



KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR

**REAKTOR SERBA GUNA G.A. SIWABESSY
(RSG-GAS)**

Iman Kuntoro

KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR

**REAKTOR SERBA GUNA G.A. SIWABESSY
(RSG-GAS)**

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR

**REAKTOR SERBA GUNA G.A. SIWABESSY
(RSG-GAS)**

Iman Kuntoro

Penerbit BRIN

© 2023 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Keselamatan Reaktor Nuklir Reaktor Serba Guna G.A Siwabesy (RSG-GAS)/Iman Kuntoro–
Jakarta: Penerbit BRIN, 2023.

xvi + 144 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-979-8500-81-7 (*e-book*)

978-979-8500-76-3 (cetak)

978-623-8052-51-6 (*e-book*)

- | | |
|----------------|------------|
| 1. Nuklir | 2. Reaktor |
| 3. Keselamatan | 4. RSG-GAS |

621.483

Copy editor : Annisa' Eskahita Azizah
Proofreader : Sarwendah Puspita Dewi dan Prapti Sasiwi
Penata Isi : S. Imam Setyawan
Desainer Sampul : S. Imam Setyawan

Cetakan Pertama : Januari 2018
Cetakan edisi revisi : Februari 2023

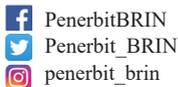
Diterbitkan oleh:



Penerbit BRIN, anggota IKAPI
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340

E-mail: penerbit@brin.go.id

Website: penerbit.brin.go.id



Daftar Isi

Daftar Isi.....	v
Daftar Gambar.....	vii
Daftar Tabel.....	ix
Pengantar Penerbit.....	xi
Kata Pengantar	xiii
Prakata	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II REAKTOR NUKLIR.....	5
BAB III PRINSIP KESELAMATAN REAKTOR.....	13
A. Filosofi, Tujuan, dan Kriteria Keselamatan Reaktor	13
B. Prinsip Pertahanan Berlapis	15
C. Analisis Kecelakaan	19
D. Tingkat Kecelakaan	21
BAB IV SISTEM KESELAMATAN REAKTOR.....	25
A. Pembagian Sistem Keselamatan.....	25
B. Persyaratan Sistem Keselamatan	26

BAB V	PENERAPAN PRINSIP KESELAMATAN PADA REAKTOR RSG-GAS.....	33
	A. Deskripsi Singkat Reaktor RSG-GAS	33
	B. Kecelakaan Dasar Desain Reaktor RSG-GAS.....	42
	C. Penerapan Sistem Pertahanan Berlapis Reaktor RSG-GAS.....	44
	D. Penerapan Persyaratan pada Sistem Keselamatan RSG-GAS.....	118
BAB VI	Penutup	125
	A. Pengalaman Kejadian Operasi Reaktor RSG-GAS	125
	B. Saran.....	128
	Daftar Pustaka	129
	Daftar Istilah.....	133
	Daftar Singkatan.....	135
	Indeks	139
	Biografi Penulis.....	143

Daftar Gambar

Gambar 2.1	Ilustrasi Reaksi Fisi (Pembelahan Inti) dan Reaksi Pembelahan Berantai	6
Gambar 2.2	Diagram Reaktor Penelitian	8
Gambar 2.3	Diagram Salah Satu Reaktor Daya pada PLTN	9
Gambar 2.4	Prinsip Pengendalian Reaksi Fisi pada Reaktor Nuklir.....	11
Gambar 4.1	Penghalang Ganda di PLTN.....	28
Gambar 4.2	Bejana Tekan Reaktor	28
Gambar 4.3	Bejana Keselamatan Reaktor	29
Gambar 4.4	Pemasangan Katup-Katup Redundansi.....	30
Gambar 5.1	Elemen Bahan Bakar Reaktor RSG-GAS	35
Gambar 5.2	Konfigurasi Teras Reaktor dan Fasilitas Iradiasi Reaktor RSG-GAS dan Nilai Fluks Neutron Termal pada Fasilitas Iradiasi	35
Gambar 5.3	Teras Reaktor Saat Beroperasi.....	36
Gambar 5.4	Peralatan Eksperimen pada Ujung Tabung Berkas Neutron RSG-GAS di Balai Eksperimen, Lantai 0,0 m Gedung Reaktor.....	39
Gambar 5.5	Peralatan Eksperimen pada Tabung Pengarah S-5 di Gedung Hamburan Neutron	39
Gambar 5.6	Diagram Alir Sistem Proses Reaktor RSG-GAS	40
Gambar 5.7	Bentuk Hasil Radioisotop dan Radiofarmaka	41

Gambar 5.8	Warna Kebiruan Batu Topas Sesudah Diiradiasi di Reaktor	42
Gambar 5.9	Fase Pembangunan Gedung Reaktor	45
Gambar 5.10	Ruang Kendali Utama	47
Gambar 5.11	Ruang Kendali Darurat	47
Gambar 5.12	Struktur Organisasi Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Fasilitas RSG-GAS.....	98
Gambar 5.13	Lokasi Titik Kumpul Personel DPFK RSG pada Saat Terjadi Kedaruratan Nuklir	102
Gambar 5.14	Jalur Evakuasi Karyawan DPFK RSG Menuju GOR Puspipstek.....	102
Gambar 5.15	Tim Proteksi Radiasi dalam Latihan Kedaruratan RSG-GAS	104
Gambar 5.16	Latihan Pemadaman Kebakaran di RSG-GAS.....	104
Gambar 5.17	Struktur Organisasi Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Kawasan Serpong	107
Gambar 5.18	Pelatihan Penanganan Medis Korban dalam Kedaruratan Reaktor RSG-GAS Tingkat Kawasan Nuklir Serpong	117
Gambar 5.19	Tim Nubika TNI-AD dalam Latihan Kedaruratan Nuklir	117
Gambar 5.20	Tiga Buah Diesel Generator RSG-GAS.....	121
Gambar 5.21	Tiga Buah Pompa Pendingin Primer (Satu <i>Stand-by</i>)....	121

Daftar Tabel

Tabel 3.1 Pembagian Pertahanan Berlapis Menurut INSAG-10	17
Tabel 3.2 Klasifikasi Kejadian Operasi Reaktor Berdasarkan Skala INES	22
Tabel 5.1 Parameter Utama Reaktor RSG-GAS.....	36
Tabel 5.2 Fasilitas Iradiasi di Reaktor RSG-GAS	38
Tabel 5.3 Desain Sistem Reaktor RSG-GAS.....	48
Tabel 5.4 Contoh Klasifikasi Mutu Sistem Reaktor RSG-GAS.....	48
Tabel 5.5 Parameter untuk Tindakan Proteksi Otomatis dari Sistem Proteksi Reaktor RSG-GAS	81
Tabel 5.6 Zona Tindakan Jika Terjadi Kedaruratan Nuklir Fasilitas RSG-GAS.....	100
Tabel 5.7 Program Pelatihan dan Gladi Kedaruratan Nuklir Kawasan Serpong	116
Tabel 5.8 Redundansi pada Sistem Proteksi Reaktor	120
Tabel 5.9 Kejadian Operasi Reaktor pada Operasi Teras No. 1 s.d. 88	126

Pengantar Penerbit

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku ini merupakan upaya Penerbit BRIN untuk membantu masyarakat memahami bagaimana teknologi reaktor, manfaat, dan potensi bahayanya, serta bagaimana tingkat keselamatan dan keamanannya. Penerbitan ulang buku ini dirasa penting mengingat telah terjadi kesalahpahaman di kalangan benak masyarakat kita yang mengidentikkan teknologi nuklir dengan bom atom. Padahal sebenarnya reaktor nuklir bukanlah bom atom. Potensi bahaya radiasi memang benar ada, tetapi dengan kemajuan teknologi dan sifat alami anugerah dari Allah, teknologi reaktor nuklir telah dikuasai manusia dan terus berkembang ke arah yang lebih selamat (aman). Dengan demikian, buku ini cocok dibaca oleh siapa saja yang ingin mengetahui tentang keselamatan reaktor nuklir.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

Kata Pengantar

Keselamatan reaktor nuklir merupakan suatu topik yang selalu menjadi pertanyaan bagi masyarakat. Seberapa selamatkah pengoperasian reaktor nuklir itu? Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN, eks BATAN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), perlu terus-menerus menyosialisasikan atau menyebarluaskan masalah keselamatan nuklir ini. Salah satunya adalah melalui penerbitan buku yang berjudul *Keselamatan Reaktor Nuklir Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS)* pada tahun 2018. Oleh karena itu, kami sangat menyambut baik dengan akan diterbitkannya kembali buku ini oleh Penerbit BRIN.

Buku ini membahas tentang reaktor nuklir dan keselamatannya, antara lain pengertian reaktor nuklir, prinsip-prinsip keselamatan reaktor, kemudian ditutup dengan penerapan prinsip keselamatan pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS), milik BRIN, di Kawasan Sains dan Teknologi Serpong. Reaktor RSG-GAS telah beroperasi dengan selamat selama 34 tahun. Dengan memahami teknologi keselamatan reaktor ini, diharapkan akan makin meningkatkan keyakinan dan kepercayaan masyarakat terhadap keselamatan reaktor nuklir.

Buku ini juga diharapkan bermanfaat bagi para pegiat di bidang reaktor nuklir antara lain para operator, supervisor reaktor, petugas proteksi radiasi, perawat reaktor, dan para pengguna, serta periset reaktor nuklir.

Serpong, April 2022

Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir
ORTN BRIN

Dr. Topan Setiadipura

Prakata

Syukur alhamdulillah kami panjatkan ke hadirat Allah Yang Maha Besar atas rida-Nya sehingga penyusunan buku berjudul *Keselamatan Reaktor Nuklir Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS)* dapat diselesaikan. Keselamatan reaktor nuklir adalah suatu pertanyaan yang selalu muncul di benak masyarakat, baik masyarakat umum, akademisi, maupun politisi, suatu pertanyaan yang tidak pernah akan habis, selalu terbayang bahaya radiasi akibat bom atom di Hiroshima dan Nagasaki pada Perang Dunia II yang memang sangat mengerikan. Oleh karena itu, penulis ingin menekankan bahwa reaktor nuklir bukanlah bom atom. Potensi bahaya radiasi benar ada, tetapi dengan teknologi dan adanya sifat alami anugerah dari Allah, teknologi reaktor nuklir telah dikuasai manusia dan terus berkembang ke arah yang lebih aman. Dengan memahami teknologi keselamatan reaktor ini, semoga tingkat kekhawatiran masyarakat terhadap reaktor nuklir dapat lebih diminimalkan.

Buku ini diharapkan bermanfaat dan dapat menjadi pegangan bagi para pegiat di bidang reaktor nuklir, antara lain para operator, supervisor reaktor, petugas proteksi radiasi, perawat reaktor, dan para penanggung jawab pengoperasian reaktor. Materi buku merupakan topik-topik yang telah penulis berikan pada kursus operator dan supervisor reaktor RSG-GAS beberapa tahun yang lalu.

Pada dasarnya, buku ini membahas tentang keselamatan reaktor nuklir yang terpilah dalam beberapa bab, yaitu pengertian reaktor nuklir, prinsip-prinsip keselamatan reaktor, kemudian ditutup dengan penerapan prinsip keselamatan pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy milik Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang dioperasikan oleh Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG) di Kawasan Nuklir Serpong yang terletak di dalam kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Puspiptek), Serpong. Mulai tahun 2021, BATAN sudah terintegrasi ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Reaktor dioperasikan oleh Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK) di Kawasan Sains dan Teknologi (KST) B.J. Habibie, Serpong. Buku ini diterbitkan pertama kali oleh penerbit BATAN Press pada tahun 2018. Penerbitan kembali oleh Penerbit BRIN tidak mengubah materi pokok keselamatan nuklir reaktor, kecuali penyesuaian hal-hal yang berhubungan dengan perubahan organisasi setelah integrasi dengan BRIN.

Selanjutnya, penulis mengharapkan semoga buku ini juga dibaca oleh masyarakat luas agar dapat dipahami bagaimana teknologi reaktor, manfaat, dan potensi bahayanya, serta bagaimana tingkat keselamatan dan keamanannya.

Penulis sangat berterima kasih kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN) BRIN atas dorongannya untuk berkarya dalam bentuk menulis buku. Terima kasih juga kami sampaikan kepada rekan-rekan dari PRSG/DPFK yang membantu memberikan data dan foto tentang reaktor RSG-GAS. Selanjutnya, penulis mengharap saran dan kritik dari pembaca untuk menyempurnakan buku ini.

Serpong, April 2022

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

Lebih dari 52 tahun Indonesia telah memasuki era nuklir, yaitu sejak tahun 1964 dengan beroperasinya reaktor nuklir pertama buatan General Atomic, Amerika Serikat, yang dioperasikan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) di Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan (saat itu bernama Pusat Reaktor Atom Bandung), Bandung, dengan nama Reaktor TRIGA MARK II dengan daya 250 kW (kilowatt). TRIGA adalah kepanjangan dari Training, Research, Isotopes, General Atomics. Pada tahun 1971, reaktor ini ditingkatkan dayanya menjadi 1.000 kW dengan mengganti teras reaktor dengan yang lebih besar. Selanjutnya pada tahun 2000, dengan teras yang sama, dilakukan kembali peningkatan daya reaktor (*up-grading*) dari 1.000 kW menjadi 2.000 kW. Nama reaktor diganti menjadi Reaktor TRIGA 2000. Fluks neutron pada posisi iradiasi berkisar antara $2,5 \times 10^{13} - 5 \times 10^{13} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Reaktor dioperasikan secara rutin sesuai dengan permintaan pengguna untuk melayani penelitian terkait sains dan teknologi nuklir, aktivasi neutron, produksi radioisotop, dan training.

Pada tahun 1979, reaktor nuklir kedua dibangun oleh tenaga ahli BATAN dengan menggunakan teras reaktor bekas reaktor TRIGA MARK II Bandung di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (dahulu Pusat Penelitian Bahan Murni dan Instrumentasi), Yogyakarta. Reaktor tersebut diberi nama Reaktor KARTINI dan dioperasikan

dengan daya 100 kW. Fluks neutron pada fasilitas iradiasi berkisar antara 10^7 – 10^{12} n.cm⁻².s⁻¹. Reaktor Kartini telah dioperasikan sejak Maret 1979 dan memperoleh izin operasi dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) sampai dengan akhir tahun 2020. Penggunaan utama Reaktor Kartini adalah untuk penelitian terkait sains dan teknologi nuklir, aktivasi neutron, dan *training*.

Selanjutnya pada tahun 1987, dalam rangka mempersiapkan sumber daya manusia yang kompeten untuk melaksanakan program industri nuklir, BATAN membangun reaktor ketiga, yaitu Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) dan laboratorium penunjangnya di Kawasan Nuklir Serpong yang terletak di dalam kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Puspiptek), Kementerian Riset dan Teknologi. Reaktor ini mempunyai daya termal 30 MW yang menghasilkan fluks neutron pada fasilitas iradiasi pada orde 10^{14} n.cm⁻².s⁻¹ untuk memenuhi fungsinya sebagai reaktor serba guna, yaitu untuk riset, produksi isotop, dan uji material. Penggunaan atau utilisasi utama reaktor RSG-GAS adalah untuk produksi radioisotop, analisis aktivasi neutron, eksperimen hamburan neutron, dan eksperimen fisika reaktor. Produksi rutin radioisotop yang digunakan untuk memenuhi permintaan domestik dan luar negeri adalah Mo-99, I-131, P-32, Ir-192, Sm-153, dan Re-186.

Ketiga reaktor telah memberikan kontribusi penting dalam penelitian pengembangan dan pemanfaatan sains dan teknologi nuklir, termasuk pengembangan sumber daya manusia nuklir di Indonesia. Kegiatan ini dilakukan bekerja sama dengan pihak perguruan tinggi, rumah sakit, industri, dan badan lingkungan hidup di sekitar lokasi reaktor.

Reaktor nuklir pada umumnya dirancang mempunyai umur operasi sekitar 30 tahun. Namun, pada kenyataannya banyak reaktor nuklir di dunia yang dioperasikan melebihi umur rancangannya. Hal ini bergantung pada kondisi fisik dan fungsi dari setiap komponen, sistem, dan struktur reaktor. Sampai saat ini, ketiga reaktor BATAN masih beroperasi dengan selamat untuk melayani kegiatan penelitian sains dan teknologi nuklir, produksi radioisotop, dan pelatihan

personel meskipun usia reaktor hampir mencapai usia desain terutama untuk Reaktor Kartini dan RSG-GAS. Pada akhir tahun 2020, RSG-GAS bahkan sudah memperoleh perpanjangan izin operasi sampai dengan tahun 2030 dari BAPETEN. Pertimbangan utama dalam pemberian izin operasi adalah terpenuhinya persyaratan keselamatan reaktor.

Buku ini membahas secara garis besar tentang sistem keselamatan reaktor nuklir pada umumnya dengan penekanan pada reaktor RSG-GAS yang dioperasikan oleh Pusat Reaktor Serba Guna (PSRG) BATAN dan setelah BATAN melebur ke BRIN dioperasikan oleh DPFK yang bertujuan agar dapat memberi gambaran yang jelas tentang penerapan prinsip-prinsip keselamatan dan kinerja sistem keselamatan reaktor di RSG-GAS. RSG-GAS dipilih sebagai subjek pembahasan karena reaktor ini mempunyai daya yang tinggi dengan kandungan uranium yang banyak sehingga mempunyai risiko yang tinggi pula dibandingkan kedua reaktor TRIGA.

Bab II merupakan pengantar untuk mengenal reaktor nuklir. Bab ini membahas terutama mengenai bagian utama reaktor, prinsip kerja, dan risiko bahaya yang dikandungnya, serta jenis reaktor.

Bab III menyajikan prinsip keselamatan reaktor nuklir, filosofi, tujuan, dan kriteria keselamatan. Bab ini membahas pula tentang prinsip pertahanan berlapis secara rinci, analisis keselamatan, dan tingkat kecelakaan nuklir.

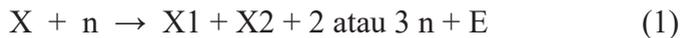
Bab IV merupakan bagian inti dari buku ini yang membahas penerapan prinsip keselamatan reaktor pada reaktor riset RSG-GAS. Pembahasan meliputi deskripsi reaktor, jenis-jenis kecelakaan terantisipasi, yaitu kecelakaan dasar desain, kemudian secara agak rinci tentang sistem pertahanan berlapis dan sistem keselamatan reaktor.

Bab V adalah bab penutup yang berisi bahasan pengalaman operasi reaktor RSG-GAS selama 28 tahun. Pada bab ini juga diberikan saran untuk mempertahankan tingkat keselamatan reaktor untuk operasi tahap perpanjangan selanjutnya.

BAB II

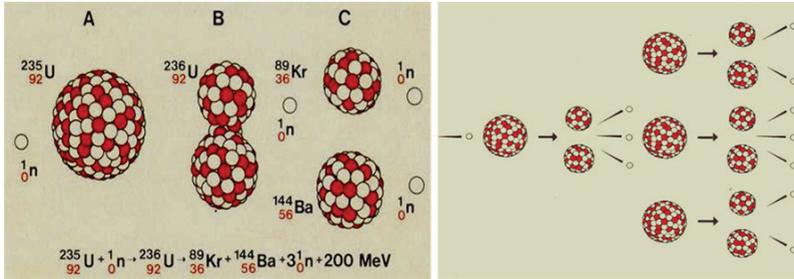
REAKTOR NUKLIR

Reaktor nuklir adalah suatu instalasi yang bekerja berdasarkan reaksi fisi atau reaksi pembelahan inti atom secara berantai dan terkendali. Reaksi fisi inti berlangsung pada bagian yang disebut teras reaktor. Teras reaktor tersusun atas bahan bakar, moderator, reflektor, dan sumber neutron. Reaksi fisi terjadi jika neutron menumbuk inti bahan bakar nuklir, misalnya uranium, mengikuti rumus (1).



Contoh reaksi fisi pada reaktor termal dengan bahan bakar U-235 ditunjukkan pada rumus (2) (Lederer & Wilberg, 1981; Stacey, 2007) dan Gambar 2.1.





Reaksi pembelahan inti uranium

Reaksi pembelahan inti berantai

(a)

(b)

Ket.: (a) Reaksi Pembelahan Inti Uranium; (b) Reaksi Pembelahan Inti Berantai

Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.1 Ilustrasi Reaksi Fisi (Pembelahan Inti) dan Reaksi Pembelahan Berantai

Catatan penting dari reaksi fisi tersebut adalah sebagai berikut.

- 1) X adalah inti bahan bakar atau bahan fisil atau bahan dapat belah, contohnya uranium: U-233, U-235.
- 2) X1 dan X2 adalah inti hasil belah atau produk fisi yang ukurannya hampir sama besar dan bersifat tidak stabil atau bersifat radioaktif sehingga akan meluruh dengan memancarkan radiasi dan/atau partikel.
- 3) n adalah simbol untuk partikel neutron. Reaksi ini menghasilkan neutron baru sebanyak 2 atau terkadang 3 buah dengan energi sekitar 2 MeV. Jadi, dari satu reaksi fisi selanjutnya dapat terjadi reaksi fisi berikutnya sebanyak 4, 8, 16, dst. atau sebanyak 3, 9, 27, 81, dst.
- 4) E adalah simbol untuk energi. Reaksi fisi juga menghasilkan energi panas yang sangat besar, yaitu sekitar 200 MeV dari setiap pembelahan inti.

Selanjutnya dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Satu neutron termal penumbuk atau penembak inti bahan bakar akan menghasilkan 2 atau 3 neutron cepat yang siap untuk melakukan reaksi tumbukan berikutnya setelah dibuat menjadi

neutron lambat melalui proses tumbukannya dengan inti-inti bahan moderator. Neutron ini kemudian menyebabkan reaksi fisi berikutnya yang lebih banyak. Proses ini berlangsung terus-menerus sehingga dikenal dengan istilah reaksi fisi berantai.

- 2) Reaktor nuklir merupakan sumber radiasi, terutama radiasi neutron dan sinar gamma, untuk keperluan eksperimen. Dalam tiap sekon (detik) dan tiap centimeter persegi bahan bakar, reaktor menghasilkan neutron sebanyak 10^{12} sampai 10^{15} , bergantung dari besar daya reaktor. Di samping itu, dalam reaktor nuklir akan ditimbun zat radioaktif, yaitu isotop-isotop produk fisi yang bersifat radioaktif di dalam bahan bakar yang merupakan sumber bahaya radiasi.
- 3) Reaktor juga merupakan sumber energi panas yang sangat besar, yaitu 200 MeV per reaksi fisi. Sebagai gambaran, 1 kg U-235 yang membelah akan menghasilkan energi panas sebesar 24 juta kWh atau setara dengan pembakaran batu bara sebanyak 3 juta kg atau 3 juta kali lebih besar.

Berdasarkan kegunaannya, reaktor nuklir dibagi menjadi dua jenis, yaitu reaktor penelitian dan reaktor daya. Reaktor yang memanfaatkan neutron baru yang dihasilkan dan membuang panasnya disebut reaktor penelitian yang digunakan untuk kegiatan pendidikan, pelatihan, penelitian bahan, produksi radioisotop, dan uji material. Reaktor penelitian biasanya mempunyai daya termal dari beberapa watt sampai 50 MW. Diagram alir reaktor penelitian disajikan pada Gambar 2.2. Sebaliknya, reaktor yang memanfaatkan energi panasnya dan mengungkung radiasinya disebut reaktor daya yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Reaktor daya digunakan untuk menghasilkan energi dan pada umumnya mempunyai daya besar mulai dari 2.000 MW sampai 5.000 MW termal untuk menghasilkan uap yang diperlukan oleh turbin dan akhirnya untuk menghasilkan daya listrik mulai dari sekitar 600 MW sampai 1.700 MW. Diagram alir reaktor daya atau PLTN ditunjukkan pada Gambar 2.3.

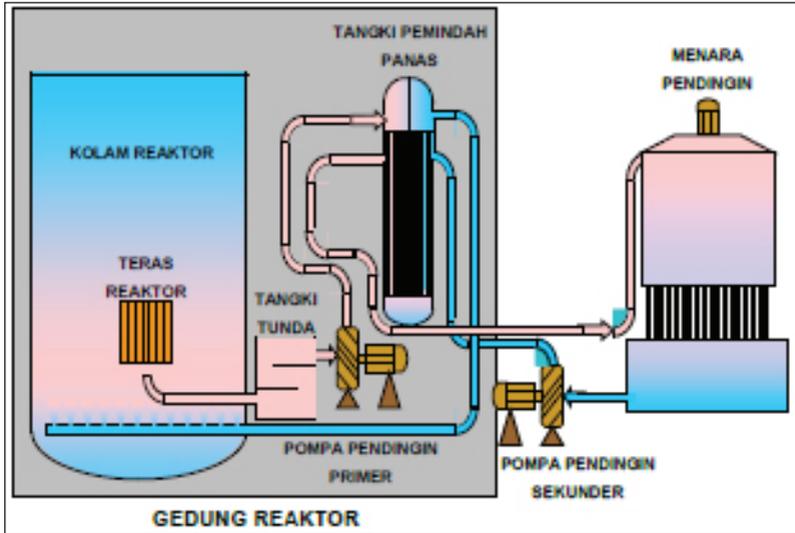
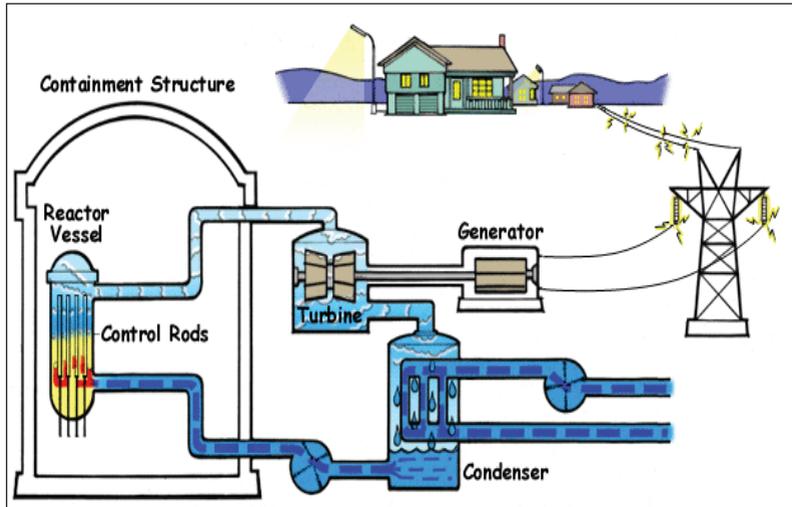


Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2003)

Gambar 2.2 Diagram Reaktor Penelitian

Bagian utama reaktor penelitian sebagai salah satu contoh dari reaktor jenis *material testing reactor* (MTR) adalah teras reaktor dan sistem pendingin yang terdiri dari kolam reaktor, tangki tunda, pompa pendingin primer, penukar panas, pompa pendingin sekunder, dan menara pendingin. Teras reaktor yang tersusun dari bahan bakar, moderator, batang kendali, dan bahan pendingin air, merupakan tempat terjadinya reaksi pembelahan inti yang menghasilkan energi panas. Panas kemudian dipindahkan ke penukar panas oleh pompa pendingin primer melalui tangki tunda untuk meluruhkan tingkat radioaktivitasnya. Panas di penukar panas kemudian diambil oleh sistem pendingin sekunder dan melalui menara pendingin dibuang ke lingkungan.



Sumber: 45 Nuclear Plants (t.t.)

Gambar 2.3 Diagram Salah Satu Reaktor Daya pada PLTN

Bagian utama dari reaktor daya adalah teras reaktor berada di dalam bejana reaktor (*reactor vessel*), sistem pendingin primer, penghasil uap, turbin, generator listrik, sistem pendingin sekunder termasuk kondenser di dalamnya, dan bejana pengungkung (*containment structure*). Jadi, secara umum, komponen utama dari instalasi reaktor nuklir adalah sebagai berikut:

- 1) bahan bakar nuklir, sebagai target untuk ditembak dengan neutron lambat;
- 2) moderator, berfungsi untuk memperlambat neutron cepat hasil reaksi fisi;
- 3) reflektor, berfungsi untuk memantulkan kembali neutron yang akan keluar dari teras;
- 4) pendingin, berupa bahan untuk mengambil energi panas di teras reaktor;
- 5) batang kendali, berfungsi menyerap neutron untuk mengatur jumlah reaksi fisi; dan
- 6) perisai radiasi, berfungsi untuk mengungkung radiasi.

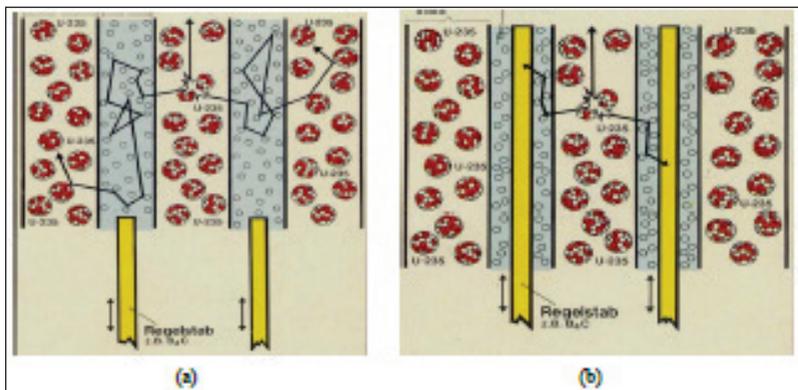
Selain kedua jenis reaktor tersebut, jenis reaktor juga dapat dibedakan berdasarkan tenaga neutron dan nama komponen serta parameter operasinya. Ditinjau dari tenaga neutron yang melangsungkan reaksi pembelahan, reaktor dibedakan menjadi reaktor cepat, dengan contoh *fast breeder reactor* (FBR), *liquid metal fast breeder reactor* (LMFBR), dan *gas cooled fast breeder reactor* (GCFBR); dan reaktor termal, dengan contoh *pressurized water reactor* (PWR), *boiling water reactor* (BWR), *pressurized heavy water reactor* (PHWR), dan *gas cooled reactor* (GCR). Jenis reaktor berdasarkan parameter atau bagian reaktor yang lain, misalnya reaktor berefektor grafit: GCR, advance GCR (AGCR); reaktor berpendingin air ringan: PWR, BWR; dan reaktor yang beroperasi pada suhu tinggi: *high temperature gas cooled reactor* (HTGR).

Dewasa ini, semua PLTN komersial yang beroperasi di dunia menggunakan reaksi nuklir fisi dan pada umumnya reaktor jenis ini menggunakan bahan bakar uranium. Namun, reaktor penelitian biasanya dibedakan menjadi reaktor pendidikan, reaktor produksi isotop, reaktor uji material, dan reaktor serbaguna.

Apa bahaya reaktor nuklir sehingga masyarakat atau banyak orang takut dengan pengoperasian reaktor nuklir? Seberapa tinggikah keselamatan reaktor nuklir? Sedikit banyak kenangan bom atom Hiroshima dan Nagasaki tentu membayangi perasaan khawatir atau takut dengan nuklir di masyarakat tersebut.

Seperti telah disebutkan, reaktor merupakan sumber energi yang sangat besar, tetapi mengandung sumber radioaktif yang sangat besar pula. Kandungan zat radioaktif yang terkumpul di dalam bahan bakar reaktor berada dalam kisaran atau orde gigacurie (1 curie, Ci = $3,7 \times 10^{10}$ disintegrasi per sekon, dps). Dengan kata lain, reaktor mengandung potensi bahaya radiasi yang sangat besar di samping manfaat energi yang besar pula. Oleh karena itu, dapat dipahami bahwa reaktor dikatakan dalam keadaan aman dan selamat jika zat radioaktif yang dikandungnya tetap terkungkung selamanya di dalam reaktor, tidak lepas ke lingkungan.

