingin (Fb) :	1,167
Faktor kenaikan fluks panas (Fh) :	1,200
Faktor kenaikan suhu film (Ff) :	1,260
Faktor ketidak pastian (Fu) :	1,200
Parameter kinetika	
Fraksi neutron lambat efektif,	$\beta_{\text{eff}} = 0,007243$
Umur rerata prompt neutron, detik	$l = 6,3582 \times 10^{-5}$
Umpan balik reaktivitas	
Koef. Umpan balik reaktivitas void, $\Delta k/k/\%$ void	-1,20E-03
Koefisien suhu moderator, $\Delta k/k/^\circ\text{C}$	-1,10E-04
Koefisien suhu elemen bakar (doppler), $\Delta k/k/^\circ\text{C}$	-1,60E-05

HASIL DAN PEMBAHASAN

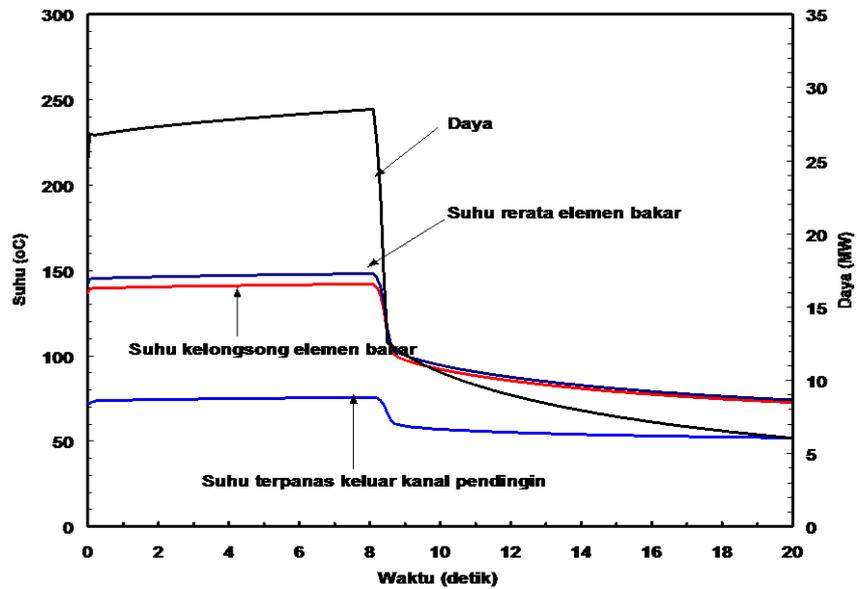
Program perhitungan EUREKA-2/RR dilengkapi dengan persamaan perpindahan panas untuk menghitung parameter termohidrolika pada kondisi setimbang (*steady state*). Persamaan yang digunakan untuk menghitung margin keselamatan termohidrolika teras reaktor, dihitung berdasarkan perhitungan fluks panas pada akhir pendidihan inti. Sedangkan RSG-GAS menggunakan kriteria batas keselamatan terhadap instabilitas aliran, agar dapat diperbandingkan maka perlu dilakukan perhitungan nilai instabilitas aliran dengan menggunakan hasil perhitungan parameter termohidrolika yang diperoleh dari EUREKA-2/RR.

Sesuai dengan pemodelan maka hasil perhitungan PAD terutama pada karakteristik transien reaktivitas, dengan dan tanpa pengoperasian sistem batang kendali otomatis. Pembahasan dilakukan terhadap karakteristik termohidrolika dan transien reaktivitas sejak terjadinya PAD hingga reaktor *scram* dan tercapainya kondisi stabil setelah *scram*.

