

EVALUASI PENYEBAB SCRAM PADA KANAL UBL SISTEM PROTEKSI REAKTOR DALAM PENGOPERASIAN REAKTOR RSG-GAS

Jaja Sukmana¹, Rachmat Triharto², Irwan³
^{1,2,3} PRSG-BATAN Kawasan Puspiptek Gd. 30 Serpong, 15310

E-mail: jsukmana@batan.go.id

Diterima Editor : 17 Maret 2017

Diperbaiki : 24 Maret 2017

ABSTRAK

EVALUASI PENYEBAB SCRAM PADA KANAL UBL - SISTEM PROTEKSI REAKTOR DALAM PENGOPERASIAN REAKTOR RSG-GAS. Keselamatan dalam pengoperasian reaktor diterapkan oleh Sistem Proteksi Reaktor dengan tindakan *scram*. Namun *scram* yang sering terjadi merupakan kegagalan operasi dan menimbulkan risiko lain. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pemicu dan penyebab dasar terjadinya *scram* dengan metode deskriptif analitik melalui wawancara, observasi, dan telaah dokumen yang dipadukan dengan penyusunan *fault tree analysis*. Hasil deskriptif analitik menyatakan bahwa pemicu timbulnya *scram*, yaitu kerapatan fluks neutron terlalu tinggi, periode pengoperasian terlalu cepat, pembebanan atau daya di teras tidak merata, dan terjadinya transien reaktivitas positif. Sedangkan penyebab dasar kejadian *scram* pada kanal *unbalanced load*, terdiri dari kegagalan sistem instrumentasi, kondisi fluks neutron tidak merata, jatuhnya salah satu batang kendali, terjadinya pengosongan tabung berkas, gangguan *handling* dan *loading* sampel iradiasi, dan terjadi panas lokal pada elemen bakar. Karenanya fungsi *scram* sebagai antisipasi kecelakaan juga menjadi umpan balik pengalaman operasi untuk rekomendasi pemutakhiran penilaian keselamatan sehingga kegagalan operasi dapat diminimalisir.

Kata kunci: Keselamatan operasi reaktor nuklir; Penyebab kejadian; *Scram* reaktor; Sistem proteksi reaktor.

ABSTRACT

SCRAM CAUSE EVALUATION OF UNBALANCED LOAD CHANNEL - REACTOR PROTECTION SYSTEM AT OPERATION OF THE RSG-GAS REACTOR. *Safety in the operation of the Reactor Protection System is implemented by the scram action. However scram which often happened is the failure of the operation and poses other risks. The purpose of this study is to determine the trigger and the reasons for scram with analytic descriptive method through interviews, observation and document review, combined with the preparation of fault tree analysis. The analytic descriptive results show that trigger of scram are, the neutron flux density is too high, too fast operation period, unbalanced load, and the occurrence of positive transient reactivity. While the basic causes of the scram incident on channel unbalanced load, consisting of the failure of instrumentation systems, neutron flux uneven conditions, the fall of one of control rods, the emptying of the beam tube, interference handling and loading of samples irradiated, and the local hot channel at the fuel elements. Therefore function of scram as anticipation of the accident is also the feedback of operating*

experience for updating on safety assessment so that failure of the operation can be minimized.

Keywords: Cause of the incident; Reactor protection system; Suddenly shutdown of reactor; The safe operation of nuclear reactor.

PENDAHULUAN

Insiden nuklir terjadi karena kegagalan komponen menyebabkan inti reaktor tidak dapat dikontrol dan didinginkan sehingga bahan bakar nuklir yang dilindungi (yang berisi uranium dan produk fisi radioaktif) mulai memanaskan dan bocor. Kebocoran dianggap sangat serius karena kemungkinan bahwa kontainmen reaktor mulai gagal, sehingga terjadi lepasan zat radioaktif ke lingkungan. Seperti kecelakaan reaktor nuklir yang terjadi di Windscale, Mayak, Chernobyl, dan Fukushima^[3]. Kecelakaan ini memiliki dampak kesehatan, ekonomi, sosial dan psikologis dalam jangka pendek maupun jangka panjang yang berbahaya bagi manusia.

Potensi kecelakaan dalam pengoperasian reaktor RSG-GAS yang mungkin timbul diperhitungkan dari akibat kejadian berikut ini^[8]: 1. Kehilangan catu daya listrik; 2. Inseri reaktivitas lebih dan anomali distribusi daya; 3. Kehilangan aliran (*LOFA = Loss of Flow Accident*); 4. Kehilangan pendingin (*LOCA = Loss of Coolant Accident*); 5. Kesalahan penanganan atau kegagalan peralatan; 6. Kejadian internal khusus (ledakan, kebakaran, dan lain-lain); 7. Kejadian eksternal khusus (gempa bumi, banjir, kejatuhan pesawat); dan 8. Kesalahan manusia. Dalam analisis keselamatan reaktor RSG-GAS, risiko kejadian tersebut dipertimbangkan sebagai kondisi Kecelakaan Basis Desain (*Design Basic Accident, DBA*).

Beberapa kejadian yang terekam dari penelusuran dan evaluasi pengalaman pada operasi reaktor RSG-GAS, diantaranya terjadi kontaminasi ke luar gedung reaktor, terjadi kerusakan dan kebocoran sampel FPM saat iradiasi, terjadinya kerusakan bahan

bakar dengan kode RI-362, terjadinya kenaikan radioaktivitas udara di Balai Operasi gedung reaktor, dan terganggunya jadwal operasi pemanfaatan reaktor, merupakan bentuk penyimpangan atau kejadian *anomaly* yang tetap harus terkendali^[4,10].

