

Iman Kuntoro  
Surian Pinem

# Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS

Buku ini tidak diperjualbelikan.



# **Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (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/>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Iman Kuntoro  
Surian Pinem

# Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2024 Iman Kuntoro & Surian Pinem

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS/Iman Kuntoro & Surian Pinem–Jakarta:  
Penerbit BRIN, 2024.

xviii + 96 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-623-8372-74-4 (*e-book*)

- |                    |                        |
|--------------------|------------------------|
| 1. Reaktor Nuklir  | 2. Pengelolaan Reaktor |
| 3. Operasi Reaktor | 4. Keselamatan Reaktor |
| 5. RSG-GAS         |                        |

621.483

Editor Akuisisi : Anggy Denok Sukmawati  
*Copy editor* : Mulyani & Martinus Helmiawan  
*Proofreader* : Sarah Fairuz  
Penata isi : Hilda Yunita  
Desainer Sampul : Hilda Yunita

Edisi Pertama : Agustus 2024



Diterbitkan oleh:  
Penerbit BRIN, anggota Ikapi  
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah  
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No. 8,  
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,  
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340  
Whatsapp: +62 811-1064-6770  
*E-mail*: penerbit@brin.go.id  
*Website*: penerbit.brin.go.id  
 Penerbit BRIN  
 @penerbit\_brin  
 @penerbit.brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.



# DAFTAR ISI

Daftar Gambar.....	vii
Daftar Tabel.....	ix
Pengantar Penerbit.....	xi
kata pengantar .....	xiii
Prakata .....	xv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>BAB 2 REAKTOR RSG-GAS.....</b>	<b>5</b>
A. Pembangunan Reaktor RSG-GAS.....	5
B. Desain Reaktor RSG-GAS .....	12
C. Penggunaan Reaktor RSG-GAS .....	15
<b>BAB 3 OPERASI KOMISIONING REAKTOR RSG-GAS.....</b>	<b>23</b>
A. Komisioning Reaktor .....	24
B. Program Komisioning Reaktor RSG-GAS.....	27
C. Hasil Komisioning Reaktor RSG-GAS.....	32
<b>BAB 4 OPERASI TERAS TRANSISI REAKTOR RSG-GAS.....</b>	<b>41</b>
A. Program Operasi Teras Transisi.....	41
B. Hasil Operasi Teras Transisi .....	45
<b>BAB 5 OPERASI RUTIN REAKTOR RSG-GAS.....</b>	<b>49</b>
A. Teras Kerja .....	49
B. Siklus Operasi.....	53
C. Neraca Reaktivitas .....	56
D. Pengendalian Reaktivitas .....	58

BAB 6	TEKNIK PENGOPERASIAN REAKTOR RSG-GAS.....	63
A.	Moda Operasi.....	63
B.	Teknik Operasi Reaktor RSG-GAS .....	64
Penutup	.....	79
Glosarium.....		83
Daftar Pustaka .....		89
Tentang Penulis .....		93
Indeks .....		95

Buku ini tidak diperjualbelikan.



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penandatanganan Kontrak Pengadaan Reaktor dan Bahan Bakar .....	6
Gambar 2.2	Pengerasan Tanah untuk Penyiapan Fondasi Bangunan Reaktor .....	8
Gambar 2.3	Pembangunan Gedung Reaktor .....	8
Gambar 2.4	Pemasangan Dinding Kolam Reaktor .....	8
Gambar 2.5	Pemasangan Komponen pada Bagian Kolam Reaktor.....	9
Gambar 2.6	Pemasangan Sistem Pendingin Primer .....	9
Gambar 2.7	Pemasangan Sistem Penukar Panas .....	9
Gambar 2.8	Pemasangan Ruang Kendali Utama.....	9
Gambar 2.9	Peresmian Reaktor RSG GAS oleh Presiden Republik Indonesia Soeharto .....	10
Gambar 2.10	Konfigurasi Teras Pertama RSG-GAS dengan Pesan Presiden Soeharto .....	11
Gambar 2.11	Dimensi Elemen pada Reaktor RSG-GAS (Satuan mm): (a) Elemen Bakar FE; (b) Elemen Kendali CE di RSG-GAS .....	14
Gambar 2.12	Reaktor RSG-GAS dan Laboratorium Penunjang di Kawasan Nuklir Serpong.....	15
Gambar 2.13	Peralatan Pendukung Eksperimen di RSG-GAS .....	18
Gambar 2.14	Peralatan Eksperimen pada Tabung Pengarah S-5 .....	19
Gambar 2.15	Bentuk Hasil Radioisotop dan Radiofarmaka .....	20
Gambar 2.16	Warna Kebiruan Batu Topaz sesudah Irradiasi di Reaktor.....	21

Gambar 3.1	Sertifikat Penerimaan Akhir Pengadaan Reaktor RSG-GAS.....	34
Gambar 3.2	Konfigurasi Teras Reaktor pada Saat Tercapai Kondisi Kritis Pertama.....	35
Gambar 3.3	Konfigurasi Teras-1.....	37
Gambar 3.4	Sinar Biru yang Tampak dari Fenomena Radiasi Cherenkov pada Saat Operasi Reaktor RSG-GAS .....	39
Gambar 4.1	Konfigurasi Teras 1 hingga Teras 6 RSG-GAS .....	44
Gambar 5.1	Konfigurasi Teras Kerja RSG-GAS dengan Pola 6/1 .....	51
Gambar 5.2	Konfigurasi Teras Kerja Reaktor RSG-GAS dengan Pola 5/1.....	52
Gambar 5.3	Satu Siklus (Daur) Operasi Reaktor RSG-GAS .....	54
Gambar 5.4	Satu Siklus (Daur) Operasi RSG-GAS dengan Pola Pemuatan 5/1 .....	56
Gambar 6.1	Perubahan Fluks Neutron pada Proses <i>Start-up</i> Reaktor.....	68
Gambar 6.2	Diagram Pengendalian Daya Otomatis Reaktor RSG-GAS.....	70
Gambar 6.3	Reaktivitas Xenon Sebagai Fungsi Waktu dan Daya Reaktor.....	71
Gambar 6.4	Reaktivitas Xenon sebagai Fungsi Waktu pada Saat Penurunan Daya Reaktor .....	72
Gambar 6.5	Reaktivitas Xenon Sebagai Fungsi Waktu pada Peningkatan Daya Reaktor .....	73
Gambar 6.6	Dinamika Reaktivitas Xenon sebagai Fungsi Waktu pada Daya 18MW Diikuti dengan Pemadaman Reaktor.....	75
Gambar 6.7	Dinamika Peracunan Xenon pada Kasus <i>Restart-up</i> Reaktor.....	77
Gambar 7.1	Perpanjangan Izin Operasi Reaktor RSG-GAS.....	81



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kegiatan Antarmuka dari Lingkup Pengadaan BATAN (B) – INTERATOM (IA).....	7
Tabel 2.2	Data Geometri Perangkat Elemen Bakar dan Elemen Kendali Reaktor RSG-GAS.....	13
Tabel 2.3	Fasilitas Iradiasi dan Eksperimen pada Reaktor RSG-GAS ..	17
Tabel 3.1	Program Komisioning Reaktor RSG-GAS.....	28
Tabel 3.2	Daftar Kegiatan Uji Komisioning Nuklir.....	30
Tabel 3.3	Parameter Neutronik Teras-1.....	39
Tabel 3.4	Parameter Termal-hidrolika Teras-1 .....	40
Tabel 4.1	Program Pengoperasian dan Pembentukan Teras Penuh .....	42
Tabel 4.2	Pelaksanaan Operasi Teras Transisi .....	42
Tabel 4.3	Hasil Komisioning Parameter Bahan Bakar Teras Transisi ..	45
Tabel 4.4	Parameter Nuklir Teras Kerja Teras-6.....	46
Tabel 4.5	Parameter Termal-hidrolika Teras Teras-6 .....	47
Tabel 5.1	Neraca Reaktivitas Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS Pola 6/1 .....	57
Tabel 5.2	Neraca Reaktivitas Pola Pemuatan 5/1.....	58
Tabel 5.3	Karakteristik Batang Kendali Reaktor RSG-GAS .....	59
Tabel 5.4	Karakteristik Batang Kendali Pengatur RSG-GAS .....	59

Buku ini tidak diperjualbelikan.



# 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.

Pada tanggal 20 Agustus 1987, Indonesia telah mengukir sejarah dengan diresmikannya Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) yang merupakan sarana penelitian utama di Kawasan Nuklir Serpong. RSG-GAS menjadi salah satu pencapaian penting di bidang ketenaganukliran Indonesia karena RSG-GAS merupakan desain reaktor daya dengan fluks neutron tinggi pertama di dunia yang menggunakan bahan bakar uranium dengan pengayaan rendah sehingga pencapaian kondisi kritis pertama RSG-GAS juga dinantikan oleh penggiat reaktor nuklir di dunia.

Buku *Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS* ini hadir tidak hanya untuk membahas proses pembangunan dan perancangan desain RSG-GAS, tetapi juga menjelaskan prinsip-prinsip pengoperasian reaktor RSG-GAS selama masa hidupnya, mulai dari operasi komisioning, operasi teras transisi, hingga operasi rutin dan penggunaan dengan teras kerjanya. RSG-GAS telah didesain dengan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

masa hidup reaktor 30 tahun, namun di tahun 2017, reaktor ternyata masih dapat beroperasi dengan baik dan selamat. Hal tersebut mengindikasikan bahwa sebagian besar sistem dan komponen masih dapat menjalankan fungsinya sehingga syarat keselamatan nuklir dapat dipenuhi.

Selain itu, buku ini juga disusun oleh para penulis yang terlibat langsung dalam tahap pengoperasian reaktor, dimulai dari tahap desain sampai dengan tahap pengoperasian dan penggunaan reaktor saat ini sehingga informasi yang disajikan tersebut dikemas dengan cukup sederhana, jelas, dan runtut. Melalui informasi yang disajikan dalam buku ini, para penulis berharap dapat menunjukkan kepada masyarakat bahwa pengoperasian reaktor nuklir termasuk penggunaan nuklir untuk tujuan damai telah mampu dilakukan oleh putra-putri Indonesia.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat bermanfaat bagi para teknisi di bidang reaktor nuklir, seperti operator reaktor, supervisor reaktor, petugas proteksi radiasi, pengguna dan periset reaktor nuklir, serta pengawas tenaga nuklir. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.