Transien PAD tanpa batang kendali otomatis

Pada awal terjadinya PAD, daya reaktor meningkat dengan cepat karena adanya penyisipan

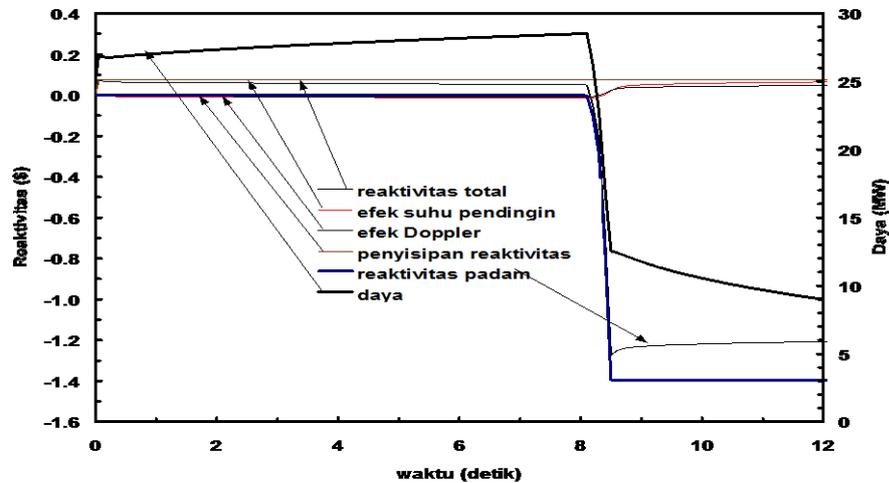
reaktivitas positif yang disebabkan oleh menurunnya suhu pendingin primer. Hal ini disebabkan karena koefisien reaktivitas suhu moderator/pendingin teras RSG-GAS adalah negatif $\alpha_T = \delta_p/\delta_T$. Beroperasinya pompa cadangan ini tidak secara langsung menyebabkan reaktor *scram*. Daya reaktor terpancung akibat sinyal sistem proteksi reaktor (*RPS=Reactor Protection System*), karena terlampauinya batas daya operasi mencapai 114% dari daya awal 25 MW atau 28,5 MW. Akan tetapi adanya waktu tunda antara sinyal dan reaktor trip selama 0,5 detik untuk mengeksekusi instrumentasi agar batang kendali jatuh, maka reaktor baru terpancung ketika daya reaktor mencapai 28,52 MW. Transien daya sejak penyisipan air dingin hingga reaktor trip memakan waktu selama 8,10 detik. Selama terjadi transien daya reaktor ini maka suhu elemen bakar, kelongsong maupun keluaran kanal pendingin mengalami peningkatan pula. Nilai untuk masing-masing parameter tersebut adalah 148,3 °C, 142,1 °C, dan 75,7 °C. Karakteristik transien parameter termohidrolika sebagai fungsi waktu ditunjukkan oleh Gambar 1. Kenaikan suhu dari kondisi setimbang reaktor yang dioperasikan pada daya 25 MW dan terjadinya *scram* akibat proteksi daya reaktor dapat dilihat pula pada Tabel 2^[4].



Gambar 1. Suhu dan daya transien selama “penyisipan” air dingin (daya awal 25 MW)

Tabel 2. Hasil perhitungan termohidrolika teras silisida RSG-GAS pada kondisi setimbang.