Reaktor nuklir bukanlah bom nuklir. Untuk bom, reaksi fisi nuklir memang sengaja dirancang untuk meledak, artinya reaksi fisi berlangsung terjadi secara terus-menerus, tidak terkendali. Sebaliknya, pada reaktor nuklir, reaksi fisi dirancang sangat terkendali sehingga tidak mungkin dapat meledak. Prinsipnya ada tiga langkah. Pertama, pemasangan sistem batang kendali yang andal, yaitu dengan menggunakan bahan absorber atau penyerap neutron yang sangat kuat seperti boron, grafit, atau kadmium, yang dilengkapi dengan sistem yang tidak memungkinkan untuk keluar dari bahan bakar sehingga tidak mungkin terjadi reaksi fisi di luar kendali seperti ditampilkan dalam Gambar 2.4. Kedua, reaktor dilengkapi dengan sistem pendingin yang selalu cukup pada segala kondisi untuk menjaga keutuhan atau integritas bahan bakar. Dengan demikian, zat radioaktif yang timbul tetap terjaga, atau terkungkung, di dalam bahan bakar. Ketiga, reaktor dilengkapi dengan sistem pengungkung radiasi secara berlapis-lapis untuk mencegah terjadinya pelepasan zat radioaktif ke lingkungan.



Ket.: (a) Posisi batang kendali di luar teras; (b) Posisi batang kendali masuk di dalam teras

Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.4 Prinsip Pengendalian Reaksi Fisi pada Reaktor Nuklir

Gambar 2.4 menunjukkan prinsip pengendalian reaksi fisi dalam pengoperasian reaktor, yang ditunjukkan dengan warna kuning adalah batang kendali. Reaktor dioperasikan dengan cara menarik batang kendali keluar dari daerah bahan bakar pada ketinggian tertentu sehingga terjadilah reaksi fisi berantai. Jika batang kendali dimasukkan ke daerah bahan bakar, semua neutron akan diserapnya sehingga reaksi fisi terhenti dan reaktor padam.

Teknologi reaktor nuklir selalu berkembang dalam rangka meningkatkan faktor keandalan dan keselamatan, meminimalkan kecenderungan terjadinya kecelakaan, dan menghindari konsekuensi terhadap manusia saat terjadi kecelakaan. Dalam pengalaman pengoperasian reaktor daya komersial atau PLTN selama enam dekade di 33 negara di dunia, telah terjadi tiga kecelakaan besar, yaitu reaktor Three Mile Island, Amerika Serikat (zat radioaktif masih terkungkung); reaktor Chernobyl, Ukraina; dan reaktor Fukushima Daiichi, Jepang. Pada kecelakaan dua reaktor terakhir terjadi pelepasan zat radioaktif ke lingkungan. Kecelakaan yang menyebabkan kematian manusia hanyalah kecelakaan reaktor Chernobyl dengan jumlah korban total 56 orang (World Nuclear Association, t.t.). Hal ini menggambarkan bahwa PLTN merupakan sistem pembangkit listrik yang mempunyai tingkat keamanan yang tinggi. Dengan pengembangan teknologi secara terus-menerus, risiko kecelakaan PLTN makin rendah dari waktu ke waktu.

BAB III

PRINSIP KESELAMATAN REAKTOR

A. Filosofi, Tujuan, dan Kriteria Keselamatan Reaktor

Secara prinsip, keselamatan manusia dan lingkungan adalah dua aspek utama yang harus menjadi tujuan dan harus diperhitungkan dan dipertimbangkan dalam pengoperasian suatu instalasi teknis. Apalagi untuk instalasi nuklir seperti halnya reaktor, masalah keselamatan dituntut lebih tinggi dibandingkan instalasi nonnuklir atau sering disebut instalasi konvensional karena terdapat tambahan potensi bahaya berupa kandungan zat radioaktif. Pada pengoperasian reaktor, di dalam bahan bakar nuklir terkandung banyak zat radioaktif yang disebut isotop produk fisi atau isotop hasil-belah yang bersifat radioaktif dalam jumlah dan aktivitas yang sangat besar, yaitu dalam orde gigacurie atau 10^9 curie. Curie adalah satuan aktivitas radioaktif sebesar $3,7 \times 10^{10}$ Becquerel (Bq) atau $3,7 \times 10^{10}$ disintegrasi per sekon. Kandungan zat radioaktif yang sangat besar ini harus dikungkung dengan baik dan diyakinkan tidak lepas ke lingkungan. Dengan adanya potensi bahaya tersebut, dipakailah filosofi keselamatan reaktor *fail-safe* and *safety-in depth*, yaitu menerapkan teknik gagal-selamat dan prinsip pertahanan berlapis dalam mendesain sistem keselamatan reaktor. Dengan menggunakan filosofi ini, reaktor selalu aman, artinya selalu dapat dipadamkan dengan cara menghentikan reaksi fisi dan menjamin zat radioaktif tetap terkungkung di dalam

sistem pertahanan yang berlapis-lapis. Berdasarkan filosofi tersebut, selanjutnya ditetapkan tujuan dan keselamatan reaktor.

Tujuan keselamatan reaktor adalah pengoperasian reaktor secara aman bagi manusia, instalasi, dan lingkungan, baik oleh sebab pengoperasian reaktor dalam kondisi normal, gangguan, dan kecelakaan maupun oleh sebab pengaruh dari luar instalasi reaktor. Pengaruh dari luar dapat berupa bencana alam dan kegiatan masyarakat termasuk tindak kejahatan manusia.

Untuk dapat memenuhi tujuan tersebut, reaktor nuklir dituntut memenuhi persyaratan keselamatan yang sangat ketat dan tinggi, baik secara teknis maupun administratif, mulai dari tahap desain, pembangunan, operasi, sampai ke tahap pasca-operasi atau dekomisioning, yaitu setelah reaktor tidak dioperasikan lagi. Persyaratan keselamatan ini harus dipegang teguh dan dipenuhi pada setiap tahap operasi oleh pihak pengoperasi dan pihak pengawas. Keselamatan reaktor nuklir dapat dikatakan tercapai jika pengoperasian reaktor memenuhi kriteria keselamatan sebagai berikut.

- 1) Operasi reaktor harus selalu dapat dipantau dan dikendalikan keadaannya dan dapat dipadamkan pada setiap saat dan pada setiap keadaan.
- 2) Energi panas yang timbul, baik pada operasi normal maupun akibat kecelakaan operasi, harus dapat dibuang secara selamat. Dengan demikian, akan terjamin keutuhan bahan bakar yang mengandung zat radioaktif dalam jumlah besar tersebut.
- 3) Zat radioaktif harus terkendali dan tetap terkungkung di dalam reaktor. Paparan radiasi terhadap personel dan lingkungan harus selalu di bawah batas yang diizinkan dan diusahakan sekecil mungkin sesuai dengan prinsip "ALARA" (as low as reasonably achievable), artinya serendah mungkin yang dapat dicapai dengan segala macam prosedur dan teknologi. Dengan kata lain, selalu diusahakan tidak terkena atau berhubungan dengan radiasi jika tidak ada pekerjaan yang penting dan harus dilakukan.

B. Prinsip Pertahanan Berlapis

Dalam rangka memenuhi tiga kriteria keselamatan, keselamatan reaktor menerapkan prinsip keselamatan yang tinggi yang disebut dengan prinsip pertahanan berlapis (*defence in depth*), yang secara garis besar dikelompokkan dalam tiga lapis pertahanan keselamatan (International Atomic Energy Agency [IAEA], 1992a, 1992b) sebagai berikut.

1) Pengoperasian reaktor secara aman dan andal

Lapis pertahanan pertama adalah pengoperasian reaktor secara aman dan andal, dengan menerapkan persyaratan yang ketat dan tinggi dalam desain sistem, mutu sistem, dan kualifikasi personel. Desain harus menjamin bahwa sistem pengoperasi, sistem kendali, dan sistem pemantau mampu membatasi segala macam gangguan atau kegagalan operasi dan mengambil tindakan untuk mencegah terjadinya kecelakaan lebih lanjut. Persyaratan mutu dikenakan pada setiap tahap, mulai dari desain, fabrikasi, konstruksi, dan operasi, misalnya tiap sistem/komponen mempunyai faktor keselamatan yang besar (konservatif), pemakaian bahan/alat yang teruji, pelaksanaan sistem jaminan mutu, kemudahan dalam perawatan dan pengecekan sistem, serta tersedianya prosedur dan instruksi kerja untuk seluruh kegiatan. Personel pengoperasi reaktor meliputi operator, supervisor, dan perawat reaktor, serta pengawas radiasi. Semuanya harus mempunyai kualifikasi dan keahlian tertentu sesuai dengan tugasnya dan mempunyai sertifikat dari pihak yang berwenang, yaitu BAPETEN.

2) Pencegahan kecelakaan

Meskipun instalasi reaktor sudah didesain dengan baik, yaitu memenuhi kriteria aman dan andal, tetapi tentu saja, gangguan masih mungkin terjadi. Oleh karena itu, perlu dibuat lapis pertahanan kedua, yaitu bahwa reaktor harus mempunyai sistem keselamatan yang andal (berfungsi setiap saat) dan mampu membatasi gangguan-gangguan tersebut dan mencegah perkembangan lebih lanjut (terjadinya kecelakaan) sehingga mampu melindungi personel, instalasi, dan

lingkungan. Sistem keselamatan harus didesain dengan syarat tertentu, seperti redundansi, diversitas, bersifat pasif, dan jika gagal bersifat bertindak ke arah yang selamat.

3) Penanggulangan kecelakaan

Keandalan operasi dan pencegahan kecelakaan reaktor sudah dipenuhi dengan tersedianya dan berfungsinya lapis pertahanan pertama dan kedua. Namun, gangguan atau kegagalan sistem diasumsikan masih mungkin terjadi dan harus diantisipasi terjadinya kecelakaan operasi yang disertai dengan pelepasan zat radioaktif. Lapis ketiga dipersiapkan untuk menanggulangi kecelakaan tersebut, yaitu instalasi reaktor harus mempunyai organisasi dan peralatan kedaruratan, baik di dalam maupun dari luar instalasi, yang mampu melaksanakan tindak penanggulangan akibat kecelakaan reaktor yang disertai dengan pelepasan zat radioaktif ke lingkungan.

Dalam perkembangan prinsip pertahanan berlapis, pada tahun 1996, dengan mempertimbangkan pengalaman pengoperasian reaktor terutama reaktor daya (PLTN) dan fasilitas nuklir, baik pada kondisi operasi normal maupun kondisi kejadian dan kecelakaan operasi, Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) yang berkedudukan di Vienna, Austria, melalui International Nuclear Safety Advisory Group menerbitkan dokumen INSAG-10 yang membuat klasifikasi sistem pertahanan berlapis dari tiga lapis dikembangkan dan dirinci lebih lanjut menjadi lima lapis untuk reaktor daya di PLTN (International Nuclear Safety Advisory Group [INSAG], 1996), seperti disajikan secara ringkas dalam Tabel 3.1. Kemudian pada tahun 2005, IAEA menerbitkan dokumen persyaratan keselamatan untuk reaktor riset, yaitu Safety of Research Reactors: Safety Requirements, No. NS-R-4, yang menganjurkan penerapan konsep pertahanan berlapis tersebut untuk reaktor riset (IAEA, 2005). Selanjutnya pada tahun 2016, IAEA memperbarui dengan dokumen Safety of Research Reactors: Specific Safety Requirements, No. SSR-3 (IAEA, 2016).

Tabel 3.1 Pembagian Pertahanan Berlapis Menurut INSAG-10

Lapis	Tujuan	Unsur/Alat Utama
Lapis 1	Pencegahan operasi abnormal dan kegagalan	Konservatif dalam desain dan kualitas tinggi dalam konstruksi dan operasi
Lapis 2	Pengendalian operasi abnormal dan pendeteksian kegagalan	Sistem pengendali, pembatas, dan proteksi, serta sistem pengawasan lain.
Lapis 3	Pengendalian kecelakaan dasar desain	Sistem keselamatan teknis dan prosedur kecelakaan
Lapis 4	Pengendalian kondisi parah termasuk pencegahan meningkatnya kecelakaan dan mitigasi konsekuensi kecelakaan	Manajemen kecelakaan
Lapis 5	Mitigasi konsekuensi radiologik pelepasan zat radioaktif	Tanggap darurat lepas lokasi (<i>off-site</i>)

Sumber: INSAG (1996)

a) Lapis 1: Pencegahan operasi abnormal dan kegagalan

Pada dasarnya, lapisan pertahanan pertama yang baru ini sama dengan lapisan pertahanan pertama yang lama, yaitu bahwa pengoperasian reaktor dilakukan secara aman dan andal dengan menerapkan persyaratan yang ketat dan tinggi dalam desain sistem, mutu sistem, dan kualifikasi personel.

b) Lapis 2: Pengendalian operasi abnormal dan deteksi kegagalan

Instalasi reaktor harus dijaga beroperasi dalam batas-batas operasi yang diizinkan, di mana sistem kendali dan sistem keselamatan harus didesain mampu membatasi kejadian tak normal yang melampaui batas operasi tersebut. Sistem pengendali parameter nuklir, daya, suhu, dan tekanan harus dipasang untuk mencegah berkembangnya kejadian lebih lanjut. Sistem pengukur radioaktivitas di udara dan di setiap sistem harus selalu berfungsi dengan benar. Malfungsi sistem

ini harus terdeteksi di ruang kendali. Sistem proteksi berfungsi secara otomatis pada setiap saat parameter keselamatan melampaui batasnya.

c) Lapis 3: Pengendalian kecelakaan dalam kecelakaan dasar desain Lapis 1 dan 2 mencegah dan mempertahankan kondisi reaktor pada batas-batas yang diizinkan. Sejumlah kejadian dan kecelakaan dipostulasikan terjadi, disebut dengan kecelakaan dasar desain (*design basis accident*, DBA), dengan anggapan bahwa kegagalan boleh jadi berkembang serius, seperti contohnya pecahnya pipa utama dari sistem pendingin primer. Untuk itu, diperlukan sistem keselamatan untuk membatasi efek kecelakaan ini pada tingkat yang dapat diterima. Tambahan sistem ini disebut dengan sistem keselamatan teknis. Sistem ini harus berfungsi secara otomatis. Dalam kondisi kecelakaan terpostulasi, sistem ini menjamin keutuhan integritas teras reaktor, artinya teras akan selalu mendapat pendinginan cukup sehingga integritas bahan bakar reaktor tetap terjaga. Dengan demikian, tidak akan terjadi pelepasan zat radioaktif ke lingkungan.

d) Lapis 4: Pengendalian kondisi kecelakaan terparah termasuk pencegahan perluasan kecelakaan dan mitigasi konsekuensi kecelakaan

Dalam analisis risiko kegagalan instalasi reaktor, dipertimbangkan kegagalan berlapis yang menimbulkan kecelakaan di luar desain (*beyond design basis accident*, BDBA), misalnya terjadinya pelelehan bahan bakar reaktor sehingga terjadi pelepasan zat radioaktif lebih lanjut. Hal penting di sini adalah bagaimana mengurangi kebolehhadiah situasi tersebut dengan menyediakan prosedur dan peralatan untuk menangani skenario tambahan berhubungan dengan kegagalan berlapis ini, yaitu dengan membentuk manajemen kedaruratan. Manajemen kedaruratan harus dapat membatasi pelepasan zat radioaktif dan menyediakan waktu yang cukup untuk melakukan tindak protektif kepada penduduk sekitar. Tindak manajemen kedaruratan harus ditentukan dalam prosedur kedaruratan dan harus tertulis dalam rencana kedaruratan internal.

- e) Lapis 5: Mitigasi konsekuensi radiologik dari pelepasan zat radioaktif pada daerah luar fasilitas

Jika terjadi kecelakaan pada lapis pertahanan keempat dan berkembang terus sehingga terjadi pelepasan zat radioaktif ke lingkungan, harus tersedia tim penanggulangan kedaruratan lepas lokasi (eksternal). Tindak penanggulangan di daerah pelepasan zat radioaktif yang tinggi berupa evakuasi, pembatasan gerak, pembagian tablet yodium, dan lain-lain oleh otoritas publik. Penguasa instalasi reaktor harus mempunyai rencana kedaruratan eksternal termasuk latihan secara berkala.

Jika kita perhatikan, gabungan dari lapis 2 dan 3 pada klasifikasi yang baru sama dengan lapis 2 yang lama. Demikian pula lapis 4 dan 5 baru yang merupakan pemilahan lebih lanjut dari lapis 3 pedoman yang lama.

Sistem pertahanan berlapis suatu instalasi reaktor dikatakan cukup memadai apabila pada tiap lapis diyakinkan berjalannya fungsi-fungsi secara konservatif, jaminan mutu, dan budaya keselamatan. Konservatisme dan margin keselamatan merupakan pendekatan deterministik yang harus diaplikasikan pada lapis 1 sampai dengan lapis 3. Di sisi lain, kecelakaan terparah pada umumnya memerlukan pendekatan konservatif yang lebih kecil, mengingat keselamatan penduduk harus dilindungi dari pelepasan zat radioaktif sedini mungkin. Tiap lapis pertahanan dapat dikatakan berfungsi efektif *single space*, please dari desain, bahan, struktur, komponen, sistem, pengoperasian, dan pemeliharaan dapat diandalkan. Kemudian, seluruh pihak terkait yang secara aktif terlibat dalam keselamatan fasilitas meliputi para operator, konstruktor, atau anggota organisasi keselamatan secara mantap mempunyai budaya keselamatan.

C. Analisis Kecelakaan

Dalam mendesain reaktor, harus diuraikan jenis-jenis kecelakaan yang mungkin terjadi dari tingkat terkecil sampai dengan terparah yang disebut dengan kecelakaan dasar desain (DBA). Kecelakaan ini harus diuraikan secara rinci dalam dokumen laporan analisis

keselamatan (LAK) atau *safety analysis report* (SAR), meliputi bagaimana terjadinya, tanggapan, atau reaksi sistem operasi dan sistem keselamatan reaktor, tindak operator yang diperlukan, serta akibat terhadap sistem, manusia, dan lingkungan. Kecelakaan desain terparah atau terbesar dipakai sebagai acuan dalam menyusun tim dan prosedur kedaruratan yang dikenal dengan kesiapsiagaan kedaruratan nuklir (*nuclear emergency preparedness*).

Untuk meyakinkan keselamatan reaktor, pengusaha instalasi reaktor harus melakukan analisis kecelakaan yang termuat dalam LAK. Analisis dilakukan untuk setiap jenis kecelakaan yang mungkin terjadi dan berisi model perhitungan dan program yang dipakai untuk menggambarkan jalannya kecelakaan dan sebagian perlu dilakukan secara eksperimen. Dari analisis kecelakaan ini, juga ditentukan parameter dan batas keselamatan operasi serta tindak pengamanan yang harus disiapkan.

Batasan dan kondisi operasi (BKO) harus ditetapkan untuk memastikan bahwa reaktor dioperasikan sesuai dengan asumsi dan tujuan desain. BKO berisi persyaratan untuk berbagai mode dan kondisi operasi reaktor. BKO ini juga harus terdapat dalam dokumen LAK dan manual operasi serta harus selalu tersedia untuk personel pengoperasi. BKO ditentukan secara berlapis dengan urutan sebagai berikut:

- 1) batas keselamatan;
- 2) batas pengesetan sistem keselamatan;
- 3) batas operasi normal; dan
- 4) persyaratan pengawasan.

Batas keselamatan merupakan batas maksimum parameter fisik untuk menjaga integritas bahan bakar reaktor sehingga terjamin zat radioaktif yang dikandungnya tetap terkungkung di dalamnya. Parameter tersebut biasanya berupa temperatur kelongsong bahan bakar yang harus dijaga berada di bawah titik lelehnya.

Batas pengesetan sistem keselamatan merupakan batas maksimum parameter keselamatan yang diset pada sistem keselamatan reaktor dengan margin atau faktor keselamatan tertentu dari batas keselamatan. Dengan demikian, batas keselamatan tidak pernah akan tercapai karena reaktor sudah dimatikan terlebih dahulu secara otomatis pada batas ini.

Batas operasi normal merupakan batas maksimum parameter operasi untuk keadaan operasi normal yang mempunyai margin tertentu dari batas pengesetan sistem keselamatan. Adapun persyaratan pengawasan adalah serangkaian kegiatan yang harus dilakukan untuk menjamin bahwa persyaratan yang disebutkan pada batas keselamatan untuk operasi normal dapat dipenuhi. Bentuk kegiatan atau pengawasan terdiri dari inspeksi, pemeriksaan kemampuan operasi (uji fungsi), dan kalibrasi.

BKO mempunyai tujuan mencegah keadaan yang cenderung ke arah kecelakaan dan mengurangi konsekuensi kecelakaan yang mungkin terjadi. BKO ditinjau selama masa hidup instalasi reaktor berdasarkan pada pengalaman, perkembangan teknologi keselamatan, dan perubahan yang mungkin telah terjadi pada instalasi. Jika pengoperasian reaktor menyimpang dari satu atau lebih batasan dan kondisi operasi, tindakan perbaikan yang sesuai harus diambil, organisasi pengoperasi harus melakukan tinjau ulang dan evaluasi dari kasus tersebut serta memberi tahu kepada BAPETEN.

D. Tingkat Kecelakaan

Jika terjadi kegagalan operasi atau bahkan kecelakaan, pihak pengoperasi harus segera melaporkan kepada pihak berwenang secara rinci meliputi jenis kejadian/kecelakaan, urutan kejadian, tindak pengamanan, dampak yang terjadi, dan rencana tindak lanjut perbaikannya. Panitia keselamatan dan badan pengawas kemudian melakukan inspeksi dan evaluasi keselamatan untuk menilai tingkat kecelakaan. Selanjutnya, pihak badan pengawas menentukan tindak penanggulangan dan perbaikan yang harus dilakukan oleh pihak pengoperasi dalam rangka status perizinan kembali operasi reaktor.

Tingkat kejadian sampai dengan kecelakaan dalam pengoperasian reaktor nuklir dan instalasi nuklir lainnya ditentukan berdasarkan skala internasional yang disebut dengan Skala INES (*International Nuclear and Radiological Event Scale atau Skala Kejadian Radiologi dan Nuklir Internasional*) yang secara rinci disajikan dalam Tabel 3.2. Kejadian dan kecelakaan operasi dalam reaktor atau instalasi nuklir dibagi dalam delapan skala, mulai dari skala 0 sampai dengan skala 7, yaitu skala 0 (deviasi), 1 (anomali), 2 (kejadian), 3 (kejadian serius), 4 (kecelakaan tanpa risiko lepas lokasi), 5 (kecelakaan dengan risiko lepas lokasi), 6 (kecelakaan serius), dan 7 (kecelakaan besar).

Tabel 3.2 Klasifikasi Kejadian Operasi Reaktor Berdasarkan Skala INES

Skala dan nama kejadian	Kriteria atau gejala keselamatan		
	Dampak lepas lokasi	Dampak di lokasi	Sistem berlapis
7 Kecelakaan besar	Pelepasan zat radioaktif besar berdampak kepada kesehatan dan lingkungan	-	-
6 Kecelakaan serius	Pelepasan zat radioaktif cukup besar	-	-
5 Kecelakaan dengan risiko lepas lokasi	Pelepasan zat radioaktif terbatas	Kerusakan berat pada teras reaktor/sistem penghalang	-
4 Kecelakaan tanpa risiko lepas lokasi	Pelepasan zat radioaktif kecil, paparan radiasi ke masyarakat tidak terlampaui	Kerusakan pada teras reaktor/sistem penghalang/paparan radiasi pekerja besar	-
3 Kejadian serius	Pelepasan zat radioaktif sangat kecil kepada masyarakat	Kontaminasi tersebar luas/terjadi pengaruh kesehatan akut seorang pekerja	Sistem penghalang keselamatan tidak berfungsi lagi

Skala dan nama kejadian	Kriteria atau gejala keselamatan		
	Dampak lepas lokasi	Dampak di lokasi	Sistem berlapis
2 Kejadian	-	Kontaminasi atau paparan lebih kepada seorang pekerja.	Kegagalan persyaratan keselamatan
1 Anomali	-	-	Penyimpangan batas operasi
0 Deviasi	Tidak memengaruhi keselamatan		

Sumber: IAEA (2013)

World Nuclear Association menampilkan data beberapa contoh kecelakaan nuklir di dunia secara singkat dan dikelompokkan berdasarkan tingkat skala kecelakaan INES 3 sampai dengan 7 (World Nuclear Association, t.t.). Tiga tingkat skala terbawah, yaitu skala 2, 1, dan 0, tidak diberikan contohnya karena hanya merupakan kejadian, anomali, dan deviasi yang tidak memengaruhi keselamatan.

1) Skala 7

- a) Kecelakaan PLTN Chernobyl, di Ukraine, pada tahun 1986 di mana terjadi pelelehan bahan bakar akibat ledakan uap dan kebakaran. Kecelakaan ini menelan korban tewas sebanyak 56 orang dan berdampak terhadap kesehatan dan lingkungan sekitar.
- b) Kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi 1–3, Jepang, pada tahun 2011 dengan kejadian bahan bakar rusak dan terjadi pelepasan zat radioaktif ke lingkungan.

2) Skala 6

Kecelakaan kritikalitas pabrik proses ulang bahan bakar Mayak, Ozerk, Rusia, pada tahun 1957.

3) Skala 5

Kecelakaan PLTN Three Mile Island unit 2, USA, pada tahun 1979, di mana terjadi bahan bakar meleleh, tetapi zat radioaktif tetap terkungkung di dalam reaktor, tidak berdampak ke lingkungan.

4) Skala 4

- a) Kecelakaan PLTN Saint-Laurent A1, Prancis, pada tahun 1969, di mana terjadi bahan bakar pecah, tetapi zat radioaktif tetap terkungkung di dalam reaktor.
- b) Kecelakaan PLTN Saint-Laurent A2, Prancis, pada tahun 1980, terjadi pemanasan berlebih di reflektor grafit, zat radioaktif juga masih terkungkung di dalam reaktor.
- c) Kecelakaan kritikalitas pabrik bahan bakar Tokai-mura, Jepang, pada tahun 1999.

5) Skala 3

- a) Kecelakaan reaktor Fukushima Daiichi 4, Jepang, pada tahun 2011 dengan kejadian kolam bahan bakar bekas mengalami pemanasan berlebih (*overheating*).
- b) Reaktor Fukushima Daini 1, 2, 4, Jepang, pada tahun 2011, mengalami pemutusan pendinginan.
- c) Kecelakaan reaktor Vandellos, Spanyol, pada tahun 1989, berupa kebakaran turbin.
- d) Kecelakaan reaktor Davis-Besse, AS, 2002, terjadi korosi hebat.
- e) Kecelakaan reaktor Paks, Hungaria, pada tahun 2003, terjadi kerusakan bahan bakar.

BAB IV

SISTEM KESELAMATAN REAKTOR

A. Pembagian Sistem Keselamatan

Sistem reaktor dapat dibedakan atas sistem pengoperasi dan sistem keselamatan. Sistem pengoperasi berfungsi untuk mengoperasikan reaktor, meliputi mengendalikan, memantau, dan mengawasi semua sistem-sistemnya. Sistem keselamatan adalah sistem yang ditambahkan ke sistem pengoperasi, yang selalu siap dan tepat waktu mengambil tindak pengamanan jika terjadi gangguan operasi reaktor. Jadi, sistem keselamatan adalah sistem reaktor yang mempunyai fungsi untuk mematikan reaktor dan mencegah kecelakaan lebih lanjut dan risikonya.

Sistem keselamatan terdiri dari sistem proteksi reaktor (SPR) dan sistem keselamatan aktif dan pasif. Sistem proteksi reaktor adalah sistem yang menerima sinyal dari sistem pengukuran (pengoperasi) yang bertugas mengawasi parameter keselamatan dan mengambil tindakan secara otomatis memadamkan reaktor dan memicu sistem keselamatan lain jika parameter tersebut melewati batas keselamatan operasi.

Sistem keselamatan pasif adalah sistem keselamatan yang terpasang permanen dan tidak memerlukan sinyal picu untuk berfungsi, tetapi selalu berfungsi setiap saat. Contoh sistem keselamatan pasif adalah perisai biologis, sungkup reaktor, dan gedung reaktor. Adapun

sistem keselamatan aktif, atau sistem keselamatan teknis (*engineered safety features*, ESF) adalah sistem keselamatan yang berfungsi jika dipicu oleh sistem proteksi reaktor. Sistem keselamatan teknis dapat digolongkan menjadi empat kelompok sebagai berikut.

1) Sistem pemadam reaktor

Sistem ini harus selalu dapat berfungsi untuk mematikan atau memadamkan reaktor, baik pada kondisi operasi normal maupun pada saat terjadi gangguan dan dapat mempertahankan reaktor dalam keadaan padam. Sebagai contoh adalah sistem pancung pada sistem batang kendali reaktor.

2) Sistem penjaga pendinginan teras

Sistem ini harus mampu mempertahankan jumlah pendingin minimum yang diperlukan oleh teras reaktor. Salah satu contoh adalah sistem pendingin darurat.

3) Sistem penghalang radiasi

Sistem ini harus mampu mengungkung zat radioaktif agar tidak keluar dari reaktor. Sebagai contoh adalah sistem katup penutup cerobong reaktor.

4) Sistem penyedia daya sistem keselamatan

Sistem ini harus dapat menjamin pasokan daya kepada seluruh sistem keselamatan.

B. Persyaratan Sistem Keselamatan

Kegiatan desain merupakan langkah awal dari kegiatan pembangunan dan pengoperasian reaktor. Oleh karena itu, kegiatan desain harus dilaksanakan dengan secermat dan sesempurna mungkin karena hasilnya menjadi pegangan dan akan sangat menentukan dalam tahap kegiatan berikutnya dalam rangka mencapai persyaratan keselamatan operasi reaktor. Penerapan desain dalam pembangunan dan pengoperasian harus diawasi dan diuji sesuai dengan persyaratan yang ditentukan. Prinsip dalam membuat desain sistem keselamatan reaktor agar memenuhi persyaratan keandalan dan memenuhi kriteria keselamatan reaktor adalah sebagai berikut.

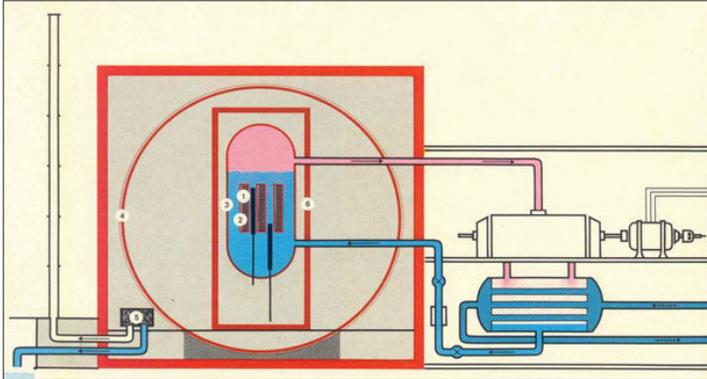
1) Fitur keselamatan inheren (*inherent safety features*, ISF)

Teras reaktor didesain tersusun atas bahan yang mempunyai sifat alami (inheren) untuk dapat menstabilkan diri atau melawan gangguan yang muncul selama operasi. Apabila terjadi gangguan yang menyebabkan daya reaktor naik, suhu teras naik yang selanjutnya menyebabkan kerapatan atom berkurang. Kerapatan atom yang berkurang mengakibatkan jumlah reaksi fisi menjadi berkurang. Artinya, daya reaktor turun kembali. Dengan demikian, tidak terjadi pemanasan berlebih pada bahan bakar. Hal ini dikatakan reaktor mempunyai fitur keselamatan inheren atau keselamatan melekat berupa koefisien reaktivitas suhu yang berharga negatif.