## KATA PENGANTAR

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) adalah reaktor nuklir ketiga milik Indonesia yang sebelumnya dioperasikan oleh (Badan Tenaga Nuklir Nasional) BATAN dan kini telah terintegrasi dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Reaktor telah dibangun dan dioperasikan sejak tahun 1983 sebagai fasilitas utama untuk pengembangan industri nuklir di Kawasan Sains dan Teknologi BJ Habibie Serpong. Reaktor telah mengabdikan kepada negara melalui penelitian teknologi nuklir, produksi radioisotop, analisis aktivasi neutron, serta pengembangan sumber daya manusia di bidang nuklir. Oleh karena itu, perlu adanya sosialisasi atau penyampaian informasi terkait operasi dan pemanfaatan reaktor nuklir kepada masyarakat luas. Salah satunya adalah melalui penerbitan buku yang berjudul *Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS ini*.

Buku ini membahas tentang pengelolaan reaktor nuklir RSG-GAS, yang meliputi tahap desain, pembangunan, komisioning, operasi, dan penggunaannya semenjak beroperasi selama 35 tahun. Buku ini ditulis oleh pihak-pihak yang terlibat dan mengikuti tahap pengoperasian reaktor, dimulai dari tahap desain sampai dengan tahap pengoperasian dan penggunaan reaktor saat ini sehingga cukup jelas dan runtut penyajiannya. Dengan penyajian yang cukup sederhana tentang pengelolaan reaktor riset nuklir, buku ini diharapkan dapat memberi gambaran dan menumbuhkan kepercayaan pada masyarakat

Buku ini tidak diperjualbelikan.

bahwa putra-putri Indonesia telah mampu mengoperasikan reaktor nuklir termasuk penggunaan nuklir untuk tujuan damai.

Buku ini juga diharapkan dapat memberikan manfaat bagi para pegiat teknis di bidang reaktor nuklir, seperti operator reaktor, supervisor reaktor, petugas proteksi radiasi, pengguna dan periset reaktor nuklir, serta pengawas tenaga nuklir.

Serpong, November 2023

Kepala Pusat

PRTRN ORTN BRIN

Dr. Topan Setiadipura

Buku ini tidak diperjualbelikan.



## PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah Tuhan Yang Maha Kuasa, karena atas ridho-Nya, penyusunan buku yang berjudul *Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS* (Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy) telah selesai. RSG-GAS merupakan reaktor riset nuklir ketiga yang dimiliki oleh Indonesia dan dioperasikan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). RSG-GAS berada di Kawasan Nuklir Serpong, di dalam Kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) milik Kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi, yang semenjak September 2021, bersama lembaga penelitian lainnya dilebur menjadi Badan Riset dan Inovasi (BRIN) di Kawasan Sains dan Teknologi (KST) BJ Habibie Serpong, Tangerang Selatan. Reaktor RSG-GAS dioperasikan oleh Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK-BRIN) yang sebelumnya bernama Pusat Reaktor Serba Guna BATAN.

Selama masa hidupnya, suatu reaktor nuklir memiliki 5 tahapan, yaitu tahap desain, pembangunan, komisioning, operasi, dan terakhir adalah tahap dekomisioning. Buku ini membahas tentang kinerja pengoperasian reaktor nuklir RSG-GAS dimulai dari tahap komisioning, operasi transisi, operasi rutin serta penggunaannya, dan diakhiri dengan teknis pengoperasian reaktor nuklir RSG-GAS. Pada beberapa bagian, disajikan pula secara ringkas mengenai tahapan desain dan tahap pembangunan reaktor. Tahap dekomisioning atau

Buku ini tidak diperjualbelikan.

tahap penghentian operasi untuk selamanya belum dibahas dalam buku ini karena walaupun usia reaktor sudah melampaui usia desain awalnya, reaktor RSG-GAS melakukan perpanjangan izin operasi pada bulan Desember 2020. Perpanjangan izin operasi diajukan kepada Badan Pengawas Tenaga Nuklir dengan pertimbangan dan penilaian terhadap kondisi instalasi reaktor yang masih memenuhi persyaratan keselamatan reaktor.

Materi yang disampaikan dalam buku ini mencakup topik-topik yang telah penulis jalani selama bekerja di Pusat Reaktor Serba Guna BATAN, mulai tahun 1986. Para penulis bersama-sama menyusun materi di setiap bagian operasi reaktor. Iman Kuntoro menambahkan materi tahap desain dan pembangunan reaktor yang telah diikuti mulai tahun 1983, dan juga berpartisipasi dalam desain dan pelatihan operator reaktor di Interatom GmbH Jerman Barat. Surian Pinem lebih berfokus pada penyajian kegiatan selama komisioning dan operasi reaktor.

Besar harapan bahwa buku ini dapat memberikan manfaat bagi para pegiat teknis di bidang reaktor, nuklir seperti operator reaktor, supervisor reaktor, petugas proteksi radiasi, pengguna dan periset reaktor nuklir, serta pengawas tenaga nuklir. Selain itu, penulis berharap buku ini dapat dimanfaatkan oleh masyarakat luas untuk memahami prinsip kerja reaktor nuklir.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kepala Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir BATAN, yang kini menjadi Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN- BRIN), atas dorongannya untuk berkarya dalam bentuk tulisan (buku). Terima kasih juga kami sampaikan kepada Kepala Pusat Reaktor Serba Guna BATAN (PRSG), yang kini menjadi Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK-BRIN), beserta staf-staf yang telah mengizinkan dan membantu memberikan akses data dan dokumentasi terkait reaktor RSG-GAS, terutama kepada bapak Joko

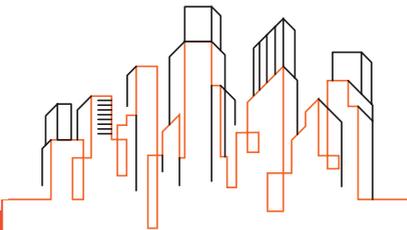
Sularto, Sigit Purwanto, Dwi Haryanto, dan Suwoto. Selanjutnya, penulis sangat mengharap saran dan kritik dari para pembaca untuk menyempurnakan buku ini.

Serpong, November 2023

Penulis

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



# 1 PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (reaktor RSG-GAS) di Serpong merupakan reaktor penelitian ketiga yang dimiliki oleh Indonesia setelah reaktor TRIGA 2000 di Bandung dan reaktor Kartini di Yogyakarta. Di antara ketiga reaktor riset ini, reaktor RSG-GAS merupakan reaktor riset yang mempunyai daya termal terbesar, yakni 30 MW. Reaktor RSG-GAS didesain dan dibangun oleh Interatom GMBH dari Republik Federasi Jerman Barat. Pembangunan reaktor berlangsung mulai dari bulan Mei 1983 dan reaktor mencapai kondisi kritis pada bulan Juli 1987. Setelah melalui teras transisi pada bulan Maret 1992, RSG-GAS berhasil mencapai teras kerja pada daya 30 MW.

Dalam proses pembangunan dan operasi reaktor RSG-GAS, banyak hal yang dilakukan agar reaktor dapat beroperasi dengan selamat. Pembangunan dan pengoperasian reaktor nuklir memiliki sejumlah perbedaan dari pembangkit lainnya karena terdapat beberapa standar yang ditentukan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dan Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency*, disingkat IAEA).

Dalam pengoperasian reaktor pengetahuan tentang komisioning reaktor menjadi sangat penting dalam melaksanakan prinsip-prinsip keselamatan operasi. Hasil uji komisioning yang dilakukan selama pembentukan teras kerja menjadi hal yang sangat penting untuk

menjamin keselamatan operasi reaktor. Selain itu, teknik pengoperasian reaktor memiliki peran yang penting dalam pengendalian reaktor untuk dapat beroperasi dengan selamat. Selain dituntut untuk memahami peran parameter teras terhadap operasi reaktor, operator dan supervisor pada sebuah reaktor nuklir juga harus memiliki pengetahuan teknis untuk mengoperasikan setiap sistem pendukung operasi reaktor.

Pengalaman yang dipetik selama kegiatan desain, komisioning, dan operasi reaktor RSG-GAS dapat digunakan sebagai pembelajaran pada kegiatan rutin pengoperasian reaktor riset maupun pembangunan reaktor baru di Indonesia. Buku dengan judul *Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS* ini disusun dalam rangka memahami proses komisioning dan teknik pengoperasian reaktor.

Dalam buku ini, penulis akan menyajikan prinsip-prinsip pengoperasian reaktor RSG-GAS, mulai dari operasi komisioning, operasi teras transisi, hingga operasi rutin. Pengalaman komisioning yang disajikan dalam buku ini diharapkan dapat menjadi pembelajaran untuk evaluasi desain teras reaktor riset. Teknik pengoperasian reaktor yang disajikan, meliputi pola pengoperasian, mode pengoperasian, karakteristik operasi, dan teknik dasar pengoperasian reaktor.