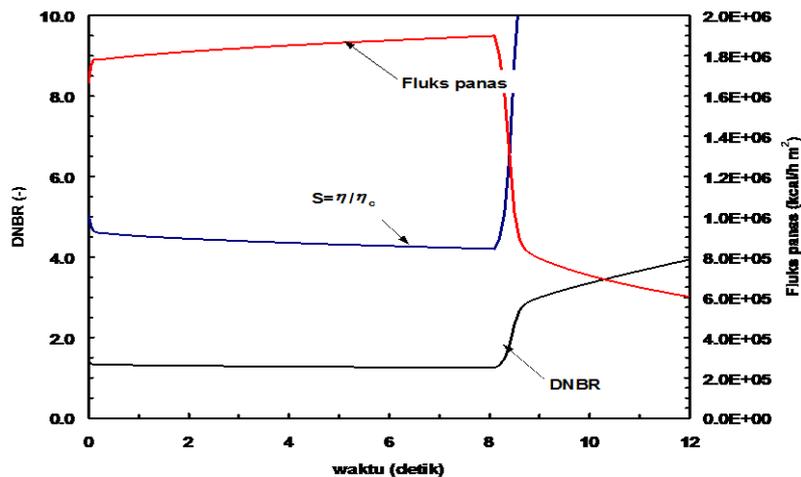
PARAMETER	DAYA 25 MW		DAYA 28,5 MW	
	Kanal rerata	Kanal panas	Kanal rerata	Kanal panas
Kecepatan pendingin, m/detik	3,83	3,83	3,83	3,83
Hilang tekan total teras, kg/cm ²	0,6090	0,6090	0,6090	0,6090
Tek. pend. keluar EB, kg/cm ²	1,514	1,514	1,514	1,514
Suhu jatuh keluar EB, C	-	116,25	-	116,26
Kenaikan suhu pend., C	9,70	27,03	11,05	30,81
Suhu maks. Kelongsong, C	82,19	136,99	88,27	142,86
Suhu maks. EB, C	84,39	142,22	89,76	148,13
Fluks panas rerata, W/cm ²	34,58	34,58	39,43	39,43
Fluks panas maks., kg/cm ²	66,20	199,44	75,47	227,36
ΔT_{ONB} , C	-	-7,30		-12,15
Marjin keselamatan:				
(a) DNBR		1,42		1,25
(b) $S = \eta/\eta_c$		5,03		4,24



Gambar 2. Transien daya dan reaktivitas selama “penyisipan” air dingin (daya awal 25 MW)

Pada Gambar 2 terlihat bahwa bersamaan dengan terpancungnya daya reaktor secara tajam dari daya 25 MW menjadi 12 MW kemudian meluruh secara perlahan hingga mencapai daya 0 MW, maka reaktivitas akibat penyisipan pendingin dan umpan balik reaktivitas Doppler menurun tajam dari 0,1\$ menjadi -1,3\$. Hal ini disebabkan karena batang kendali baru jatuh setelah reaktor terpancung.

Reaktivitas padam tersedia sebesar -1,4\$, hal ini menunjukkan bahwa reaktor masih menunjukkan keandalannya pada saat terjadi kecelakaan reaktivitas akibat PAD, karena masih memiliki reaktivitas padam yang lebih besar dari 0,5% atau 0,65\$ ($\% = \beta_{\text{eff}}$)^[2].



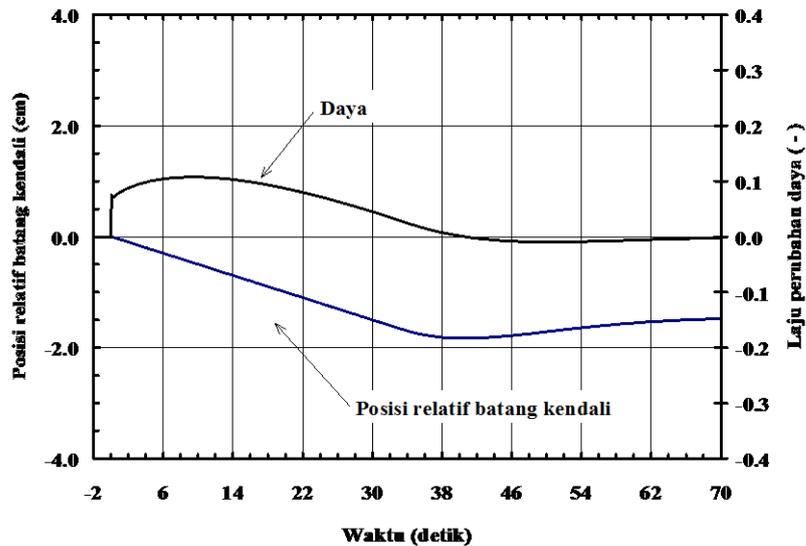
Gambar 3. Margin keselamatan dan fluks panas transien selama “penyisipan” air dingin