Reaktor RSG-GAS didesain memiliki sistem keselamatan inheren dan keselamatan teknis dari sistem proteksi reaktor. Sistem Proteksi Reaktor (SPR) menerapkan batasan dan kondisi operasi untuk mencegah terjadinya kondisi abnormal hingga kecelakaan^[2]. Namun demikian, kegagalan SPR dapat menjadi sumber bahaya, berupa reaktor tidak mampu *start-up*, pemadaman operasi reaktor secara mendadak (*scram*), dan bahaya terlampauinya batas keselamatan.

Dengan demikian, maka tujuan khusus yang ingin dicapai dalam penelitian ini, yaitu:


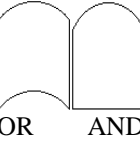

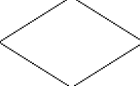
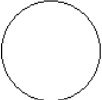

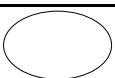
1. Mencari pemicu timbulnya tindakan protektif *scram* oleh SPR.
2. Mencari penyebab paling dasar dari *scram* oleh pemantau *fluks neutron* khususnya kanal *Unbalanced Load* (UBL) dari SPR.
3. Melakukan evaluasi terhadap setiap faktor penyebab dasar kejadian ketidakseimbangan beban/daya (UBL).

TINJAUAN TEORITIS

Bahaya didefinisikan sebagai sesuatu atau sumber yang berpotensi menimbulkan cedera atau kerugian baik kepada manusia, proses, property, dan lingkungan. Sumber bahaya meliputi bahaya internal yang dapat berasal dari bahan/material, alat/mesin, proses, lingkungan kerja, metode kerja, cara kerja, maupun produk, dan bahaya eksternal yang berasal dari lingkungan dan manusia^[6].

Metode identifikasi bahaya dalam penelitian ini, diantaranya digunakan *Fault tree analysis* (FTA). FTA merupakan diagram logika yang digunakan untuk mewakili masing-masing dampak dari suatu peristiwa dan penyebab dari suatu peristiwa^[5]. Diagram ini juga menyatakan ilustrasi bebas dari rangkaian potensi kegagalan peralatan atau kesalahan manusia yang dapat menimbulkan kerugian. Istilah-istilah dan simbol dalam FTA disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Istilah dan simbol dalam metode FTA^[5]

Istilah	Simbol	Keterangan
<i>Event</i>		Penyimpangan yang tidak diharapkan dari suatu keadaan normal pada suatu komponen dari sistem
<i>Top Event</i>		Kejadian yang dikehendaki pada “puncak” yang akan diteliti lebih lanjut ke arah kejadian dasar lainnya dengan menggunakan gerbang logika untuk menentukan penyebab kegagalan
<i>Logic Event</i>	 OR AND	Hubungan logika antara <i>input</i> (penyebab) dinyatakan dalam AND (“dan”) dan OR (“atau”). OR menunjukkan <i>output</i> terjadi jika salah satu input terjadi. AND menunjukkan bahwa <i>output</i> terjadi hanya jika semua <i>input</i> terjadi.
<i>Transferred Event</i>		Segitiga yang digunakan simbol transfer. Simbol ini menunjukkan bahwa uraian lanjutan kejadian berada di halaman lain.
<i>Undeveloped Event</i>		Kejadian dasar (<i>Basic Event</i>) yang tidak akan dikembangkan lebih lanjut karena tidak tersedianya informasi.
<i>Basic Event</i>		Kejadian yang tidak diharapkan yang dianggap sebagai penyebab dasar sehingga tidak perlu dilakukan analisa lebih lanjut.
<i>Inhibit gate</i>		AND khusus. <i>Output</i> disebabkan oleh satu <i>input</i> setelah memenuhi kondisi tertentu.
<i>Conditioning event</i>		Kondisi batasan khusus yang diterapkan pada suatu gerbang. Kejadian <i>ouput</i> terjadi jika kejadian <i>input</i> terjadi dan memenuhi kondisi tertentu.

Sumber: Vesely, WE (1981), *Fault Tree Handbook*, Washington DC US NRC.

Tujuan keselamatan nuklir secara teknis (keselamatan reaktor) diwujudkan melalui penerapan pertahanan berlapis (*defense in depth*), yang meliputi^[1]: 1) Pencegahan kegagalan operasi dengan desain konservatif, 2) Pencegahan kejadian operasi menjadi kecelakaan, 3) Pengendalian kecelakaan

dasar desain, 4) Pengendalian untuk menjaga agar lepasan zat radioaktif serendah mungkin, dan 5) Mitigasi konsekuensi radiologi untuk lepasan zat radioaktif. Sistem pertahanan pada tingkat ke-2 dan pada tingkat ke-3 sebagai bagian yang dievaluasi dalam penelitian ini.