Buku ini membahas tentang pembangunan reaktor, komisioning, teras transisi, operasi rutin, dan teknis pengoperasian reaktor nuklir RSG-GAS. Bab II dengan judul Reaktor RSG-GAS menjelaskan tentang sejarah pembangunan reaktor dan desain serta penggunaan reaktor. Bab III menjelaskan tentang Komisioning Reaktor RSG-GAS. Setelah pembangunan reaktor nuklir selesai, komisioning bagian nuklir dan non-nuklir dilakukan untuk mengetahui apakah desain telah berfungsi dengan baik sehingga reaktor beroperasi dengan selamat. Bab IV menjelaskan tentang Operasi Teras Transisi Reaktor RSG-GAS. Teras transisi dilakukan setelah Teras-1 beroperasi sesuai dengan desain. Teras transisi melalui proses penambahan bahan bakar secara bertahap mulai dari Teras-2 hingga Teras-6. Pengukuran parameter teras reaktor pada setiap tahap teras transisi dilakukan untuk memberikan jaminan bahwa reaktor dapat beroperasi dengan

selamat sampai pada daya nominal 30 MW. Bab V menjelaskan tentang Operasi Rutin Reaktor RSG-GAS. Setelah mencapai teras kerja maka operasi rutin RSG-GAS dapat dilakukan sesuai dengan kebutuhan penggunaan reaktor. Teras kerja reaktor RSG-GAS dapat dioperasikan secara rutin dengan panjang siklus 25 hari pada daya penuh 30 MW. Manajemen teras reaktor RSG-GAS menggunakan skema pemuatan *scattered*, yaitu kombinasi pemuatan luar-ke tengah dan tengah-keluar. Bahan bakar segar dimasukkan di tepi luar teras, kemudian diikuti dengan pergeseran ke tengah. Skema pergeseran bahan bakar yang telah mengalami pembakaran ditentukan berdasarkan hasil perhitungan manajemen teras untuk mendapatkan konfigurasi teras yang memenuhi kriteria keselamatan. Bab VII menjelaskan tentang Teknik Pengoperasian Reaktor RSG-GAS. Sebelum reaktor dioperasikan, persyaratan operasi reaktor harus dipenuhi secara administrasi dan teknis. Reaktor dipersiapkan melalui pembentukan konfigurasi teras dengan pola pemasukan bahan bakar dan penentuan fraksi bakar serta panjang siklus operasi. Pengoperasian reaktor RSG-GAS harus dilakukan dengan mode operasi yang disesuaikan dengan tujuan operasi dan kondisi reaktor. Agar reaktor dapat beroperasi dengan selamat maka penguasaan teknik pengoperasian reaktor pada berbagai kondisi daya menjadi hal yang sangat penting untuk menjamin keselamatan reaktor.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



## 2

# REAKTOR RSG-GAS

Reaktor RSG-GAS didesain dan dibangun oleh Interatom GmbH dari Republik Federasi Jerman Barat, sedangkan bangunan sipil dan prasarana fisik dikerjakan oleh kontraktor dalam negeri. Dalam operasionalnya, RSG-GAS dijalankan oleh tenaga ahli Indonesia. Reaktor RSG-GAS adalah reaktor serba guna sehingga dapat digunakan untuk berbagai kegiatan penelitian hingga produksi radioisotop untuk aplikasi di bidang kesehatan, lingkungan, industri, uji material, dan percobaan ilmu pengetahuan.

### A. PEMBANGUNAN REAKTOR RSG-GAS

Dalam rangka mempersiapkan sumber daya manusia yang kompeten untuk melaksanakan program industri nuklir maka pemerintah memulai pembangunan reaktor riset daya tinggi. Setelah melalui tahapan proses pengadaan, kontrak pengadaan reaktor dimenangkan oleh INTERATOM GmbH Jerman Barat. Setelah melalui proses diskusi dengan pihak BATAN, dalam perkembangannya, daya reaktor yang awalnya disebut dengan MPR-30 (*Multipurpose Reactor-30MW*) ini akhirnya disepakati menjadi 30 MW.

Pembangunan reaktor MPR-30 dilaksanakan berdasarkan kontrak antara BATAN dan INTERATOM yang telah ditandatangani oleh Direktur Jenderal BATAN waktu itu, Prof. Dr. Achmad Baiquni

dan Manajer INTERATOM GmbH, Mr. Kotzrewa pada tanggal 5 Juni 1982, di Kantor Pusat BATAN Jakarta seperti terlihat pada Gambar 2.1 (BATAN, 1982). Jenis kontrak yang dipilih adalah “Proyek Putar Kunci” atau “*Turn Key Project*”, yaitu seluruh kegiatan pembangunan mulai dari desain sampai dengan reaktor beroperasi dilaksanakan dan menjadi tanggung jawab pemasok INTERATOM, sesudah itu diserahkan kepada pihak pembeli, yaitu BATAN. Namun demikian, dalam kerangka alih teknologi, tertulis dalam kontrak bahwa pihak pemasok akan melibatkan personil BATAN dalam setiap kegiatan, termasuk pelatihan para operator supervisor reaktor dan pemelihara sistem reaktor. Secara garis besar, daftar kegiatan antarmuka dan lingkup pengadaan antara BATAN dan INTERATOM dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Sumber: BATAN (1982)

**Gambar 2.1** Penandatanganan Kontrak Pengadaan Reaktor dan Bahan Bakar

Buku ini tidak diperjualbelikan.

**Tabel 2.1** Kegiatan Antarmuka dari Lingkup Pengadaan BATAN (B) – INTERATOM (IA)

No.	Uraian	Desain Dasar	Desain Detail	Pengadaan	Supervisi Fabrikasi & Konstruksi	Uji Penerimaan		Tanggung Jawab
						Non Nuklir	Nuklir	
1	Fondasi	IA (B)	IA (B)	B	IA (B)	IA (B)	-	IA
2	Konstruksi sipil Gedung administrasi dan menara pendingin	IA (B)	B	B	IA (B)	IA (B)	-	IA
3	Konstruksi sipil gedung reaktor dan disel	IA (B)	IA (B)	B	IA (B)	IA (B)	-	IA
4	Sistem dan komponen elektrik dan mekanik	IA (B)	IA (B)	IA	IA (B)	IA (B)	B (IA)	IA

Keterangan: IA: INTERATOM, B: BATAN, (-): dilibatkan

Desain dasar reaktor RSG-GAS dilaksanakan oleh INTERATOM, perusahaan Jerman Barat yang dimiliki oleh perusahaan Kraftwerk Union (KWU). Detail desain seluruh komponen reaktor, gedung reaktor, seluruh sistem proses, dan sistem yang berhubungan dengan keselamatan dibuat pula oleh INTERATOM. Detail desain struktur penunjang yang mencakup gedung bantu, gedung operasi, menara pendingin, dan pekerjaan infrastruktur dikerjakan INTERATOM sebagai kontraktor utama untuk desain reaktor dan pemasok elemen bakar nuklir. Elemen bakar nuklir pada awalnya dibuat dan dipasok oleh NUKEM GmbH yang merupakan sub-kontraktor INTERATOM.

Pembangunan dimulai pada bulan Mei tahun 1983. Kegiatan penyelidikan aspek ketanahan untuk menentukan tapak dan fondasi berdasarkan desain dilakukan oleh *INTERATOM*. Kegiatan penggalian (ekskavasi) sampai level -14 m, pengisian kembali (*backfitting*) dan pemadatan sampai level -12 m siap untuk pengerjaan fondasi. Gedung reaktor, gedung bantu, dan gedung generator diesel sendiri dilakukan oleh PT. Hutama Karya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Sedangkan pelaksanaan konstruksi struktur sipil gedung operasi (gedung administrasi) dilakukan oleh PT. Adhi Karya seperti Gambar

2.3. Perusahaan PT. Purna Bina Indonesia dan Sub-kontraktor Bechtel National Inc. membantu BATAN dalam kegiatan manajemen proyek RSG-GAS dan instalasi nuklir lainnya di Serpong. Pemasangan sistem reaktor dilakukan oleh INTERATOM, seperti terlihat pada Gambar 2. 4–2. 8.



Foto: Dokumen Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG, 1986)

**Gambar 2.2** Pengerasan Tanah untuk Penyiapan Fondasi Bangunan Reaktor



Foto: Dokumen PRSG (1986)

**Gambar 2.3** Pembangunan Gedung Reaktor

Foto: Dokumen PRSG (1986)

**Gambar 2.4** Pemasangan Dinding Kolam Reaktor

Buku ini tidak diperjualbelikan.

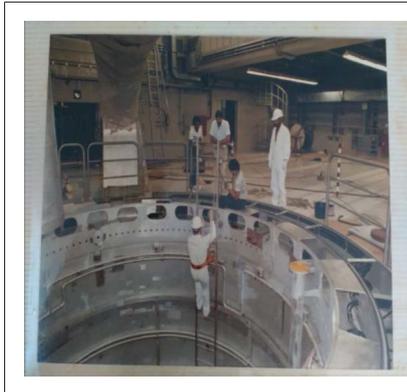


Foto: Dokumen PRSG (1986)

**Gambar 2.5** Pemasangan Komponen pada Bagian Kolam Reaktor

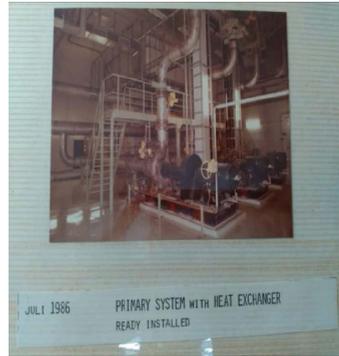


Foto: Dokumen PRSG (1986)

**Gambar 2.6** Pemasangan Sistem Pendingin Primer



Foto: Dokumen PRSG (1986)

**Gambar 2.7** Pemasangan Sistem Penukar Panas

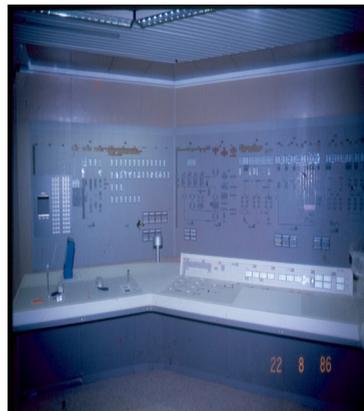


Foto: Dokumen PRSG (1986)

**Gambar 2.8** Pemasangan Ruang Kendali Utama

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Pembangunan reaktor selesai pada tahun 1987 dan dilanjutkan dengan uji coba bagian nuklir. Reaktor mencapai kondisi kritis pertama pada bulan Juli 1987 kemudian tercapai daya nominal teras pertama 10 MW (PRSG, 1988; 1987; Kuntjoro & Pinem, 1987). Pada tanggal 20 Agustus 1987, Presiden Soeharto meresmikan beroperasinya reaktor tersebut dan diberi nama Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy (disingkat reaktor RSG-GAS). Nama G. A. Siwabessy dipilih untuk mengenang jasa Prof. Dr. Gerrit Augustinus Siwabessy. Beliau yang saat itu sedang menjabat sebagai Menteri Kesehatan Republik Indonesia merupakan Direktur Jenderal BATAN pertama yang saat itu bernama LTA atau Lembaga Tenaga Atom. Reaktor RSG-GAS terletak di Kawasan Nuklir Serpong BATAN, di dalam Kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) milik Kementerian Riset dan Teknologi.