Gambar 3 menunjukkan karakteristik margin keselamatan terhadap akhir pendidihan inti dan instabilitas aliran (S) saat transien. Margin keselamatan menurun sesaat setelah PAD, dan kondisi minimum keselamatan terhadap DNBR dan S tercapai ketika fluks panas mencapai nilai maksimumnya, masing-masing sebesar 1,25 dan 4,20. Dengan menggunakan kriteria terhadap instabilitas aliran, maka dapat dikatakan bahwa S minimum yang terjadi pada kecelakaan akibat PAD ini, masih memenuhi kriteria batas keselamatan. Kondisi setelah reaktor terpancung tidak diperhatikan karena baik margin keselamatan

maupun fluks panas yang terjadi menunjukkan kecenderungan yang lebih aman.

Transien PAD dengan mengoperasikan sistem batang kendali otomatis.

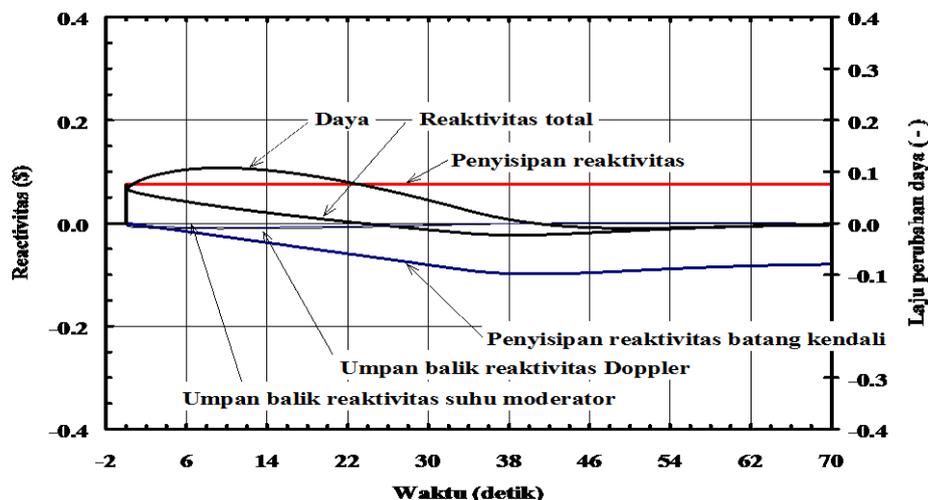
Pada model perhitungan ini diasumsikan bahwa pada saat terjadi kecelakaan, batang kendali otomatis beroperasi. Di sini akan dilihat kemampuan kecepatan pergerakan batang kendali dalam mengkompensasi penyisipan reaktivitas positif yang berdampak pada kenaikan daya reaktor.



Gambar 4. Penyisipan reaktivitas: $5,5 \times 10^{-4} \Delta k/k$ step, “penyisipan” air dingin dengan sistem batang kendali otomatis

Gambar 4 menunjukkan laju perubahan daya transien dan posisi relatif batang kendali. Ketika disisipkan reaktivitas penurunan suhu pendingin yang merupakan koefisien reaktivitas suhu moderator sebesar $5,5 \times 10^{-4} \Delta K/K$ ($7,18 \times 10^{-4} \$$) ke dalam teras reaktor, maka daya reaktor segera meningkat. Batang kendali segera mengkompensasi reaktivitas positif tersebut dengan kecepatan