Tabel 2. Setting batas operasional dari variabel pemantau kerapatan *fluks neutron*-SPR, reaktor RSG-GAS^[8]

No.	Variabel Proses		Nilai Batasan	Waktu Merespon	Unit Logik
	Parameter kerapatan fluks n	Kode Kanal			
1	rentang awal (batas bawah)	JKT01 CX811, 821	$n\text{-flux} \leq 2 \text{ cps}$	n.a	1 dari 2
	rentang awal (batas atas)	JKT01 CX811, 821	$n\text{-flux} \geq 10^5 \text{ cps}$	n.a	1 dari 2
2	rentang menengah, respon periode	JKT02 CX811, 821	$T_{\text{periode}} \leq 15 \text{ detik}$	2435 ms	1 dari 2
	rentang menengah, respon daya	JKT02 CX811, 821	Daya > 5% ($5 \times 10^{-4} \text{ A}$)	235 ms	1 dari 2
3	rentang daya (<i>take over detector</i>)	JKT03 CX811, 821, 831, & CX841	$\Phi \geq 3\% P_N$	n.a	2 dari 3
4	rentang daya - <i>unbalanced load</i>	JRE/JRF/JRG10 FX804	$S_{az} \geq 0,16$	235 ms	2 dari 3 / 1 dari 4*)
5	rentang daya - <i>negative floating</i> ($-\Delta\phi/\Delta t$)	JRE/JRF/JRG10 FX803	Fl.lim.val. ≈ 0 neg., $\rho \geq -1,5\%$	235 ms	2 dari 3
6	N_{16} -koreksi- <i>positive floating</i> ($+\Delta\phi/\Delta t$)	JRE/JRF/JRG10 FX802	Fl.lim.val. ≈ 0 pos., $\rho \geq +0,5\%$	235 ms	2 dari 3
7	Daya reaktor terkoreksi N_{16}	JRE/JRF/JRG10 FX801 & JRF10 FX805	$\Phi \text{ corr.} \geq 109\% (32,7 \text{ MW})$	235 ms	2 dari 3

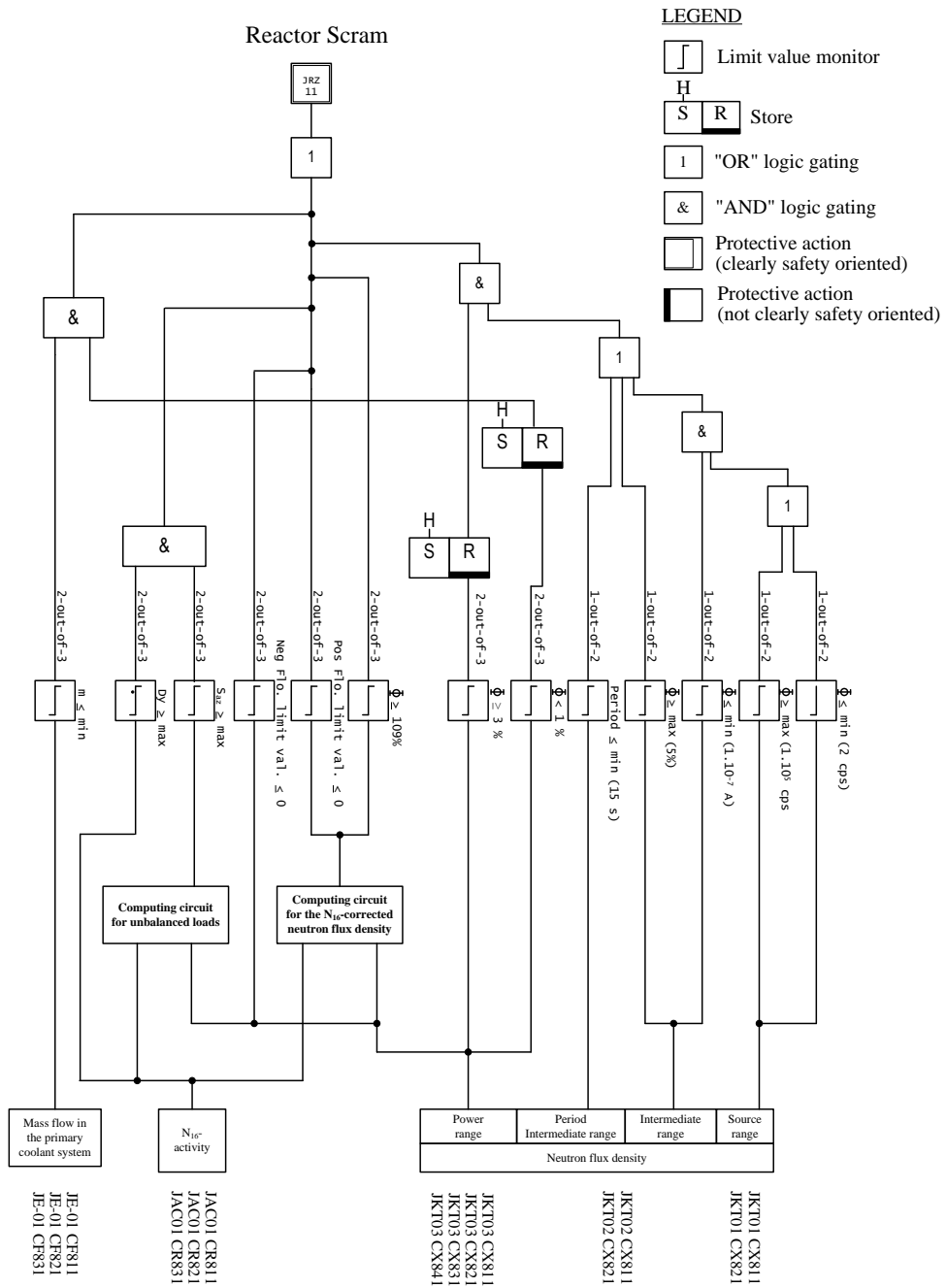
Keterangan:

Sumber: Bab XVI, LAK RSG Rev. 10.1 (edit)

*) 1 dari 4 berlaku hanya untuk detektor

Sistem proteksi reaktor harus didesain mampu menginisiasi tindakan protektif secara otomatis untuk menghentikan kejadian awal dan untuk mempertahankan reaktor tetap dalam kondisi selamat serta mencegah tidak terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan^[1]. Jenis tindakan protektif yang dipicu oleh SPR adalah saling kunci pengoperasian reaktor; pemadaman operasi reaktor secara cepat/tiba-tiba (*scram, safety control rod axe man*); dan pengaktifan ragam keselamatan teknis lainnya^[10]. *Scram* reaktor merupakan proses penghentian operasi

reaktor secara tiba-tiba, apabila parameter batasan dan kondisi operasi reaktor terlampaui. Variabel proses/pemantau parameter operasi reaktor pada SPR, membandingkan nilai terukur terhadap nilai batas operasi dan masing-masing dibuat dalam 2 (dua) atau 3 (tiga) unit pemantau *redundant*^[8]. Kanal pemantau fluks neutron merupakan sistem instrumentasi yang mendeteksi, mengukur, dan mengolah data besaran atau populasi neutron di teras reaktor. Berikut data kanal pemantau dan pemroses *fluks neutron* di teras reaktor RSG-GAS, ditunjukkan pada Tabel 2.



Sumber: LAK RSG-GAS Rev. 10.1 Tahun 2011

Gambar 1. Gerbang logik pemantau fluks neutron-sistem instrumentasi dan kendali (SIK) SPR RSG-GAS^[8] (edit)

METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengikuti metode penelitian analisis kualitatif (kualitatif deskriptif). Kualitatif, untuk mengetahui penyebab lebih mendasar dari terjadinya *scram* sedangkan deskriptif, untuk penggambaran kondisi dan kinerja dari kanal pantau SPR khususnya kanal UBL.

Pengumpulan data dapat menggunakan sumber primer dan sumber sekunder. Sumber primer adalah sumber data yang langsung memberikan data kepada pengumpul data dan sumber sekunder merupakan sumber yang tidak langsung memberikan data kepada pengumpul data, misalnya lewat dokumen. Untuk menjaga validitas data dalam penelitian dilakukan triangulasi, baik dari metode atau dari sumber data. Triangulasi metode merupakan cara memperoleh informasi dengan metode yang berbeda, yaitu observasi, menelaah dokumen, serta melakukan wawancara. Sedangkan triangulasi sumber diperoleh dari narasumber dengan kode RSG-1 s/d RSG-6.

Selanjutnya melakukan evaluasi penyebab *scram* menggunakan FTA. Berikut ini beberapa aturan dalam membangun *Fault Tree*^[7]:

1. Tulis semua pernyataan kejadian sebagai kesalahan atau kalimat negatif, tentukan jenis kegagalan dan batasannya.
2. Kegagalan sistem menggunakan gerbang AND, OR, INHIBIT, atau tidak menggunakan gerbang sama sekali.
3. Kondisi kegagalan komponen selalu menggunakan OR.
4. Suatu gerbang tidak boleh secara langsung dihubungkan dengan gerbang yang lain.
5. Pada gerbang OR, *input* menyebabkan *output*.
6. Pada gerbang AND definisikan hubungan sebab, keterkaitan antar penyebabnya, satu *input* tidak menyebabkan terjadi *output*.

7. Gerbang INHIBIT menyatakan hubungan antara satu kesalahan dengan kesalahan lain tetapi harus disertai kondisi.

HASIL PENELITIAN

1) Deskripsi Pemicu Timbulnya *Scram* di Reaktor RSG-GAS

Batasan dan kondisi operasi kerapatan fluks neutron atau daya sebagai pemicu kejadian *scram* yang diinstruksikan oleh sistem proteksi reaktor^[8], terjadi apabila (khusus pada operasi daerah daya):

A. Pada daerah operasi menengah (*intermediate range*), dipantau oleh unit JKT02, yaitu:

1. Fluks neutron pada jangkauan menengah tidak tersedia minimal 10^{-7} A.
2. Kerapatan *fluks neutron* pada jangkauan menengah terlalu tinggi, maks 5% daya.
3. Pengoperasian reaktor pada jangkauan menengah memiliki periode yang terlalu kecil, minimal 15 detik.

B.1. Pada daerah operasi daya (*power range*), dipantau oleh unit JKT03, yaitu:

1. Operasi pada daya rendah dengan moda konveksi alam, lebih dari 1% daya.
2. Operasi pada tingkat daya ($\phi \approx 3\%$) sebelum dilakukan pemindahan (*take over*) dari unit pemantau *fluks neutron intermediate* ke *power range*.