2) Penghalang ganda (*multiple barriers*)

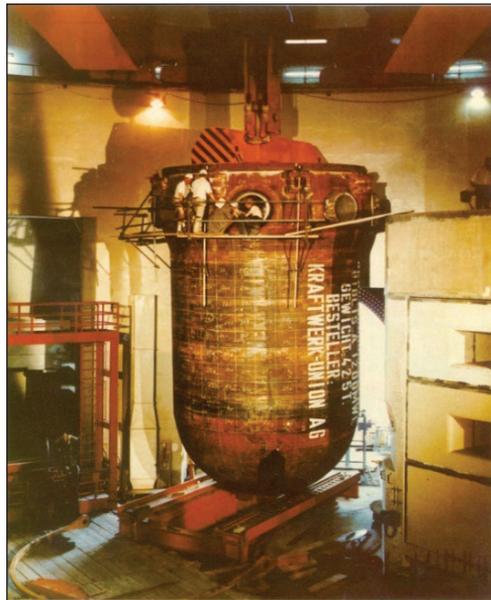
Untuk menjamin bahwa zat radioaktif yang dihasilkan dari pengoperasian reaktor, baik berupa padat, cair, dan gas tetap terkungkung secara aman, reaktor harus didesain mempunyai sistem penghalang atau pengungkung radiasi secara berlapis-lapis atau ganda. Sistem penghalang ganda di suatu reaktor, misalnya pada suatu PLTN, terlihat pada Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3:

- a) matriks bahan bakar: ruang di antara atom/molekul yang mampu menampung gas isotop-isotop hasil reaksi pembelahan nuklir;
- b) kelongsong elemen bahan bakar yang kedap;
- c) bejana tekan (*pressure vessel*);
- d) bejana keselamatan (*safety vessel*);
- e) sistem ventilasi yang akan mengendalikan udara keluar dari gedung reaktor tidak mengandung zat radioaktif; dan
- f) perisai beton, biasanya disebut pula perisai biologis. Perisai biologis pada umumnya berupa beton barit yang mempunyai densitas tinggi (sekitar $3,5 \text{ ton/m}^3$) atau lebih rapat dibanding dengan densitas beton biasa yang berharga lebih kecil dari $2,5 \text{ ton/m}^3$. Oleh karena itu, beton barit disebut juga dengan beton berat.



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 4.1 Penghalang Ganda di PLTN



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 4.2 Bejana Tekan Reaktor



Sumber: Volkmer (1982)

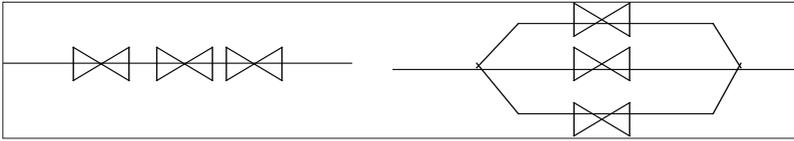
Gambar 4.3 Bejana Keselamatan Reaktor

3) Redundansi dan Diversitas

Sistem keselamatan reaktor nuklir, termasuk komponen-komponennya, harus berfungsi dengan sangat andal, yaitu dijamin dapat berfungsi setiap saat. Oleh karena itu, sistem harus didesain secara rangkap, baik rangkap 2, 3, atau bahkan 4 jika perlu. Pada umumnya dibuat rangkap tiga untuk memenuhi satu fungsi. Teknik perangkapan sistem atau komponen ini disebut dengan redundansi.

Contoh redundansi:

Bagaimana menyusun katup pada suatu pipa pendingin reaktor agar dapat menjamin fungsinya untuk menutup atau membuka aliran? Untuk menjamin selalu terjadinya aliran pendingin, katup-katup harus dipasang paralel sehingga meskipun dua katup menutup, aliran tetap berjalan melalui katup ketiga. Sebaliknya, untuk menjamin tidak terjadi aliran (tertutup), katup-katup dipasang secara seri sehingga dengan hanya satu katup menutup, aliran sudah tertutup. Kedua hal tersebut digambarkan dalam Gambar 4.4.



Ket.: (a) Seri: untuk fungsi menutup; (b) Paralel: untuk fungsi membuka

Gambar 4.4 Pemasangan Katup-Katup Redundansi

Di samping redundansi berdasarkan fungsi, terdapat pula prinsip redundansi ruang, yaitu perangkapan sistem pada ruangan berbeda sehingga jika salah satu ruang/gedung rusak, sistem dapat difungsikan dari ruang lain. Prinsip ini juga memudahkan dari segi perawatan dan perbaikan.

Istilah redundansi 2 dari 3 ditulis 2V3, yang berarti suatu fungsi dimonitor atau dilaksanakan oleh tiga rangkap komponen atau sistem dan penunjukan 2 buah komponen yang akan dianggap benar dan dipakai untuk melakukan tindak pengamanan oleh sistem proteksi reaktor. Jadi, redundansi sangat menentukan tingkat keandalan dari suatu komponen atau sistem untuk melakukan fungsinya.

Adapun diversitas adalah perangkapan sistem atau komponen, tetapi dengan metode atau alat berbeda untuk satu fungsi sama. Contoh, pengukuran daya reaktor dapat dilakukan dengan detektor neutron berdasarkan prinsip radiasi atau dengan detektor suhu yang bekerja berdasarkan panas.

4) Teknik gagal-selamat (*fail-safe*)

Salah satu prinsip penting dalam keselamatan reaktor adalah gagal-selamat, yaitu lebih baik operasi reaktor gagal (dipadamkan) sehingga keselamatan terjamin. Prinsip ini selalu digunakan untuk desain sistem keselamatan reaktor sehingga apabila suatu sistem atau komponen sistem keselamatan gagal berfungsi, reaktor akan dipadamkan secara otomatis (*scram*, pancung) oleh sistem proteksi reaktor. Untuk mengetahui secara pasti bahwa suatu komponen memang gagal, prinsip redundansi di atas sangat penting. Sekali lagi ditekankan bahwa teknik gagal-selamat bersama dengan prinsip pertahanan berlapis ini dipakai sebagai “filosofi keselamatan reaktor nuklir”.

5) Pengaruh luar

Reaktor juga harus didesain aman terhadap ancaman atau pengaruh dari luar sistem reaktor, yaitu kejadian atau kecelakaan reaktor yang disebabkan oleh bukan akibat operasi reaktor, tetapi akibat kejadian di luar reaktor, yang secara garis besar dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu kejadian alam dan kecelakaan atau gangguan masyarakat. Kejadian alam atau peristiwa alam meliputi gempa bumi, banjir, tanah longsor, angin puting beliung, dan bencana alam lain. Desain dan pembangunan reaktor harus dapat menghindari dan/atau menahan kejadian alam yang mungkin menimpa instalasi reaktor. Pemilihan lokasi reaktor (disebut tapak reaktor) dan penentuan desain reaktor yang sesuai akan menentukan tingkat keandalan dan keselamatan reaktor.

Instalasi reaktor juga harus didesain untuk mampu menghindari dan menanggulangi kejadian atau kejahatan masyarakat, seperti ditabrak pesawat terbang, peledakan, sabotase, dan pencurian. Penentuan lokasi reaktor harus jauh dari lintas kegiatan masyarakat. Di samping itu, fasilitas reaktor juga harus dilengkapi dengan sistem proteksi fisik dan sistem pengamanan yang kuat, termasuk pemisahan instalasi reaktor dari kegiatan administrasi yang akan memberikan tingkat keamanan dan keselamatan reaktor yang tinggi.

BAB V

PENERAPAN PRINSIP KESELAMATAN PADA REAKTOR RSG-GAS

Dalam bab ini akan disajikan bagaimana penerapan prinsip-prinsip keselamatan reaktor pada reaktor serbaguna RSG-GAS. Penyajian meliputi deskripsi reaktor secara ringkas, jenis-jenis kecelakaan dasar desain reaktor, penerapan sistem pertahanan berlapis, dan penerapan persyaratan pada sistem keselamatan, serta disajikan pula pengalaman kejadian operasi di reaktor RSG-GAS pada bab penutup.

A. Deskripsi Singkat Reaktor RSG-GAS

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy, sering disingkat dengan RSG-GAS, merupakan reaktor penelitian yang berfungsi untuk penelitian, produksi radioisotop, dan uji bahan sehingga disebut reaktor serbaguna (Pusat Reaktor Serba Guna [PRSG], 2011). RSG-GAS merupakan reaktor penelitian ketiga yang dimiliki BATAN, dibangun di Kawasan Nuklir Serpong yang terletak di dalam kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Puspiptek) di Kelurahan Muncul, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten. Kawasan ini terdiri dari laboratorium berbagai instansi, yaitu Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Kementerian Kehutanan dan Lingkungan Hidup, dan Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Sejak September 2021, BATAN melebur ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Kawasan Nuklir Serpong terintegrasi dalam Kawasan Sains dan Teknologi (KST) B.J. Habibie, Serpong.

RSG-GAS dibangun mulai tahun 1983 dan mencapai kondisi kritis pertama pada bulan Juli 1987 yang kemudian diresmikan oleh Presiden Republik Indonesia pada tanggal 20 Agustus 1987 pada daya 10 MW. Pada bulan Maret 1992, dicapai operasi reaktor pada daya nominal 30 MW. RSG-GAS menggunakan bahan bakar oksida U_3O_8 -Al dengan pengayaan uranium rendah, yaitu $\pm 19,75\%$ dalam bentuk elemen bakar yang tersusun atas 21 plat bahan bakar dengan kelongsong $AlMg_2$ seperti terlihat pada Gambar 5.1. Pada bulan Juli 1999, pada teras ke-36 dilakukan penggantian penggunaan bahan bakar oksida U_3O_8 -Al dengan bahan bakar silisida U_3Si_2 -Al. Penggantian dilakukan secara bertahap. Tahap pertama, pada teras ke-36 dimasukkan dua bahan bakar silisida sampai akhirnya pada teras ke-45, tahun 2003, diperoleh teras silisida penuh dan dicapai daya termal 30 MW pada bulan September 2003.

Teras reaktor RSG-GAS menghasilkan daya termal nominal 30 MW dan fluks neutron maksimum di posisi iradiasi pusat (*central irradiation position*, CIP) sebesar $2,52 \times 10^{14}$ n.cm⁻².s⁻¹. Pada posisi iradiasi di daerah reflektor (pinggir), besar fluks neutron termal masih cukup tinggi, yaitu sekitar $0,8 \times 10^{14}$ n.cm⁻².s⁻¹. Konfigurasi teras tersusun atas kisi 10 x 10 dan berisi 40 elemen bakar standar, 8 elemen kendali dengan 8 pasang batang kendali AgInCd, 1 *central irradiation position* (CIP), 4 *irradiation positions* (IP), 5 sistem *rabbit*, serta beberapa posisi iradiasi di daerah reflektor. Teras dikelilingi oleh reflektor blok berilium dan elemen berilium, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3. Parameter utama reaktor disajikan dalam Tabel 5.1.

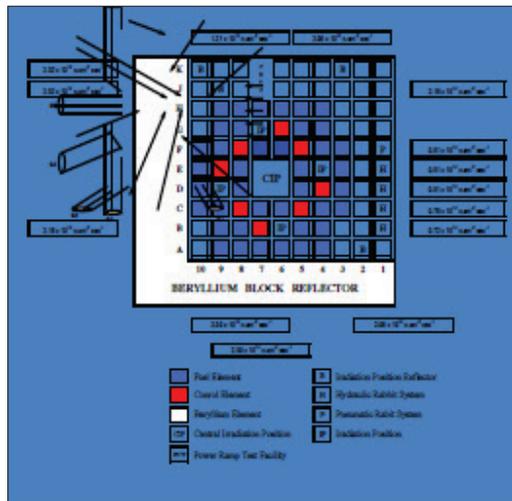
Reaktor serbaguna RSG-GAS merupakan sarana utama di Kawasan Nuklir Serpong untuk mendukung penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir dalam rangka persiapan industri nuklir. Instalasi pendukung dan pengguna reaktor RSG-GAS adalah Instalasi Produksi Elemen Bakar, Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif, Instalasi Produksi Isotop, dan Instalasi Radiometalurgi. RSG-GAS dilengkapi dengan fasilitas untuk memenuhi fungsinya sebagai reaktor serbaguna, yaitu untuk uji material, produksi radioiso-

top dan penelitian, termasuk *training* sumber daya manusia. Seluruh fasilitas iradiasi dan fungsinya dapat dilihat pada Tabel 5.2.



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (1987)

Gambar 5.1 Elemen Bahan Bakar Reaktor RSG-GAS



Sumber: PRSG (2011)

Gambar 5.2 Konfigurasi Teras Reaktor dan Fasilitas Iradiasi Reaktor RSG-GAS dan Nilai Fluks Neutron Termal pada Fasilitas Iradiasi

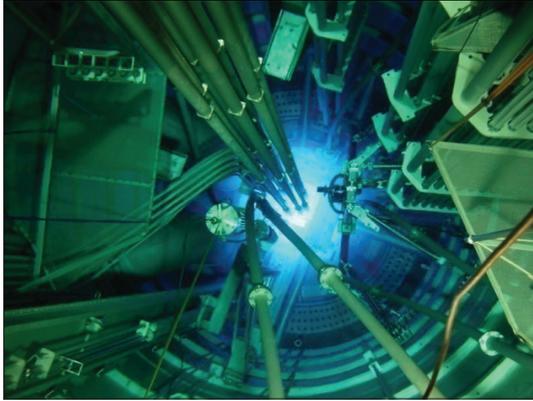


Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2004)

Gambar 5.3 Teras Reaktor Saat Beroperasi

Tabel 5.1 Parameter Utama Reaktor RSG-GAS

Parameter	Nilai
Jumlah elemen bakar/elemen kendali	40/8
Panjang siklus, hari/MWD	21,8/654
Fraksi bakar rerata awal/akhir siklus, % hilangnya ^{235}U	24/31
Fraksi bakar buang, % hilangnya ^{235}U	56
Reaktivitas lebih awal siklus, dingin dan tanpa Xenon, %	9,7
Reaktivitas untuk eksperimen, %	2,0
Nilai reaktivitas 8 batang kendali, %	-13,8
Margin reaktivitas padam, %	-1,3
Koefisien suhu elemen bakar, /°	$-1,92 \times 10^{-5}$
Koefisien suhu moderator, /°	$-1,14 \times 10^{-4}$
Koefisien void moderator, /% void	$-1,34 \times 10^{-3}$
Pembangkitan panas di teras reaktor, MW	30
Laju alir sistem primer, kg/s	860
Nilai desain laju alir minimum, kg/s	800
Suhu masuk/keluar teras, °C	40,5/50,6
Suhu maksimum permukaan pelat, °C	146
Suhu maksimum di tengah bahan bakar pada daya nominal (akhir siklus), °C	187
Margin keselamatan minimum pada daya nominal	3,01
Margin keselamatan minimum untuk desain transien	1,48

Sumber: PRSG (2011)

Sebagai reaktor uji material, RSG-GAS dibangun untuk melakukan penelitian dan pengembangan bahan atau material yang akan dipakai dalam reaktor daya suatu PLTN dan merupakan salah satu sarana untuk membina SDM dalam penguasaan karakteristik pengoperasian reaktor daya. Untuk uji material dalam rangka penelitian dan pengembangan bahan bakar dan bahan struktur reaktor, tersedia fasilitas untuk iradiasi di teras reaktor, *power ramp test facility* (PRTF), dan *neutron radiography* (NR).

Untuk produksi radioisotop, RSG-GAS dapat mengiradiasi target untuk memproduksi radioisotop bagi keperluan medis, seperti Mo-99, I-131, I-133, I-125, dan sumber iradiasi untuk industri, seperti Co-60, Ir-192, perunut Br-82, P-32, dan S-35. Di reaktor ini masih tersedia kapasitas untuk produksi radioisotop sebanyak empat kali jumlah produksi saat ini.

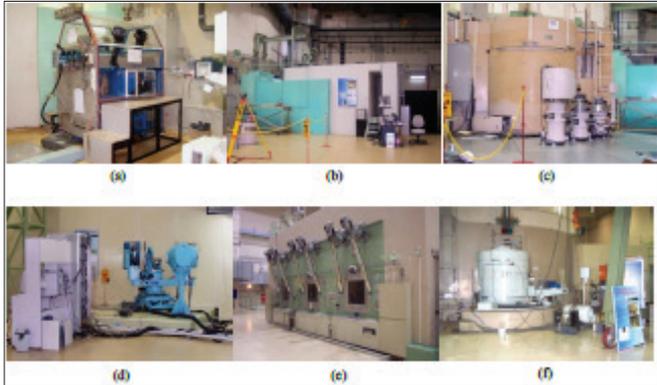
Kegiatan penelitian dan pengembangan ilmu bahan telah dilakukan untuk bahan *magnetic alloys*, polimer, dan mineral mengenai struktur, tekstur, dan sebagainya. Eksperimen dilakukan dengan teknik hamburan neutron, difraksi neutron, dan polarisasi neutron pada fasilitas lima buah tabung berkas neutron yang berpangkal pada teras reaktor. Peralatan meliputi radiografi neutron (NRG), spektrometer 3 sumbu *triple axis spectrometry* (TAS), *powder diffractometer* (PD), *four cycle diffractometer* (FCD), *small angle neutron spectrometry* (SANS), *high resolution SANS* (HRSANS), *high resolution PD* (HRPD) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5.

Fasilitas iradiasi lainnya ialah sistem rabbit untuk iradiasi sampel dan *neutron transmutation doping* (NTD) untuk iradiasi silikon dan fasilitas iradiasi batu topas. Sistem NTD sedang dikembangkan untuk memenuhi permintaan industri elektronik luar negeri. Sementara itu, untuk iradiasi batu topas, mulai tahun 2005 secara rutin sudah dapat melayani permintaan pengguna dengan kapasitas 1.000 kg per tahun.

Tabel 5.2 Fasilitas Iradiasi di Reaktor RSG-GAS

Fasilitas	Posisi	Alat	Fungsi
CIP	D-6, D-7, E-6, E-7	-	Produksi radioisotop
IP1	B-6	-	Uji bahan bakar reaktor riset
IP2	E-4	-	Uji material struktur
IP3	G-7	-	Produksi radioisotop
IP4	D-9	-	Produksi radioisotop
B1,2,3,4	A-2, K-3, K-10, J-9	-	Iradiasi umum
P	F-1	Sistem <i>Rabbit</i>	Iradiasi sampel
H	B-1, C-1, D-1, E-1	Sistem <i>Rabbit</i>	Iradiasi sampel
NR	Luar teras	FIT	Iradiasi topas
NTD	Luar teras	NTD	Iradiasi silikon
PRTF	Reflektor	PRTF	Uji bahan bakar PLTN
S-1	Lantai 0 m	Loop I-125	Produksi radioisotop
S-2	Lantai 0 m	NRG	Radiografi bahan
S-3	-	Kosong	-
S-4	Lantai 0 m	TAS	Penelitian bahan
S-5	Lantai 0 m dan Gd. Hamburan Neutron	FCD, HRPD, SANS, HRSANS	Penelitian bahan
S-6	Lantai 0 m	PD	Penelitian bahan

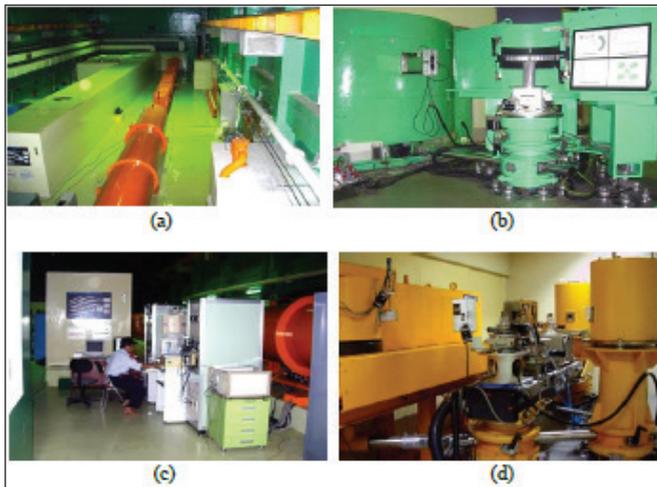
Sumber: PRSG (2011)



Ket.: (a) Loop Produksi RI I-125; (b) Radiografi Neutron; (c) Spektrometer 3 Sumbu; (d) Four Cycle Diffractometer; (e) Hot Cells; (f) Powder Diffractometer

Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2005)

Gambar 5.4 Peralatan Eksperimen pada Ujung Tabung Berkas Neutron RSG-GAS di Balai Eksperimen, Lantai 0,0 m Gedung Reaktor

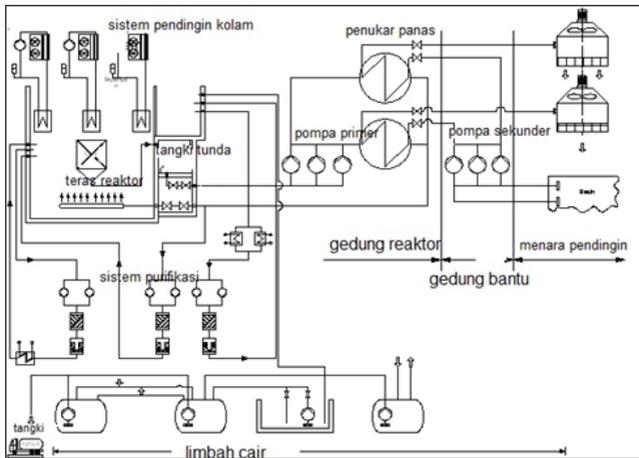


Ket.: (a) Pengarah Neutron; (b) SANS; (c) HRPD; (d) HRSANS

Foto: Dokumentasi PSTBM BATAN (2008)

Gambar 5.5 Peralatan Eksperimen pada Tabung Pengarah S-5 di Gedung Hamburan Neutron

Bagian utama dan sistem proses termasuk sistem pendingin reaktor RSG-GAS secara skematis ditunjukkan pada Gambar 5.6.



Sumber: PRSG (2011)

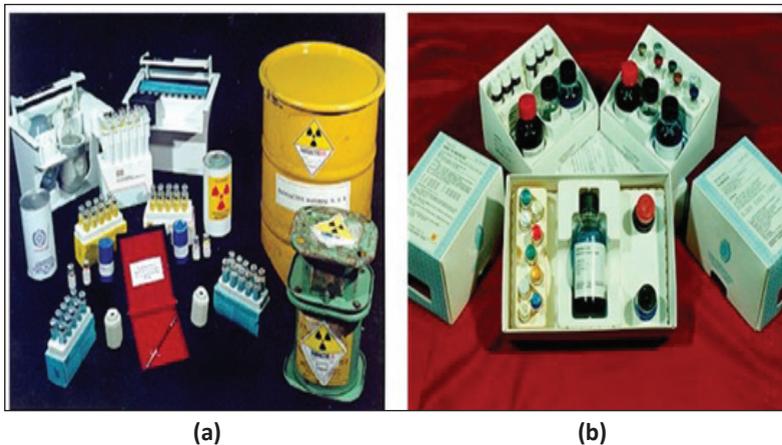
Gambar 5.6 Diagram Alir Sistem Proses Reaktor RSG-GAS

Energi panas yang dihasilkan di teras reaktor sebesar 30 MW dipindahkan ke dua lajur sistem pendingin primer oleh dua buah pompa primer melalui tangki tunda untuk menurunkan tingkat radioaktivitasnya dan dua buah tangki pemindah atau penukar panas (*heat exchanger*). Selanjutnya, panas dipindahkan ke dua lajur sistem pendingin sekunder melalui dua penukar panas tersebut oleh dua buah pompa sekunder. Panas di dalam sistem pendingin sekunder selanjutnya dipindahkan ke udara luar atau lingkungan melalui dua jalur menara pendingin.

Setelah pemadaman reaktor, kedua pompa sistem pendingin primer didesain tetap beroperasi sedikitnya selama 200 detik sebelum berhenti untuk mengambil panas peluruhan di teras reaktor. Selanjutnya, setelah laju alir sistem pendingin primer turun mencapai 15% dari laju alir minimum, dua katup sirkulasi alam di dalam *plenum outlet* teras reaktor terbuka karena gaya gravitasi sehingga antara

kolam reaktor dan sistem pendingin primer terhubung dan air kolam mengalir melalui katup ke arah atas melalui teras reaktor, terjadi aliran secara konveksi alam.

RSG-GAS dioperasikan secara rutin dengan panjang daur atau siklus operasi selama 21 hari pada daya penuh atau setara dengan energi yang dibangkitkan sebesar 650 MWD. Dengan pola tersebut, reaktor beroperasi sebanyak antara 2.200 jam sampai dengan 4.000 jam per tahun, bergantung kepada keperluan pengguna. Sampai tahun 2015, RSG-GAS telah beroperasi secara rutin selama 28 tahun dengan selamat untuk memenuhi permintaan penelitian, produksi radioisotop, iradiasi sampel, iradiasi batu topas, dan pembinaan sumber daya manusia. Gambar 5.7 dan Gambar 5.8 menunjukkan produk yang menonjol dari penggunaan iradiasi di RSG-GAS berupa radioisotop, radiofarmaka, dan pewarnaan batu topas. Batu topas yang awalnya tidak berwarna atau bening seperti kaca, berubah menjadi berwarna biru setelah diiradiasi dengan neutron.



Ket.: (a) Produk Radioisotop; (b) Produk Radiofarmaka

Foto: Dokumentasi PTRR BATAN (2013)

Gambar 5.7 Bentuk Hasil Radioisotop dan Radiofarmaka



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2008)

Gambar 5.8 Warna Kebiruan Batu Topas Sesudah Diiradiasi di Reaktor

B. Kecelakaan Dasar Desain Reaktor RSG-GAS

Kecelakaan dasar desain (*design basis accident*, DBA) reaktor RSG-GAS telah ditentukan sejak tahap desain, yaitu melelehnya sebuah elemen bakar di teras reaktor. Berdasarkan kecelakaan dasar desain tersebut, gedung dan sistem reaktor didesain dan dibangun. Setelah itu, disusun jenis kecelakaan yang diantisipasi dapat terjadi untuk analisis keselamatan reaktor. Jenis-jenis kecelakaan yang mungkin terjadi di reaktor RSG-GAS adalah sebagai berikut.

- 1) Berkurangnya kemampuan pembuangan panas pada sistem pendingin primer

Berkurangnya kemampuan pemindahan atau pembuangan panas pada sistem pendingin primer reaktor RSG-GAS dapat disebabkan oleh:

- a) pengurangan laju aliran pendingin akibat penutupan katup primer;
- b) kebocoran sistem pendingin primer setelah katup isolasi;

- c) kebocoran pendingin primer pada pipa antara kolam dan katup isolasi; dan
 - d) kehilangan daya pompa dan penurunan laju alir pendingin.
- 2) Penyumbatan kanal pendingin elemen bakar
- Hal ini sangat mungkin terjadi karena teras reaktor RSG-GAS berada di dalam kolam yang terbuka dan aliran pendingin di teras mempunyai arah dari atas ke bawah (dihisap). Apabila terjadi sesuatu hal atau kegiatan sehingga kotoran menempel pada permukaan bahan bakar, akan terjadi pengurangan aliran pendingin di antara pelat bahan bakar yang tertutup tersebut.
- 3) Berkurangnya kemampuan pembuangan panas sistem pendingin sekunder
- Berkurangnya kemampuan pembuangan panas sistem pendingin sekunder reaktor RSG-GAS dapat terjadi oleh beberapa sebab, yaitu
- a) kegagalan satu atau dua pompa pendingin sekunder;
 - b) penutupan katup pendingin sekunder secara tidak disengaja;
 - c) kehilangan air pendingin;
 - d) pembukaan katup by-pass pada penukar panas; dan
 - e) kegagalan pembuangan panas ke lingkungan dari sistem blower.
- 4) Kecelakaan reaktivitas
- Kecelakaan reaktivitas yang dapat terjadi di reaktor RSG-GAS adalah akibat adanya insersi atau penyisipan reaktivitas pada saat reaktor beroperasi, baik oleh ketidaknormalan penarikan batang kendali maupun oleh penanganan (penarikan atau pemasukan) sampel atau target iradiasi. Kecelakaan dapat terjadi saat reaktor beroperasi pada daya rendah maupun pada daya tinggi.

C. Penerapan Sistem Pertahanan Berlapis Reaktor RSG-GAS

Penerapan sistem pertahanan keselamatan berlapis pada reaktor RSG-GAS akan ditinjau berdasarkan INSAG-10 tahun 1996, yaitu terpilah dalam lima lapis meskipun RSG-GAS dibangun pada tahun 1983 berdasarkan prinsip keselamatan tahun delapan puluhan.

1. Lapis Pertahanan Pertama

Tujuan lapis pertahanan pertama adalah pencegahan operasi abnormal dan kegagalan dengan alat utama konservatif dalam desain dan kualitas tinggi dalam konstruksi dan operasi. RSG-GAS telah didesain dan dibangun untuk tujuan operasi yang andal dan aman, yang mampu mencegah kondisi operasi abnormal dan mencegah kegagalan. Sistem didesain secara konservatif, artinya mempunyai margin keselamatan yang tinggi, dibangun, dan dioperasikan dengan kualitas yang tinggi pula. Reaktor telah dibangun berdasarkan desain yang mempertimbangkan filosofi, tujuan, dan kriteria keselamatan reaktor seperti disajikan dalam Tabel 5.3, yang secara garis besar dapat dikemukakan sebagai berikut.

- a. Reaktor mempunyai sistem pengoperasian yang lengkap dan andal dengan menerapkan prinsip inheren, gagal-selamat, dan margin keselamatan yang tinggi.
- b. Reaktor dilengkapi dengan sistem kendali reaktivitas yang dirancang untuk operasi normal maupun untuk keselamatan pemadaman. Sistem kendali reaktivitas berfungsi sebagai berikut:
 - 1) untuk menyediakan kendali bagi operator untuk mempertahankan daya reaktor;
 - 2) untuk memadamkan reaktor dan mempertahankan kondisi subkritis;
 - 3) untuk membatasi masuknya reaktivitas; dan
 - 4) untuk mempertahankan daya reaktor secara otomatis pada tingkat daya tertentu.

- c. Reaktor didesain dan dibangun untuk tahan gempa sampai 0,25 g (percepatan tanah $2,5 \text{ m/s}^2$) untuk gedung, sistem, dan komponen yang mempunyai fungsi keselamatan (lihat Gambar 5.9).
- d. Reaktor mempunyai dua ruang kendali, yaitu Ruang Kendali Utama (RKU) dan Ruang Kendali Darurat (RKD) seperti terlihat pada Gambar 5.10 dan Gambar 5.11.
- e. Reaktor dibangun jauh (sekitar 200 meter) dari permukiman dan pusat kegiatan masyarakat sehingga kecil kemungkinan terjadinya gangguan dari masyarakat. Saat ini permukiman berkembang pesat maka instalasi reaktor diperkuat dengan sistem proteksi fisik dan sistem pengamanan.
- f. Reaktor dioperasikan oleh personel yang ahli dan bersertifikat yang terpelihara.



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (1985)

Gambar 5.9 Fase Pembangunan Gedung Reaktor

RSG-GAS dioperasikan oleh personel pengoperasi yang mempunyai kualifikasi mengikuti peraturan badan pengawas, terakhir adalah Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2019 tentang Izin Bekerja Petugas Instalasi dan Bahan Nuklir, seperti berikut (Peraturan BAPETEN No. 7, 2019).