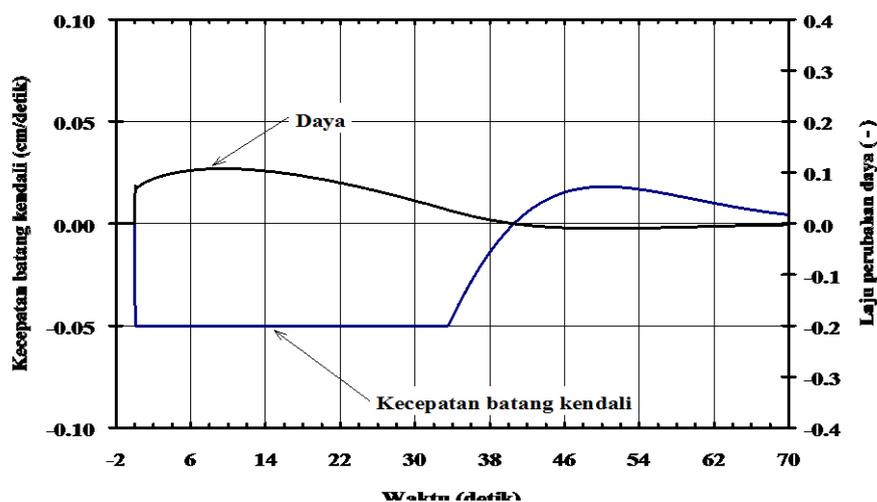
maksimum 0,5 cm/detik^[2]. Akibat beroperasinya sistem batang kendali otomatis maka daya reaktor tidak langsung *scram* akibat kenaikan daya, melainkan secara berangsur menurun dan mencapai daya awal 25 MW dalam waktu 38 detik. Hal ini sesuai dengan analisis kemampuan batang kendali untuk mengkompensasi penyisipan reaktivitas yang terjadi pada teras oksida^[5].



Gambar 5. Laju perubahan daya transien dan reaktivitas selama “penyisipan” air dingin dengan sistem batang kendali otomatis.

Laju perubahan daya reaktor dan reaktivitas secara lengkap ditampilkan pada Gambar 5. Pada Gambar tersebut terlihat bahwa penyisipan reaktivitas akibat PAD dianggap tetap. Akibat adanya kompensasi sistem batang kendali otomatis maka umpan balik reaktivitas suhu moderator dan Doppler tidak mengalami penurunan secara drastis akan tetapi bergerak relatif tetap. Hal ini disebabkan karena pengaruh penambahan

reaktivitas relatif kecil dibandingkan dengan akibat kenaikan daya. Transien reaktivitas total berayun sebagai fungsi waktu dengan slope yang sama dengan penyisipan reaktivitas batang kendali. Hal ini dapat dimengerti mengingat penyisipan reaktivitas batang kendali lebih dominan daripada penyisipan reaktivitas akibat PAD.



Gambar 6. Laju perubahan daya dan kecepatan batang kendali selama “penyisipan” air dingin dengan sistem batang kendali otomatis.

Gambar 6 menunjukkan pergerakan batang kendali dalam mengkompensasi kenaikan daya reaktor. Akibat PAD daya reaktor meningkat mencapai daya maksimum 27,5 MW dalam waktu 8 detik, segera sesaat setelah terjadi penyisipan reaktivitas positif PAD, batang kendali menyisip dengan memberikan reaktivitas negatif. Kecepatan batang kendali sebesar 0,5 cm/detik selama 34 detik berhasil mengkompensasi kenaikan daya reaktor hingga mencapai daya awal (25 MW) kembali. Segera setelah daya reaktor mencapai daya awalnya maka batang kendali secara otomatis berbalik arah dan mencapai posisi awal sebelum PAD pada detik ke 70.

KESIMPULAN

Analisis kecelakaan akibat penyisipan air dingin yang disebabkan oleh beroperasinya pompa primer cadangan tanpa sengaja, dengan dua model perhitungan memberikan hasil analisis dan simpulan sebagai berikut.