B.2. Pada daerah operasi daya (*power range*) pengolahan data logik, dipantau oleh unit JRE/F/G10, yaitu:

1. Kerapatan *fluks neutron* terkoreksi N_{16} dalam kanal jangkauan daya terlalu tinggi, maksimal 109%.
2. Transien reaktivitas positif pada kondisi kerapatan fluks neutron terkoreksi N_{16} terlalu tinggi, maks 0,5%.
3. Transien reaktivitas negatif dari kerapatan *fluks neutron* terlalu tinggi, maks -1,5%.
4. Sinyal pengukuran beban tak seimbang melebihi nilai batas sebesar 16%.

2) Menentukan Penyebab Dasar Kejadian *Scram* pada Kanal UBL di Reaktor RSG-GAS

Scram yang terjadi harus senantiasa dapat teridentifikasi penyebabnya. Keseringan kejadian tersebut tetap menjadi gangguan pelayanan kualitas terhadap pelanggan, sebagaimana informasi yang diperoleh berikut ini:

“Dengan sering terjadinya *scram*, secara QA akan mengganggu pelayanan kualitas kepada pelanggan sehingga akan dapat merugikan

pelanggan. Secara keselamatan, *scram* yang sering terjadi harus dilakukan evaluasi” (RSG-6).

Dari hasil penelitian melalui data rekaman laporan operasi^[9], kejadian *scram* yang terindikasi pada kanal pemantau/pengolah data *fluks neutron* dapat dirinci, sebagai berikut:

Tabel 2. Jumlah kejadian *scram* pada indikator kanal fluks neutron SPR^[9]

No.	Kanal Fluks Neutron SPR		Jumlah Scram	
1.	Kanal daerah awal (<i>start-up range</i>)	JKT01 CX	1 kali	2,13%
2.	Kanal daerah menengah (<i>intermediate range</i>)	JKT02 CX	13 kali	27,66%
3.	Kanal daerah daya (<i>power range</i>)	JKT03 CX	16 kali	34,04%
4.	Kanal logik ketidaksetimbangan daya (<i>unbalanced load</i>)	JRE/F/G10 FX 804	16 kali	34,04%
5.	Kanal logik negatif floating (<i>negative floating limit value</i>)	JRE/F/G10 FX 803	1 kali	2,13%
6.	Kanal logik positif floating (<i>positive floating limit value</i>)	JRE/F/G10 FX 802	0	0
7.	Kanal Daya terkoreksi N16	JRE/F/G10 FX 801, JRF10 FX805	0	0
	Jumlah		47 kali	100%

Sumber: Hasil Telaah Dokumen Laporan Operasi, PRSG, 2012-2015.

Berikut ini, penjelasan kondisi pelaksanaan operasi ketika kejadian *scram* yang terekam pada laporan operasi menurut pantauan operator reaktor, yaitu:

Scram pada indikator logik UBL; dari 16 kejadian diasumsikan bahwa:

- 8 (delapan) kejadian karena kondisi gangguan SIK dari JKT03 CX811-831 yang dibuktikan dengan adanya perbaikan atau penggantian komponen dan juga reaktor sedang melakukan iradiasi sampel.
- 5 (lima) kejadian karena kondisi gangguan SIK dari JKT03 CX841 yang berdampak langsung pada ketidak seimbangan daya dan juga reaktor sedang melakukan iradiasi sampel.
- 2 (dua) kejadian murni terbaca sebagai kejadian UBL baik saat iradiasi atau gangguan SIK dari JRE10 FX804.

Menurut SAR Rev.7 Chapter 15.2.3 dan LAK Rev.10-1 Bab XVI.D.4.7 dan Bab VIII B.2.4^[10], penyebab *scram* yang terpantau oleh JRE/F/G10 FX804 yaitu karena terjadi penyimpangan *fluks neutron* dari suatu posisi lebih dari 16% dan kegagalan sistem instrumentasi pada kanal daerah daya. Kedua hal tersebut disebabkan karena gangguan reaktivitas pada posisi di teras, faktor *hot* kanal, dan kerusakan JKT03 CX841. Penyebab gangguan reaktivitas adalah posisi *loading* iradiasi dan pengosongan tabung berkas. Penyebab lainnya, karena jatuhnya batang kendali.

Sedangkan dari hasil wawancara terkait penyebab *scram* yang terpantau oleh JRE/F/G10 FX804, diperoleh pernyataan sebagai berikut:

“Iya, kerusakan atau kegagalan sistem instrumentasi memenuhi kriteria pemicu *scram*” (RSG-1).

“*Scram* rata-rata berasal dari kegagalan sistem instrumentasi batang kendali. Perkiraan awal dari kerusakan pada detektor, lalu diketahui bahwa *fluks neutron* telah tinggi” (RSG-2).

“Ya, ..Kerusakan pada JKT03 CX811 maka UBL terlewati lebih dari 16%” (RSG-3).

“Karena pengaruh peningkatan resistansi dari sistem instrumentasi, dan UBL dari resistansi intrumentasi bisa direkayasa” (RSG-4).

“Gangguan satu saja (sistem instrumentasi) menimbulkan kondisi *unbalanced load*” (RSG-5).

“Benar..., dan sebagai penyebab paling dominan karena *ageing*, penggantian yang tidak sesuai *spektek*” (RSG-5).

Dan akibat lainnya secara umum, terungkap sebagai berikut:

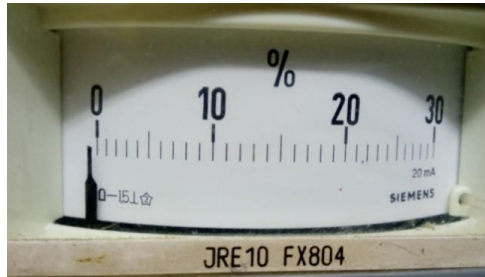
“Akibat pemasangan atau penarikan batang kendali secara tidak merata, akibat masuknya target iradiasi di satu posisi, dan adanya pengujian absorber di posisi kisi H-10” (RSG-1).