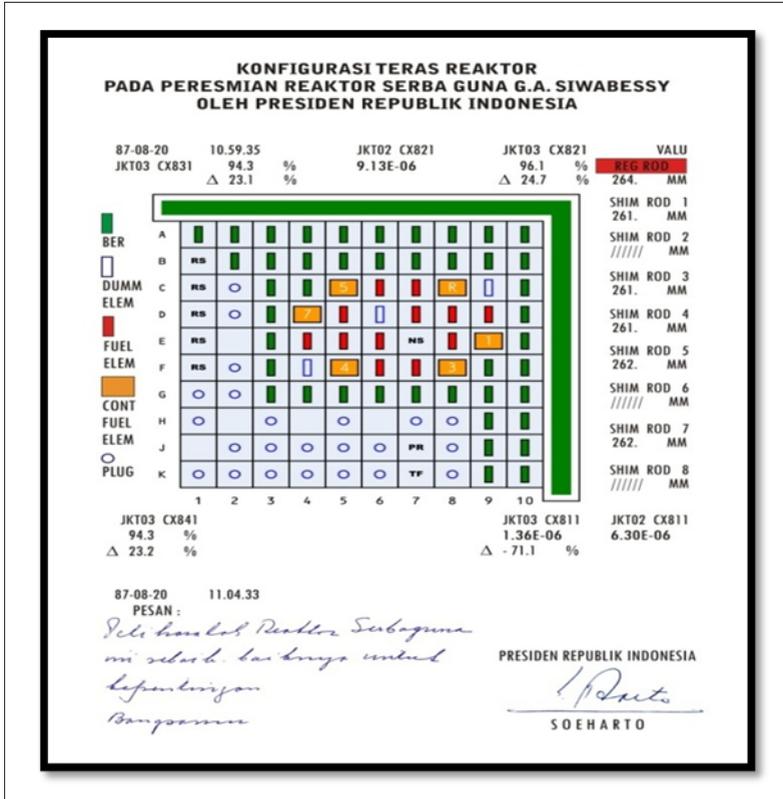
Pada saat peninjauan ke ruang kendali utama, presiden Suharto berpesan kepada para operator secara tertulis *“Peliharalah Reaktor Serba Guna ini sebaik-baiknya untuk kepentingan Bangsaamu”* seperti tertera pada Gambar 2.9 dan 2.10.



Sumber: PRSG (1987)

**Gambar 2.9** Peresmian Reaktor RSG GAS oleh Presiden Republik Indonesia Soeharto

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: PRSG (1987)

**Gambar 2.10** Konfigurasi Teras Pertama RSG-GAS dengan Pesan Presiden Soeharto

Dari informasi yang diberikan oleh pemasok, usia desain reaktor RSG-GAS diperkirakan sekitar 30 tahun sehingga secara desain, RSG-GAS dapat beroperasi sampai dengan tahun 2017. Namun, sampai dengan usia reaktor yang mencapai 30 tahun, reaktor masih beroperasi dengan selamat dengan sebagian besar sistem dan komponen masih berfungsi dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa desain reaktor masih dapat menjalankan fungsinya untuk menunjang operasi yang aman dan selamat hingga mencapai akhir usia desainnya. Dengan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

melakukan peremajaan (*refurbishment*) seperti mengganti komponen dan sistem yang mengalami penuaan, antara lain sistem pendingin primer, sistem pendingin sekunder, dan sistem ventilasi, keseluruhan sistem reaktor dapat berfungsi kembali dengan baik. Pihak pengelola PRSG kemudian mengajukan perpanjangan izin ke Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) untuk masa hidup berikutnya. Pada bulan Desember 2020, reaktor RSG-GAS memperoleh perpanjangan izin operasi selama 10 tahun sampai dengan tahun 2030. Dengan demikian, tahap terakhir pengoperasian reaktor yaitu tahap dekomisioning tidak jadi dilakukan dan reaktor dioperasikan lebih lanjut pada masa hidupnya yang kedua.

## B. DESAIN REAKTOR RSG-GAS

Desain reaktor RSG-GAS adalah sebagai reaktor serba guna dengan daya termal nominal sebesar 30 MW, oleh karena itu, selama masa pembangunan, reaktor ini disebut dengan reaktor MPR-30 (*Multipurpose Reactor-30*). Reaktor RSG-GAS adalah tipe kolam terbuka yang menggunakan bahan bakar pelat tipe MTR (*Material Test Reactor*) dengan pengayaan U-235 rendah (LEU - *Low Enriched Uranium*). Material air digunakan sebagai pendingin dan moderator neutron, sedangkan berilium digunakan sebagai reflektor neutron. RSG-GAS didesain untuk dapat menghasilkan fluks neutron termal dalam kisaran  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s (Hamzah & Dauk, 1988). Reaktor RSG-GAS merupakan reaktor MTR atau Reaktor Uji Material (RUM) pertama di dunia yang menggunakan bahan bakar uranium dengan pengayaan uranium U-235 19,75% sehingga sudah sejalan dengan program IAEA “RERTR” (*Reduced Enrichment of Research and Test Reactor*) yang awalnya muncul pada tahun 1974 akibat larangan Presiden USA, Jimmy Carter, untuk penggunaan bahan bakar dengan pengayaan di atas 20%. Perlu diketahui bahwa sampai dengan saat RSG-GAS dibangun, reaktor uji material pada umumnya menggunakan bahan bakar dengan pengayaan U-235 tingkat menengah sekitar 40% (MEU - *Medium Enriched Uranium*) dan pengayaan tinggi (HEU - *High Enriched Uranium*) sekitar 90%. Contoh beberapa reaktor uji material

yang sampai saat itu beroperasi dengan bahan bakar HEU antara lain: JRR-3, 20 MW (Jepang); Petten, 40 MW (Belanda), Dounreay Materials Testing Reactor (Inggris), Jules Horowitz Reactor (Perancis).

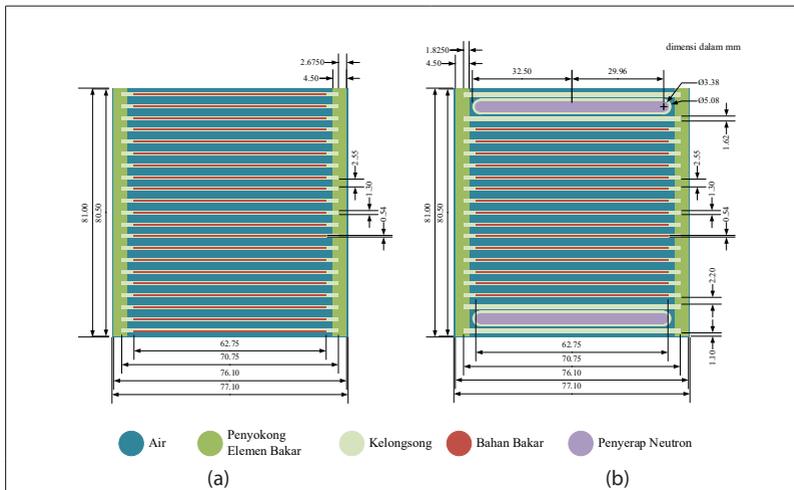
Elemen bakar (*FE-Fuel Element*) reaktor RSG-GAS dirancang memiliki bentuk persegi panjang sehingga memberikan efektivitas tinggi untuk pengendalian dan pemadaman reaktor. Elemen bakar kendali (*CE-Control Element*) dirancang untuk dapat disisipi penyerap jenis-garpu (*fork type*). Bagian yang berisi bahan bakar pada elemen bakar kendali CE memiliki ukuran yang identik dengan bagian yang berisi bahan bakar pada elemen bakar FE. Berbeda dari FE yang memiliki 21 pelat bahan bakar, CE memiliki 15 pelat bahan bakar dengan 3 (tiga) posisi pelat elemen bakar terluar diambil untuk memberikan ruang tempat memasukkan bilah penyerap (*absorber blade*). Sepasang pelat Aluminium ditambahkan di setiap sisi elemen bakar kendali sebagai pelat pengarah untuk pergerakan bilah penyerap. Perangkat penyerap terdiri atas dua bilah Ag-In-Cd yang diberi lapisan baja tahan karat. Tabel 2.2 menunjukkan data umum perangkat bahan bakar reaktor RSG-GAS, sedangkan Gambar 2.11 menunjukkan dimensi elemen bakar standar (FE) dan elemen kendali (CE).

**Tabel 2.2** Data Geometri Perangkat Elemen Bakar dan Elemen Kendali Reaktor RSG-GAS

Parameter	Nilai
Pelat elemen bakar per elemen bakar standar	21
Jumlah elemen bakar kendali pada teras	4
Pelat elemen bakar per elemen bakar kendali	15
Dimensi elemen bakar standar dan elemen kendali, mm	77,1 × 81 × 600
Ketebalan pelat bahan bakar, mm	1,3
Lebar kanal pendingin, mm	2,55
Jumlah pelat bahan bakar di elemen bakar	21
Jumlah pelat bahan bakar di elemen kendali	15
Material kelongsong	AlMg2
Material pelat sisi	AlMg1
Ketebalan kelongsong bahan bakar, mm	0,38

Parameter	Nilai
Dimensi zona aktif ( <i>meat</i> ), mm	$0,54 \times 62,75 \times 600$
Material bahan bakar	U3O8-AI
Pengayaan, %	19,75
Muatan massa 235U, g	250
Material penyerap	Ag-In-Cd
Ketebalan penyerap, mm	3,38
Material kelongsong penyerap	SS-321
Ketebalan kelongsong penyerap	0,85
Tebal <i>meat</i> , cm	0,054
Tebal kelongsong, cm	0,038
Lebar kanal pendingin, cm	0,255
Dimensi kisi teras, cm $\times$ cm	$8,1 \times 7,71$

Sumber: Interatom (1987)

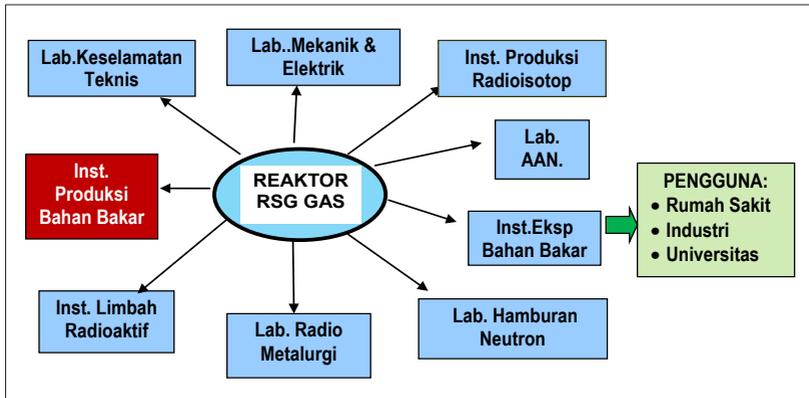


Sumber: PSRG (1987)