- a. Supervisor reaktor: minimal berijazah sarjana atau diploma IV bidang ilmu teknik, fisika, atau kimia; dan minimal 4 tahun berpengalaman sebagai operator. Supervisor harus telah menerima cukup pelatihan dalam bidang teknologi reaktor dan operasi di fasilitas ini untuk memenuhi persyaratan sertifikasi supervisor.
- b. Operator reaktor: minimal berijazah D-III bidang ilmu teknik, fisika, atau kimia; dan telah magang sebagai operator reaktor paling singkat dua tahun. Operator telah menerima cukup pelatihan di bidang teknologi reaktor dan operasi di fasilitas atau di lain tempat untuk memenuhi persyaratan untuk sertifikasi.
- c. Petugas proteksi radiasi (PPR): minimal berijazah D-III bidang ilmu teknik atau eksakta; dan telah magang sebagai petugas proteksi radiasi instalasi nuklir paling singkat tiga tahun dan telah menerima cukup pelatihan proteksi radiasi untuk memenuhi persyaratan sertifikasi sebagai petugas PPR.
- d. Petugas perawat: minimal berijazah D-III bidang ilmu teknik, fisika, atau kimia; dan telah magang sebagai teknisi perawatan reaktor paling singkat dua tahun dan telah menerima cukup pelatihan teknologi fasilitas, perawatan, dan perbaikan, baik di fasilitas maupun di tempat lain sesuai dengan bidang keahliannya untuk memenuhi persyaratan sertifikasi sebagai petugas perawatan.



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (1988)

Gambar 5.10 Ruang Kendali Utama



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (1988)

Gambar 5.11 Ruang Kendali Darurat

Tabel 5.3 Desain Sistem Reaktor RSG-GAS

No.	Sistem reaktor	Keterangan	Aspek
1.	Daya reaktor	30 MW	
2.	Ruang kendali	Tersedia 2 buah, Ruang Kendali Utama (RKU) dan Ruang Kendali Darurat (RKD)	Keandalan
3.	Teras	Koefisien reaktivitas negatif, margin reaktivitas padam besar	Inheren, margin tinggi
4.	Sistem pendingin	Kapasitas 32 MW, 2 lajur sistem bantu	Keandalan, margin tinggi
5.	Sistem instrumentasi dan kendali	Sistem pemantau, proses, proteksi dan kendali, komponen keselamatan	Keandalan
6.	Sistem ventilasi	Dibagi dalam beberapa daerah sesuai tingkat radiasi dan fungsi keselamatan.	Keselamatan
7.	Sistem proteksi radiasi	Memantau paparan dan aktivitas radiasi di tiap ruang dan sistem	Keandalan, keselamatan
8.	Sistem listrik	PLN 3 lajur, UPS, 3 diesel	Keandalan
9.	Bangunan reaktor	Tahan gempa 0,25 g	Keselamatan
10.	Sistem mutu	Dibagi dalam 3 kelas, AS1, AS2, dan Industri, contoh pada Tabel 5.4	Keandalan, mutu tinggi
11.	Sistem limbah	<i>Zero release</i> , tak ada pelepasan limbah ke lingkungan	Keselamatan

Sumber: PRSG (2011)

Tabel 5.4 Contoh Klasifikasi Mutu Sistem Reaktor RSG-GAS

No.	KKS	Komponen	Kelas Mutu	
			AS 1	AS 2
1	JDA	Suspensi Penggerak BK	x	
		Magnet		x
2	JKT	Instrumentasi fluks (Mekanik)		x
3	SMJ10	<i>Crane</i> , di Balai operasi		x
		Main Hoist	x	

No.	KKS	Komponen	Kelas Mutu	
			AS 1	AS 2
4.	JE01 AP01/02/03	Pompa primer		x
5.	JE01 BC01/02	<i>Heat exchangers</i>		x

Ket.: AS1: mempunyai toleransi 0–5%; AS2: mempunyai toleransi 5–10%

Sumber: PRSG (2011)

2. Lapis Pertahanan Kedua

Lapisan pertahanan kedua adalah untuk memenuhi tujuan pengendalian operasi abnormal dan pendeteksian kegagalan yang intinya reaktor mempunyai sistem pengendali, pembatas, dan proteksi, serta sistem pengawasan lain. RSG-GAS mempunyai sistem tersebut yang disebut dengan batasan dan kondisi operasi (BKO).

BKO adalah batasan khusus dan persyaratan peralatan untuk pengoperasian reaktor yang selamat dan menangani situasi abnormal. Besaran yang digunakan diambil dari laporan analisis keselamatan (LAK). Secara prinsip, batasan dan persyaratan operasi ini merupakan pedoman dalam pengoperasian reaktor yang selamat. Batas dan kondisi operasi reaktor berisi batasan-batasan dalam pengoperasian reaktor yang terdiri dari empat hal, yaitu a) batas keselamatan, b) batas pengesetan sistem keselamatan, c) batas operasi, dan d) persyaratan pengawasan. Masing-masing batas kondisi operasi yang aman ini memuat informasi tentang tujuan, pemberlakuan pada mode operasi, spesifikasi atau batasan, dan dasar penentuannya.

Sebelum menyajikan batasan dan kondisi operasi, akan disampaikan terlebih dahulu jenis atau macam mode operasi yang dapat dilakukan oleh reaktor. Reaktor RSG-GAS mempunyai empat macam mode operasi sebagai berikut.

a. Mode 1: Operasi daya

Operasi reaktor yang dimulai dari awal (*start-up*) sampai ke operasi daya dan operasi reaktor pada daya > 3% daya penuh.

b. Mode 2: Operasi daya rendah

Mode 2, terdiri dari dua macam, yaitu

- 1) Mode 2a: Operasi awal dan operasi daya rendah dengan pendinginan konveksi alam (pendingin primer padam). Reaktor beroperasi dengan daya $< 1\%$ dari daya penuh, baik kritis maupun subkritis dengan kondisi batang kendali beroperasi.
- 2) Mode 2b: Operasi awal dan operasi daya rendah dengan pendinginan konveksi paksa (pendingin primer dioperasikan). Reaktor beroperasi dengan daya $< 3\%$ dari daya penuh, baik kritis maupun subkritis, dengan kondisi batang kendali beroperasi.

c. Mode 3: Reaktor padam

Reaktor padam dengan kondisi semua batang kendali berada di posisi paling bawah, ditandai dengan:

- 1) penunjukan meter nol;
- 2) sistem 6 kontak berada pada posisi terbuka; dan
- 3) kunci *start-up* dalam keadaan *off*.

d. Mode 4: Pengisian ulang elemen bakar (*refuelling*)

Reaktor dalam kondisi padam seperti pada mode 3 dengan pompa primer mati dan sistem pendinginan kolam dalam kondisi beroperasi, untuk kegiatan pengisian ulang bahan bakar dan penanganan elemen teras yang lain.

a. Batas Keselamatan (BK)

Batas keselamatan (BK) reaktor RSG-GAS bertujuan untuk menjaga integritas kelongsong elemen bakar untuk mode operasi 1 dan mode operasi 2.

1) BK.1 Operasi daya

Batas keselamatan 1 (BK.1) memberikan nilai batas parameter-parameter reaktor yang dapat menjamin integritas (keutuhan) kelongsong

elemen bakar selama reaktor beroperasi dengan mode operasi daya. Batasan keselamatan tersebut meliputi:

- a) daya maksimal reaktor: 34,2 MW;
- b) faktor daya radial maksimal: 2,6;
- c) laju alir minimal: 640 kg/s;
- d) suhu *inlet* pendingin kolam maksimal: 44°C; dan
- e) tinggi air kolam minimal: 12,00 m.

Dasar penentuan batas keselamatan ini adalah untuk menjamin batas keselamatan minimum ketidakstabilan aliran pada saluran panas bahan bakar di teras, tidak lebih kecil dari 1,48 untuk seluruh rentang daya reaktor. Jika fenomena ketidakstabilan aliran ini terjadi, suhu akan naik sampai batas yang tidak dapat ditoleransi akibat ketidakcukupan pendinginan pada pelat elemen bakar, akibatnya integritas kelongsong terancam.

2) BK.2 Mode operasi daya rendah

Batas keselamatan 2 (BK.2) berisi nilai batas parameter-parameter reaktor untuk menjamin integritas kelongsong elemen bakar selama reaktor beroperasi dengan mode daya rendah dengan pendinginan konveksi alam. Batasan keselamatan tersebut meliputi:

- a) daya termal reaktor maksimum: 758 kW;
- b) periode minimal: 10 detik; dan
- c) tinggi air kolam minimum: 12,00 m.

Dasar penentuan batas keselamatan ini adalah untuk menjamin tidak terjadinya ketidakstabilan aliran pada saluran terpanas bahan bakar, yaitu tidak melewati margin keselamatan minimum sebesar 1,48.

b. Pengesetan Sistem Keselamatan (PSK)

Batas pengesetan sistem keselamatan reaktor dipilah dalam dua kelompok sistem, yaitu sistem proteksi reaktor dan sistem isolasi pengungkung. Rincian kedua pengesetan sistem keselamatan (PSK) tersebut dijelaskan berikut ini.

- 1) PSK.1 Batas pengaktifan sistem proteksi reaktor
 - a) Tujuan: Menjamin bahwa batas keselamatan tidak dilampaui.
 - b) Pemberlakuan: Semua mode.
 - c) Batasan dan persyaratan operasi: Batas pengaktifan sistem proteksi reaktor (SPR) sesuai dengan harga pada tabel yang disediakan oleh desainer.
 - d) Tindakan:

Mode operasi 1, 2a, 2b, 3, dan 4: Pada kondisi tidak tersedia trip otomatis dan satu dari tiga saluran diyakini tidak berfungsi maka kanal dapat dimatikan secara manual.

Mode 2b: Reaktor tidak boleh dihidupkan jika ada saluran yang tidak berfungsi.
 - e) Dasar: Batas pengaktifan variabel yang termasuk dalam batas keselamatan telah dipilih sedemikian rupa sehingga dapat menjamin adanya tindakan proteksi secara otomatis untuk mencegah setiap situasi abnormal yang terantisipasi, sebelum kriteria stabilitas aliran dilanggar. Adanya perbedaan batas antara batas pengaktifan SPR dengan batas keselamatan memberi toleransi adanya ketidakpastian pada besaran parameter. Variasi daya sebesar 5%, variasi aliran 5%, variasi suhu pendingin teras sekitar 2 °C, dan variasi tinggi 0,05 m.
- 2) PSK.2 Batas pengaktifan sistem isolasi pengungkung
 - a) Tujuan: Untuk memulai pengungkungan jika terjadi aktivitas tinggi yang tidak diperkirakan di dalam reaktor. Sebagai contoh, pada balai operasi, balai eksperimen, ruang di lantai bawah tanah, fasilitas pendukung, dan *primary cell*, jika harga konsentrasi radioaktivitas udara yang keluar di cerobong lebih tinggi dari $5 \times 10^{-4} \text{ Ci/m}^3$ ($18,5 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3$).
 - b) Pemberlakuan: Semua mode.
 - c) Batasan dan persyaratan operasi: Batas pengaktifan sistem isolasi pengungkung ditunjukkan pada tabel tertentu yang sudah tersedia dari desainer. Sistem ini harus dalam kondisi

dapat beroperasi dan batas pengaktifan serta waktu respons, paling sedikit dua kanal tiap fungsi proteksi tidak melebihi nilai tertentu.

- d) Dasar: Batas konsentrasi ini berhubungan dengan pelepasan zat radioaktif jangka pendek dengan paparan 20 Ci/jam ke lingkungan sampai katup isolasi gedung tertutup dalam waktu 20 detik jika terjadi kecelakaan dasar desain (DBA). Setelah itu laju pelepasan zat radioaktif akan menurun sampai lebih dari sepuluh kali lipat.

c. Batas Operasi (BO)

Terkait dengan batas operasi (BO) untuk RSG-GAS, terdapat dua prinsip yang harus dipatuhi:

- 1) Prinsip pertama: Sebelum mengoperasikan reaktor, semua sistem yang terkait dengan keselamatan harus dalam kondisi beroperasi.
- 2) Prinsip kedua: Dalam kondisi terjadinya penyimpangan selama operasi, reaktor dapat saja terus beroperasi sampai akhir siklus jika batasan dan persyaratan operasi tidak dilampaui.

BO dikenakan pada sistem-sistem reaktor yang dikelompokkan dalam sistem reaktor, sistem pendingin, sistem instrumentasi, sistem pendukung, sistem ventilasi, dan sistem catu daya, seperti disajikan berikut ini.

1) BO.1 Sistem Reaktor

BO untuk sistem reaktor terdiri dari karakteristik pemuatan teras, fraksi bakar, harga reaktivitas padam dan batang kendali, konfigurasi batang kendali, penunjuk posisi batang kendali, waktu jatuh batang kendali, pendingin teras, dan daya reaktor.

a) BO.1.1 Karakteristik pemuatan teras

- (1) Tujuan: Untuk mempertahankan karakteristik muatan teras.
- (2) Pemberlakuan: Mode 1 dan 2.

- (3) Spesifikasi: Karakteristik muatan teras harus diatur sebagai berikut.

Berdasarkan pengalaman reaktor penelitian lain, bahwa penyerap tipe garpu akan diganti jika penyerap garpu tersebut telah digunakan selama 40 kali siklus operasi atau setelah reaktor beroperasi sebanyak 30.000 MWD. Di samping alasan tersebut, penyerap garpu pada RSG-GAS akan diganti jika parameter lain telah dipenuhi seperti fluens telah mencapai nilai 10^{22} n/cm², hasil uji kalibrasi batang kendali telah menunjukkan nilai margin padam (*shut-down*) pada kondisi batang kendali macet (*stuck rod*) < 0,5%, dan waktu jatuh maksimum bahan penyerap melebihi 0,47 detik.

- (4) Dasar: Nilai reaktivitas bahan penyerap akan selalu menurun. Namun, hal ini tidak akan menjadi masalah yang berkaitan dengan keselamatan selama fungsi batang kendali untuk pemadaman reaktor dipenuhi. Mungkin saja terjadi interaksi mekanik antara bahan penyerap AgInCd dan kelongsong *stainless steel* (SS) oleh iradiasi dan panasnya dapat menyebabkan bengkok ataupun gembung.

b) BO.1.2 Fraksi bakar

- (1) Tujuan: Untuk mempertahankan integritas elemen bakar.
(2) Pemberlakuan: Semua mode.
(3) Spesifikasi: Fraksi bakar untuk bahan bakar buang adalah 56%, kondisi batas operasi aman elemen bakar buang RSG-GAS ditetapkan 65%.
(4) Dasar: Hasil uji iradiasi elemen bakar silisida menunjukkan bahwa pada fraksi bakar mendekati 90%, tidak mengindikasikan adanya *swelling* (pembengkakan).

c) BO.1.3 Harga reaktivitas padam dan batang kendali

- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa:
(a) Batang kendali dapat memadamkan tiap konfigurasi teras walaupun terdapat batang kendali dengan harga

reaktivitas terbesar macet, atau terjadi penarikan tak disengaja batang kendali yang sangat reaktif.

- (b) Sistem pemadaman dapat memadamkan teras setiap saat.
 - (2) Pemberlakuan: Mode 1 dan 2
 - (3) Spesifikasi: Sistem pemadaman yang terdiri dari 8 batang kendali harus dapat memadamkan teras setiap saat dengan margin reaktivitas padam $< 0,5\%$ walaupun batang kendali dengan harga reaktivitas tertinggi gagal masuk ke teras (kondisi *stuck rod*). Jika terjadi perubahan konfigurasi teras, reaktor tidak boleh dioperasikan sebelum dilakukan verifikasi terhadap margin padam dan harga reaktivitas tiap batang kendali.
 - (4) Dasar: Reaktivitas lebih teras mempunyai nilai terbesarnya pada awal siklus (BOC) dengan keadaan teras dingin dan tanpa racun xenon. Untuk itu, sistem pemadaman harus dapat memadamkan teras dengan selamat walaupun satu batang kendali macet atau terangkat keluar teras secara tidak sengaja.
- d) BO.1.4 Konfigurasi batang kendali
- (1) Tujuan: Menjamin deviasi posisi maksimum antara batang kendali tertinggi dan terendah dari batang kendali *bank* (posisi yang rata) dipertahankan pada level tertentu.
 - (2) Pemberlakuan: Mode 1.
 - (3) Spesifikasi: Reaktor dioperasikan dengan tujuh batang kendali, bertindak sebagai *bank* dan satu yang lain bertindak sebagai batang pengatur. Beda atau deviasi posisi (ketinggian) maksimum antara *bank* dan pengatur dipertahankan lebih kecil dari 5 mm.
 - (4) Tindakan: Apabila posisi batang kendali pengatur terdapat perbedaan sebesar 7 mm dengan posisi batang kendali *bank*, dilakukan kompensasi dengan batang kendali yang lain sehingga posisi batang kendali (8 batang kendali) menjadi sama.

- (5) Dasar: Konfigurasi batang kendali memengaruhi distribusi kerapatan daya. Konfigurasi batang kendali yang tidak simetri dapat menyebabkan distribusi daya yang tidak simetri pula dan sebagai konsekuensinya dapat meningkatkan faktor kanal panas. Harga batas dari peningkatan ini ditentukan dengan faktor puncak daya radial sebesar 2,60. Batas ini dapat terlampaui jika dua batang kendali (batang pengatur ditambah satu batang kendali) posisinya terlalu jauh dari posisi *bank*.
- e) BO.1.5 Penunjuk posisi batang kendali
- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa batang kendali bekerja dengan baik.
 - (2) Pemberlakuan: Mode 1, 2, dan 3.
 - (3) Spesifikasi: Reaktor tidak boleh dioperasikan kecuali jika kondisi sistem penunjuk posisi batang kendali dalam keadaan beroperasi selama reaktor *start-up* dan kondisi operasi.
 - (4) Tindakan:
Mode 1: Jika satu sistem penunjuk batang kendali gagal, baik sistem indikasi analog maupun sistem indikasi digital, reaktor dapat saja terus dioperasikan sampai akhir siklus.
Mode 2: Jika sistem penunjuk posisi batang kendali tidak beroperasi selama reaktor *start-up*, reaktor dipadamkan.
Mode 3: Dalam kondisi sistem indikasi gagal, lakukan perbaikan.
 - (5) Dasar: Penunjuk posisi batang kendali harus memberi informasi posisi batang kendali yang benar.
- f) BO.1.6 Waktu jatuh batang kendali
- (1) Tujuan: untuk menjamin bahwa waktu jatuh batang kendali tidak melebihi batas yang dapat menyebabkan penyimpangan daya yang tidak dapat diizinkan.
 - (2) Pemberlakuan: Mode 1 dan 2.
 - (3) Spesifikasi: Waktu jatuh maksimum yang diizinkan untuk 80% jatuhnya (dari ketinggian penuh) suatu penyerap tidak

boleh melebihi 0,47 detik dan harga rata-rata waktu jatuh semua penyerap tidak melebihi 0,4 detik.

- (4) Tindakan: Reaktor tetap dalam kondisi padam. Penyerap yang melebihi waktu jatuh maksimum tertentu harus diperbaiki sehingga waktu jatuhnya kembali pada rentang yang dapat diizinkan lagi.
 - (5) Dasar: Jika waktu jatuh tidak berada dalam rentang yang dapat diizinkan, penyimpangan daya reaktor dapat saja terjadi pada kasus kecelakaan insersi reaktivitas.
- g) BO.1.7 Pendingin teras
- (1) Tujuan: Untuk menjamin teras reaktor selalu mendapatkan pendinginan yang cukup untuk pemindahan panas yang dikandungnya.
 - (2) Pemberlakuan: Mode 1 dan 2
 - (3) Spesifikasi:
 - (a) Laju alir sistem primer minimum adalah 800 kg/s (2.902 m³/h), laju alir nominal 860 kg/s (3120 m³/h), dan sesuai dengan desain pompa primer dan vibrasi teras maka laju alir dibatasi maksimal 3200 m³/h.
 - (b) Laju alir massa total yang diperlukan untuk mendinginkan insersi iradiasi di teras dan reflektor tidak boleh melebihi 10 kg/s (36 m³/h), pada laju alir minimum 800 kg/s (2902 m³/h). Pada kondisi laju alir sistem primer naik ke 860 kg/s (3120 m³/h), laju alir massa maksimum melalui insersi iradiasi di teras dan reflektor adalah sebesar 30 kg/s (108 m³/h). Untuk masing-masing eksperimen insersi iradiasi yang dilakukan di dalam teras atau reflektor, laju alir melalui insersi iradiasi pada penurunan tekanan 0,29 bar (perubahan tekanan *irreversible* atau *reversible* di luar perbedaan tinggi) harus dihitung atau diukur di dalam fasilitas uji.

- (c) Tidak boleh ada posisi *grid* yang kosong jika konfigurasi teras menyimpang dari konfigurasi teras setimbang.
 - (d) Faktor kanal panas nuklir untuk tiap konfigurasi teras pada kondisi tunak tidak boleh lebih dari 1,6 untuk aksial dan 2,6 untuk radial.
- (4) Tindakan:
- (a) Reaktor tetap dalam posisi padam. Atur posisi *flap* dari katup *inlet* isolasi pemindah panas di sistem primer ke nilai yang sudah ditentukan untuk itu atau periksa penyebab lain dari kenaikan atau penurunan aliran.
 - (b) Kurangi jumlah target iradiasi atau naikkan resistansi hidroliknya.
 - (c) Ubah konfigurasi teras untuk menghindari kondisi yang tidak dapat diterima.
 - (d) Ubah konfigurasi teras untuk memenuhi harga yang telah ditentukan.
- (5) Dasar:
- (a) Jika laju alir minimum sistem primer tidak tersedia, pelat elemen bakar tidak dapat didinginkan secara memadai. Jika kegagalan pompa terjadi, akibatnya dapat terjadi pelelehan pelat elemen bakar.
 - (b) Jika harga desain 10 kg/s dilewati pada laju aliran sistem pendingin primer minimum, faktor kanal panas nuklir yang dapat diterima harus diperkecil di bawah harga desain untuk mempertahankan batas keselamatan terhadap ketidakstabilan di atas harga yang sudah ditetapkan.
 - (c) Jika posisi *grid plate* tetap terbuka, pendingin tidak tersedia untuk mendinginkan pelat.
 - (d) Elemen bakar dan beberapa dari mereka akan meleleh. Jika posisi kosong ditutup, distribusi aliran di saluran pendingin tetangganya, yaitu pada pelat elemen bakar

luar dari elemen di sampingnya tidak akan dapat terdinginkan secara memadai lagi. Kondisi pendinginan akan lebih buruk lagi jika pelat elemen bakar secara langsung berhadapan dengan gelembung air.

- (e) Panas yang dapat dipindahkan dari suatu pelat elemen bakar dibatasi oleh fenomena stabilitas aliran. Panas yang dipindahkan ke saluran pendingin secara langsung berkaitan dengan faktor kanal panas nuklir. Jika batas operasional untuk faktor-faktor tersebut dilanggar, elemen bakar dapat meleleh.

h) BO.1.8 Daya Reaktor

- (1) Tujuan: Untuk menjamin terpenuhinya nilai fluks neutron yang diperlukan dan menjaga integritas kelongsong elemen bakar.
- (2) Pemberlakuan: Mode 1.
- (3) Spesifikasi: Reaktor dioperasikan pada daya nominal 30 MW termal. Dalam kondisi terjadi kenaikan daya reaktor, sistem proteksi reaktor akan diaktifkan jika daya mencapai batas pengaktifan sistem keselamatan tersebut.
- (4) Dasar: Batasan 34,2 MW dilakukan untuk menjamin batas keselamatan minimum kestabilan aliran, pada kanal panas teras tidak boleh lebih kecil dari 1,48 untuk seluruh rentang daya.

2) BO.2 Sistem pendingin reaktor

Batasan untuk sistem pendingin reaktor meliputi pipa dan komponen, kendali ketinggian air kolam, sistem purifikasi pendingin, penukar panas, mutu pendingin primer, sistem katup primer, sistem pendinginan kolam, dan sistem lapisan air hangat.

a) BO.2.1 Pipa dan komponen

- (1) Tujuan: Untuk menjamin pemipaan dan komponen berfungsi sesuai dengan persyaratan desain.
- (2) Pemberlakuan: Mode 1 dan 2.

- (3) Spesifikasi: Pompa primer boleh dihidupkan jika semua katup yang digerakkan dengan motor, catu dayanya dimatikan, kecuali katup isolasi primer dan katup-katup keluaran pompa. Setelah pompa primer dihidupkan dan katup setelah pompa terbuka, catu daya dari katup tersebut harus dimatikan paling lambat dalam 10 menit.
 - (4) Tindakan: Tidak ada
 - (5) Dasar: Kemungkinan penurunan aliran sistem primer < 800 kg/detik selama operasi daya reaktor oleh penutupan tiba-tiba katup keluaran harus diyakinkan tidak ada.
- b) BO.2.2 Kendali tinggi air
- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa tidak terjadi kecelakaan kehilangan pendingin (LOCA, *loss of coolant accident*).
 - (2) Pemberlakuan: Mode 1 dan 2.
 - (3) Spesifikasi: Reaktor tidak boleh dioperasikan jika kolam reaktor tidak memenuhi tinggi air kolam minimum 12,41 m.
 - (4) Tindakan: Isi air kembali kolam reaktor atau padamkan reaktor.
 - (5) Dasar: Pendinginan teras dan perisai radiasi setelah kecelakaan LOCA harus tetap dijamin. Pemindahan panas peluruhan melalui sistem pendingin setelah kehilangan pembuangan panas utama juga harus dijamin.
- c) BO.2.3 Sistem purifikasi pendingin
- (1) Tujuan: untuk menjamin bahwa pengotor air reaktor tidak merusak sistem reaktor dan membatasi kontribusi laju dosis gamma yang berasal dari pengotor.
 - (2) Pemberlakuan:
 - (a) Mode 2.
 - (b) Mode 1, 2, 4.
 - (3) Spesifikasi:
 - (a) Dalam hal satu pompa purifikasi gagal, reaktor masih boleh dioperasikan.

- (b) Reaktor tidak boleh dioperasikan jika konduktivitas air pendingin primer melebihi $0,8 \mu\text{S/m}$ (mikrosiemens per meter).
- (4) Tindakan:
 - (a) Mode 2: Jangan hidupkan reaktor jika kondisi tidak dipenuhi.
 - (b) Mode 1: Padamkan reaktor jika konduktivitas melebihi harga batas. Perbaiki kondisi dan ganti resin penukar ion.
 - (c) Mode 4: Hentikan pemuatan ulang, pulihkan kondisi.
- (5) Dasar:
 - (a) Pengotoran radioaktif di pendingin kolam harus dibatasi agar laju dosis gamma yang diizinkan tidak melebihi 10 mrem/jam pada jembatan di atas kolam.
 - (b) Persyaratan ini dibuat untuk membatasi konsentrasi aktivitas di sistem primer dan memelihara spesifikasi primer.
- d) BO.2.4 Penukar panas
 - (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa tidak ada kebocoran pada penukar panas.
 - (2) Pemberlakuan: Semua mode.
 - (3) Spesifikasi: Konsentrasi aktivitas pendingin sekunder $< 5 \times 10^{-6} \text{ Ci/m}^3$.
 - (4) Tindakan: Padamkan reaktor.
 - (5) Dasar: Proteksi terhadap pelepasan aktivitas radiasi yang tidak dapat diterima ke lingkungan disebabkan oleh kebocoran di dalam penukar panas haruslah dijamin. Untuk itu pemantau radiasi disediakan di sistem pendingin sekunder.
- e) BO.2.5 Mutu pendingin primer
 - (1) Tujuan: Untuk menjamin mutu pendingin sistem primer tidak menyebabkan korosi.
 - (2) Pemberlakuan: Semua mode.

- (3) Spesifikasi: Selama operasi reaktor konduktivitas air pendingin primer harus $< 0,8 \mu\text{S/m}$.
 - (4) Tindakan: Jika batas tertentu tidak dipenuhi, penggunaan saringan *mixed-bed* di sistem purifikasi pendingin primer harus diperiksa. Untuk mode 1 dan 2, reaktor dipadamkan.
 - (5) Dasar: Konduktivitas merupakan variabel proses yang menunjukkan tingkat pengotoran yang harus dipertahankan pada rentang harga tertentu untuk membatasi efek korosi.
- f) BO.2.6 Sistem pendingin kolam
- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa paling sedikit satu pendingin kolam dapat bekerja dengan baik setiap saat.
 - (2) Pemberlakuan
 - (a) Mode 1
 - (b) Mode 2
 - (c) Mode 3
 - (3) Spesifikasi:

Selama operasi daya reaktor paling sedikit satu lajur sistem pendingin kolam harus tersedia termasuk sistem catu daya listriknya. Sebelum reaktor dioperasikan paling sedikit dua sistem pendingin kolam harus dalam kondisi dapat beroperasi.
 - (4) Tindakan:
 - (a) Lajur sistem pendingin kolam yang rusak harus diperbaiki.
 - (b) Reaktor tidak boleh dihidupkan.
 - (c) Hentikan pemuatan.
 - (5) Dasar: Kapasitas tiap lajur sistem pendingin kolam ditentukan untuk membatasi suhu air kolam maksimum sehingga integritas kolam dapat dipertahankan.
- g) BO.2.7 Katup sistem pendingin
- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa semua katup dapat beroperasi selama operasi reaktor.

- (2) Pemberlakuan: Mode 1 dan 2.
 - (3) Spesifikasi:
 - (a) Reaktor tidak boleh dihidupkan kecuali katup isolasi primer dalam kondisi operasi.
 - (b) Reaktor hanya dihidupkan jika katup isolasi kolam dalam kondisi beroperasi.
 - (c) Reaktor tidak boleh dihidupkan kecuali katup-katup dalam posisi terkunci pada posisi tertutup.
 - (d) Reaktor tidak boleh dioperasikan jika kendali katup dalam status tak terenergisasi.
 - (4) Tindakan:

Pertahankan reaktor tetap dalam kondisi padam jika kondisi a–d tidak dipenuhi dan pulihkan kembali ke kondisi semula.
 - (5) Dasar:
 - a–c: Kondisi-kondisi ini adalah dasar untuk mempertahankan pendingin dalam status bahwa suhu dan laju aliran pada level yang diinginkan dan fungsi keselamatan yang perlu dapat dilaksanakan pada situasi darurat.
 - d: Laju aliran sistem primer harus dipertahankan konstan selama operasi daya reaktor.
- h) BO.2.8 Sistem lapisan air hangat
- (1) Tujuan: menjamin sistem lapisan air hangat dapat menurunkan laju dosis pada jembatan kolam reaktor.
 - (2) Pemberlakuan: Mode 1.
 - (3) Spesifikasi: Reaktor tidak boleh dioperasikan jika sistem lapisan air hangat tidak berfungsi, kecuali laju dosis di jembatan kolam lebih kecil dari 10 mrem/jam.
 - (4) Tindakan:
 - (a) Jika laju dosis pada jembatan kolam melebihi harga di atas, daya reaktor harus diturunkan.
 - (b) Periksa unit yang salah.

- (5) Dasar: Sistem lapisan air hangat diperlukan untuk memelihara laju dosis di balai operasi reaktor rendah.

3) BO.3 Instrumentasi

Dalam hal sistem instrumentasi reaktor, BO dipilah dalam sistem proteksi reaktor dan sistem pemantauan aktivitas udara.

a) BO.3.1 Sistem proteksi reaktor (SPR)

- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa SPR harus bekerja dengan baik selama operasi reaktor.
- (2) Pemberlakuan: Semua mode.
- (3) Spesifikasi: Batas pengaktifan sistem proteksi reaktor (SPR) sesuai dengan tabel yang ditentukan oleh desainer.
- (4) Tindakan: Semua saluran tidak beroperasi harus diletakkan pada kondisi *trip*.
- (5) Dasar: Batas pengaktifan variabel yang termasuk dalam batas keselamatan telah ditentukan sehingga dapat menjamin adanya tindakan proteksi secara otomatis untuk mencegah setiap situasi abnormal yang terantisipasi, sebelum kriteria stabilitas aliran terlampaui. Adanya perbedaan antara batas pengaktifan SPR dengan batas keselamatan memberi toleransi adanya ketidakpastian pada besaran parameter. Variasi daya sebesar 5%, variasi aliran sebesar 5%, variasi suhu pendingin teras sekitar 2 °C, dan variasi tinggi sebesar 0,05 m.

b) BO.3.2 Sistem pemantauan aktivitas udara

- (1) Tujuan: Menjamin bahwa reaktor tidak akan mengeluarkan gas mulia ke lingkungan.
- (2) Pemberlakuan: Semua mode.
- (3) Spesifikasi:
Reaktor tidak boleh dioperasikan jika peralatan pemantau udara cerobong (KLK06) seperti yang tertera di bawah ini tidak beroperasi atau menunjukkan tanda peringatan.