“Terjadi karena kesalahan mengatur batang kendali... dan kemungkinan karena penumpukan sampel pada satu posisi saja” (RSG-2).

“Perkiraan awal dari kerusakan pada detektor..., lalu diketahui bahwa fluks neutron telah tinggi” (RSG-2).

Data hasil telaah dokumen dan hasil wawancara secara keseluruhan dipadukan urutan penyebab kejadiannya pada tabel 6.

B. Monitor JRE10 FX804 hasil observasi



Gambar 2. 1 Foto indikator UBL (JRE10 FX804) dalam satuan persen (%)

Monitor pemantau ketidak seimbangan daya pada operasi daerah daya (Gambar2) hanya satu penampil dalam satuan %. Satuan % (persen) berasal dari nilai perbandingan rata-rata fluks tertinggi dengan fluks terendah dari empat posisi pantauan di teras. Nilai batas perbedaan tertinggi diseting pada nilai nominal 16%.

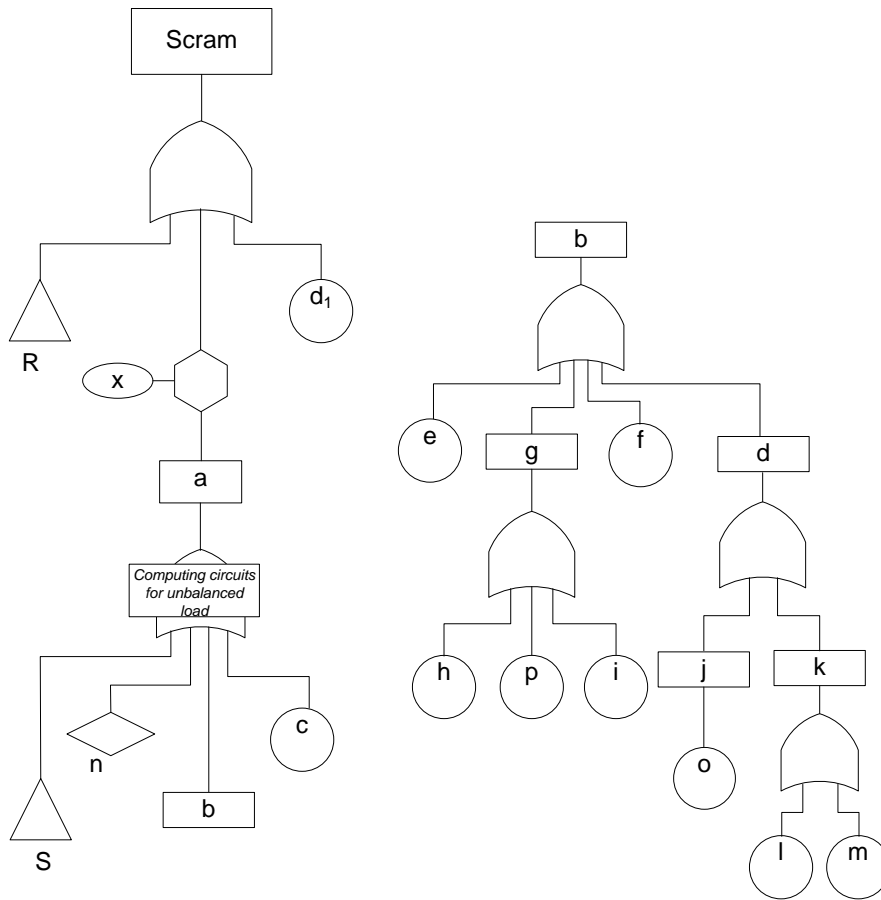
C. Evaluasi kejadian *scram* pada JRE/F/G10 FX804 menggunakan Diagram FTA

Sebagaimana langkah membangun FTA^[6,7], diperoleh diagram FTA sebagai kejadiandari indikator pengolah kerapatan fluks neutron daerah daya ketidakseimbangan beban (UBL):

Tabel 6. Kejadian *scram* pada indikator kanal logik *unbalanced load*-JRE/F/G10 FX804

No.	Indikasi dan Batasan	Penyebab Pertama	Penyebab Kedua	Penyebab Ketiga	Penyebab keempat
1.	Kondisi nilai fluks neutron di teras tidak merata. *(1,2) Batasan: 16%	Gangguan reaktivitas pada posisi di teras.*(1)	<i>Handling/ loading</i> iradiasi.*(1,2)	-	-
			Pengosongan tabung berkas iradiasi.*(1)		
			Gangguan sistem instrumentasi.*(1,2)	Penuaan.*(2)	Resistansi meningkat/ korosi, HV <i>low</i> .*(2)
				Lampau jangkau ukur.*(2)	Detektor tidak sesuai spektek.*(2)
			Kesalahan <i>handling</i> BK.*(1,2)	Jatuhnya salah satu BK.*(1)	-
		Kesalahan pengaturan oleh operator.*(2)			
		BK kompensasi tidak optimal.*(2)			
	Fluks neutron di teras sudah tinggi.*(2)	-	-	-	
	Faktor <i>hot</i> kanal.*(1)	-	-	-	