**Gambar 2.11** Dimensi Elemen pada Reaktor RSG-GAS (Satuan mm): (a) Elemen Bakar FE; (b) Elemen Kendali CE di RSG-GAS

### C. PENGGUNAAN REAKTOR RSG-GAS

Reaktor RSG-GAS merupakan fasilitas nuklir yang dilengkapi dengan instalasi/laboratorium, pendukung, seperti Instalasi Produksi Radioisotop, Laboratorium Analisis Aktivasi Neutron (AAN), Instalasi Bahan Bakar Nuklir, Laboratorium Hamburan Neutron, Laboratorium Radio-metalurgi, Instalasi Limbah Radioaktif, Instalasi Produksi Bahan Bakar, Laboratorium Keselamatan Teknis, dan Laboratorium Mekanik Elektrik, yang merupakan suatu kesatuan laboratorium BATAN Serpong untuk mendukung persiapan industri nuklir di Indonesia dan juga memenuhi kebutuhan pengguna di Rumah Sakit, Industri, dan Universitas, seperti terlihat pada Gambar 2.12. Dengan alasan tersebut, Kawasan Nuklir Serpong dikenal dengan RSG-GAS dan Laboratorium Penunjang Serpong (RSG-LP) pada beberapa tahun pertama beroperasi.



**Gambar 2.12** Reaktor RSG-GAS dan Laboratorium Penunjang di Kawasan Nuklir Serpong

Reaktor RSG-GAS dikategorikan pula sebagai jenis reaktor riset dengan daya tinggi untuk mendukung fungsinya sebagai alat riset, produksi radioisotop dan uji material, serta kebutuhan iradiasi lain di

berbagai bidang. Penggunaan atau utilisasi reaktor RSG-GAS, antara lain untuk penelitian dan pengembangan dalam bidang ilmu dan teknologi nuklir, dan juga untuk melayani kegiatan iradiasi nuklir. Penelitian di bidang teknologi nuklir dititikberatkan pada penelitian di bidang bahan bakar nuklir, fisika reaktor, dan pelatihan operator reaktor. Sedangkan pelayanan kegiatan iradiasi dilakukan untuk penelitian uji material, produksi isotop, dan analisis aktivasi neutron. Untuk itulah reaktor RSG-GAS dilengkapi dengan beberapa fasilitas iradiasi seperti:

- 1) fasilitas iradiasi untuk *In Pile Loop* (IPL) yang berfungsi untuk menguji bahan bakar PLTN jenis PWR;
- 2) fasilitas iradiasi untuk pengujian material atau bahan untuk reaktor nuklir;
- 3) fasilitas *Power Ramp Test* (PRTF) atau fasilitas uji daya *ramp* yang digunakan untuk menguji pin elemen bakar reaktor daya jenis PWR atau BWR pada daya (fluks) yang berubah-ubah;
- 4) fasilitas radiografi neutron yang digunakan untuk melakukan radiografi pada bahan teriradiasi seperti elemen bakar reaktor;
- 5) fasilitas silikon doping yang digunakan untuk mengiradiasi kristal tunggal Silikon menjadi bahan semikonduktor;
- 6) fasilitas iradiasi produksi radioisotope yang berfungsi untuk mengiradiasi target agar mendapatkan berbagai jenis radioisotope baik untuk keperluan medis, industri, maupun untuk penelitian;
- 7) fasilitas sistem *rabbit* (sistem hidraulik dan sistem pneumatik) yang digunakan untuk melakukan aktivasi neutron dan produksi radioisotop dengan waktu iradiasi pendek;
- 8) tabung berkas neutron (terdapat 6 buah tabung berkas neutron pada reaktor) yang menyalurkan neutron dari teras reaktor menuju peralatan untuk penelitian dan pengembangan di Balai Eksperimen khususnya riset di bidang fisika neutron dan ilmu bahan.

Untuk memenuhi fungsinya sebagai reaktor serba guna, setelah dilakukan reorientasi program, reaktor RSG GAS dilengkapi dengan fasilitas iradiasi dan fasilitas eksperimen, seperti disajikan dalam Tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Fasilitas Iradiasi dan Eksperimen pada Reaktor RSG-GAS

Fasilitas	Posisi	Alat	Fungsi
CIP	D-6, D-7, E-6, E-7	-	Produksi radioisotop
IP1	B-6	-	Iradiasi topaz
IP2	E-4	-	Iradiasi topaz
IP3	G-7	-	Produksi radioisotop
IP4	D-9	-	Produksi radioisotop
B1,2,3,4	A-2, K-3, K-10, J-9	-	Iradiasi sampel
P	F-1	Sistem Rabbit	Iradiasi sampel
H	B-1, C-1, D-1, E-1	Sistem Rabbit	Iradiasi sampel
NR	Luar teras	FIT	Iradiasi topaz
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

Keterangan:

- FIT : Fasilitas Iradiasi Topaz, NTD: *Neutron Transmutation Doping*,  
PRTF : *Power Ramp Test Facility*, NRG: *Neutron Radiography*,  
TAS : *Triple Axis Spectrometry*, FCD: *Four Cycle Diffractometer*,  
SANS : *Small Angle Neutron Scattering*, HRSANS: *High Resolution SANS*,  
PD : *Powder diffractometer*, HRPD: *High resolution PD*.

Bersama dengan kegiatan litbang fisika neutron, telah dilakukan pula litbang ilmu bahan untuk bahan *magnetic alloys*, polymer, dan mineral, baik terkait aspek struktur, tekstur, dan sebagainya. Eksperimen dilakukan dengan teknik hamburan neutron, difraksi neutron, dan polarisasi neutron menggunakan 5 fasilitas tabung berkas

neutron dari teras reaktor. Peralatan ini meliputi radiografi neutron (NRG), spektrometer 3 sumbu TAS (*triple axis spectrometry*), FCD (*four cycle diffractometer*), SANS (*small angle neutron spectrometry*), HRSANS (*high resolution SANS*), PD (*powder diffractometer*), HRPD (*high resolution PD*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13 dan 2.14. Penelitian terkait litbang ilmu bahan sebelumnya dilakukan oleh para peneliti dari Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) BATAN.

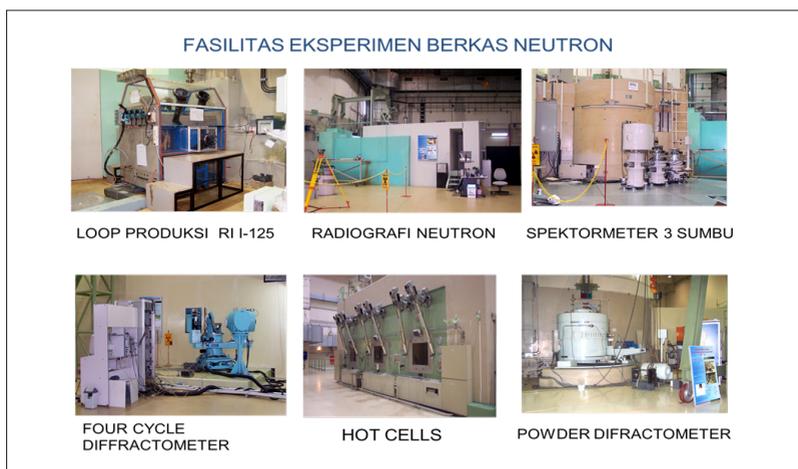


Foto: Dokumen Dokumentasi Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (2008)

**Gambar 2.13** Peralatan Pendukung Eksperimen di RSG-GAS



Buku ini tidak diperjualbelikan.



Foto: Dokumentasi Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (2008)

**Gambar 2.14** Peralatan Eksperimen pada Tabung Pengarah S-5

Sampai dengan tahun 2020, reaktor RSG-GAS telah beroperasi secara rutin selama 30 tahun dengan selamat untuk memenuhi permintaan para pengguna reaktor. Dalam satu tahun, rata-rata reaktor dioperasikan selama 3000–4000 jam sesuai permintaan pengguna. Secara garis besar, reaktor RSG-GAS digunakan untuk melayani permintaan penelitian ilmu bahan, iradiasi target produksi radioisotop, iradiasi sampel untuk AAN, iradiasi batu topaz, dan pembinaan sumber daya manusia.

Untuk produksi radioisotop, RSG-GAS meradiasi target untuk memproduksi radioisotop secara rutin untuk keperluan medis, seperti Mo-99, I-131, I-133, I-125; sebagai sumber iradiasi untuk industri, seperti Co-60, Ir-192; dan digunakan untuk perunut, antara lain Br-82, P-32, dan S-35. Hasil produksi radioisotop ini telah digunakan oleh beberapa rumah sakit dalam negeri, bahkan sebagian diekspor ke negara tetangga di ASEAN. Sebelumnya, pelaksana dari produksi radioisotop dan radiofarmaka adalah PTRR (Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka) BATAN dan PT INUKI (Industri Nuklir Indonesia).

Iradiasi sampel untuk analisis aktivasi neutron (AAN) juga cukup banyak dan sering. Sampel tersebut dapat berasal dari bidang industri, geologi, arkeologi, pertanian, kesehatan, dan lingkungan. Adapun iradiasi batu topaz juga telah dimulai pada tahun 2005. Iradiasi batu

Buku ini tidak diperjualbelikan.

topaz tersebut secara rutin melayani perusahaan Gunter Milis GmbH dari Jerman dengan kapasitas 1000 kg per tahun. Gambar 2.15 dan 2.16 menunjukkan produk dari pemanfaatan reaktor RSG-GAS seperti radioisotop, radiofarmaka, dan pewarnaan batu topaz. Batu topaz yang awalnya tidak memiliki warna dan cenderung bening (*translucent*) dapat berubah menjadi biru setelah diiradiasi dengan neutron sehingga dapat dijadikan perhiasan.