- (a) Sistem pemantau aktivitas gas mulia beta cerobong (KLN06 CR001/CR002)
 - (b) Sistem pemantau aktivitas aerosol beta cerobong (KLN06 CR003)
 - (c) Sistem aktivitas sampel iodin dan aerosol cerobong (KLN06 CR004)
- (4) Tindakan:

Jika alarm kegagalan terjadi pada sistem pemantau aktivitas gas mulia beta (KLN06 CR001/CR002) pada mode 1 dan 2, lakukan pengamatan pemantau aktivitas gas mulia beta KLN03 CR003 (sistem venting kolam reaktor) dan lakukan perbaikan. Jika perbaikan dari sistem pemantau yang gagal tersebut tidak mungkin dilakukan dalam 24 jam, padamkan reaktor.

Jika terjadi alarm dari pemantau aktivitas aerosol beta (KLN06 CR003) atau sampler iodin aerosol (KLN06 CR004), lakukan perbaikan. Jika perbaikan tidak mungkin dilakukan dalam 24 jam, aktifkan sistem isolasi gedung pada sistem venting.

Jika terjadi alarm pada sistem pemantau aktivitas pada mode 3, pertahankan reaktor pada kondisi tidak kritis dan mulai tindak perbaikan.

Jika terjadi alarm pada sistem pemantau aktivitas ini pada mode 4, hentikan pemuatan ulang dan lakukan perbaikan.

- (5) Dasar:

Rancangan sistem pemantauan aktivitas radiasi cerobong adalah untuk memantau sistem pelepasan udara gas mulia radioaktif dan bahan radioaktif untuk mempertahankan dampak lingkungan serendah mungkin (ALARA). Jika satu pemantau gagal dan tidak ada indikasi pengukuran yang kontinu dari laju aktivitas buangan melalui cerobong yang dikeluarkan ke lingkungan maka analisis kualitatif dan kuantitatif harus dilakukan.

4) BO.4 Sistem Pendukung

Sistem pendukung meliputi integritas pengungkung, damper isolasi pengungkung, dan sistem tekanan rendah.

a) BO.4.1 Integritas pengungkung

(1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa tidak ada bocoran dari pengungkung reaktor.

(2) Pemberlakuan: Semua mode.

(3) Spesifikasi:

Reaktor tidak boleh dioperasikan dan semua operasi sistem yang dapat menyebabkan pelepasan radioaktivitas dini ke udara harus dihentikan:

(a) Jika perbedaan tekanan pengungkung atmosfer tidak dipertahankan pada harga batasnya 0,5 mbar (paling sedikit lebih kecil dari atmosfer).

(b) Jika laju kebocoran pengungkung tidak dipertahankan pada batas harga 2.000 m³/h.

(c) Jika pelepasan radiasi dini udara cerobong pengungkung melebihi 5×10^{-4} Ci/m³.

(4) Tindakan:

(a) Perbaiki kondisi.

(b) Perbaiki kondisi.

(c) Alihkan *switch* ke filter siaga.

(5) Dasar:

Pengungkung instalasi reaktor mempunyai tujuan untuk mempertahankan radiasi pada pencapaian level serendah mungkin pada kondisi semua kecelakaan yang diamati.

Batas dan elemen pengungkung adalah:

(a) struktur bangunan termasuk penetrasinya;

(b) katup isolasi gedung dan *flap*;

(c) pengunci udara;

(d) sistem *venting* tekanan rendah.

Harus dijamin bahwa:

- (a) tidak ada pelepasan radioaktif yang tidak terkendali;
- (b) pelepasan radioaktivitas dini udara ke lingkungan diminimalisasi dan tidak ada pelepasan radioaktivitas tak terkendali;
- (c) pelepasan radioaktivitas dini udara ke lingkungan diminimalisasi.

b) BO.4.2 *Damper* isolasi pengungkung

- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa *damper* isolasi pengungkung harus bekerja dengan baik selama operasi reaktor.
- (2) Pemberlakuan: Semua mode.
- (3) Spesifikasi: Reaktor tidak boleh dioperasikan dan semua operasi yang dapat menyebabkan pelepasan dini radioaktif harus dihentikan, jika *damper* isolasi pengungkung tidak beroperasi atau jika masing-masing kombinasi lebih kecil dari satu *damper* dalam keadaan tertutup. Hal ini berlaku untuk *damper* dengan simbol berikut ini: pada sisi *inlet* (KLA10 AA-01 dan KLA10 AA-02) dan sisi *outlet* (KLA20 AA-01, KLA20 AA-02, KLA20 AA-03, KLA20 AA-04)
- (3) Tindakan: Tutup *damper* secara manual. Perbaiki *damper* yang rusak.
- (4) Dasar: Kondisi ini harus dipenuhi untuk melingkupi atau mengungkung radioaktivitas selama operasi sistem tekanan rendah.

c) BO.4.3 Sistem tekanan rendah

- (1) Tujuan: Untuk menjamin tidak ada udara yang keluar ke lingkungan.
- (2) Pemberlakuan:
 - (a) Semua mode.
 - (b) Mode 1, 2.

- (3) Spesifikasi:
 - (a) Reaktor tidak boleh dioperasikan dan operasi sistem lain yang dapat menyebabkan pelepasan radioaktif harus dihentikan jika sistem tekanan rendah (diberi kode KLA40) dapat beroperasi pada kondisi kurang dari: 2 dari 3 x 100% pemanas, atau 1 dari 2 x 100% saringan, atau 2 dari 3 x 100% kipas.
 - (b) Reaktor tidak boleh dioperasikan jika semua redundan sistem tekanan rendah dalam kondisi tidak dapat dioperasikan.
 - (4) Tindakan:
 - Butir a dan b: Perbaiki unit yang rusak.
 - (5) Dasar: Kondisi ini harus dipenuhi untuk pengungkungan dini udara radioaktif.
- 5) BO.5 Sistem Ventilasi
- a) Tujuan: Untuk menjamin bahwa sistem ventilasi dapat beroperasi pada semua mode.
 - b) Pemberlakuan:
 - (1) 1/2/3: Semua mode.
 - (2) 4: Mode 1 dan 2.
 - c) Spesifikasi
 - (1) Reaktor tidak boleh dioperasikan jika:
 - (a) Sistem ventilasi di dalam ruang pengukuran kode KLE35, 2 dari 3 x 100% tidak beroperasi.
 - (b) Sistem ventilasi untuk Ruang Kendali Darurat kode KLD, 2 dari 3 x 100% tidak beroperasi.
 - (c) Sistem ventilasi untuk sistem *venting* kode KLA60 1 dari 2 x 100% *filter plants* atau 2 dari 3 x 100% kipas tidak beroperasi.

- (d) Suhu maksimum balai operasi, balai eksperimen, gedung bantu, dan *primary cell* di dalam pengungkung terlewati.
- (2) Reaktor tidak boleh di-*start-up* jika:
 - (a) Sistem ventilasi ruang pengukuran (KLE35) tidak semua sistem 3 x 100% beroperasi.
 - (b) Sistem ventilasi untuk Ruang Kendali Darurat (KLD) tidak semua sistem 3 x 100% beroperasi.
 - (c) Sistem ventilasi untuk sistem *venting* KLA60 tidak semua redundan beroperasi.
 - (d) Suhu maksimum yang diijinkan untuk balai operasi, balai eksperimen, gedung bantu dan *primary cell* dalam pengungkung terlewati.
- d) Tindakan:
 - (1) Padamkan dan perbaiki.
 - (2) Perbaiki.
- e) Dasar:

Untuk a.1/2/4, kondisi ini diperlukan untuk mempertahankan kondisi ruang sehingga sistem yang terkait dengan keselamatan yang dipasang di ruang-ruang akan mempertahankan kemampuan operasinya.

Untuk a.3; b.3, sistem ini diperlukan untuk meminimalisasi buangan radioaktif.

6) BO.6 Sistem Daya Listrik

Sistem daya listrik terpecah dalam distribusi daya AC dan DC.

a) BO.6.1 Distribusi daya AC

- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa akan ada catu daya selama kehilangan daya listrik.
- (2) Pemberlakuan: Semua mode.
- (3) Spesifikasi:

Reaktor tidak boleh dioperasikan kecuali kondisi berikut dipenuhi, yaitu catu daya cadangan untuk komponen yang terkait dengan keselamatan (tiga diesel-generator) siap beroperasi (*stand-by*). Bahan bakar untuk setiap diesel harus tersedia untuk 72 jam.

Pada mode 3 dan 4:

- (a) Satu catu daya cadangan dapat diambil untuk pemeliharaan.
- (b) Setiap catu daya cadangan yang tidak beroperasi harus dikembalikan dalam kondisi beroperasi secepat mungkin.

(4) Tindakan:

Mode 1:

Reaktor dipadamkan, jika selama kondisi operasi daya, kegagalan diesel dideteksi dan perbaikannya melebihi 10 jam setelah deteksi. Reaktor tidak boleh dihidupkan jika satu dari catu daya cadangan tidak pada posisi beroperasi.

Mode 2 dan 3:

Apabila lebih dari satu catu daya cadangan tidak beroperasi, hentikan *start-up* reaktor.

Mode 4:

Dengan lebih dari dua catu daya cadangan tidak beroperasi, hentikan semua operasi penanganan elemen bakar komponen di kolam, setelah menyelesaikan setiap tahap yang sedang berjalan.

(5) Dasar:

Untuk menjamin bahwa sumber daya AC yang cukup akan tersedia untuk memasok peralatan yang berkaitan dengan keselamatan, yaitu untuk 1) pemadaman reaktor secara selamat dan 2) pengendalian kondisi kecelakaan dalam fasilitas. Spesifikasi ini mengharapkan bahwa semua ketiga sistem catu daya cadangan siap operasi selama pengoperasian reaktor dengan

mode 2, 3, dan 4. Jika diperlukan perawatan dapat dilakukan untuk salah satu catu daya cadangan.

Catu daya yang siap operasi (*stand-by*) disediakan untuk jalur darurat sehingga walaupun terjadi kecelakaan kehilangan daya listrik yang menyebabkan aliran pendingin di primer dan sekunder menurun (*coastdown*), pemindahan panas peluruhan masih dapat dijamin oleh sistem pendingin kolam dan sistem keselamatan masih dapat bekerja oleh catu daya dari generator. Diesel generator akan dihidupkan secara otomatis oleh sistem proteksi reaktor saat terjadi kehilangan daya listrik, dan dihubungkan secara otomatis ke kanal darurat.

b) BO.6.2 Distribusi daya DC 24 Volt

(1) Tujuan: Untuk menjamin tersedianya daya 24 V jika terjadi kehilangan listrik.

(2) Pemberlakuan: Semua mode.

(3) Spesifikasi:

Reaktor tidak dapat dioperasikan kecuali kondisi berikut ini dipenuhi. Semua sistem catu daya 24 V DC yang berkaitan dengan keselamatan (baterai, rectifier, jalur BW) harus dalam keadaan beroperasi.

Pada mode 3 dan 4:

(a) Satu sistem daya 24 VDC dapat ditarik dari operasinya untuk pemeliharaan atau pengujian.

(b) Setiap sistem 24 VDC yang tidak beroperasi harus diperbaiki agar dapat beroperasi kembali.

(4) Tindakan:

Mode 1 dan 2:

Jika satu dari sumber daya redundan yang memasok sistem berkaitan dengan keselamatan tidak beroperasi dan kegagalannya tidak dapat diperbaiki dalam 10 jam maka pemadaman reaktor segera dilakukan. Jika dua sumber daya yang memasok beban untuk sistem yang terkait dengan keselamatan tidak ber-

operasi, reaktor dipadamkan. Reaktor tidak boleh dihidupkan jika terjadi penyimpangan redundan catu daya.

Mode 3:

Jika tiga sumber yang memasok beban yang berkaitan dengan keselamatan tidak beroperasi, kembalikan sistem yang terpasang, atau sediakan pasokan alternatif secepat mungkin sehingga paling sedikit satu sumber daya untuk tiap beban yang berkaitan dengan keselamatan beroperasi.

Mode 4:

Jika dua dari sumber daya yang redundan yang memasok beban sistem yang berkaitan dengan keselamatan tidak beroperasi, hentikan semua operasi pengungkungan dan penanganan elemen bakar dalam kolam. Penghentian dilakukan setelah menyelesaikan tahapan yang sedang berjalan tersebut secara lengkap.

(5) Dasar:

Distribusi daya 24 V DC menjamin kapasitas operasi catu daya tak putus untuk sistem keselamatan. Ketiga catu daya 24 V DC terdiri dari tiga jalur yang independen untuk menjamin bahwa jika terjadi suatu kesalahan, atau satu kegagalan, atau perawatan, atau kesalahan pengujian, tidak akan menyebabkan panel-panel yang terkait dengan keselamatan tidak memiliki catu daya.

7) BO.7 Penanganan Pemuatan dan Pemuatan Kembali Elemen Bakar (*loading unloading*)

a) BO.7.1 Penanganan dalam kolam

(1) Tujuan: Menjamin bahwa selama aktivitas pemuatan elemen bakar, semua penyerap berada dalam posisi di bawah.

(2) Pemberlakuan: Semua Mode.

(3) Spesifikasi: Dalam penanganan elemen teras di kolam seperti elemen bakar, unit kendali, elemen reflektor, bagian reflektor

blok, penyisipan eksperimen, dan *plug* berilium dan aluminium dapat dimulai 48 jam setelah reaktor dipadamkan dan hanya ketika semua bahan penyerap dimasukkan ke dalam teras pada posisi “di bawah”.

- (4) Tindakan: Konfirmasi perlu dilakukan oleh personel jaga dari RKU bahwa semua penyerap ada di bawah. Setiap langkah pemuatan, pengeluaran, dan pemuatan kembali elemen teras harus dicatat pada protokol pemuatan untuk identifikasi alasan dan verifikasi sirkulasi elemen bakar.
 - (5) Dasar: Semua penanganan di dalam kolam dikendalikan oleh Subkoordinator Keselamatan Operasi dalam bentuk tertulis dan harus dilakukan berdasarkan hasil perhitungan manajemen teras yang memperhatikan aspek fisika reaktor seperti keseimbangan reaktivitas teras dan penanganan elemen teras.
- (1) BO.7.1.1 Rak penyimpanan elemen bakar teriradiasi di kolam penyimpanan
 - (a) Tujuan: Untuk menjamin bahwa tersedia tempat untuk penyimpanan elemen bakar jika teras harus dikosongkan.
 - (b) Pemberlakuan: Semua mode.
 - (c) Spesifikasi: Hanya 252 dari 300 posisi penyimpanan yang dapat diisi dengan elemen bakar dan elemen kendali yang sudah dipakai di teras.
 - (d) Tindakan: Tidak ada.
 - (e) Dasar: Sisa 48 posisi disediakan untuk pemindahan satu teras penuh elemen bakar dan elemen kendali, sedangkan elemen lainnya termasuk elemen reflektor dan elemen *dummy* dari *grid* teras disimpan di rak yang pendek tanpa pelat kadmium, tersedia 52 posisi di kolam penyimpanan.

- (2) BO.7.1.2 Peluruhan daya elemen bakar dan elemen kendali
- (a) Tujuan: Untuk menjamin bahwa radioaktivitas semua elemen bakar dan elemen kendali harus diluruhkan sebelum dipindahkan ke rak penyimpanan elemen bakar teriradiasi.
 - (b) Pemberlakuan: Mode 4.
 - (c) Spesifikasi: Elemen bakar dan elemen kendali tidak dapat ditangani jika pompa primer dalam kondisi operasi. Baru setelah pompa padam, penanganan, pemindahan elemen teras, dan penyimpanan sementara diizinkan. Dalam kasus pemindahan semua elemen teras ke kolam penyimpanan, boleh dilakukan setelah 30 hari dari saat pemadaman reaktor.
 - (d) Tindakan: Tidak ada.
 - (e) Dasar: Sistem pendingin kolam penyimpanan dengan dua rak penyimpan dengan 300 posisi dirancang sesuai dengan prosedur ini dengan memperhatikan daya peluruhan.
- (3) BO.7.1.3 Identifikasi elemen bakar dan elemen kendali
- (a) Tujuan: Untuk menjamin bahwa semua elemen bakar dan elemen kendali telah secara benar diperiksa sebelum dimuat ke dalam teras reaktor.
 - (b) Pemberlakuan: Mode 4.
 - (c) Spesifikasi: Penanganan elemen teras dihentikan jika identifikasi tiap elemen yang dipindahkan ke dalam atau ke luar dari teras ditemukan tidak sesuai dengan rencana pemuatan.
 - (d) Tindakan: Jika ketidaksesuaian posisi terjadi dan terdeteksi saat verifikasi, kesalahan harus dikoreksi dan kemudian verifikasi kedua juga harus dilakukan.
 - (e) Dasar: Untuk mendapatkan reaktivitas yang telah ditentukan terlebih dahulu dan diperoleh distribusi kerapatan daya yang dapat diterima, persyaratan ini harus dipenuhi.

- (4) BO.7.1.4 Prosedur keselamatan kekritisan selama pembentukan teras
- (a) Tujuan: Untuk menjamin bahwa tidak terjadi kekritisan selama pembentukan teras.
 - (b) Pemberlakuan: Mode 4.
 - (c) Spesifikasi: Penanganan elemen teras di kolam dihentikan jika kondisi berikut ini tidak dipenuhi untuk mempertahankan kondisi subkritis.
 - i) Pengamanan dengan melaksanakan peraturan/prosedur untuk menangani:
 - unit elemen kendali/penyerap;
 - elemen bakar yang teriradiasi;
 - elemen bakar segar;
 - elemen reflektor;
 - komponen blok reflektor; dan
 - penyisipan eksperimen.
 - ii) Pengamanan dilakukan melalui perencanaan yang baik terhadap penggantian konfigurasi teras dan langkah pelaksanaannya dengan memperhatikan:
 - status konfigurasi teras sebelumnya; dan
 - pemuatan elemen bakar untuk pembentukan teras kerja baru
 - iii) Pengamanan dengan melakukan pengukuran dan pemantauan selama pembentukan teras.
 - iv) Pengamanan secara administratif.
 - (d) Tindakan: Jika kondisi a sampai d tidak dipenuhi, hentikan penanganan elemen teras dan kembalikan kondisi sebelumnya.
 - (e) Dasar: Kondisi a–d ini adalah dasar dalam menjaga subkritisitas selama pemindahan elemen teras di teras.
- b) BO.7.2 *Crane* di balai operasi
- (1) Tujuan: Untuk menjamin bahwa pengoperasian *crane* tidak membahayakan teras reaktor.

- (2) Pemberlakuan: Semua mode.
- (3) Spesifikasi: Penanganan menggunakan *crane* di kolam reaktor harus menggunakan pengait utama dan sistem saling kunci (*interlock*) berfungsi baik.
- (4) Tindakan: Apabila sistem *interlock* tidak berfungsi, penanganan dihentikan.
- (5) Dasar:
Tidak terjadi pelepasan zat radioaktif yang disebabkan oleh kegagalan *crane*.
 - (a) Secara umum penggeseran beban oleh *crane* di atas teras tidak diperbolehkan untuk menghindari kerusakan teras dan pendukung batang kendali kecuali untuk *refueling*, pemasangan/pembongkaran fasilitas iradiasi/eksperimen.
 - (b) Hanya pengait utama *crane* dapat dioperasikan dalam kecepatan rendah di atas kolam reaktor.

Alasannya ialah:

- (a) Berat sistem penanganan target termasuk *thimble* dan target jauh lebih ringan dari kapasitas *crane* (80–13.000 kg).
- (b) *Interlocking* dari *crane* hanya dapat diinterupsi oleh supervisor.
- (c) Pengait utama diusahakan di atas *cantilever*.
- (d) Selama operasi *crane*, harus ditunggu oleh paling sedikit dua orang, yaitu supervisor dan operator *crane*.

8) BO.8 Gempa

- a) Tujuan: Untuk menjamin agar selama terjadi gempa bumi, reaktor tetap aman dan dapat dikendalikan dari Ruang Kendali Darurat (RKD).
- b) Pemberlakuan: Semua mode.
- c) Spesifikasi:

Jika gempa terjadi, harus diputuskan:

- (1) apakah reaktor dapat dikendalikan dari RKU atau dikendalikan dari RKD;
- (2) apakah *safe shut-down earthquake* (SSE) terjadi; dalam kasus ini reaktor dipadamkan dan kemungkinan kerusakan instalasi harus diestimasi.

d) Tindakan:

- (1) Evaluasi terhadap instrumentasi RKU dan RKD harus dilakukan.
- (2) SSE dapat terjadi jika paling sedikit satu dari empat perekam seismik yang merekam adanya akselerasi maksimum pada arah yang berbeda mempunyai nilai lebih besar dari 0,063 g.

e) Dasar:

- (1) Instrumentasi RKU tidak diverifikasi untuk menahan kejadian seismik.
- (2) 1,7 mendekati $0,7 \times 2,5$ g merupakan batas bawah yang mungkin untuk akselerasi intensitas gempa lebih besar dari skala VIII.

9) BO.9 Eksperimen

a) Tujuan: Untuk menjamin bahwa semua percobaan dilakukan dengan selamat.

b) Pemberlakuan:

Spesifikasi a–d dan f–h: Mode 1 dan 2.

Spesifikasi e: Mode 3 dan 4.

Spesifikasi i: Berlaku untuk semua mode.

c) Spesifikasi:

- (1) Selama operasi reaktor, segala bentuk penanganan di atas teras tidak diperbolehkan kecuali kegiatan pemuatan/pembongkaran target.

- (2) Sebelum memulai eksperimen, harus dibuktikan bahwa setiap *item* yang berkaitan dengan eksperimen tersebut telah diletakkan pada posisi seharusnya.
- (3) Setelah eksperimen selesai harus dilakukan pemeriksaan untuk menjamin bahwa tidak ada bagian dari percobaan yang jatuh ke kolam dan tertinggal di sana.
- (4) Selama operasi, dilarang menangani *foil* plastik di dekat kolam reaktor.
- (5) Penanganan *foil* plastik di sekitar kolam hanya diizinkan jika reaktor padam dan *foil*-nya berwarna, yang dapat nyata terlihat di dalam air.
- (6) Tidak ada eksperimen atau sampel bergerak mempunyai nilai reaktivitas lebih dari $-0,5\%$.
- (7) Harga reaktivitas semua eksperimen harus memperhatikan keseimbangan reaktivitas teras, khususnya margin reaktivitas padam dan reaktivitas lebih.
- (8) Laju alir total untuk mendinginkan sampel iradiasi yang dimasukkan dalam teras dan reflektor tidak boleh melebihi harga desain.
- (9) Tidak boleh ada material yang dapat meledak di dalam fasilitas eksperimen.

d) Tindakan:

- (1) Hentikan penanganan di atas teras.
- (2) Periksa ulang posisi eksperimen.
- (3) Barang yang jatuh diambil.
- (4) Diperintahkan untuk menangani *foil* plastik jauh dari kolam reaktor.
- (5) Plastik *foil* yang tidak berwarna (bening) tidak boleh masuk balai operasi.
- (6) Jika nilai reaktivitas lebih besar dari $-0,5\%$, eksperimen harus didesain ulang.

- (7) Jika kondisi ini tidak dipenuhi, teras, atau eksperimen harus diatur ulang.
 - (8) Reaktor harus dipadamkan. Jumlah target iradiasi dikurangi atau resistansi hidroliknya diperbesar.
 - (9) Bahan mudah meledak tidak diizinkan masuk ke fasilitas eksperimen apapun.
- e) Dasar:
- Spesifikasi a–e: Kondisi yang dijelaskan harus dipenuhi untuk menghindari perubahan arah pendingin dan mempertahankan pendingin reaktor.
- Spesifikasi f: Perubahan reaktivitas yang terjadi akibat keluar atau masuknya sampel atau peralatan percobaan, saat reaktor beroperasi, dibatasi oleh kondisi ini.
- Spesifikasi g: Semua eksperimen yang dilakukan tidak boleh memengaruhi kemampuan pemadaman reaktor dengan selamat.
- Spesifikasi h: Jika harga desain dilampaui, ketidakcukupan aliran pendingin akan terjadi untuk pendinginan pelat elemen bakar.
- Spesifikasi i: Persyaratan bahan harus dipenuhi untuk menjaga integritas teras.

d. Persyaratan Pengawasan (PP)

Persyaratan pengawasan dibuat untuk menjamin bahwa persyaratan yang disebutkan pada BKO dapat dipenuhi. Bentuk pengawasan terdiri dari inspeksi, pemeriksaan kemampuan operasi (uji fungsi), dan kalibrasi. Persyaratan pengawasan merinci frekuensi dan lingkup pengujian untuk menunjukkan terpenuhinya persyaratan kinerja yang berhubungan dengan parameter yang telah ditetapkan sesuai dengan BKO. Pelaksanaan pengetesan yang memengaruhi kondisi operasi reaktor harus dilakukan setelah selesainya operasi satu siklus bulanan. Penyimpangan minor terhadap periode uji yang berdampak terhadap siklus reaktor dapat ditoleransi. Sebelum melakukan pengetesan

khusus, seluruh kondisi instalasi harus diperhatikan. Persyaratan pengawasan dikenakan pada sistem reaktor yang dikelompokkan dalam sistem reaktor, sistem pendingin, sistem instrumentasi, sistem pendukung, sistem ventilasi, sistem listrik, penanganan pemuatan dan pemuatan kembali elemen bakar, pencatat gempa dan eksperimen.

3. Lapis Pertahanan Ketiga

Lapis pertahanan ketiga mempunyai tujuan pengendalian kecelakaan dasar desain dengan alat utama sistem keselamatan teknis dan prosedur kecelakaan. Sebagai penerapan prinsip keselamatan lapis pertahanan ketiga, reaktor RSG-GAS dilengkapi dengan sistem keselamatan teknis reaktor, termasuk di dalamnya sistem proteksi reaktor, untuk dapat mengendalikan semua jenis kecelakaan dasar desain (DBA). Penjelasan akan disajikan dalam dua bagian, yaitu sistem proteksi reaktor dan sistem keselamatan teknis reaktor.

a. Sistem Proteksi Reaktor

Sistem proteksi reaktor berfungsi untuk memantau dan memproses parameter keselamatan dan secara otomatis akan melakukan tindakan proteksi untuk menjaga keselamatan reaktor, dengan memicu berfungsinya sistem keselamatan teknis reaktor. Tindakan sistem proteksi reaktor RSG-GAS adalah:

- 1) memadamkan reaktor secara pancung (*scram*);
- 2) isolasi gedung reaktor;
- 3) isolasi sistem pendingin primer;
- 4) menghidupkan diesel; dan
- 5) isolasi sistem bantu primer.

Sistem proteksi reaktor (SPR) berbasis pada sistem redundansi 3 dan ditempatkan di dalam gedung reaktor pada ketinggian 23 m, Ruang 0930, 0931, dan 0932. Fungsi SPR yang sama diberlakukan ke dalam suatu sistem logika bersama atau dalam redundansi 2, bergantung pada hubungan logika atau rancangan dari sistem reaktor yang bersangkutan. Tindakan pengamanan dilakukan oleh sistem redundan

2 dari 3 atau 1 dari 2. Redundan 1 dipasang di dalam kabinet CLE01 di Ruang 0930, redundan 2 dipasang di dalam kabinet CLF01 di Ruang 0931, dan redundan 3 dipasang di dalam kabinet CLG01 di Ruang 0932. SPR dipasok oleh 3 sistem daya tak terputus, bertegangan ± 24 volt dari lemari distribusi BWE, BWF, dan BWG. Setiap redundansi dari SPR dipasok oleh 2 dari 3 lemari distribusi. Parameter dan tindak penanggulangan sistem proteksi terhadap jenis kecelakaan operasi reaktor disajikan dalam Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Parameter untuk Tindakan Proteksi Otomatis dari Sistem Proteksi Reaktor RSG-GAS

Parameter	Harga Batas	Gerbang Logik	Jenis Kecelakaan														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
Cacah fluks kanal jangkau <i>start-up</i>	Min. 2 cps	1V2															
Cacah fluks kanal jangkau <i>start-up</i>	Maks 1 x 10^5 cps	1V2															
Arus fluks kanal jangkau menengah	1×10^{-7} A	1V2															
Periode kanal jangkau menengah	≤ 5 s	1v2	X														
Fluks kanal jangkau menengah (F)	$> 5\%$	1V2	X														
Daya kanal jangkau daya	$< 3\%$ daya nominal	2V3															
Perubahan fluks kanal jangkau daya - Df/Dt	≤ 0	2V3				X											
Kerataan fluks kanal jangka daya ($S_{a,}$)	$\geq 0,2$	2V3															
Perubahan daya N_{16} + Df/Dt	≤ 0	2V3		X	X												
Daya kanal N_{16} (F)	$\geq 108\%$	2V3		X	X												
Laju dosis-g SPP (Dg)	$\geq 0,36$ rad/h	2V3				X											
Laju alir SPP (M)	$\leq 85\%$	2V3					X					X					

Parameter	Harga Batas	Gerbang Logik	Jenis Kecelakaan												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Suhu keluaran HE (T)	≥ 42 °C	2V3								X					
Level air kolam reaktor (h)	$\leq 12,25$ m	2V3									X	X	X		
Tegangan diesel generator (U)	$\leq 0,8$	3 x 2V3								X					
Beda tekan katup sirkulasi alam (Dp)	$\geq 0,60$ bar	2V3							X						
Dosis-g sistem ventilasi kolam (Dg)	≥ 125 mR/h	2V3													X
			Tindak penanggulangan												
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
						4			3	3	3	2			
									5	5	5				

Ket.:

Jenis kecelakaan operasi reaktor RSG-GAS:

1. Kecelakaan reaktivitas pada saat *start-up*
2. Kecelakaan reaktivitas pada daerah daya
3. Tabung berkas neutron banjir
4. Kanal pendingin bahan bakar tertutup
5. Pompa primer gagal beroperasi
6. Penutupan katup isolasi primer
7. Kegagalan operasi pompa sekunder
8. Kegagalan penyedia daya listrik
9. LOCA, kecelakaan kehilangan pendingin
10. Kebocoran penukar panas
11. Pelepasan radiasi dari subsistem

Tindak penanggulangan oleh SPR:

1. *Scram*, pemadaman reaktor secara cepat dengan memutus arus listrik ke sistem penggerak batang kendali sehingga batang kendali bergerak jatuh bebas dalam waktu 400 milisekon.
2. Isolasi gedung reaktor.
3. Isolasi sistem pendingin primer.
4. Diesel beroperasi.
5. Isolasi sistem bantu primer.

Sumber: PRSG (2011)

b. Sistem Keselamatan Teknis

Tujuan utama dari sistem keselamatan teknis (SKT) adalah meniadakan atau meminimalisasi serendah mungkin tingkat radiasi nuklir yang keluar ke lingkungan apabila terjadi kecelakaan reaktor. Sistem keselamatan teknis reaktor RSG-GAS dipilah menjadi empat sistem, yaitu

- 1) sistem yang berhubungan dengan pembuangan panas;
- 2) sistem yang berhubungan dengan penjagaan integritas kolam reaktor;
- 3) sistem yang berhubungan dengan penjagaan fungsi pengungkung; dan
- 4) sistem yang berhubungan dengan penjagaan reaktor *shut-down*, pengendalian, dan penyediaan daya listrik darurat.