1. Pada kecelakaan akibat PAD tanpa beroperasinya sistem batang kendali otomatis akan menyebabkan reaktor *scram* akibat sinyal yang berasal dari proteksi daya reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

1. N.OHNISHI,et.al.,*EUREKA-2/RR: A Computer code for the Reactivity Accident Analysis in a Water Cooled Reactor*, JAERI-M-84-074,1984.
2. BATAN, *Safety Analysis Report of the Indonesian Multipurpose Reactor GA-Siwabessy*, Rev.8, Maret 1999.
3. LIEM PENG HONG, BAKRI ARBIE, T.M. SEMBIRING, PRAYOTO, *Fuel Management Strategy for the New Equilibrium Silicide Core Design of RSG-GAS (MPR-30)*, Nuclear, Eng and Design, No. 180 pg. 207-219, 1998.
4. ENDIAH PUJI HASTUTI and MASANORI KAMINAGA *Thermal Hydraulic Transient Accident Analysis of The RSG-GAS Silicide Core Design by Using EUREKA-2/RR Code*, JAERI-Report, 1998
5. IMAN KUNTORO and MASANORI KAMINAGA, *Simulation of Automatic Control Performance by Digital Computer Code EUREKA-2 for Multi Purpose Reactor GA Siwabessy (MPR-GAS, JAERI Report, 1992*

DISKUSI

Pertanyaan : (Slamet Wiranto)

1. Mohon dijelaskan bagaimana penyisipan air pendingin bisa menimbulkan reaktivitas positif ?
2. Asumsi bahwa pompa pendingin cadangan bisa tiba-tiba beroperasi sendiri rasanya terlalu ekstrim ?
3. Mungkin penelitian ini cocok untuk reaktor yang berada di negara yang perubahan suhunya mencolok ?

Daya reaktor maksimum akibat penyisipan reaktivitas positif tercapai pada detik ke 8,1. Pada pengoperasian daya reaktor sebesar 25 MW maka kondisi ini margin keselamatan teras RSG-GAS masih menunjukkan keandalannya.

2. Bila pada saat terjadinya PAD sistem batang kendali otomatis dioperasikan, maka pergerakan batang kendali otomatis mampu mengkompensasi penyisipan reaktivitas suhu pendingin/moderator yang terjadi, reaktor tidak sempat *scram* dan kembali mencapai kondisi setimbang pada daya awal 25 MW pada detik ke 34. Batang kendali mencapai posisi awalnya pada detik ke 70.

Ucapan Terima kasih

Terima kasih kami sampaikan kepada Mr. M. Kaminaga yang telah membantu dalam pemodelan perhitungan dalam rangka program kerjasama bilateral BATAN-JAERI, terima kasih kami sampaikan pula kepada Dr. Dhandang Purwadi yang telah membantu mengoreksi makalah ini, serta semua pihak yang telah membantu terlaksananya pembuatan analisis ini.

Jawaban : (Endiah PH.)

1. Penyisipan air dingin memberikan reaktivitas positif disebabkan karena koefisien reaktivitas suhu moderator/pendingin teras RSG-GAS adalah negatip $\alpha_T = \sigma_p/\sigma_T$.
2. Asumsi ini dilakukan untuk memenuhi salah satu analisis pada kecelakaan dasar desain (DBA = *design basic accident*)
3. Ya, untuk RSG GAS sendiri akan menambah tingkat keselamatan ditinjau dari perubahan reaktivitas akibat PAD.

Pertanyaan : (Dhandang P)

Apa yang mendasari pengambilan asumsi penurunan suhu 5°C pada saat PAD ?

Jawaban : (Endiah PH.)

1. Diambil dari SAR RSG-GAS, dimana penurunan suhu maksimum adalah 5°C
2. Dapat diturunkan dari persamaan pembangkitan daya sebagai fungsi massa pendingin, kapasitas panas air dan ΔT .

Pertanyaan : (Asep Saepuloh)

Bila terjadi PAD kemudian BKD dioperasikan, maka reaktor tidak scram, kenapa ?

Jawaban : (Endiah PH.)

Karena dengan BKD dioperasikan, maka akan mampu daya dikendalikan sampai kembali kepada daya semula.