Dari pemaparan di atas, terlihat bahwa penggunaan reaktor mengalami sejumlah perubahan dari desain awal, yakni tidak ada fasilitas uji untuk bahan bakar reaktor di dalam teras RSG-GAS. Fasilitas iradiasi CIP dan IP yang semula didesain untuk tujuan pengujian bahan bakar dan bahan struktur reaktor telah diubah fungsinya menjadi hanya untuk keperluan iradiasi sampel radioisotop dan sampel topaz. Hal tersebut dilakukan karena program pembangunan PLTN sempat dihentikan ketika reaktor telah beroperasi pada daya penuh. Selain itu, fasilitas untuk doping silikon juga tidak menghasilkan produk yang baik sehingga tidak lagi dimanfaatkan.



Foto: Dokumentasi Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka - BATAN (2012)

**Gambar 2.15** Bentuk Hasil Radioisotop dan Radiofarmaka



Foto: Dokumen PRSG (2005)

**Gambar 2.16** Warna Kebiruan Batu Topaz sesudah Irradiasi di Reaktor

Buku ini tidak diperjualbelikan.



# 3

## OPERASI KOMISIONING REAKTOR RSG-GAS

Setelah sebuah reaktor nuklir selesai dibangun maka dilakukan tahap komisioning. Komisioning bertujuan untuk menguji apakah desain yang telah dibangun dapat berfungsi sesuai dengan tujuannya. Tahap ini sangat penting dalam pembangunan reaktor nuklir. Komisioning tersebut, meliputi komisioning bagian non-nuklir (*non-nuclear island*) dan komisioning bagian nuklir (*nuclear island*). Komisioning bagian non-nuklir merupakan suatu kegiatan untuk menguji fungsi sistem-sistem reaktor, termasuk menjamin seluruh sistem untuk mendukung komisioning nuklir telah berfungsi dengan baik. Sedangkan komisioning nuklir dimulai dengan pemuatan awal bahan bakar dan sumber neutron sebagai langkah awal kekritisasi, serta berakhir setelah dicapainya teras kerja pada daya nominal 30 MW. Pada pembangunan reaktor nuklir yang baru, kritis pertama menjadi hal yang sangat krusial karena jika kriticalitas tercapai maka desain teras yang telah dibuat dapat dinyatakan sesuai dengan perhitungan. Dengan kata lain, jika kriticalitas pertama tidak tercapai maka perlu dilakukan perhitungan ulang desain teras reaktor. Bab ini akan menjelaskan prosedur komisioning dan parameter nuklir yang diukur.

## A. KOMISIONING REAKTOR

Komisioning adalah proses pengujian semua komponen dan sistem reaktor yang telah dikonstruksi melalui proses pengoperasian dan verifikasi performa untuk membuktikan apakah sistem sudah menjalankan fungsinya dan memenuhi persyaratan desain dan kriteria kinerja operasinya. Secara garis besar, kegiatan uji komisioning suatu instalasi reaktor nuklir dapat dipilah ke dalam dua jenis, yaitu uji bagian non-nuklir dan uji bagian nuklir.

Program komisioning memuat seluruh aspek yang meliputi urutan uji fungsi sesuai dengan standar keselamatan dan peraturan yang berlaku. Program komisioning harus menjamin bahwa.

- 1) Seluruh sistem dan komponen berfungsi sesuai kriteria desain.
- 2) Pemuatan bahan bakar nuklir dan kondisi kritis pertama dilaksanakan dengan selamat.
- 3) Seluruh parameter nuklir diverifikasi.
- 4) Reaktor dapat dioperasikan pada daya penuh dengan selamat.

Badan Tenaga Atom Internasional (International Atomic Energy Agency, IAEA) telah menerbitkan persyaratan dan rekomendasi untuk kegiatan komisioning reaktor riset (IAEA, 1992; 2006), yakni:

- 1) *Safety Standard: SS No. 35-S2, "Code on the Safety of Nuclear Research Reactor: Operation, Chapter 8"*, IAEA, Vienna, 1984.
- 2) *Safety Guides: SS No. 35-G4, "Commissioning of Research Reactor, IAEA, Vienna, 1984"*.

Persyaratan komisioning reaktor riset yang terdapat dalam dokumen standar keselamatan IAEA, SS No. 35-S2 antara lain.

- 1) Program Komisioning (PK) harus disiapkan untuk menunjukkan bahwa tujuan desain telah dipenuhi. PK harus diserahkan kepada Panitia Keselamatan dan Badan Pengawas, yang kemudian harus diulas dan disetujui sebelum dilaksanakan.
- 2) Organisasi pengoperasi, desainer, dan pabrikan harus terlibat dalam pembuatan PK.

- 3) Uji komisioning harus disusun dalam kelompok fungsional dan dengan urutan yang sesuai. Urutan meliputi uji pra-operasional, kritikalitas pertama dan uji daya rendah, dan uji daya. Tidak ada uji dilakukan kecuali langkah-langkah yang diperlukan telah terpenuhi dengan benar.
- 4) Dokumentasi yang mencakup ruang lingkup, urutan, dan hasil yang diharapkan dari semua jenis pengujian harus disiapkan secara terperinci dan sesuai dengan program jaminan mutu (PJM). Dokumentasi harus berisi:
  - a) tujuan uji dan hasil yang diharapkan;
  - b) persyaratan keselamatan yang diperlukan selama uji;
  - c) persyaratan awal;
  - d) prosedur uji;
  - e) laporan uji yang meliputi ringkasan data dan analisis, evaluasi hasil, identifikasi defisiensi bila ada ditemukan, dan tindakan perbaikan.
- 5) Hubungan antara badan pengawas dan organisasi pengoperasi harus terjalin dengan baik selama proses komisioning. Khususnya, hasil dan analisis yang berhubungan dengan keselamatan harus tersedia di panitia keselamatan dan badan pengawas untuk penilaian dan persetujuan.
- 6) Peralatan eksperimen harus mendapat perhatian semestinya selama komisioning.
- 7) Peralatan eksperimen baru harus menjalani prosedur komisioning tambahan yang sesuai.
- 8) Proses komisioning harus merupakan proses kerja sama antara organisasi pengoperasi dengan pemasok reaktor untuk meyakinkan dan menjamin tercapainya pemahaman bagi organisasi pengoperasi tentang karakteristik reaktor.
- 9) Seluruh hasil uji harus diserahkan oleh pemasok kepada organisasi pengoperasi untuk disimpan sebagai dokumen seumur hidup reaktor (*lifetime document*).

Persyaratan IAEA tersebut harus menjadi dasar dalam mempersiapkan program komisioning reaktor riset. Penyiapan PK juga direkomendasikan mengikuti dokumen panduan IAEA *Safety Guide* SS No. 35-G4. Panduan ini memberikan persyaratan khusus yang urut berhubungan dengan pernyataan-pernyataan yang ada dalam dokumen *Safety Standard* dan menyediakan panduan terperinci untuk melaksanakan komisioning reaktor riset. Rekomendasi memuat dua panduan utama, yaitu: Penyiapan Program Jaminan Mutu (PJM) dan Program Komisioning (PK).

Sebuah PJM untuk kegiatan komisioning reaktor berdasarkan standar kualitas tertentu harus dibuat dan diberlakukan sejak awal perencanaan komisioning oleh organisasi pengoperasi. PJM harus diterapkan pada seluruh item komisioning yang berhubungan dengan keselamatan sehingga dapat memberikan keyakinan bahwa kegiatan komisioning dilaksanakan sesuai dengan persyaratan-persyaratan yang berlaku. PJM untuk komisioning merupakan satu kesatuan dari tiga prinsip berikut.

- 1) Manajemen menyediakan alat dan dukungan untuk mencapai tujuan.
- 2) Personil melaksanakan kegiatan untuk mencapai kualitas.
- 3) Evaluasi efektivitas manajemen proses dan pelaksanaan kerja dilakukan untuk menjamin mutu.

PJM harus menggambarkan bagaimana cara mengelola, melaksanakan, dan mengevaluasi pekerjaan, struktur organisasi, pembagian tanggung jawab, dan aturan manajemen lainnya, seperti perencanaan, penjadwalan, dan alokasi sumber daya. Metode dan pengendalian dari setiap item, peralatan, dan dokumen penting juga harus dibuat. Setiap personil harus dilatih dan memiliki kualifikasi sesuai dengan tugasnya. Aturan harus dibuat untuk menjadi patokan penilaian, verifikasi, dan audit sehingga dapat meyakinkan bahwa kegiatan komisioning dilaksanakan sesuai dengan prosedur.

Program Komisioning (PK) harus menunjukkan bahwa persyaratan dan tujuan desain yang ditulis dalam Laporan Analisis Keselamatan (LAK) dapat terpenuhi. PK juga harus mencakup hal-hal sebagai berikut:

- 1) deskripsi umum yang berisi gambaran umum tentang tujuan, persyaratan, uji utama dan prosedur setiap tahap, dan hasil yang diharapkan;
- 2) organisasi dan tanggung jawabnya yang mencakup struktur, fungsi, level otoritas, dan hubungan timbal baliknya;
- 3) tahapan komisioning, uji, syarat awal, dan jadwal;
- 4) prosedur dan laporan komisioning yang mencakup persyaratan untuk persiapan, hasil ulasan, dan persetujuan untuk prosedur dan laporan komisioning;
- 5) verifikasi, ulasan, audit, dan tindak lanjut dari deviasi atau penyimpangan terhadap:
  - a) persyaratan persiapan prosedur untuk verifikasi, ulasan, dan audit;
  - b) pemberian gambaran atas perubahan atau prosedur yang telah terjadi untuk menindaklanjuti hasil komisioning yang tidak diharapkan, berkaitan dengan perubahan desain, program, kejadian, atau kecelakaan yang mungkin terjadi selama uji;
  - c) persyaratan dokumentasi yang mencakup persyaratan untuk mendokumentasikan hasil-hasil komisioning.