Sistem keselamatan yang berhubungan dengan pembuangan panas terdiri dari sistem pendinginan kolam, roda gila pada pompa pendingin primer, pengaturan katup sistem pendingin primer, dan katup sirkulasi alam. Deskripsi dari fitur keselamatan masing-masing adalah sebagai berikut.

1) Sistem pendinginan kolam

Dalam keadaan normal, apabila sistem pembuangan panas gagal, panas yang dibangkitkan oleh pemanasan gamma di kolam dan reflektor setelah reaktor padam dibuang ke lingkungan oleh tiga buah sistem pendinginan kolam dengan simbol JNA10, JNA20, dan JNA30. Sistem terdiri dari tiga redundan rangkaian pendingin, masing-masing mempunyai kapasitas 100%. Masing-masing komponen rangkaian dirancang tahan gempa. Penukar panas di dalam kolam reaktor terbuat dari $AlMg_3$, sedangkan komponen lainnya termasuk pipa, terbuat dari *stainless steel* (SS).

Susunan pemipaan dan penyangganya dirancang apabila ada satu pipa pecah di dalam susunan pemipaan, sistem yang lain tidak terpengaruh. Peralatan dipasang di atas gedung reaktor di mana jaraknya diatur sehingga jika ada salah satu komponen yang rusak atau gagal, hal ini tidak mengganggu integritas sistem yang lain. Sistem

dioperasikan dan diamati dari Ruang Kendali Utama dan Ruang Kendali Darurat dan semua komponen dari sistem membutuhkan pemeliharaan yang sederhana. Berkebalikan dengan fitur keselamatan teknis yang lain, tiga redundan dari sistem pendingin kolam ini dikendalikan hanya secara manual dari RKU dan RKD.

2) Roda gila (*fly-wheel*) pompa primer

Jika motor pompa primer gagal, aliran sistem primer secara konveksi alam harus mampu untuk memindahkan panas peluruhan. Saat motor pompa primer gagal, pendinginan teras masih dijamin oleh roda gila yang dipasang dan disambung langsung dengan poros pompa primer. Roda gila merupakan sistem keselamatan teknis dan inertianya yang dirancang sedemikian rupa sehingga laju aliran di dalam teras tidak lebih kecil dari 15% dari nilai nominalnya, sampai waktu 40 sekon setelah *scram*.

3) Pengaturan penutupan katup pada sistem pendingin primer

Setelah reaktor *scram*, aliran sistem primer harus tetap ada selama tingkat panas masih terlalu tinggi untuk dibebaskan melalui konveksi alam. Oleh karena itu, waktu penutupan katup isolasi primer diatur sebesar 96 sekon. Nilai ini jauh lebih tinggi dari waktu penutupan minimum yang diperbolehkan sebesar 70 sekon. Kemungkinan katup berubah sendiri dari posisinya dapat dicegah oleh besarnya perbandingan putaran motor penggerak dengan putaran as katup yang diatur oleh roda gigi. Katup-katup lain dalam rangkaian pendingin primer diputuskan dari catu dayanya selama sistem pendingin primer beroperasi.

4) Katup sirkulasi alam

Katup sirkulasi alam menjamin aliran pendinginan melalui teras yang dibutuhkan setelah reaktor padam dan jika panas peluruhan tidak dapat dibebaskan oleh pendingin utama. Fungsi dari dua katup sirkulasi alam didasarkan pada efek penghisap pompa pendingin primer. Fitur keselamatan teknis menjamin bahwa katup sirkulasi alam di bagian bawah teras terbuka secara otomatis oleh pengaruh gravitasi ketika laju aliran sistem pendingin primer turun di bawah 15% dari laju

nominal. Hasil percobaan menunjukkan bahwa katup sirkulasi alam terbuka 114 detik setelah *scram*. Kemudian aliran pendingin melalui teras membalik arahnya (ke atas) dan pembuangan panas peluruhan dari teras ke air kolam terjadi melalui konveksi alam. Katup sirkulasi alam terbuat dari $AlMg_3$ dan dirancang tahan gempa.

Sistem keselamatan teknis yang berhubungan dengan penjaminan integritas kolam reaktor meliputi sistem katup isolasi primer, lapisan kedua dari tabung berkas neutron, dan *crane* gedung reaktor.

1) Katup isolasi primer

Untuk menghindari hilangnya air pendingin reaktor akibat pecahnya pipa utama di luar ruang katup, dipasang katup isolasi ganda. Kedua saluran utama yang menembus ruang katup masing-masing dilengkapi dengan dua katup isolasi yang redundan. Catu daya motor diambil dari *uninterruptible power supply* (UPS). Katup pipa SS dari kolam sampai ruang katup dan di antara dua katup, dinding luar dari kamar katup dan perlengkapan listriknya dirancang tahan gempa. Penutupan katup terjadi secara otomatis oleh sistem proteksi reaktor jika level air turun di bawah nilai minimum yang ditentukan. Posisi katup ditunjukkan di Ruang Kendali Utama dan di Ruang Kendali Darurat. Untuk tujuan ini sensor kendali level air kolam reaktor dihubungkan dengan motor katup. Katup mempunyai kemampuan menahan tekanan sampai 20 bar. Nilai ini jauh lebih tinggi dari tekanan kolam. Pemeliharaan katup sangat sederhana dan dapat diuji selama reaktor padam.

2) Lapisan kedua dari tabung berkas neutron (*beam tube*)

Enam tabung berkas neutron masing-masing dilengkapi dengan lapisan kedua untuk menghindari bocornya air kolam reaktor jika tabung berkas bocor atau pecah. Lapisan kedua biasanya disebut *thimble*. *Thimble* dan tabung berkas dianggap satu unit. *Thimble* terbuat dari $AlMg_3$ dibautkan ke bagian luar flange tabung berkas dan ujungnya masuk dalam beton perisai sejauh 130 mm sebelum kolam sehingga bengkoknya tabung berkas tidak memengaruhi *thimble*. Flange, pembautan, dan tebal *thimble* dirancang tahan terhadap pukulan air akibat kebocoran tabung berkas yang tiba-tiba dan gempa

bumi. Karena thimble adalah komponen yang pasif, tidak ada bagian yang membutuhkan pemeliharaan. Kebocoran dapat dideteksi dengan mengisolasi dan mengosongkan tabung berkas secara tersendiri. Kemungkinan kebocoran dapat diamati lewat kaca pengamat pada sistem pengisian/pengosongan tabung berkas.

3) *Crane* gedung reaktor

Crane yang ada di gedung reaktor dirancang sedemikian rupa sehingga kerusakan integritas kolam dan bangunan, yang mungkin terjadi akibat adanya beban yang jatuh atau benturan, dapat dicegah. Fitur kelamatan teknis *crane* mencakup hal-hal sebagai berikut.

- a) Hanya bagian *hoist* utama yang dapat dioperasikan di dalam area kolam, pengoperasian dari *hoist* bantu dikunci secara elektrik.
- b) *Hoist* utama dirancang mampu mengangkat beban maksimum sampai 220 kN, tetapi setelah kegiatan pembangunan selesai *hoist* hanya dapat mengangkat sampai 130 kN. Hal ini dapat diatur dengan *switch*.
- c) Motor penggerak *hoist* dilengkapi dengan normal *services brake* dan *brake* kedua yang ada pada poros motor. Sebagai tambahan, *brake safety* dipasang yang dapat bereaksi langsung atau independen pada kabel *drum*.
- d) *Hoist* utama dilengkapi dengan dua kabel redundan, masing-masing mampu menahan beban total *crane*.
- e) Dua *limit switch*, di mana gerakan yang satu akan membatasi gerakan *crane* yang lain.
- f) Penyangga *frame work*, *trolley*, dan rel *crane* dirancang tahan gempa. *Crane* dan *trolley* disambungkan ke relnya oleh peralatan *dripping*.
- g) *Crane* hanya dapat bergerak satu arah gerakan.
- h) Dilengkapi dengan sinyal akustik dan optik untuk menunjukkan kalau ada kegagalan di *crane*.

Adapun sistem keselamatan yang berhubungan dengan penjagaan fungsi pengungkung meliputi pengungkung keselamatan dan sistem penyedia tekanan rendah.

1) Pengungkung keselamatan

Pengungkung keselamatan dari reaktor bertujuan untuk menjaga radionuklida yang keluar ke lingkungan serendah mungkin dalam kondisi kecelakaan yang diantisipasi. Batas dan elemen pengungkung keselamatan mencakup:

- a) struktur gedung termasuk penetrasi-penetrasinya;
- b) katup dan katup isolasi gedung;
- c) pintu-pintu udara; dan
- d) sistem penyedia tekanan rendah.

Fitur keselamatan teknis yang berhubungan dengan rancangan pengungkung, antara lain:

- a) syarat-syarat rancangan untuk mengatur tata letak komponen yang berisi bahan radioaktif di dalam pengungkung;
- b) sistem penyedia tekanan rendah untuk menjaga tersedianya tekanan negatif gedung reaktor apabila terjadi kondisi kecelakaan;
- c) operasi resirkulasi dan pembersihan udara lewat filter udara jika terjadi kecelakaan;
- d) isolasi ganda pengungkung gas yang berhubungan dengan sistem tekanan rendah untuk menjaga kontaminasi silang antara daerah radiasi sedang yang terdiri dari enam daerah ventilasi, yaitu balai operasi, balai eksperimen, ruang bantu, *primary cell*, *hot cell*, dan lingkungan;
- e) fondasi gedung reaktor yang kedap untuk menjamin bahwa tidak ada radionuklida di dalam air yang secara kebetulan dibebaskan di dalam gedung reaktor dapat bocor ke dalam tanah;

- f) struktur bangunan dari pengungkung keselamatan dan semua komponen yang perlu untuk mempertahankan tekanan negatif di dalam gedung, seperti:
 - (1) katup isolasi gedung;
 - (2) penetrasi gedung;
 - (3) pintu-pintu udara staf/personel;
 - (4) pintu-pintu udara material;
 - (5) sistem penyedia tekanan rendah; dan
- g) kedap dan dirancang tahan gempa.

2) Sistem penyedia tekanan rendah

Tujuan dari sistem penyedia tekanan rendah adalah untuk menjaga agar tekanan negatif di dalam gedung selalu lebih rendah dari tekanan atmosfer sehingga udara yang keluar gedung dipastikan hanya melalui cerobong (*stack*) yang sebelumnya sudah melewati filter tertentu. Fitur keselamatan teknis yang tergabung di dalam desain yang menjamin bahwa sistem tersebut melaksanakan fungsinya adalah:

- a) filter dipasang redundansi (2 x 100%);
- b) ventilator dibuat redundansi (3 x 100%);
- c) catu daya diambil dari sistem catu daya darurat; dan
- d) dirancang tahan gempa.

Sistem keselamatan yang berhubungan dengan penjagaan reaktor *shut-down*, pemantauan, pengendalian dan penyedia listrik darurat, terdiri dari sistem batang kendali, sistem proteksi reaktor, instrumentasi proteksi radiasi, ruang kendali darurat, sistem resirkulasi udara Ruang Proteksi Reaktor, dan catu daya darurat AC dan DC.

1) Sistem batang kendali

Sistem batang kendali terdiri dari delapan batang kendali yang dirancang untuk operasi reaktor dalam kondisi operasi maupun padam. Sistem proteksi reaktor akan memicu delapan batang kendali jatuh bebas (*scram*) apabila ada parameter operasi yang melampaui harga

batas *scram* untuk menjamin keselamatan reaktor. Komponen utama dari batang kendali adalah mekanisme penggerak batang kendali, batang kendali, dan perangkat penyerap jenis garpu yang tersusun dari dua bilah AgInCd dengan kelongsong *stainless steel* (SS). Fitur keselamatan teknis yang masuk dalam desain, antara lain:

- a) batang kendali masuk ke dalam teras secara jatuh bebas;
- b) menjamin kondisi subkritis reaktor meskipun 1 batang kendali macet atau hanya 7 dari 8 batang kendali yang berhasil masuk ke dalam teras; dan
- c) bilah absorber tidak mungkin keluar dari elemen kendali.

Setiap terjadi putusnya atau patahnya struktur batang kendali menyebabkan batang kendali masuk ke dalam teras. Batang kendali juga tidak mungkin masuk melampaui teras karena tidak ada celah untuk hal ini. Keluarnya batang kendali ke atas tidak mungkin terjadi karena adanya aliran ke bawah selama operasi normal dan selama konveksi alam gaya berarah ke atas jauh lebih kecil dari pada berat absorber.

2) Sistem proteksi reaktor (SPR)

Fungsi dari sistem proteksi reaktor ialah untuk memantau dan memproses variabel-variabel yang perlu untuk keselamatan reaktor dan lingkungan. Sistem ini mematikan reaktor dan menghidupkan sistem-sistem keselamatan yang lain. Fitur keselamatan teknis yang termasuk dalam sistem proteksi reaktor adalah:

- a) pemrosesan sinyal analog yang redundan;
- b) sistem redundan terpisah satu dengan yang lain untuk menghindari apabila salah satu sistem gagal akan memengaruhi yang lain;
- c) pemisahan oleh batas-batas fisik;
- d) banyak bagian yang dapat diuji sendiri dan dimungkinkan dilaksanakannya pengujian saat beroperasi;
- e) logika penentuan dua dari tiga;
- f) perbandingan sinyal analog yang kontinu;

- g) sifat gagal-selamat dari bagian logik menggunakan sistem pulsa dinamis;
- h) tersedia sumber daya ganda untuk kabinet elektronik; dan
- i) dirancang tahan gempa.

3) Instrumentasi proteksi radiasi

Pemantauan proteksi radiasi melindungi personel reaktor dan masyarakat umum dari tingkat paparan radiasi yang tidak diizinkan dengan memulai pengaktifan alarm atau langkah-langkah protektif. Fitur keselamatan teknis yang termasuk di dalam instrumentasi proteksi radiasi adalah:

- a) instrumen-instrumen dengan rentang pengukuran yang berlapis pada alat pemantau di cerobong (*stack*). Tujuannya adalah apabila ada satu alat yang gagal maka alat yang lain dapat menggantikan fungsi alat yang rusak;
- b) instrumen-instrumen di dalam ruangan yang sama dipasang sejauh mungkin;
- c) alat pengukuran gas mulia dan laju dosis di cerobong dirancang tahan gempa;
- d) dapat diuji dengan menggunakan sumber pada kondisi beroperasi;
- e) kabinet elektronik dilengkapi dengan catu daya ganda;
- f) semua peralatan pengukur dilengkapi dengan alat pemantau kegagalan dengan menggunakan sumber uji atau efek nol;
- g) pengkabelan di dalam pipa tembaga khusus untuk menghindari gangguan dari sumber listrik luar; dan
- h) penunjukan dan alarm terdapat di lokal, di dalam Ruang Kendali Utama, dan Ruang Kendali Darurat.

4) Ruang Kendali Darurat

Ruang Kendali Darurat (RKD) merupakan tempat pemantauan dan pengendalian jika Ruang Kendali Utama (RKU) mengalami kegagalan karena adanya kecelakaan. Semua fungsi-fungsi yang berhubungan

dengan keselamatan dapat dijalankan dan dipantau di ruangan ini. Kabel dari atau ke sistem-sistem yang redundan tetap terpisah oleh pembatas fisik sampai ke RKD. Di RKD, kabel-kabel itu tetap terpisah. Sinyal yang berhubungan dengan keselamatan diproses secara terpisah. Semua perangkat keras dirancang tahan gempa.

5) Sistem resirkulasi udara ruang proteksi reaktor

Untuk operasi sistem proteksi reaktor, di dalam masing-masing ruangan tersebut dilakukan oleh sistem udara resirkulasi dan sistem air pendingin. Kedua sistem dirancang tahan gempa dan dihubungkan dengan sistem penyedia daya darurat. Fitur keselamatan teknis ini, yang tergabung di dalam rancangan, menjamin bahwa sistem tersebut akan melakukan fungsinya.

6) Catu daya darurat

a) Catu daya AC

Penyedia daya untuk sistem yang berhubungan dengan keselamatan ketika daya normal mengalami gangguan dilakukan oleh sebuah sistem penyedia daya darurat AC. Sistem penyedia daya darurat ini dibagi dalam tiga rangkaian redundansi dan berdiri sendiri, masing-masing dipasok oleh satu diesel-generator dan peralatan bantuannya, seperti sistem *start-up* dan sistem penyedia bahan bakar dengan kemampuan 100%. Masing-masing rangkaian, dari pemasok bahan bakar sampai ke panel distribusi, dipisahkan satu sama lain dengan batas fisik dan dirancang tahan gempa. Masing-masing diesel-generator dapat diuji dengan membebaninya dengan resistor uji. Pengujian ini dapat dilakukan selama reaktor beroperasi karena apabila selama pengujian, catu daya normal gagal maka generator secara otomatis akan berfungsi sebagai catu daya darurat.

b) Catu daya DC

Sistem catu daya DC disediakan untuk memasok sistem-sistem yang berhubungan dengan keselamatan yang membutuhkan daya yang tidak terputus selama kehilangan daya normal sampai hidupnya diesel-generator. Sistem ini terdiri dari tiga redundansi yang masing-

masing dipasok oleh *rectifier* dan baterai. Dua *rectifier* mampu memasok semua sistem yang tersambung. Masing-masing baterai mampu menyediakan daya untuk rangkaianannya selama 45 menit. Untuk meningkatkan kesiapan dan ketersediaan masing-masing komponen sistem proteksi reaktor yang redundan dipasok dari dua panel distribusi. Pembatas fisik memisahkan masing-masing rangkaian dan jika bebannya lebih dari satu rangkaian, pemasok-pemasok diode-couple dengan diode untuk menghindari arus balik dari pemasok-pemasok tersebut. Sumber daya DC dirancang tahan gempa. *Rectifier* dan baterai berasal dari jenis yang terjamin masuk kategori kelas A untuk menjamin *reability* dan *availability* yang tinggi.

4. Lapis Pertahanan Keempat

Tujuan lapis pertahanan keempat adalah pengendalian kondisi kecelakaan parah, termasuk pencegahan meningkatnya kecelakaan dan mitigasi konsekuensi kecelakaan dengan alat utama manajemen kecelakaan. Penerapan prinsip keselamatan lapis keempat dilakukan dengan membentuk organisasi dan peralatan untuk menanggulangi kedaruratan nuklir di tingkat fasilitas reaktor, yaitu organisasi penanggulangan kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS. Pembentukan organisasi ini mengikuti peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir, yaitu Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 1 Tahun 2010 tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir. Tugas dan tanggung jawab organisasi tersebut adalah melaksanakan penanggulangan kedaruratan nuklir di fasilitas RSG-GAS secara keseluruhan pada tingkat fasilitas atau tingkat instalasi. Manajemen kedaruratan di RSG-GAS ini telah dituangkan dalam dokumen Program Kesiapsiagaan Nuklir Fasilitas RSG-GAS. Secara umum, kedaruratan reaktor RSG-GAS dibagi dalam tiga tingkat kedaruratan (PRSG, 2015b), yaitu

- 1) Kedaruratan Nuklir Waspada adalah kedaruratan nuklir yang berdampak di dalam gedung fasilitas reaktor saja (tingkat fasilitas);
- 2) Kedaruratan Nuklir Area Tapak adalah kedaruratan nuklir yang berdampak di dalam pagar Kawasan Nuklir Serpong (tingkat kawasan); dan

- 3) Kedaruratan Nuklir Umum adalah kedaruratan nuklir yang berdampak di luar pagar Kawasan Nuklir Serpong (tingkat lepas kawasan).

Bagian ini akan membahas manajemen kedaruratan untuk tingkat 1. Sementara itu, untuk tingkat 2 dan 3 akan dibahas dalam subsubbab lapis pertahanan kelima.

Organisasi penanggulangan kedaruratan nuklir tingkat fasilitas RSG-GAS, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.12, mempunyai tugas dan tanggung jawab untuk melaksanakan penanggulangan kedaruratan nuklir tingkat fasilitas RSG-GAS. Unsur-unsur utama pelaksana penanggulangan kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS adalah sebagai berikut.

- 1) Ketua Penanggulangan Kedaruratan (KPK), Direktur DPFK:
 - a) memberi instruksi dan bekerja sama dan menerima laporan dari Pelaksana Operasi (PO) dalam pelaksanaan penanggulangan kedaruratan;
 - b) melaporkan ke pengelola Kawasan Sains dan Teknologi (KST) Serpong tentang adanya kedaruratan dan meminta bantuan penanggulangan yang diperlukan;
 - c) meminta bantuan tim kedaruratan KST yang dikoordinasikan oleh pengelola KST jika diperlukan;
 - d) memberikan informasi kepada masyarakat, media massa, dan instansi terkait;
 - e) menerima laporan hasil evaluasi dan penanggulangan kecelakaan dari PO dan memutuskan tindakan penanggulangannya;
 - f) memastikan semua pelaksanaan penanggulangan sesuai dengan prosedur dan komunikasi dengan petugas lapangan berjalan dengan optimal;
 - g) memberikan informasi kepada masyarakat, media massa, dan instansi terkait;

- h) menyatakan berakhirnya kedaruratan nuklir;
- i) melakukan pencatatan data dan kronologi tindakan penanggulangan.

2) Pengendali Operasi (KO):

- a) mengumpulkan informasi awal perihal kecelakaan yang terjadi;
- b) melaporkan informasi awal kepada ketua penanggulangan kedaruratan nuklir;
- c) membuat *security perimeter*;
- d) melaksanakan instruksi KPK;
- e) melakukan koordinasi satuan pelaksana operasi di lapangan dalam pelaksanaan pemulihan awal, operasi pembersihan, perlindungan terhadap petugas penanggulangan, dan langkah-langkah perlindungan lainnya;
- f) memberikan masukan dan rekomendasi dalam penanggulangan kedaruratan kepada ketua penanggulangan kedaruratan nuklir;
- g) mengawasi dan mengoordinasikan pelaksana operasi dalam melakukan tugasnya;
- h) mengumpulkan informasi terkait tindakan penanggulangan yang telah dilakukan oleh PO; dan
- i) melaporkan kondisi TKP dan tindakan penanggulangan yang telah atau sedang dilakukan.

3) Pengkaji Radiologi (RA):

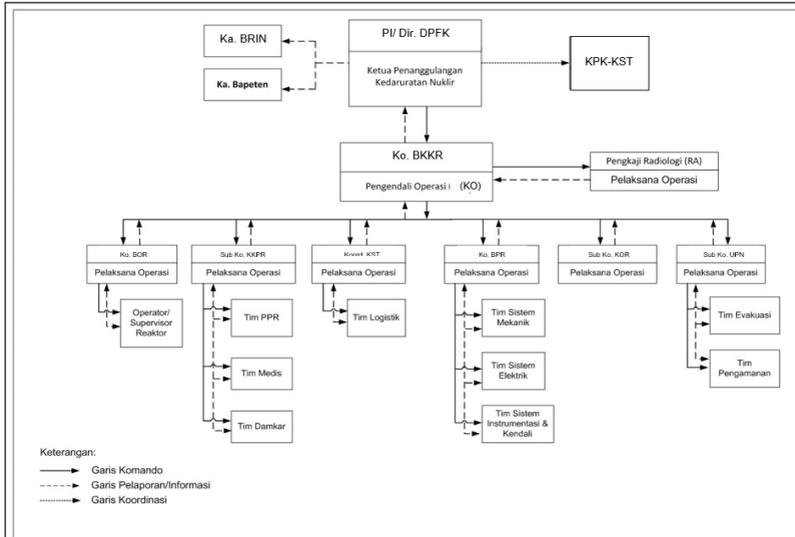
- a) melaksanakan survei lapangan di lokasi kecelakaan;
- b) mengendalikan kontaminasi;
- c) merumuskan dan memberi rekomendasi langkah-langkah perlindungan;
- d) melaksanakan koordinasi penanganan penemuan kembali sumber, dekontaminasi, dan termasuk penanganan limbah radioaktif;

- e) berkoordinasi dengan PO Proteksi Radiasi terkait pengumpulan data radiologi di lokasi kecelakaan;
 - f) melakukan estimasi dan mencatat dosis yang diterima oleh masyarakat dan/atau petugas penanggulangan; dan
 - g) berkoordinasi dengan Pengkaji Radiologi KST.
- 4) Pelaksana Operasi Fasilitas (PO Fasilitas):
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) berkoordinasi dengan KO dan PO lainnya;
 - c) melakukan tindakan yang diperlukan sesuai sistem yang menjadi tanggung jawabnya;
 - d) melakukan pengamanan fasilitas dari bahaya mekanik, elektrik, dan instrumentasi; dan
 - e) melaporkan tindakan yang dilakukan kepada KO.
- 5) Pelaksana Operasi Tim Petugas Proteksi Radiasi (PO Proteksi Radiasi):
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) memeriksa dan memelihara kesiapan peralatan proteksi radiasi dan alat pelindung diri (APD);
 - c) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO;
 - d) melakukan pengukuran tingkat radiasi dan tingkat kontaminasi;
 - e) memasang *safety perimeter* serta rambu-rambu tanda radiasi;
 - f) membuat akses kontrol dan memantau keluar masuknya petugas penanggulangan kedaruratan;
 - g) mencari sumber radiasi/kontaminasi kemudian menandainya;
 - h) berkoordinasi dengan PO limbah radioaktif untuk mengumpulkan dan mengamankan seluruh barang yang terkontaminasi;
 - i) mengukur tingkat radiasi dan kontaminasi barang/alat;

- j) mengukur tingkat kontaminasi petugas penanggulangan kedaruratan yang masuk daerah radiasi;
 - k) mencatat dosis radiasi petugas penanggulangan kedaruratan yang masuk daerah radiasi; dan
 - l) melaporkan hasil pengukuran kepada KO.
- 6) Pelaksana Operasi Tim Medis (PO Medis)
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) memeriksa dan memelihara kesiapan peralatan P3K, dekontaminasi personel, dan APD;
 - c) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO dan PO lainnya;
 - d) melaksanakan penanganan P3K korban;
 - e) mengambil sampel korban dari lubang telinga, hidung, dan mulut;
 - f) mengambil TLD korban dan segera mengirimkan ke lab *whole body counter* (WBC) untuk evaluasi lebih lanjut;
 - g) mendata kronologis korban;
 - h) meminta bantuan medis KNS melalui KO apabila korban mengalami luka;
 - i) melakukan dekontaminasi eskternal terhadap korban;
 - j) melakukan evaluasi penerimaan dosis petugas kedaruratan; dan
 - k) melaporkan hasil penanganan korban kepada KO.
- 7) Pelaksana Operasi Tim Pemadam Kebakaran (PO Damkar)
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) memeriksa dan memelihara kesiapan peralatan damkar dan *rescue*;
 - c) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO dan PO lainnya;
 - d) melakukan pemadaman kebakaran sesuai prosedur;

- e) melakukan penyelamatan pekerja/korban;
 - f) melaporkan hasil kegiatan kepada KO; dan
 - g) melakukan remediasi.
- 8) Pelaksana Operasi Tim Logistik (PO Logistik)
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) berkoordinasi dengan KO dan PO lainnya;
 - c) membantu mobilisasi Tim Kedaruratan;
 - d) menyediakan logistik (baik alat, kendaraan, bahan, maupun konsumsi) yang diperlukan oleh Tim Kedaruratan.
- 9) Pelaksana Operasi Tim Evakuasi (PO Evakuasi)
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) mengoordinasikan tindakan evakuasi personel;
 - c) mengarahkan personel untuk evakuasi;
 - d) melakukan penghitungan personel yang dievakuasi; dan
 - e) melaporkan tindakan penanggulangan kepada KO.
- 10) Pelaksana Operasi Tim Keamanan (PO Keamanan)
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO;
 - c) melakukan penyelamatan barang atau dokumen penting lainnya;
 - d) mengamankan sumber radioaktif di tempat kedaruratan;
 - e) mengatur akses personel; dan
 - f) melakukan koordinasi dengan tim lainnya.

Pusat kendali tanggap darurat jika terjadi kedaruratan nuklir di RSG-GAS bertempat di RKD Gedung 35 yang berfungsi sebagai tempat pengendalian dan pemantauan kondisi reaktor. Peralatan yang terdapat di dalam RKD adalah panel kontrol instrumentasi parameter keselamatan, peralatan komunikasi, dan audiovisual.



Sumber: Keputusan Direktur Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran Nomor B-187/IV/HK.01.00/1/2022 (2022)

Gambar 5.12 Struktur Organisasi Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Fasilitas RSG-GAS

Ruang krisis yang berada di lantai dasar Gedung 31 menjadi tempat berkumpulnya Pelaksana Operasi apabila terjadi kedaruratan di RSG-GAS. Fasilitas yang berada di ruang krisis tersebut adalah alat pelindung diri (APD), alat ukur radiasi, alat komunikasi, audiovisual, kotak P3K, dan meja-kursi.

Pada saat terjadi kedaruratan nuklir RSG-GAS, yang berada di RKD Gedung 35 adalah sebagai berikut:

- 1) Direktur DPFK sebagai Ketua Penanggulangan Kedaruratan;
- 2) Koordinator Keselamatan dan Keamanan Reaktor sebagai Pengendali Operasi;
- 3) Koordinator Operasi Reaktor sebagai Pelaksana Operasi;
- 4) Koordinator Pemeliharaan Reaktor sebagai Pelaksana Operasi;
- 5) Pengkaji Radiologi sebagai Pelaksana Operasi; dan
- 6) Supervisor/operator reaktor sebagai Pelaksana Operasi.

Sementara itu, di Ruang Krisis yang berfungsi sebagai Ruang Tanggap Darurat berkumpul tim tanggap darurat yang terdiri dari:

- 1) Subkoordinator UPN sebagai Pelaksana Operasi;
- 2) Subkoordinator Proteksi Radiasi sebagai Pelaksana Operasi;
- 3) Subkoordinator Keselamatan Operasi sebagai Pelaksana Operasi;
- 4) Subkoordinator Mekanik sebagai Pelaksana Operasi;
- 5) Subkoordinator Elektrik sebagai Pelaksana Operasi;
- 6) Subkoordinator Instrumentasi sebagai Pelaksana Operasi;
- 7) Tim PPR sebagai Pelaksana Operasi;
- 8) Tim Medis sebagai Pelaksana Operasi;
- 9) Tim Damkar sebagai Pelaksana Operasi;
- 10) Tim Logistik sebagai Pelaksana Operasi;
- 11) Tim Evakuasi sebagai Pelaksana Operasi; dan
- 12) Tim Pengamanan sebagai Pelaksana Operasi.

Apabila kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS meningkat menjadi kedaruratan nuklir tingkat kawasan dan tingkat lepas kawasan, pelaksanaan penanggulangan kedaruratan nuklir dilaksanakan oleh organisasi penanggulangan kedaruratan nuklir Kawasan Nuklir Serpong.

Direktur DPFK sebagai KPK melakukan koordinasi dengan pihak terkait dalam rangka penanggulangan kedaruratan Kawasan Nuklir Serpong. Instansi yang terkait tersebut adalah:

- 1) KST B.J. Habibie, Serpong
- 2) TNI AD (Nubika, Koramil)
- 3) Kepolisian (Polsek Cisauk dan Polsek Gunung Sindur)
- 4) Badan Penanggulangan Bencana Daerah, BPBD (logistik dan transportasi)
- 5) Dinkes Tangsel (rumah sakit)
- 6) Pemerintah Kota Tangerang Selatan (damkar)

Peran dan tanggung jawab Direktur DPFK apabila terjadi ke-daruratan nuklir di Kawasan Nuklir Serpong adalah sebagai ketua penanggunggalan/koordinator tim penanggulangan dari instansi lain.