Ket: * (1): hasil telaah dokumen LAK dan Lap. Operasi RSG
(2): hasil wawancara



Keterangan:

- R = Gangguan kanal logik pemantau/proses fluks n lain
- S = Kenaikan aktivitas N_{16} pada pendingin primer
- a = Ketidakseimbangan beban terkoreksi daya P_{N16}
- b = Gangguan reaktivitas pada posisi di teras
- c = Fluks neutron di teras reaktor sudah tinggi lebih dari normalnya
- $d_1 = d$ = Gangguan sistem instrumentasi
- e = Gangguan *handling* dan *loading* iradiasi di teras
- f = Pengosongan tabung berkas iradiasi

- g = Kesalahan *handling* BK
- h = BK kompensasi tidak optimal
- i = Jatuhnya salah satu BK
- j = Melampaui seting/skala ukur
- k = Penuaan
- l = Korosi/resistansi jaringan meningkat
- m = HV detektor melemah
- n = Faktor *hot channel*
- o = Detektor baru tidak sesuai spektek
- p = Kesalahan pengaturan BK
- $x = \Delta\Phi_n \leq 16\%$

Gambar 3. Diagram logik penyebab *scram* pada JRE/F/G10 FX804

PEMBAHASAN

1) Pemicu timbulnya *scram* reaktor

Scram yang terindikasi dipicu karena terlampauinya batasan dan kondisi parameter fluks neutron/daya reaktor dari SPR, terdata sebanyak 47 kejadian dan 16 kali terindikasi pada UBL. Indikasi awal setiap kejadian ini sebagian besar sesuai dengan fungsi dari masing-masing unit pemantau sistem terkait keselamatan operasi reaktor, namun sebagian masih merupakan asumsi atau catatan sesaat dari petugas pengoperasi reaktor yang dituangkan dalam laporan kejadian operasi reaktor^[9]. Namun sebagaimana yang tertuang dalam program sistem manajemen RSG-GAS bahwa salah satu misi pelayanan kualitas operasi maka diharapkan kejadian *scram* (*unplanned shutdown reactor*) karena faktor internal boleh terjadi kurang dari 5 kali per tahun. Walaupun kejadian *scram* tersebut adalah sebagai fungsi dari Sistem Proteksi Reaktor dalam mencegah kecelakaan operasi reaktor RSG-GAS, tetapi bahwa kejadian *scram* merupakan gangguan yang harus dievaluasi dan diketahui penyebabnya (RSG-6). Penghentian operasi (*scram*) yang tidak diketahui penyebabnya dianggap sebagai kegagalan operasi.

2) Penyebab dasar kejadian *scram* di reaktor RSG-GAS

Dari hasil telaah dokumen, wawancara (RSG-1, RSG-2, RSG-4, RSG-5, dan RSG-6), dan observasi; evaluasi lebih fokus dan terarah dengan menampilkan kejadian melalui diagram FTA^[10]. Sehingga *scram* yang terindikasi pada daerah operasi tingkat daya tinggi oleh pengolah data UBL (JRE/F/G10 FX804), yaitu:

1. Terjadinya kondisi *fluks neutron* atau kondisi daya yang terpantau di teras reaktor tidak merata (*event a*; pada Gambar 3, lihat *point a*). Ketidakrataan atau UBL dibatasi sebesar 16%.

Ketidakrataan *fluks neutron* diantaranya disebabkan oleh kondisi *fluks neutron* pada sebagian posisi di teras sudah lebih tinggi (*event c*).

2. Terjadinya konsentrasi *fluks neutron* pada satu titik yang disebut sebagai *hot channel factor* (*event n*). Kejadian *hot channel* adalah terkonsentrasinya energi panas pada suatu titik baik di elemen bakar atau pada suatu titik, di teras reaktor yang jauh lebih tinggi dari posisi lainnya. Kejadian *hot channel* dapat mengakibatkan terjadinya pelelehan pelat elemen bakar^[8]. Akan tetapi kejadian ini belum mendapat evaluasi penyebab lebih lanjut.
3. Gangguan reaktivitas pada suatu posisi di teras (*event b*) yaitu berasal dari *handling* dan *loading* sampel iradiasi (*event e*), kejadian pengosongan tabung berkas iradiasi (*event f*), terjadinya kesalahan *handling* batang kendali (BK) (*event g*), dan terjadinya kegagalan sistem instrumentasi (*event d*), yang juga terbaca sebagai sinyal *unbalanced load*. Kesalahan *handling* BK disebabkan karena kesalahan pengaturan BK oleh operator, ketidakoptimalan kondisi BK kompensasi, dan kejadian terjatuhnya salah satu BK saat operasi. Selain itu, kegagalan sistem instrumentasi dapat disebabkan oleh penggantian detektor yang tidak sesuai spesifikasi teknisnya atau detektor lama mengalami proses penuaan (*event k*).
4. Kejadian point 1) s/d 3) di atas, dalam pemrosesan keputusan *scram* masih dipengaruhi oleh kondisi kenaikan aktivitas gamma N_{16} pada pendingin primer (*event S*), atau mempunyai syarat sebagai kombinasi kejadian bersama. Tetapi nilai ketidaseimbangan beban tidak tergantung pada aktivitas N_{16} . Hal tersebut berbeda secara logika dengan referensi, sehingga diagram gerbang logik pada Bab VIII LAK perlu mendapat evaluasi dan validasi.