## **B. PROGRAM KOMISIONING REAKTOR RSG-GAS**

Detail program komisioning reaktor RSG-GAS yang dimulai dari uji konstruksi hingga proses akhir serah terima dari pemasok INTERATOM kepada BATAN dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Program Komisioning Reaktor RSG-GAS

Periode	Komisioning			Operasi terbatas	Operasi tak terbatas
	Uji konstruksi	Uji Penerimaan			
Tahap	Uji keteknikan	Uji Bagian Non Nuklir	Uji Bagian Nuklir Teras I	Operasi teras transisi	Operasi rutin
	Tahap-1		Tahap-2	Tahap-3	Tahap-4
	INTERATOM			BATAN	
Tanggung Jawab	Melibatkan BATAN		INTERATOM Memimpin uji	INTERATOM Membantu uji, menyediakan manajemen teras	
Sasaran antara/ Milestone	<i>Final turn over</i> Penerimaan Awal		<i>Final Acceptance</i> Penerimaan Akhir		
Sasaran/ Goal	Konstruksi selesai		Kritis Pertama	Demo operasi selama 24 jam	Teras setimbang

## 1. Organisasi komisioning reaktor RSG-GAS

Organisasi yang terlibat dalam kegiatan komisioning reaktor RSG-GAS adalah:

- 1) BATAN sebagai pemilik, grup pengoperasi, dan Jaminan Mutu/ QA (*Quality Assurance*);
- 2) INTERATOM sebagai kontraktor utama;
- 3) panitia keselamatan BATAN;
- 4) BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir);
- 5) subkontraktor yang mencakup desainer, konstruktor, instalator, *supplier* bertanggung jawab kepada kontraktor utama;
- 6) tim komisioning yang dibagi ke dalam beberapa grup fungsional seperti operator, fisika reaktor, sistem proses, instrumentasi - kendali, mekanikal, dan elektrikal.

Keanggotaan di dalam tiap grup berasal dari personil BATAN dan INTERATOM. Adapun personil dari sub-kontraktor juga ikut mendukung aktivitas sesuai dengan keahlian dan tanggung jawabnya di bawah koordinasi INTERATOM sebagai kontraktor utama.

Manajer Komisioning adalah Kepala PRSG, sedangkan panitia keselamatan berada pada tingkat yang sama dengan manajer komisioning dan bertanggung jawab kepada Kepala BATAN. Grup komisioning dari INTERATOM dipimpin oleh *Site Project Manager*.

## 2. Tahapan Komisioning

Uji komisioning dilaksanakan setelah uji konstruksi selesai dilakukan. Uji Komisioning dibagi menjadi dua jenis, yaitu bagian non nuklir dan nuklir yang masing-masing dibagi lagi dalam dua tahap sehingga keseluruhan menjadi 4 tahap.

- 1) Uji bagian non nuklir (2 tahap) terdiri dari:
  - a) Uji pra-operasional
  - b) Uji sistem dan uji fungsi
- 2) Uji bagian nuklir (2 tahap) terdiri dari:
  - a) Uji *start-up* nuklir
  - b) Uji kenaikan daya

### a. Tahap 1 Uji Pra-operasional atau Uji Individual

Uji Pra-operasional atau disebut juga uji individual, meliputi pengujian dari komponen atau subsistem untuk menentukan bahwa komponen-komponen dan subsistem telah siap untuk mendukung uji sistem. Uji Pra-operasional mencakup:

- 1) pengecekan fungsi tiap komponen;
- 2) pengaturan titik pengesetan (*set point* dan *limit switches*);
- 3) kalibrasi instrumentasi;
- 4) pengecekan fungsi “saling kunci” (*interlocks*).

## b. Tahap 2 Uji Sistem dan Uji Fungsi

Uji sistem dan uji fungsi yang disebut juga uji integral merupakan pengujian fungsi pada seluruh sistem reaktor yang meliputi sistem-sistem proses, mekanik, listrik, instrumentasi-kendali, ventilasi, dan sistem-sistem pendukungnya. Pengujian ini dilakukan sebelum kegiatan pemuatan bahan bakar nuklir ke dalam teras reaktor, untuk menunjukkan bahwa seluruh fasilitas reaktor berfungsi dengan baik dan uji bagian nuklir sudah dapat dimulai.

## c. Tahap 3 Uji *Start-Up* Nuklir

Uji *start-up* nuklir adalah uji untuk mendemonstrasikan dan membuktikan bahwa sistem reaktor dan keseluruhan fasilitasnya dapat beroperasi pada daya rendah dan siap untuk uji daya berikutnya. Pengujian *start-up* nuklir terdiri dari eksperimen kekritisasi reaktor dan pengukuran parameter fisika reaktor pada daya rendah.

## d. Tahap 4 Uji Penaikan Daya

Uji penaikan daya reaktor adalah uji untuk mendemonstrasikan dan membuktikan bahwa reaktor dapat beroperasi dengan andal dan selamat pada daya nominal. Jenis uji bagian nuklir pada tahap ini meliputi eksperimen dan pengukuran yang disajikan dalam Tabel 3.2. Semua parameter data komisioning seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2 harus memenuhi syarat keselamatan operasi reaktor.

**Tabel 3.2** Daftar Kegiatan Uji Komisioning Nuklir

No.	Eksperimen
1.	Eksperimen kekritisasi <i>Criticality experiment</i>
2.	Pembentukan teras kerja (reaktivitas lebih) <i>Working core building (excess reactivity)</i>
3.	Kalibrasi batang kendali <i>Control rod calibration</i>

<b>No. Eksperimen</b>	
4.	Pengukuran parameter fisika reaktor daya rendah <i>Low power reactor physics parameters measurements</i>
5.	Peracunan xenon <i>Xenon poisoning</i>
6.	Pengukuran fluks neutron <i>Neutron flux measurements</i>
7.	Pengukuran dan pengesetan aliran <i>Flow measurements and settings</i>
8.	Kalibrasi daya <i>Power calibration</i>
9.	Pengukuran suhu pelat dan pendingin bahan bakar <i>Plate and coolant temperature measurements steady-state and transient</i>
10.	Uji sirkulasi alamiah <i>Natural circulation test</i>

### 3. Prosedur dan Dokumentasi

Prosedur dan dokumen yang harus ada untuk melaksanakan uji komisioning meliputi prosedur uji dan manual operasi. Setiap pengujian sistem atau eksperimen harus mempunyai prosedur uji yang disusun mengikuti format sebagai berikut:

- a) ringkasan uji (*test summary*)
- b) spesifikasi uji (*test specification*)
- c) prosedur uji (*test procedure*)
- d) laporan data (*data report*)
- e) laporan evaluasi (*evaluation report*)

Ringkasan uji memuat identifikasi uji yang diperlukan oleh sistem atau komponen dan akan digunakan untuk membuat spesifikasi uji. Bagian ini berisi deskripsi ringkas dari tujuan uji, status reaktor yang diuji, dan daftar peralatan pengujian khusus.

Spesifikasi uji disiapkan pada setiap uji penerimaan untuk menentukan lingkup uji yang diperlukan. Spesifikasi uji tersebut berisi tujuan dan daftar persyaratan uji yang harus dikonfirmasi dan didemonstrasikan selama pengujian. Bagian tujuan dan persyaratan adalah subbagian tambahan yang berisi kriteria penerimaan, data yang

diperlukan, syarat instalasi, dan peralatan uji khusus. Dokumen ini diperlukan untuk menyiapkan prosedur uji.

Prosedur uji berisi uraian tentang bagaimana pengujian dilaksanakan dan bagaimana reaktor dioperasikan untuk mencapai tujuan pengujian.

Laporan data disusun setelah kegiatan pengujian selesai. Laporan berisi semua data dan informasi yang terkumpul selama pengujian dan juga evaluasi kinerja sistem atau eksperimen yang diuji.

Laporan Evaluasi disiapkan oleh desainer sistem untuk evaluasi kinerja desain dari hasil uji yang diidentifikasi pada dokumen-dokumen sebelumnya. Adapun dokumen Manual Operasi adalah sekumpulan dokumen terperinci dari prosedur pengoperasian atau instruksi operasi pada setiap sistem instalasi reaktor.

## C. HASIL KOMISIONING REAKTOR RSG-GAS

### 1. Uji Bagian Non Nuklir

Uji bagian non nuklir yang meliputi Tahap I dan Tahap II telah dilaksanakan oleh INTERATOM, pemasok sistem reaktor (sub-kontraktor INTERATOM), dan dengan melibatkan personil BATAN. Kegiatan uji berlangsung selama satu tahun, mulai pertengahan tahun 1986 sampai dengan awal Juli 1987.

### 2. Hasil Uji Tahap I dan II

Hasil uji menunjukkan bahwa seluruh sistem berfungsi sesuai dengan kriteria desain dengan beberapa kekurangan kecil (*minor reservations*). Setelah selesai uji fungsi, pihak *INTERATOM* menyerahkan sistem reaktor kepada BATAN disertai dengan dokumen Paket Serah Terima (*Turn Over Packet*). Seluruh dokumen uji telah diserahkan kepada BATAN dan disimpan sebagai dokumen masa hidup reaktor (*long life documents*). Secara keseluruhan, terdapat 51 paket sistem yang

diserahkan oleh pihak INTERATOM. Dokumen Paket Serah Terima (*Turn Over Packet*) untuk setiap sistem reaktor terdiri atas:

- a) data desain (*design data*)
- b) deskripsi sistem (*system description*)
- c) prosedur operasi sistem (*operating procedures of the systems*)
- d) ringkasan uji (*test summary*)
- e) spesifikasi uji (*test specification*)
- f) prosedur uji (*test procedure*)
- g) laporan data (*data report*)
- h) laporan evaluasi (*evaluation report*)

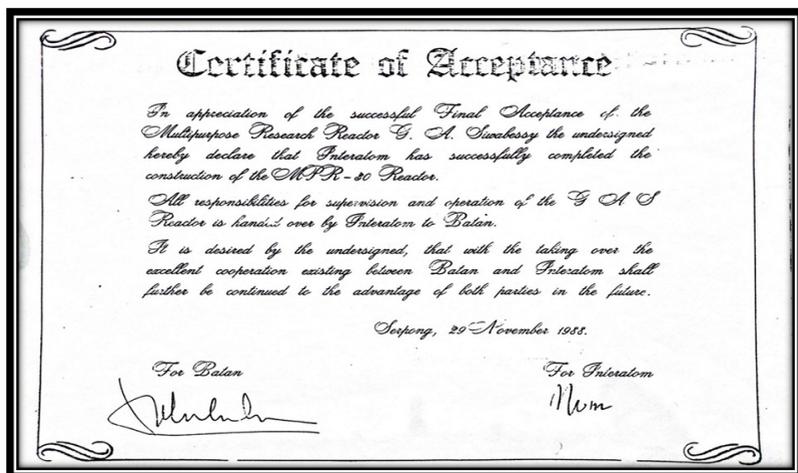
Tahap ini berakhir dengan dilaksanakannya penerimaan akhir sistem (*final turn over/systems turn over*) yang merupakan Serah Terima Awal (*Preliminary Acceptance*) dari keseluruhan proyek INTERATOM kepada BATAN. Instalasi reaktor secara kontraktual sudah diterima oleh pihak BATAN.