Fasilitas reaktor RSG-GAS berada di KST B.J. Habibie yang terletak pada ketinggian 60 m dari permukaan laut. RSG-GAS terletak di Kelurahan Muncul, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten. Reaktor RSG-GAS berjarak sekitar ± 27 km ke arah barat daya dari kota Jakarta, atau sekitar ± 17 km di sebelah selatan Kota Tangerang dan sekitar ± 30 km di sebelah utara Kota Bogor. Zona tindakan jika terjadi ke-daruratan nuklir fasilitas RSG-GAS terlihat pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Zona Tindakan Jika Terjadi Kedaruratan Nuklir Fasilitas RSG-GAS

Radius Zona Tindakan Pencegahan	Radius Zona Perencanaan	Radius Pengawasan Bahan Pangan
Minimal dinding terluar gedung reaktor	0,5–5 km	5–50 km

Sumber: PRSG (2015b)

Peralatan ke-daruratan yang digunakan dalam penanggulangan ke-daruratan nuklir adalah sebagai berikut.

- 1) Peralatan pemadam kebakaran, yaitu
 - a) APAR jenis *dry chemical* dan CO₂;
 - b) hidran yang terpasang pada instalasi RSG-GAS;
 - c) hidran lapangan;
 - d) mobil pemadam kebakaran DPFK;
 - e) mobil pemadam kebakaran KST B.J. Habibie;
 - f) mobil pemadam kebakaran Pemkot Tangerang Selatan.
- 2) Peralatan medis, yaitu
 - a) tablet iodin;
 - b) kotak P3K instalasi RSG-GAS;
 - c) ambulans dan peralatan medis DPFK;
 - d) ambulans Dinkes Tangsel dan rumah sakit.

- 3) Peralatan penanganan limbah, yaitu
 - a) kontainer limbah;
 - b) peralatan dekontaminasi;
 - c) kantong limbah;
 - d) label dan tanda radiasi, dan lain-lain.
- 4) Peralatan ukur radiasi, yaitu
 - a) surveymeter beta-gamma;
 - b) surveymeter alfa;
 - c) alat ukur *sampling* udara;
 - d) alat ukur identifikasi nuklida; dan
 - e) dosimeter personal.

Jika terjadi kedaruratan nuklir fasilitas, tempat berkumpul karyawan DPFK adalah di lobi Gedung 31, terlihat pada Gambar 5.13. Jika kedaruratan meningkat menjadi kedaruratan kawasan, karyawan akan diangkut menggunakan bus menuju lokasi yang sudah ditentukan sesuai dengan Program Kesiapsiagaan Nuklir Kawasan Nuklir Serpong, Revisi 3 Tahun 2012. Jalur evakuasi personel DPFK menuju gedung olahraga (GOR) Puspipstek seperti terlihat pada Gambar 5.14.

Tempat berlindung sementara untuk seluruh karyawan yang berada di kawasan puspipstek adalah di GOR Puspipstek. Proteksi dan evakuasi masyarakat di sekitar RSG-GAS dilakukan sesuai dengan Program Kesiapsiagaan Nuklir Kawasan Nuklir Serpong, Revisi 3 Tahun 2012 dengan langkah sebagai berikut: evakuasi, pemberian tablet kalium iodida, dan sheltering (PKTN, 2012).

Untuk menjamin keselamatan lingkungan dan masyarakat, dilakukan pemantauan radiologi kedaruratan lingkungan selama kedaruratan berlangsung. Informasi ini berguna untuk melakukan tindakan perlindungan segera.

Dalam melaksanakan penanggulangan kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS didukung oleh prosedur penanggulangan kedaruratan nuklir RSG-GAS dengan dilengkapi dengan SOP teknis yang meliputi:

- 1) identifikasi;
- 2) pelaporan dan pengaktifan;
- 3) tindakan mitigasi;
- 4) pemberian tempat berlindung sementara, evakuasi, dan pemberian tablet yodium;
- 5) pemberian informasi dan instruksi kepada masyarakat;
- 6) perlindungan terhadap petugas penanggulangan;
- 7) survei radiasi dan pemantauan radiasi;
- 8) pemadaman kebakaran;
- 9) pertolongan pertama dan penyelamatan korban;
- 10) dekontaminasi korban, pekerja, petugas penanggulangan, peralatan, jalur evakuasi, pemberian tempat berlindung sementara;
- 11) penanganan limbah radioaktif dan penemuan kembali sumber;
- 12) pernyataan tentang keadaan darurat dan pernyataan keadaan darurat telah berakhir;
- 13) evaluasi dan analisis penyebab kecelakaan.

Pelatihan penanggulangan kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS dilaksanakan oleh DPFK paling sedikit sekali dalam satu tahun, bertujuan untuk menerapkan program, mengembangkan kemampuan personel/tim di lapangan, dan menguji peralatan maupun fasilitas penanggulangan yang ada. Pelatihan dilaksanakan dengan melibatkan infrastruktur dan fungsi penanggulangan yang dimiliki. Gambar 5.15 menunjukkan Tim Proteksi Radiasi sedang memeriksa tingkat kontaminasi dalam latihan kedaruratan. Sementara itu, Tim Pemadam Kebakaran sedang melatih keterampilannya terlihat dalam Gambar 5.16.

DPFK mengikuti pelatihan dan gladi kedaruratan nuklir tingkat provinsi yang dikoordinasi oleh BPBD paling sedikit satu kali dalam dua tahun. DPFK mengikuti pelatihan dan gladi kedaruratan nuklir

tingkat nasional yang dikoordinasikan oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) paling sedikit satu kali dalam empat tahun. Laporan pelatihan atau gladi kedaruratan nuklir RSG-GAS tingkat provinsi dan nasional disampaikan kepada BAPETEN.



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2009)

Gambar 5.15 Tim Proteksi Radiasi dalam Latihan Kedaruratan RSG-GAS



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2009)

Gambar 5.16 Latihan Pemadaman Kebakaran di RSG-GAS

Penanggulangan kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS dilaksanakan sesuai klasifikasi kedaruratan nuklir yang terjadi. Penanggulangan kedaruratan nuklir waspada/instalasi dilakukan oleh organisasi penanggulangan kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS. Pada kedaruratan nuklir kawasan, penanggulangan kedaruratan nuklir dikoordinasikan oleh DPFK, penanggulangan kedaruratan nuklir tingkat provinsi dikoordinasikan oleh BPBD, dan penanggulangan kedaruratan nuklir nasional dikoordinasikan oleh BNPB.

Fungsi penanggulangan kedaruratan nuklir fasilitas RSG-GAS bertujuan untuk:

- 1) mengendalikan situasi kedaruratan nuklir agar penanggulangan berlangsung sesuai dengan SOP penanggulangan di tempat kecelakaan;
- 2) mencegah dan memitigasi konsekuensi dari kecelakaan;
- 3) mencegah terjadinya efek deterministik terhadap personel;
- 4) melakukan pertolongan pertama dan mengelola penanganan korban luka radiasi;
- 5) mencegah terjadinya efek stokastik pada personel;
- 6) mencegah terjadinya efek nonradiologi pada personel; dan
- 7) melindungi harta benda dan lingkungan.

Identifikasi terjadinya kedaruratan tingkat fasilitas adalah jika terjadi kecelakaan di RSG-GAS, tetapi tidak terjadi lepasan zat radioaktif keluar melalui cerobong RSG-GAS, ditandai dengan peralatan deteksi radiasi yang terpasang di dalam instalasi terjadi *high alarm*.

Identifikasi terjadinya kedaruratan kawasan dan lepas kawasan adalah jika terjadi kecelakaan di RSG-GAS, terjadi lepasan melalui cerobong $> 5 \times 10^{-4} \text{ Ci/m}^3$ pada sistem KLK 06 CR002.

Pelaporan awal terjadinya kedaruratan adalah dari supervisor atau operator reaktor melaporkan kepada Pemegang Izin (PI), yaitu Direktur DPFK sebagai Ketua Penanggulangan Kedaruratan Nuklir (KPK), dan kepada Koordinator Keselamatan dan Keamanan Reaktor sebagai Pengendali Operasi.

Selanjutnya, Direktur DPFK sebagai KPK mengaktifkan organisasi penanggulangan kedaruratan nuklir RSG-GAS. Koordinator Keselamatan Kerja dan Operasi sebagai Pengendali Operasi berkoordinasi dengan Pelaksana Operasi untuk melakukan penanggulangan kedaruratan nuklir di RSG-GAS dan berkumpul di RKD Gedung 35 untuk melakukan langkah-langkah penanggulangan. Untuk melakukan tindakan identifikasi, pelaporan, dan pengaktifan telah diatur di dalam SOP administratif, yaitu SOP Kedaruratan Nuklir Tingkat Fasilitas RSG, dan didukung oleh SOP Teknis, yaitu SOP Identifikasi, SOP Pelaporan, dan SOP Pengaktifan.

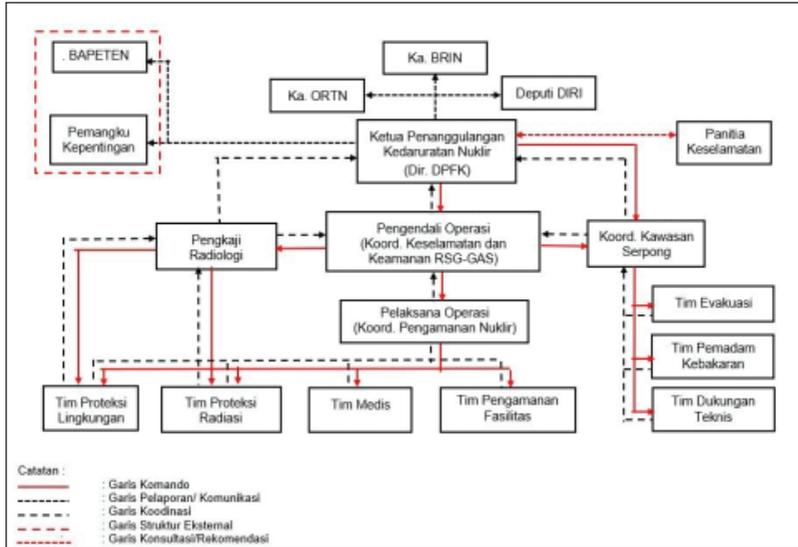
Pemegang izin (PI) sebagai Ketua Penanggulangan Kedaruratan Nuklir RSG-GAS melaporkan kepada Kepala BRIN dan Kepala BAPETEN. Pada kondisi PI berada di luar kota, jika terjadi kedaruratan nuklir di RSG-GAS, pelaporan tetap dilakukan oleh PI paling lama satu jam melalui telepon, faksimile, atau surat elektronik, dan secara tertulis paling lama dua hari setelah kecelakaan terjadi.

5. Lapis Pertahanan Kelima

Tujuan lapis pertahanan kelima adalah mitigasi konsekuensi radiologik pelepasan zat radioaktif dengan alat utama tanggap darurat lepas lokasi (*off-site*). Untuk memenuhi lapis pertahanan kelima, pimpinan BRIN telah membentuk Tim Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Kawasan Serpong. Organisasi penanggulangan kedaruratan KNS ditunjukkan dengan struktur seperti dalam Gambar 5.17. Penanggulangan kedaruratan nuklir dilaksanakan secara terintegrasi oleh seluruh tim penanggulangan sebagai pelaksana operasi dengan melibatkan organisasi penanggulangan dalam dan luar KST B.J. Habibie.

Unsur-unsur utama pelaksana penanggulangan kedaruratan nuklir kawasan Serpong adalah sebagai berikut.

- 1) Ketua Penanggulangan Kedaruratan Nuklir (KPK):
 - a) mendeklarasikan terjadinya kejadian operasi terantisipasi dan/atau kecelakaan/keadaan kedaruratan nuklir serta



Sumber: Keputusan Kepala Badan Riset Dan Inovasi Nasional Nomor 227/I/HK/2022 (2022)

Gambar 5.17 Struktur Organisasi Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Kawasan Serpong

- mengaktifkan Tim Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Kawasan;
- b) melaporkan terjadinya kejadian operasi terantisipasi dan/atau kecelakaan/keadaan kedaruratan nuklir dan upaya penanggulangannya kepada BAPETEN dan Kepala BRIN;
 - c) mengatur prioritas dan perlindungan terhadap masyarakat dan petugas penanggulangan serta menentukan tingkat kedaruratan;
 - d) meminta masukan dan rekomendasi dari pengkaji radiologi terkait penanggulangan kedaruratan nuklir;
 - e) memastikan semua pelaksanaan penanggulangan sesuai dengan prosedur dan komunikasi dengan petugas lapangan berjalan dengan optimal;

- f) memimpin jalannya penanggulangan kedaruratan dan mengambil keputusan terkait tindakan penanggulangan kedaruratan dengan rekomendasi dari pengkaji radiologi dan koordinator/unit terkait;
 - g) melaporkan terjadinya kejadian operasi terantisipasi;
 - h) memberi instruksi dan menerima laporan dari KO dalam pelaksanaan penanggulangan kedaruratan;
 - i) meminta masukan dan rekomendasi tenaga ahli dari panitia keselamatan;
 - j) menginstruksikan ke Koordinator Kawasan Serpong tentang adanya kedaruratan dan mengerahkan bantuan penanggulangan kedaruratan yang diperlukan;
 - k) menunjuk juru bicara untuk memberikan informasi kepada masyarakat, media massa, dan instansi terkait terkait penanggulangan kedaruratan;
 - l) menerima laporan hasil evaluasi dan penanggulangan kecelakaan dari KO dan memutuskan tindakan penanggulangannya;
 - m) memastikan semua pelaksanaan penanggulangan sesuai dengan prosedur dan komunikasi dengan petugas lapangan berjalan dengan optimal;
 - n) menyatakan berakhirnya kedaruratan nuklir; dan
 - o) membuat Laporan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir untuk disampaikan kepada Kepala BRIN.
- 2) Pengendali Operasi (KO):
- a) mengumpulkan informasi awal perihal kedaruratan yang terjadi;
 - b) melaporkan informasi awal kepada ketua penanggulangan kedaruratan nuklir kawasan;
 - c) melaksanakan instruksi KPK;

- d) menginstruksikan Pelaksana Operasi untuk melaksanakan pemulihan awal, operasi pembersihan, perlindungan terhadap petugas penanggulangan dan langkah-langkah perlindungan lainnya;
 - e) menginstruksikan ke Koordinator Kawasan Serpong tentang adanya kedaruratan dan mengerahkan bantuan penanggulangan yang diperlukan;
 - f) memberikan masukan dan rekomendasi dalam penanggulangan kedaruratan kepada ketua penanggulangan kedaruratan nuklir;
 - g) melakukan koordinasi dengan Pengkaji Radiologi terkait laju paparan radiasi dan kontaminasi di tempat kejadian; dan
 - h) melaporkan kondisi tempat kejadian dan tindakan penanggulangan yang telah atau sedang dilakukan kepada KPK.
- 3) Pelaksana Operasi (PO):
- a) melaksanakan instruksi KO;
 - b) mengawasi dan melakukan koordinasi dengan tim dalam pelaksanaan pemulihan awal, operasi pembersihan, perlindungan terhadap petugas penanggulangan, dan langkah-langkah perlindungan lainnya;
 - c) melakukan pengawasan, pengendalian keadaan, pengaturan sirkulasi petugas penanggulangan, dan aspek lain terkait kedaruratan di tempat kejadian;
 - d) mengumpulkan informasi terkait tindakan penanggulangan yang telah dilakukan oleh tim; dan
 - e) melaporkan kondisi tempat kejadian dan tindakan penanggulangan yang telah atau sedang dilakukan kepada KO.
- 4) Pengkaji Radiologi (RA):
- a) melakukan kajian radiologik berdasarkan data meteorologi dan monitor radiasi lingkungan serta data dari tempat kejadian;

- b) menghitung dan menentukan arah dan kecepatan angin di tempat kejadian;
 - c) meminta Tim Proteksi Lingkungan untuk mengukur laju dosis dan kontaminasi udara di koordinat yang telah ditentukan;
 - d) merumuskan dan memberi rekomendasi langkah-langkah perlindungan kepada KPK;
 - e) berkoordinasi dengan Tim Proteksi Radiasi terkait pengumpulan data radiologi di lokasi kecelakaan;
 - f) melakukan estimasi dan mencatat dosis yang diterima oleh masyarakat dan/atau petugas penanggulangan; dan
 - g) melaksanakan koordinasi penanganan penemuan kembali sumber, proses dekontaminasi, dan termasuk penanganan limbah radioaktif.
- 5) Tim Proteksi Lingkungan:
- a) menerima instruksi dari KO dan RA;
 - b) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO;
 - c) mengukur laju dosis dan kontaminasi udara di koordinat yang telah ditentukan;
 - d) berkoordinasi dengan Tim Proteksi Radiasi terkait pengumpulan data radiologi di lokasi kecelakaan;
 - e) melakukan koordinasi dengan tim lainnya dalam melaksanakan pemulihan awal, operasi pembersihan, perlindungan terhadap petugas penanggulangan dan lingkungan; dan
 - f) melaporkan hasil pengukuran kepada KO dan RA.
- 6) Tim Proteksi Radiasi:
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) menyiapkan peralatan proteksi radiasi dan alat pelindung diri (APD);
 - c) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO;
 - d) melakukan koordinasi dengan manajer keamanan dan keselamatan di tempat kejadian;

- e) melakukan pengukuran tingkat radiasi dan tingkat kontaminasi;
 - f) berkoordinasi dengan Pengkaji Radiologi terkait tingkat radiasi dan tingkat kontaminasi;
 - g) memasang *safety perimeter* serta rambu-rambu tanda radiasi;
 - h) membuat akses kontrol;
 - i) mencari sumber radiasi/kontaminasi kemudian menandainya;
 - j) mengukur tingkat radiasi dan kontaminasi barang/alat;
 - k) mengukur tingkat kontaminasi petugas penanggulangan kedaruratan yang masuk daerah radiasi; dan
 - l) melaporkan hasil pengukuran kepada KO dan RA.
- 7) Tim Medis:
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) melakukan prosedur inisiasi tanggap medik kedaruratan radiasi di klinik KNS, meliputi persiapan personel, kelengkapan peralatan, dan sarana dukung lainnya;
 - c) menuju lokasi kedaruratan dan melakukan koordinasi dengan manajer keamanan keselamatan dan pelaksana lainnya di lokasi;
 - d) melakukan prosedur tanggap medik kedaruratan radiasi oleh tim medis di lokasi, meliputi triase korban, tindakan bantuan hidup dasar dan lanjut jika diperlukan, dan dekontaminasi lapangan pada pasien;
 - e) membawa pasien ke klinik KNS berdasarkan penilaian kondisi medis pasien dan/atau membawa pasien ke RS rujukan melalui sistem SPGDT 119 jika diperlukan;
 - f) melakukan prosedur serah terima pasien kepada tim medis yang berada di klinik KNS, meliputi penilaian ulang status medis pasien dan survei kontaminasi ulang dengan tetap memperhatikan kestabilan medis pasien dan pengendalian kontaminasi;

- g) melakukan prosedur penanggulangan dan tata laksana medis lanjutan, dekontaminasi eksternal, dekorporasi kontaminasi internal jika diperlukan dan pemeriksaan penunjang serta diagnostik lainnya sesuai gangguan yang ada;
 - h) memeriksa dan memelihara kesiapan peralatan P3K, dekontaminasi personel dan APD; dan
 - i) melaporkan hasil penanganan korban kepada KO.
- 8) Tim Pengamanan Fasilitas:
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO;
 - c) membuat *security perimeter*;
 - d) melakukan penyelamatan barang atau dokumen penting lainnya;
 - e) mengatur sirkulasi petugas penanggulangan di tempat kejadian;
 - f) menjadi Manajer Keamanan dan Keselamatan di tempat kejadian, jika ada polisi Republik Indonesia terlibat di tempat kejadian, Manajer Keamanan dan Keselamatan beralih ke pihak kepolisian;
 - g) melakukan koordinasi dengan tim lainnya; dan
 - h) melaporkan tindakan penanggulangan kepada KO.
- 9) Koordinator Kawasan Serpong:
- a) menerima instruksi dari KPK dan KO;
 - b) berkoordinasi dengan KO dan Pelaksana lainnya;
 - c) menyiapkan ruang *Crisis Center* sebagai sarana yang memadai untuk melakukan koordinasi selama penanggulangan kedaruratan;
 - d) menyediakan logistik (baik alat, kendaraan, bahan, maupun akomodasi) yang diperlukan oleh Tim Kedaruratan;
 - e) mengerahkan sumber daya lainnya yang diperlukan termasuk dukungan teknis untuk penanggulangan kedaruratan; dan

- f) melaporkan tindakan penanggulangan kepada KPK dan KO.
- 10) Tim Evakuasi:
- a) menerima instruksi dari KO;
 - b) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO;
 - c) mengoordinasikan tindakan evakuasi personel;
 - d) mengarahkan personel untuk evakuasi;
 - e) melakukan penghitungan personel yang dievakuasi; dan
 - f) melaporkan tindakan penanggulangan kepada KO.
- 11) Tim Pemadam Kebakaran:
- a) menerima instruksi dari KO dan Koordinator Kawasan;
 - b) menyiapkan peralatan pemadam kebakaran dan *rescue*;
 - c) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan KO dan pelaksana lainnya;
 - d) melakukan koordinasi dengan Manajer Keamanan dan Keselamatan di tempat kejadian;
 - e) melakukan pemadaman kebakaran sesuai prosedur;
 - f) melakukan penyelamatan pekerja/korban; dan
 - g) melaporkan hasil kegiatan kepada KO.
- 12) Tim Dukungan Teknis
- a) menerima instruksi dari Koordinator Kawasan;
 - b) menuju lokasi kedaruratan dan berkoordinasi dengan pelaksana lainnya;
 - c) melakukan dekontaminasi dan pengangkutan limbah radioaktif dari lokasi kedaruratan;
 - d) melakukan penyelesaian adanya gangguan di tempat kejadian seperti pemadaman listrik, pengadaan air bersih, sistem komunikasi, dan lain sebagainya;
 - e) melakukan koordinasi dengan tim lainnya; dan
 - f) melaporkan tindakan penanggulangan kepada Koordinator Kawasan.

Untuk melaksanakan tugas tersebut, setiap tahun Kepala BRIN menetapkan Tim Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Kawasan Serpong sesuai dengan struktur organisasi kedaruratan tersebut. Anggota tim terdiri atas personel yang sesuai dengan jabatan di unit kerjanya seperti berikut.

- 1) Ketua Penanggulangan Kedaruratan (KPK): Direktur DPFK
- 2) Pengendali Operasi (KO): Koordinator Keselamatan dan Keamanan Reaktor (KKR) RSG-GAS
- 3) Pelaksana Operasi (PO): Koordinator Pengamanan Nuklir DPFK
- 4) Pengkaji Radiologi (RA): Unsur DPFK, Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains dan Teknologi (DPLFRKST), Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN), Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR)
- 5) Tim Proteksi Lingkungan: Unsur DPLFRKST dan DPFK
- 6) Tim Proteksi Radiasi: Unsur DPFK dan DPLFRKST
- 7) Tim Medis: Unsur DPFK dan Biro Komunikasi Publik, Umum, dan Kesekretariatan (BKPUK)
- 8) Tim Pengamanan Fasilitas: Unsur DPFK dan DPLFRKST
- 9) Koordinator Kawasan Sains dan Teknologi (Kawasan Serpong)
- 10) Tim Evakuasi: Unsur DPFK dan DPLFRKST
- 11) Tim Pemadam Kebakaran Unsur DPFK dan DPLFRKST
- 12) Tim Dukungan Teknis: Unsur DPLFRKST

Daftar prosedur dan instruksi kerja yang digunakan dalam Program Kesiapsiagaan Nuklir Kawasan Serpong adalah sebagai berikut:

- 1) pelaporan dan pengaktifan (Puskodal);
- 2) tindakan mitigasi, proteksi, dan evakuasi masyarakat (pemerintah kota dan BNPB);
- 3) pemberian tempat berlindung sementara (*sheltering*), evakuasi, dan pemberian tablet kalium iodida (evakuasi, medis, dan proteksi lingkungan);

- 4) pemberian informasi kepada masyarakat (Humas);
- 5) survei radiasi dan pemantauan (Pemantau Radiologi Lingkungan);
- 6) analisis dampak radiologi (Pengkaji Radiologi);
- 7) pemadaman kebakaran dan penyelamatan korban (Damkar dan *Rescue*);
- 8) penanggulangan medis kedaruratan nuklir/radiologi (Medis);
- 9) penanganan dekontaminasi korban, pekerja, petugas penanggulangan, dan peralatannya (Medis dan Proteksi Radiasi);
- 10) evakuasi, tempat berkumpul, tempat berlindung sementara (*marshall yard*) dan ruang *triage* (evakuasi);
- 11) penanganan sumber dan limbah radioaktif (Pengelola Limbah Radioaktif);
- 12) pernyataan tentang ada dan berakhirnya kedaruratan (Puskodal);
- 13) evaluasi dan analisis penyebab kecelakaan (PI);
- 14) Program Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Tingkat Fasilitas.

Pelatihan dan/atau gladi penanggulangan kedaruratan nuklir dalam kawasan yang dilaksanakan paling sedikit sekali dalam satu tahun, bertujuan untuk menerapkan program, mengembangkan kemampuan personel dan tim di lapangan, dan menguji peralatan maupun fasilitas penanggulangan yang ada. Pelatihan dilaksanakan dengan melibatkan infrastruktur dan fungsi penanggulangan yang dimiliki.

Tim melaksanakan pelatihan dan gladi kedaruratan nuklir atau radiologi di luar tapak paling sedikit sekali dalam dua tahun dengan melibatkan instansi luar seperti BPBD, kepolisian, dan/atau rumah sakit. Tim mengikuti pelatihan dan gladi kedaruratan nuklir atau radiologi di tingkat nasional paling sedikit sekali dalam empat tahun, bekerja sama dengan BNPB, Kompi Nubika Zeni TNI-AD, Gegana Kepolisian RI, Kementerian Kesehatan, Kementerian Pertanian, dan Pemerintah Kota Tangerang Selatan. Rencana, pelaksanaan, dan hasil

pelatihan serta gladi kedaruratan nuklir atau radiologi disampaikan kepada BAPETEN. Program pelatihan dan gladi kedaruratan nuklir ditunjukkan pada Tabel 5.7. Gambar 5.18 dan Gambar 5.19 menunjukkan kegiatan Tim Medis dan Tim Nubika dalam latihan kedaruratan nuklir tingkat Kawasan Nuklir Serpong.

Tabel 5.7 Program Pelatihan dan Gladi Kedaruratan Nuklir Kawasan Serpong

Objek Latihan	Metode Latihan	Frekuensi Latihan
Pengujian	Sirine, alat komunikasi, dan CCTV	1 tahun sekali
Kebakaran dan <i>rescue</i>	Kursus damkar; latihan menggunakan APAR, hidran, mobil damkar, dan peralatan pendukung lainnya	1 tahun sekali
Dekontaminasi	Kursus proteksi radiasi; latihan menghilangkan kontaminan di tubuh pekerja, peralatan, dan daerah kerja.	1 tahun sekali
Evakuasi	Latihan jalur evakuasi dan bantuan untuk mengetahui waktu dan jarak tempuh	1 tahun sekali
P3K	Kursus P3K; latihan penanganan korban gawat darurat	1 tahun sekali
Pengkaji Radiologi	Survei radiasi; pemantauan lingkungan, kajian dosis penduduk dan lingkungan	4 tahun sekali

Sumber: PRSG (2015b)



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2009)

Gambar 5.18 Pelatihan Penanganan Medis Korban dalam Kedaruratan Reaktor RSG-GAS Tingkat Kawasan Nuklir Serpong



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2009)

Gambar 5.19 Tim Nubika TNI-AD dalam Latihan Kedaruratan Nuklir

D. Penerapan Persyaratan pada Sistem Keselamatan RSG-GAS

Persyaratan bagi sistem keselamatan seperti disajikan pada Bab III meliputi ciri keselamatan inheren, sistem penghalang ganda, redundansi-diversitas, teknik gagal-selamat, dan pengaruh luar. Penerapan persyaratan tersebut pada sistem keselamatan reaktor RSG-GAS disampaikan sebagai berikut.

1. Fitur keselamatan inheren (*inherent safety features*)

Teras reaktor RSG-GAS tersusun atas bahan yang mempunyai sifat alami atau sifat melekat atau inheren, yang akan menstabilkan diri atas gangguan yang muncul selama operasi. Saat terjadi gangguan kenaikan daya reaktor, suhu teras naik yang selanjutnya akan menyebabkan kerapatan atom berkurang. Akibat selanjutnya adalah reaksi pembelahan inti berkurang lagi. Artinya, daya reaktor turun kembali. Fitur keselamatan inheren ini adalah bahwa bahan teras (bahan bakar dan moderator) mempunyai koefisien reaktivitas suhu negatif, yaitu koefisien reaktivitas suhu elemen bakar sebesar $-1,92 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ dan koefisien reaktivitas suhu moderator sebesar $-1,14 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$.

2. Sistem penghalang ganda

Untuk menjamin bahwa zat radioaktif yang dihasilkan dari pengoperasian reaktor, baik berupa padat, cair, maupun gas tetap terkungkung secara aman, reaktor RSG-GAS didesain mempunyai sistem penghalang atau pengungkung radiasi secara berlapis atau ganda, yaitu:

a. Matriks bahan bakar

Kapasitas inventori dan tekanan gas hasil belah di dalam matrik elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$ adalah sebesar $1,1 \times 10^{21}$ pembelahan/ cm^3 yang jauh lebih tinggi daripada fraksi bakar maksimum dari elemen bakar reaktor RSG-GAS.

b. Kelongsong plat elemen bahan bakar, AlMg_2

Pembengkakan plat elemen bahan bakar akan terjadi jika fraksi bakar lebih dari $1,4 \times 10^{21}$ pembelahan/cc sehingga masih mampu menampung gas produk fisi pada bahan bakar dengan fraksi bakar maksimum.

c. Perisai radiasi teras

Perisai radiasi untuk teras reaktor pada arah radial berupa perisai biologis, terdiri dari beton berat dengan densitas $3,35 \text{ ton/m}^3$ setebal 160 cm dan beton biasa dengan densitas $2,3 \text{ ton/m}^3$ setebal 60 cm. Sementara itu, ke arah aksial perisai radiasinya adalah lapisan air di atas teras reaktor setinggi 10 m.

d. Sistem ventilasi

Sistem ventilasi reaktor RSG-GAS yang mengatur dan mempertahankan tekanan udara di dalam gedung reaktor selalu dijaga negatif atau lebih kecil dari tekanan udara di luar gedung reaktor sehingga jika terjadi kebocoran udara luar yang masuk ke gedung, bukan sebaliknya. Sistem ventilasi juga akan menutup gedung secara total (isolasi gedung) jika terjadi pelepasan zat radioaktif.

e. Gedung reaktor

Pintu keluar dan masuk dibuat rangkap dua dan hanya dapat difungsikan secara bergantian, tidak dapat terbuka dua-duanya secara bersamaan sehingga tekanan di dalam gedung tetap terjaga negatif.

3. Redundansi dan Diversitas

Semua sistem dan komponen keselamatan reaktor RSG-GAS telah didesain dan dibangun secara rangkap, rangkap 2 atau 3, seperti terlihat pada sistem proteksi reaktor dalam Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Redundansi pada Sistem Proteksi Reaktor

Parameter	Harga Batas	Gerbang Logik
Cacah fluks kanal jangkau <i>start-up</i>	Min. 2 cps	1V2
Cacah fluks kanal jangkau <i>start-up</i>	Maks. 1×10^5 cps	1V2
Fluks kanal jangkau menengah	Fluks 1×10^{-7} A	1V2
Periode kanal jangkau menengah	Periode ≤ 5 s	1V2
Fluks kanal jangkau menengah	$F > 5\%$	1V2
Fluks jangkau daya	$< 3\% P_N$ (daya nominal)	2V3
Perubahan fluks kanal jangkau daya - Df/Dt	≤ 0	2V3
Fluks jangkau daya	$S_{az} \geq 0,2$	2V3
Perubahan daya kanal $N_{16} + Df/Dt$	≤ 0	2V3
Daya pada Kanal Daya N_{16}	$F \geq 108\%$	2V3
Laju dosis-g SPP	$Dg \geq 0,36$ rad/h	2V3
Laju alir SPP	$M_N \leq 85\%$	2V3
Suhu keluaran HE	$T \geq 42$ °C	2V3
Level air kolam reaktor	$h \leq 12,25$ m	2V3
Tegangan diesel-generator	$U \leq 0,8$	2V3
Beda tekan katup sirkulasi alam	$Dp \geq 0,60$ bar	2V3
Dosis-g sistem ventilasi kolam	$Dg \geq 125$ mR/h	2V3

Sumber: PRSG (2011)

Dari Tabel 5.8 juga tampak contoh diversitas, yaitu daya reaktor dipantau oleh kanal daya fluks neutron dan kanal daya N_{16} . Gambar 5.20 dan Gambar 5.21 menunjukkan perangkapan sistem penyedia daya darurat dan sistem pompa pendingin primer.