5. Terjadinya kegagalan atau kerusakan sistem instrumentasi kendali dari pemantau *fluks neutron* daerah daya (terutama JKT03 CX841) secara otomatis dianggap sebagai *unbalanced load* oleh JRE/F/G10 FX804. Sehingga *unbalanced load* yang terdeteksi tidak menunjukkan ketidakseimbangan *fluks neutron* di teras apabila diketahui terdapat gangguan sistem instrumentasi dan kendali (SIK) dari unit pemantau dan pengolah data fluks neutron.
- 3) Evaluasi faktor penyebab dasar dari kegagalan operasi reaktor RSG-GAS

Penyebab kejadian *scram* yang mengakibatkan kegagalan operasi reaktor sebagai asumsi dari indikasi yang tertuang pada laporan operasi^[9] secara umum, sebagai berikut:

1. Kegagalan sistem instrumentasi dan kendali (SIK) yang bersamaan dengan proses iradiasi.
2. Pengaruh gangguan dari sampel iradiasi, terutama iradiasi diposisi CIP, iradiasi bersamaan antara FPM (U-235), atau bersama dengan sampel Topaz, serta penggunaan fasilitas *beam tube*.
3. Kondisi UBL tetapi dengan penyebab kerusakan SIK.

Sedangkan penyebab *scram* dari evaluasi menurut telaah dokumen (PRSG, 2011), hasil wawancara (seluruh informan), dan observasi adalah, sebagai berikut:

Kondisi fluks neutron pada sebagian posisi di teras sudah lebih tinggi perlu mendapat penelitian lebih lanjut, sedangkan faktor lain yang perlu perhatian, yaitu kejadian pengosongan tabung iradiasi dan *handling* sampel iradiasi. Untuk kondisi kegagalan SIK dari unit JKT03 terutama CX841 dan jatuhnya salah satu BK, akan langsung terbaca sebagai ketidakseimbangan beban dan menyebabkan *scram* reaktor.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian untuk melakukan evaluasi penyebab *scram* pada kanal UBL-sistem proteksi reaktor, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemicu timbulnya *scram* yang terpantau oleh sistem proteksi reaktor khususnya pada kanal pemantau *fluks neutron* saat operasi daya tinggi (daya nominal) di reaktor RSG-GAS, yaitu:
 - Kerapatan *fluks neutron*, daya reaktor, atau pembebanan di empat posisi tidak merata.
 - Transien reaktivitas negatif terlalu tinggi.
 - Transien reaktivitas positif pada daya terkoreksi N_{16} terlalu tinggi.
 - Kerapatan *fluks neutron* atau daya terkoreksi N_{16} terlalu tinggi.
2. Penyebab dasar dari setiap kejadian *scram* pada operasi reaktor RSG-GAS dari hasil penelitian ini, adalah sebagai berikut:
Scram pada operasi tingkat daya tinggi (pada kanal *unbalanced load*):
 - Kondisi fluks neutron di beberapa titik di teras sudah lebih tinggi.
 - Gangguan *handling* dan *loading* iradiasi.
 - Terjadinya pengosongan tabung berkas atau fasilitas iradiasi di teras.
 - BK kompensasi tidak optimal atau jatuhnya salah satu BK.
 - Detektor baru tidak sesuai spesifikasi awal, korosi dan melemahnya pasokan sumber daya listrik.
 - Terjadi panas lokal pada EB (*hot channel factor*).

DAFTAR REFERENSI

1. BAPETEN. (2011). Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 Tahun 2011 tentang: Ketentuan keselamatan reaktor non-daya, Jakarta.
2. BAPETEN. (2013). Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 9

- Tahun 2013 Tentang: Batasan dan kondisi operasi reaktor nondaya, Jakarta.
3. Blandford, E. D., & Ahn, J. (2012). *Examining the nuclear accident at Fukushima Daiichi*. *Elements*, 8(3), 189–194. <http://doi.org/10.2113/gselements.8.3.189>.
 4. Kuntoro, I. (2014). Evaluasi kinerja sistem keselamatan reaktor RSG-GAS selama beroperasi 25 tahun, Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir Vol XI, tahun 2014.
 5. Mannan, S. (2005). *Lee's Loss Prevention in the Process Industries 3rd Edition*. US: Elsevier.
 6. NRC, US. (1981). *Fault Tree Handbook*
 7. Priminta, Galih E. (2012, Mei 07). *Metode fault tree analysis*. <http://galihekapriminta.blogspot.co.id/2012/05/metode-fault-tree-analysis.html>. Diunduh tanggal 14 Juni 2016.
 8. PRSG. (2011). Laporan analisis keselamatan (LAK) RSG-GAS Rev. 10.1, Pusat Reaktor Serba Guna-BATAN, 2011, Serpong.
 9. PRSG. (2012-2015). Laporan operasi reaktor RSG-GAS, rekaman kegiatan operasi reaktor per siklus operasi tahun 2012-2015. PRSG-BATAN.
 10. Sukmana, J. (2016). Evaluasi penyebab scram dari kanal pemantau *fluks neutron*-sistem proteksi reaktor dalam mengantisipasi kecelakaan pada pengoperasian reaktor nuklir RSG-GAS. Tesis, Universitas Indonesia, Depok.