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2015)

Gambar 5.20 Tiga Buah Diesel Generator RSG-GAS



Foto: Dokumentasi PRSG BATAN (2015)

Gambar 5.21 Tiga Buah Pompa Pendingin Primer (Satu *Stand-by*)

4. Teknik gagal-selamat

Teknik gagal-selamat, yaitu komponen atau sistem jika gagal berfungsi akan bergerak ke arah yang selamat, telah diaplikasikan pada sistem keselamatan RSG-GAS, antara lain sebagai berikut.

- a) Batang kendali, jika penyedia daya listriknya hilang atau putus, secara otomatis akan jatuh bebas karena gravitasi bumi sehingga reaktor padam.
- b) Katup konveksi alam di plenum teras juga akan jatuh bebas karena gravitasi saat sistem pendingin primer mati sehingga proses pendinginan secara konveksi alam dapat berlangsung.

5. Pengaruh luar

Instalasi reaktor RSG-GAS dibangun memenuhi persyaratan untuk mencegah dan menanggulangi kemungkinan kejadian atau kecelakaan akibat dari luar pengoperasian reaktor, yaitu

- a) berada di daerah bebas banjir dan bencana alam yang kebolehjadiannya sangat rendah;
- b) terletak jauh dari kegiatan dan lalu lintas masyarakat;
- c) dilengkapi dengan sistem proteksi dan pengamanan fisik;
- d) gedung reaktor dan sistem keselamatan di dalamnya dibangun tahan gempa bumi sampai percepatan pergeseran tanah sebesar $0,25 g$ atau $2,5 \text{ m/s}^2$. Instrumentasi seismik berfungsi untuk merekam sejarah kecepatan dan percepatan gempa bumi. Transduser gempa di RSG-GAS dipasang di titik-titik sebagai berikut: pondasi gedung reaktor, kedalaman $-6,50 \text{ m}$, bagian atas gedung reaktor, ketinggian $+26,60 \text{ m}$. Stasiun pengukuran lapangan, pondasi beton 160 m , barat daya gedung diesel.

6. Sistem proteksi kebakaran

Instalasi reaktor RSG-GAS juga dilengkapi dengan sistem proteksi kebakaran reaktor yang dibuat untuk memenuhi persyaratan keselamatan sebagai berikut.

- a) Ruang dan sistem reaktor dibuat dan dipilah ke dalam beberapa kelompok. Tiap kelompok mempunyai ketahanan terhadap kebakaran tertentu, terutama sistem keselamatan reaktor harus didesain tahan kebakaran dan ditempatkan di ruang yang tahan bakarnya tinggi.
- b) Pada sistem ventilasi terdapat sistem isolasi per daerah jika terjadi kebakaran.
- c) Tiap lokasi dipasang sistem monitor dan peralatan pemadam yang sesuai dengan bahan yang ada di dalamnya.

BAB VI

Penutup

Materi pokok keselamatan reaktor nuklir meliputi prinsip-prinsip keselamatan dan persyaratan sistem keselamatan reaktor nuklir berdasarkan standar IAEA telah disajikan secara cukup memadai untuk menakar seberapa jauh penerapannya pada reaktor riset RSG-GAS. Sebagai penutup akan disajikan mengenai pengalaman kejadian operasi reaktor tersebut dan catatan atau saran untuk mempertahankan tingkat keselamatan reaktor RSG-GAS.

A. Pengalaman Kejadian Operasi Reaktor RSG-GAS

Selama 28 tahun beroperasi, sejak tahun 1987 sampai dengan tahun 2015, RSG-GAS belum pernah mengalami kecelakaan operasi, yang pernah terjadi adalah pada tingkat kejadian operasi (insiden). Jumlah kejadian operasi reaktor tercatat sebanyak 30 kali seperti disajikan pada Tabel 5.9. Dari 30 kejadian tersebut, sembilan kejadian termasuk dalam skala 1 atau anomali, di mana hanya terjadi penyimpangan batas operasi. Sebanyak 21 kejadian lainnya tergolong dalam skala nol, yaitu deviasi, di mana tidak ada dampak atau pengaruh terhadap sistem keselamatan, yang semuanya tidak memberi dampak radiologik dari skala kecelakaan nuklir INES. Data tersebut menggambarkan bahwa selama kurun waktu 28 tahun, reaktor RSG-GAS dioperasikan dan dimanfaatkan dengan aman.

Tabel 5.9 Kejadian Operasi Reaktor pada Operasi Teras No. 1 s.d. 88

No.	Tanggal	Kejadian	Skala INES
1	15-12-1989	Tabung pengarah detektor kanal <i>start-up</i> , JKT01 CX821 bocor	0
2	23-02-1993	Kerusakan Trafo BHT03	0
3	05-03-1997	Terlepasnya kapsul target radioisotop FPM	0
4	07-03-1997	Bocor oli di pompa sekunder PA02 AP01	0
5	13-03-1993	Kerusakan batang kendali JDA05	0
6	25-03-1996	Naiknya penunjukan FFD	1
7	30-01-1997	Terjatuhnya kancing baju di kolam reaktor	0
8	07-03-1997	Pompa sekunder PA02 AP01	0
9	17-03-1997	Terjadi gempa bumi	0
10	23-04-1997	Terjatuhnya stringer pembawa kapsul	0
11	24-04-1997	Terjadi kerusakan target HEU	1
12	08-05-1997	Kotoran benda asing di elemen bakar B-8 (I)	0
13	20-07-1998	Getaran pada beam tube S-5	0
14	03-08-1998	Bengkok pada ujung bahan bakar RI-219	0
15	18-03-2000	Seal pompa pendingin primer JE01 AP01 bocor	1
16	29-09-2000	Kerusakan target radioisotop FPM selama iradiasi	1
17	25-04-2001	Pompa sekunder PA02 AP01 mati	0
18	22-12-2002	Kebakaran panel listrik distribusi utama jalur A	0
19	30-07-2003	Kenaikan suhu sistem pendingin	0
20	19-12-2003	Kegagalan iradiasi target radioisotop FPM	1
21	24-01-2005	Kebocoran kapsul target radioisotop FPM	1
22	26-01-2005	Kenaikan radioaktivitas udara di Balai Operasi	1
23	22-06-2005	Kerusakan bahan bakar RI-362	1
24	01-03-2006	Kenaikan radioaktivitas udara di Balai Operasi	1
25	10-03-2006	Konduktivitas air primer naik hingga > 8 $\mu\text{s/cm}$	0
26	09-06-2006	Pipa pendingin sekunder jalur PA01 bocor	0
27	14-11-2011	Kopling JE01 AP03 pecah & pompa PA01 AP01 motor terbakar	0

No.	Tanggal	Kejadian	Skala INES
28	31-01-2014	Detektor neutron JKT03CX841 tidak me-respons	0
29	16-03-2015	Terdapat kotoran di atas bahan bakar pada posisi C-3	0
30	20-05-2015	Batang kendali jatuh sendiri	0

Sumber: Kuntoro (2014); PRSG (2015a)

Reaktor RSG-GAS didesain mengikuti persyaratan standar desain IAEA untuk reaktor penelitian. Dalam kondisi operasi normal, kondisi kejadian yang diantisipasi dan kondisi kecelakaan yang dipostulasikan, sistem mampu beroperasi secara selamat, yaitu reaktor selalu dapat dipadamkan, pembuangan panas peluruhan terjaga, dan pelepasan zat radioaktif ke lingkungan tidak terjadi, tetap terkungkung di dalam instalasi reaktor.

Reaktor RSG-GAS mempunyai sistem keselamatan inheren yang melekat di dalam bahan pembentuk teras reaktor. Selain itu, RSG-GAS juga dilengkapi dengan fitur keselamatan teknis (*engineered safety features*, ESF). ESF diimplementasikan dalam bentuk desain pertahanan berlapis maupun penggunaan prinsip redundan pada sistem keselamatan reaktor. Dalam mendesain reaktor digunakan prinsip gagal-selamat (*fail-safe*), yaitu setiap kegagalan yang terjadi pada sistem reaktor akan membuat reaktor *scram* (padam secara pancung) secara otomatis sehingga kriteria keselamatan dipenuhi. Sistem penghalang ganda dimulai dari desain bahan bakar reaktor, sistem pendingin reaktor, dan pengungkung reaktor yang dilengkapi dengan sistem ventilasi. Seluruh sistem keselamatan reaktor dibuat dengan menggunakan prinsip redundansi dan diversitas. Dengan adanya sistem redundan dan diversitas ini maka keandalan sistem proteksi reaktor tinggi dan risiko kegagalan kecil.

Untuk melindungi lingkungan, tingkat radioaktivitas Kawasan Nuklir Serpong selalu dipantau secara periodik, tiga bulan sekali, sampai radius 5 km. Pemantauan ini meliputi pengamatan keadaan cuaca dan pemantauan tingkat radioaktivitas lingkungan di berbagai

lokasi. Untuk melengkapi analisis juga dilakukan survei untuk mengumpulkan data tingkat radioaktivitas lingkungan dan dosis radiasi alam yang diterima oleh penduduk dalam radius 5 km di sekeliling reaktor. Survei tersebut terdiri dari:

- 1) pengukuran tingkat radiasi alam;
- 2) pengukuran radioaktivitas *gross* alfa dan beta dan spektrum gamma, serta kandungan tritium dalam sampel air; dan
- 3) pengukuran radioaktivitas *gross* alfa dan beta dari sampel tanah, tanaman, dan tumbuhan yang biasanya dimakan sapi.

Dari pengukuran radioaktivitas partikel debu di udara, yang terdiri dari pengukuran radon dan turunannya, serta pengukuran aktivitas *gross* alfa dan beta dari sampel udara, hasil pemantauan menunjukkan bahwa tidak ada pelepasan zat radioaktif ke lingkungan dari reaktor maupun Kawasan Nuklir Serpong.

B. Saran

Meskipun reaktor dibangun berdasarkan teknologi dan peraturan tahun 1980-an dan sudah beroperasi selama 28 tahun, sistem keselamatan reaktor RSG-GAS masih menunjukkan kinerja prima dan memenuhi peraturan keselamatan IAEA terbaru tahun 2005. Dengan sistem keselamatan yang ada tersebut, seluruh kecelakaan dasar desain atau kecelakaan yang diantisipasi terjadi di reaktor RSG-GAS dapat dicegah dan ditangani, terbukti dengan reaktor telah beroperasi selama lebih dari 28 tahun dengan aman dan andal untuk pemanfaatannya.

Untuk mempertahankan tingkat keselamatan reaktor RSG-GAS dalam rangka perpanjangan izin operasi, perlu dilakukan manajemen penuaan secara baik meliputi pemantauan, pengecekan, pemeliharaan dan penggantian semua sistem, komponen dan struktur reaktor, terutama untuk sistem keselamatan. Di samping itu, perlu juga dilakukan peremajaan sistem dan komponen keselamatan, terutama instrumentasi dan kendali sesuai dengan status teknologi saat ini.

Daftar Pustaka

- 45 Nuclear Plants. (t.t.). *Nuclear reactor designs*. Diakses pada 8 April, 2016, dari <http://45nuclearplants.com/nuclear-reactor-designs/>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (1992a). *Code on the safety of nuclear research reactor: Design* (IAEA Safety Series No. 35-S1). <https://www.iaea.org/publications/3800/code-on-the-safety-of-nuclear-research-reactors-design>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (1992b). *Code on the safety of nuclear research reactor: Operation* (IAEA Safety Series No. 35-S2). <https://www.iaea.org/publications/3801/code-on-the-safety-of-nuclear-research-reactors-operation>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2005). *Safety of research reactors: Safety requirements*. (IAEA Safety Standards Series No. NS-R-4). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1220_web.pdf
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2013). *INES: The international nuclear and radiological event scale user's manual* (2008 edition). <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/INES2013web.pdf>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2016). *Safety of research reactors: Specifics safety requirements* (IAEA Safety Standards Series No. SSR-3). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1751_web.pdf
- International Nuclear Safety Advisory Group. (1996). *A report by the International Nuclear Safety Advisory Group: Defence in depth in nuclear safety: INSAG-10* (INSAG Series No. 10). International Atomic

Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1013e_web.pdf

Keputusan Direktur Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran Nomor B-187/IV/HK.01.00/1/2022 tentang Pembentukan Tim Penanggulangan Kedaruratan dan Proteksi Kebakaran Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy Tahun 2022. (2022).

Keputusan Kepala Badan Riset Dan Inovasi Nasional Nomor 227/I/HK/2022 tentang Tim Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Kawasan Serpong Tahun 2022. (2022).

Kuntoro, I. (2014). Evaluasi kinerja sistem keselamatan reaktor RSG-GAS selama beroperasi 25 tahun. *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, 11(1), 1–10. <http://jurnal.batan.go.id/index.php/bprn/article/view/1316>

Lederer, B. J., & Wildberg, D. W. (1981). *Reaktorhandbuch: Kerntechnische Grundlagen für Betriebspersonal im Kernkraftwerken*. Verlag Thieme.

Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2019 tentang Izin Bekerja Petugas Instalasi dan Bahan Nuklir. (2019). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/perka-bapeten-terkait-ketenaganukliran-no-7-tahun-2019-tentang-izin-bekerja-petugas-instalasi-nuklir-dan-bahan-nuklir>

Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 Tahun 2010 tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir. (2010). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/peraturan-kepala-badan-no-1-tahun-2010-tentang-kesiapsiagaan-dan-penanggulangan-kedaruratan-nuklir>

Peraturan Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional Nomor 184/KA/IX/2012 tentang Program Kesiapsiagaan Nuklir Kawasan Nuklir Serpong. (2012). https://jdih.n.go.id/files/145/178571023Perka_Kesiapsiagaan_Nuklir.pdf

Pusat Kemitraan Teknologi Nuklir. (2012). Program kesiapsiagaan nuklir kawasan nuklir Serpong (Rev. 3).

Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG). 2011. *Laporan analisis keselamatan reaktor RSG-GAS* (Rev. 10.1).

Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG). (2015a). *Laporan operasi reaktor RSG-GAS teras ke-87 dan teras ke-88*.

- Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG). (2015b). *Program kesiapsiagaan nuklir fasilitas RSG-GAS* (No. 001.001/KN 01 02/RSG).
- Stacey, W. M. (2007). *Nuclear reactor physics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Volkmer, M. (1982). *Basiswissen zum thema kernenergie*. Hamburgerische Electricitaetes-Werke Aktiengesellschaft.
- World Nuclear Association. (t.t.). *Safety of nuclear power reactors*. Diakses pada Juni, 2022, dari <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>

Daftar Istilah

- Analisis kecelakaan : uraian jenis-jenis kecelakaan yang mungkin terjadi dari tingkat yang terkecil sampai dengan yang terparah, yang disebut dengan kecelakaan dasar desain (*design basis accidents, DBA*).
- Batasan dan kondisi operasi (BKO) : untuk memastikan bahwa reaktor dioperasikan sesuai dengan asumsi dan tujuan desain.
- Diversitas : perangkapan sistem atau komponen, tetapi dengan metode atau alat berbeda untuk satu fungsi yang sama.
- Filosofi keselamatan reaktor : *fail-safe and safety-in depth*, yaitu menerapkan teknik gagal-selamat.
- Fitur keselamatan inheren (pasif, melekat) : yaitu sistem keselamatan yang merupakan sifat alami dari sistem itu.
- Keselamatan reaktor : pengoperasian reaktor secara aman bagi manusia, instalasi dan lingkungan, baik oleh sebab pengoperasian reaktor dalam kondisi normal, gangguan dan kecelakaan maupun oleh sebab pengaruh dari luar instalasi reaktor.

- Penghalang ganda : sistem penghalang atau pengungkung radiasi secara berlapis.
- Perisai biologis : umumnya berupa beton berat yang mempunyai densitas tinggi (sekitar $3,5 \text{ ton/m}^3$) lebih rapat dibandingkan densitas beton biasa yang berharga $2,5 \text{ ton/m}^3$.
- Reaksi fisi terjadi : jika neutron menumbuk inti bahan bakar nuklir, misalnya uranium.
- Reaktor nuklir : suatu instalasi yang bekerja berdasarkan reaksi pembelahan inti atom secara berantai dan terkendali. Reaksi fisi inti berlangsung di teras reaktor, yang tersusun atas bahan bakar, moderator, reflektor, dan sumber neutron.
- Redundansi : teknik perangkapan sistem atau komponen.
- Sistem keselamatan teknis (aktif) : sistem keselamatan yang berfungsi jika dipicu oleh sistem proteksi reaktor.
- Sistem proteksi reaktor : Sistem yang berfungsi mengamati parameter keselamatan dan mematikan reaktor serta memicu sistem keselamatan jika parameter keselamatan itu dilampaui.
- Tingkat kecelakaan : Kejadian dan kecelakaan operasi dalam reaktor atau instalasi nuklir dibagi dalam 8 skala mulai skala 0 sampai dengan skala 7, yaitu skala 0 (deviasi), 1 (anomali), 2 (kejadian), 3 (kejadian serius), 4 (kecelakaan tanpa risiko lepas lokasi), 5 (kecelakaan dengan risiko lepas lokasi), 6 (kecelakaan serius), dan 7 (kecelakaan besar).

Daftar Singkatan

AGCR	: <i>Advance Gas Cooled Reactor</i>
BAPETEN	: Badan Pengawas Tenaga Nuklir
BATAN	: Badan Tenaga Nuklir Nasional
BKO	: Batasan dan kondisi operasi
BNPB	: Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BOC	: <i>Beginning of Core</i>
BPBD	: Badan Penanggulangan Bencana Daerah
BRIN	: Badan Riset dan Inovasi Nasional
BWR	: <i>Boiling Water Reactor</i>
DPFK	: Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran
DPLFRKST	: Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains dan Teknologi
FBR	: <i>Fast breeder reactor</i>
GCFBR	: <i>Gas cooled fast breeder reactor</i>
GCR	: <i>Gas Cooled Reactor</i>
GOR	: Gedung olahraga
HTGR	: <i>High Temperature Gas Cooled Reactor</i>

Humas	: Hubungan masyarakat
IAEA	: <i>International Atomic Energy Agency</i>
IRM	: Instalasi Radio Metalurgi
KNS	: Kawasan Nuklir Serpong
KO	: Pengendali Operasi
KST	: Kawasan Sains dan Teknologi
LIPI	: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
LMFBR	: <i>Liquefied Metal Fast Breeder Reactor</i>
LOCA	: <i>Loss of coolant accident</i>
Nubika	: Nuklir, biologi, dan kimia
ORTN	: Organisasi Riset Tenaga Nuklir
PHWR	: <i>Pressurized heavy water reactor</i>
PI	: Pemegang Izin
PK	: Panitia keselamatan
PO	: Pelaksana Operasi
PPIKSN	: Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir
PPR	: Petugas proteksi radiasi
PRSG	: Pusat Reaktor Serba Guna
PRTDBBNLR	: Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif
PRTF	: <i>Power ramp test facility</i>
PRTKMMN	: Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir
PTKRN	: Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir
PSTBM	: Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju
Puskodal	: Pusat komando dan pengendalian
Puspiptek	: Pusat Penelitian Ilmu dan Teknologi

PWR	: <i>Pressurized Water Reactor</i>
RKD	: Ruang Kendali Darurat
RKU	: Ruang Kendali Utama
SKT	: Sistem Keselamatan Teknis
SPR	: Sistem Proteksi Reaktor
SSE	: <i>Safe shut-down earthquake</i>
TPS	: Tindakan Perlindungan Segera
UPN	: Unit Pengamanan Nuklir
WBC	: Whole Body Counter

Indeks

- Alara, 65
Analisis Kecelakaan, 20
- Bahan Bakar, 12, 13, 14, 18, 20,
23, 24, 34, 36, 37, 38, 43,
50, 51, 54, 82, 91, 118, 119,
126, 127
Batang Kendali, 12, 34, 43, 50, 53,
54, 55, 56, 82, 88, 89, 122
Batang Kendali Bank , 55
Batang Kendali Pengatur, 55
Batas Keselamatan, 20, 21, 25, 49,
50, 51, 52, 58, 59, 64
Beton Berat, 27, 119
Bom, 10, 11
- Diesel Generator, 71, 82, 121
Diversitas, 16, 29, 30, 118, 120,
127
Dosis Radiasi, 96, 128
- Elemen Bakar, 34, 36, 42, 43, 50,
51, 54, 58, 59, 70, 72, 73,
74, 75, 79, 80, 118, 126
- Elemen Kendali, 34, 36, 73, 74, 75,
89
- Faktor Kanal Panas, 56, 58, 59
Fasilitas Iradiasi, 2, 35, 37, 76
Filosofi Keselamatan Reaktor, 13, 30
Fluks Neutron, 2, 34, 59, 120
Fraksi Bakar, 53, 54, 118, 119
- Gagal-Selamat, 13, 30, 44, 70, 118,
122,127
Gempa Bumi, 31, 76, 86, 122
Hamburan Neutron, 2, 37
Hasil Belah, 6, 118
- Ines, 22, 23, 125, 126, 129
Inheren, 44, 118, 127
Isolasi Pengungkung, 51, 52, 66, 67
- Kecelakaan Dasar Desain, 3, 17, 19,
33, 42, 53, 80, 128
Kedaruratan Nuklir, 92, 93, 98, 99,
100, 107, 115, 116, 130

Kejadian Operasi, 22, 33, 106, 107, 125
 Kelongsong Bahan Bakar, 20
 Keselamatan Reaktor, 3, 13, 14, 15, 20, 25, 27, 29, 30, 31, 33, 42, 44, 51, 80, 89, 118, 119, 123, 125, 127, 128
 Kondisi Kritis, 34
 Kondisi Stuck Rod, 55
 Kriteria Keselamatan, 3, 14, 15, 44, 127
 Laju Alir, 40, 43, 51, 57, 63, 81
 Lak, 20
 Lepas Kawasan, 93, 99, 105
 Margin Padam, 54, 55
 Marshall Yard, 115
 Mitigasi, 17, 18, 19, 92, 106, 114
 Mode Operasi, 49, 50, 51, 52
 Moderator, 7, 8, 9, 118
 Neutron, 1, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 30, 34, 37, 41, 59, 82, 85, 120
 Operasi Daya, 49, 50, 51, 60, 62, 63, 70
 Operasi Daya Rendah, 50, 51
 Pendingin, 8, 9, 11, 18, 24, 29, 40, 41, 42, 43, 51, 52, 53, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 71, 74, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 91, 120, 122, 126
 Penghalang Ganda, 27, 118, 127
 Pengungkuh Keselamatan, 87, 88
 Perisai Radiasi, 9, 60, 119
 Persyaratan Pengawasan, 20, 21, 49, 79
 Pertahanan Berlapis, 3, 13, 15, 16, 19, 30, 33, 44, 127
 PLTN, 12, 16, 23, 24, 27, 37
 Posisi Iradiasi, 1, 34
 Produk Fisi, 6, 7, 13, 119
 Radiasi, 1, 2, 6, 7, 11, 14, 26, 30, 46, 60, 61, 65, 66, 83, 87, 90, 95, 96, 103, 105, 109, 110, 111, 118, 119, 128
 Radioisotop, 1, 2, 7, 33, 37, 41
 Reaktivitas, 27, 43, 44, 53, 54, 55, 57, 73, 74, 78, 79, 118
 Reaktivitas Padam, 36, 53, 54, 55, 78
 Reaktor Daya, 7, 9, 12, 16, 37
 Reaktor Nuklir, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 22, 29, 30, 125, 134
 Reaktor Penelitian, 7, 8, 10, 33, 54, 127
 Redundansi, 16, 29, 30, 80, 81, 88, 91, 118, 127
 Reflektor, 5, 9, 24, 34, 57, 72, 73, 75, 78, 83
 Ruang Kendali, 18, 45
 Sistem Keselamatan, 3, 13, 15, 16, 18, 20, 21, 30, 33, 49, 51, 59, 71, 72, 80, 84, 87, 89, 118, 122, 123, 125, 127, 128
 Sistem Keselamatan Teknis, 18, 26, 80, 84

Sistem Pendingin, 8, 9, 11, 18, 26,
40, 41, 42, 43, 53, 58, 59,
60, 61, 62, 71, 74, 80, 82,
83, 84, 122, 126

Sistem Penghalang Ganda, 27, 118,
127

Sistem Proteksi Reaktor, 25, 26, 30,
51, 52, 59, 64, 71, 80, 85,
88, 89, 91, 92, 119, 127

Sistem Tekanan Rendah, 66, 67, 68,
87

Sistem Ventilasi, 27, 53, 68, 69, 80,
119, 123, 127

Start-Up, 49, 50, 56, 69, 70, 91

Tabung Berkas Neutron, 37, 85

Tahan Gempa, 45, 83, 85, 86, 88,
90, 91, 92, 122

Teras Reaktor, 1, 5, 8, 9, 18, 26, 34,
37, 40, 41, 42, 43, 57, 74,
75, 118, 119, 127

Tingkat Kecelakaan, 3, 21

Tingkat Kedaruratan, 92, 107

Topas, 37, 41

Triage, 115

Tentang Penulis



Iman Kuntoro, lahir di Purwokerto, 4 Oktober 1954, ialah Peneliti Ahli Utama di Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir BRIN. Penulis menyelesaikan jenjang pendidikan S-1 di Fakultas Teknik UGM Jurusan Teknik Nuklir spesialisasi Teknologi Reaktor pada tahun 1980 dengan gelar Insinyur.

Pendidikan tambahan: Supervisor Reaktor Kartini BATAN (2 bulan, 1982, Yogyakarta). Kualifikasi Operator/Supervisor MPR-30 BATAN (1987, Jakarta); Winter College on Nuclear Physics and Reactors (ICTP-IAEA, 2 bulan, 1982, Trieste, Italia); Multipurpose Reactor Operator, Interatom (1 tahun, 1984/1985 di Jerman); ITC on Safety in the Operation of Nuclear Research Reactors (1 bulan, 1990, ANL, Amerika Serikat); Joint research BATAN-JAERI (2 bulan, 1991, Tokai, Jepang); Workshop Training on Core Management for Improved Utilization of Research Reactors, KAERI-IAEA (2 minggu, 2002, Daejeon, Korea); Diklat SPAMA (3 bulan, 1998, Jakarta); Diklat Kepemimpinan Tingkat II, LAN, Jakarta (3 bulan, 2003); Program Pendidikan Reguler Angkatan (PPRA) IX LEMHANNAS (Tahun 2007, Jakarta).

Penulis masuk ke BATAN pada 1 Januari 1978 sebagai staf di Dinas Reaktor PPBMI, Yogyakarta. Jabatan struktural yang pernah disandang adalah Kasubbid. Bahan Bakar Reaktor PPBMI (1981–1985), Kasubbid. Operasi Reaktor PRSG (1985–1986), Kabid. Operasi Reaktor PRSG (1986–1992), Kabid. Fisika Reaktor PRSG (1992–1996), Kabag. Tata Usaha PRSG

(1999), Kabid. Pengembangan Teknologi Reaktor P2TRR (1999–2002), Kepala Pusat P2TRR (2002–2007), dan Kepala Pusat PTBIN (2008–2011).

Penulis menempuh jabatan fungsional peneliti di bidang teknologi reaktor nuklir pertama kali sebagai Ajun Peneliti Muda (1-8-1989) dan mencapai Ahli Peneliti Utama di PTKRN BATAN (1-2-2005) dengan karya tulis ilmiah lebih dari 110 buah. Selain itu, penulis telah memperoleh Tanda Kehormatan Satyalancana Karya Satya 10 tahun (1997), 20 tahun (1999), 30 tahun (2009), dan Satya Lencana Wira Karya dalam bidang pengoperasian, penelitian, dan pengembangan reaktor riset (18-8-2006).

Tugas luar negeri: Partisipasi Desain Reaktor MPR-30 di Interatom, Jerman (6 bulan, 1983); Manajemen Operasi Reaktor Riset di JAERI, Jepang (2 bulan, 1988); Analisis Keselamatan In Pile Loop di Ansaldo, Itali (1 bulan, 1994); Partisipasi Desain TC-ISFSF di AEA, Inggris (5 minggu, 1997); mengikuti beberapa *workshop* tentang utilization of research reactor dan reactor safety di Jepang (1999), Australia (2003), Korea (2003), Vietnam (2004), Thailand (2005), dan Tiongkok (2006); Kunjungan Ilmiah Quality Assurance of Nuclear Laboratory di Belgia dan Belanda (2003); mengikuti beberapa kali technical meeting IAEA dalam bidang reactor safety di Wina, Austria (2003–2006).

Kegiatan ilmiah: mengikuti berbagai fora pertemuan ilmiah seperti seminar, lokakarya, serta kolokium tingkat instansi dan nasional; seminar, *workshop*, *technical meeting* regional dan internasional, seperti Asian Symposium on Research Reactors, ASSR-II dan III (1989 dan 1991); IAEA Design Basis Threat Workshop, Yogyakarta (16–20 Desember 2002); The FNCA Workshop on Utilization of Research Reactor (1999, 2003, dan 2004); Training on Technology Management and Innovation, Kemenristek-UNIDO/ICS (Sentul, Bogor, 11–15 Agustus 2003).

Penulis juga mengajar pada diklat yang diselenggarakan oleh Pusdiklat BATAN, antara lain Diklat Teknologi Reaktor dan Pemanfaatan RSG, Diklat In Core Fuel Management, Diklat Operator dan Supervisor RSG-GAS, RTC on Measurement of Basic Parameter of Research Reactor, Diklat Aspek Neutronik dan Termohidraulika PLTN I, Diklat Basic Professional Training on Nuclear Safety, dan Pelatihan Perawat Reaktor.

Kegiatan lain: terlibat dalam Tim Pembangunan Reaktor Kartini (1979); Tim Desain RSG-GAS (1983); Tim Komisioning RSG-GAS (1985–1987); dan Panitia Keselamatan RSG-GAS (1988–2022).

KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR REAKTOR SERBA GUNA G.A SIWABESSY (RSG-GAS)

Pembicaraan mengenai nuklir, bagi sebagian atau kebanyakan orang, otomatis merujuk pada pembuatan bom atom. Yang terkenal, bom atom Nagasaki dan Hiroshima yang sempat mengguncang Jepang pada 1945. Belum lagi dampak radiasi akibat teknologi tersebut.

Padahal sebenarnya reaktor nuklir bukanlah bom atom. Potensi bahaya radiasi memang benar ada, tetapi dengan kemajuan teknologi dan sifat alami anugerah dari Allah, teknologi reaktor nuklir telah dikuasai manusia dan terus berkembang ke arah yang lebih selamat (aman). Dengan memahami teknologi keselamatan reaktor ini, semoga tingkat kekhawatiran masyarakat terhadap reaktor nuklir dapat diminimalkan.

Untuk lebih memahami bagaimana teknologi reaktor, manfaat, dan potensi bahayanya, serta bagaimana tingkat keselamatan dan keamanannya, silakan membaca buku ini.



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung BJ Habibie, Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.568



ISBN 978-623-8052-51-6



9 786238 052516