### 3. Uji Bagian Nuklir

Uji bagian nuklir berlangsung mulai bulan Juli 1987 sampai dengan Desember 1988. Pada tahap ini, uji dan pengoperasian sistem reaktor dilaksanakan oleh BATAN dan menjadi tanggung jawab BATAN, namun masih dengan dukungan/bantuan dari INTERATOM. Uji bagian nuklir terdiri atas uji Tahap III dan Tahap IV. Uji Tahap III dilaksanakan dalam 3 langkah, yaitu percobaan kekritisan awal (*initial criticality*), pembentukan konfigurasi teras pertama, dan uji fisika pada daya rendah (*low power physics*) pada teras pertama. Adapun uji tahap IV meliputi kegiatan peningkatan daya reaktor hingga tercapai daya 10 MW, yaitu daya nominal untuk Teras-1.

Berdasarkan kontrak pengadaan reaktor antara BATAN dan INTERATOM, uji bagian nuklir digunakan untuk mendemonstrasikan atau membuktikan bahwa reaktor dapat beroperasi dengan andal dan selamat pada Teras-1 dengan daya 10 MW. Hasil uji bagian nuklir merupakan sasaran akhir dari kegiatan penerimaan akhir proyek (*Final Acceptance*) yang dijadwalkan berlangsung pada bulan Agustus 1987.

Namun, penerimaan akhir ini baru terlaksana pada bulan November 1988 setelah selesainya uji komisioning, atau terlambat sekitar 16 bulan. Sertifikat penerimaan akhir yang telah ditandatangani oleh Direktur Jenderal BATAN dan Pimpinan INTERATOM pada tanggal 29 November 1988 dapat dilihat pada Gambar 3.1. Keterlambatan ini disebabkan oleh terjadinya gangguan atau penyimpangan kinerja tabung berkas neutron nomor S-5 yang bergetar pada saat reaktor beroperasi pada daya 10 MW. Reaktor kemudian dipadamkan, dievaluasi, dan dilakukan perbaikan sistem klem pada ujung tabung berkas neutron di daerah reflektor.



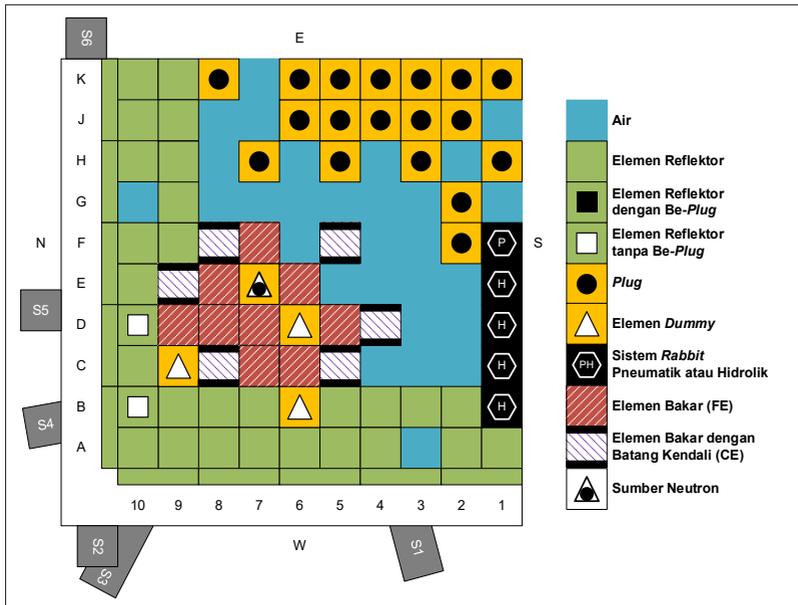
Sumber: PRSG (1988b)

**Gambar 3.1** Sertifikat Penerimaan Akhir Pengadaan Reaktor RSG-GAS

#### 4. Hasil Uji Tahap III

Uji tahap III memiliki tujuan untuk membentuk konfigurasi Teras-1, yang meliputi kegiatan percobaan kekritisasi, pembentukan Teras-1, dan percobaan fisika daya rendah. Percobaan kekritisasi yaitu mengisi bahan bakar secara bertahap sesuai prosedur sampai tercapai kondisi kritis pertama. Kondisi awal teras telah diisi atau dimuati dengan

6 buah elemen kendali (CE) di posisi D-4, F-8, C-5, E-9, F-5, dan C-8 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Pemuatan bahan bakar kemudian dilakukan secara bertahap dengan memasukkan 2 elemen bakar (FE), kemudian ditambah 3 elemen bakar, 2 elemen bakar, 1 elemen bakar, dan terakhir 1 elemen bakar. Pada setiap tahapan dilakukan pencacahan neutron dengan menggunakan detektor BF3 dan *Fission Chamber* (FC) untuk dapat memperkirakan kondisi kritis yang ditunjukkan dengan adanya peningkatan populasi neutron.



Sumber: PRSG (1988a)

**Gambar 3.2** Konfigurasi Teras Reaktor pada Saat Tercapai Kondisi Kritis Pertama

Kondisi kritis pertama tercapai pada tanggal 29 Juli 1987 pukul 03.14 WIB dini hari yang disaksikan oleh 30 orang. Setelah pemuatan elemen bakar ke-9, terbentuk susunan bahan bakar di teras reaktor yang terdiri atas 9 elemen bakar (FE) dan 6 elemen kendali (CE)

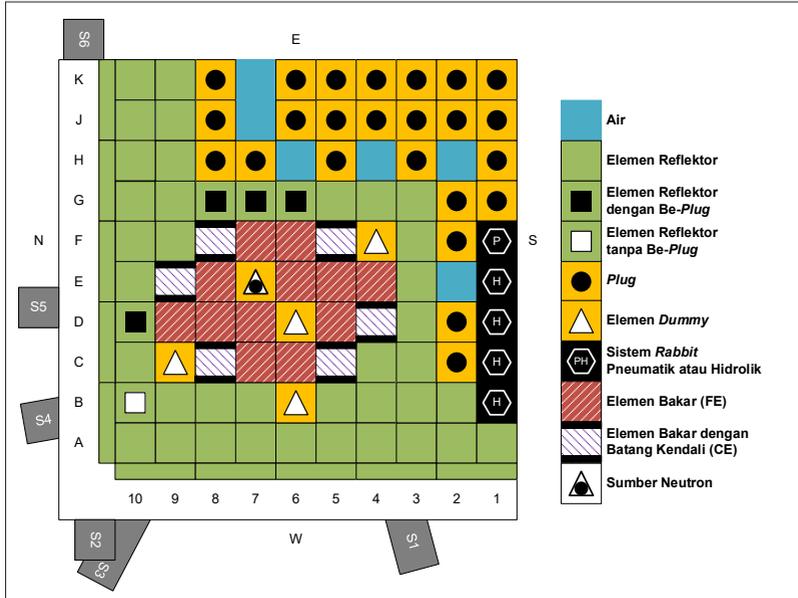
Buku ini tidak diperjualbelikan.

seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Susunan bahan bakar inilah yang disebut konfigurasi kritis yang tersusun atas jumlah bahan bakar minimum agar reaktor dapat dioperasikan pada kondisi kritis atau biasa disebut “massa kritis”. Kondisi kritis pertama ini membuktikan bahwa desain bahan bakar dan susunannya di dalam teras reaktor dapat memicu reaksi fisi berantai yang terkendali. Oleh karena itu, momentum ini menjadi perhatian para penggiat reaktor nuklir setiap kali ada pembangunan reaktor nuklir baru.

Kondisi kritis pertama merupakan titik awal sejarah operasi reaktor nuklir sehingga biasanya dirayakan dengan cukup meriah. Perayaan ini juga berlangsung di reaktor RSG-GAS yang merupakan desain reaktor daya dengan fluks neutron tinggi pertama di dunia yang menggunakan bahan bakar uranium dengan pengayaan rendah, LEU sehingga pencapaian kondisi kritis pertama ini juga dinantikan oleh penggiat reaktor nuklir di dunia.

Setelah reaktor mencapai kondisi kritis pertama maka dilanjutkan dengan penentuan reaktivitas lebih teras. Reaktivitas lebih dibutuhkan untuk menjalankan operasi reaktor selama satu siklus operasi. Kondisi kritis pertama dicapai dengan 5 buah batang kendali pada posisi teratas dan 1 buah batang kendali pada posisi 475 mm dari dasar teras. Hal ini menunjukkan bahwa sudah ada sedikit reaktivitas lebih pada konfigurasi kritis pertama yang disebabkan oleh massa bahan bakar dalam teras yang lebih banyak dari massa kritisnya. Kelebihan massa yang terkandung (*built in excess mass*) pada teras kritis pertama ini memberikan reaktivitas lebih sebesar 0,47 dolar dengan dolar adalah satuan reaktivitas reaktor.

Kegiatan komisioning nuklir kemudian dilanjutkan dengan pembentukan konfigurasi Teras-1 dengan menambahkan 3 buah elemen bakar sehingga teras pertama RSG-GAS menjadi tersusun atas 12 elemen bakar dan 6 elemen kendali seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Sumber: PRSG (1988a)

**Gambar 3.3** Konfigurasi Teras-1

Langkah terakhir pada tahap ini adalah percobaan fisika pada daya rendah di Teras-1. Reaktor dioperasikan pada daya rendah, serendah mungkin namun harus sudah bebas dari sumber neutron atau tidak lagi terpengaruhi oleh keberadaan sumber neutron yang ada di teras reaktor. Pada kondisi ini, sekalipun sumber neutron diambil atau dikeluarkan dari teras reaktor, reaktor tetap akan stabil beroperasi pada kondisi kritis. Pada operasi reaktor daya rendah ini, serangkaian pengujian fisika reaktor dilakukan untuk mendemonstrasikan parameter nuklir dari teras reaktor pertama. Pengujian fisika reaktor tersebut terutama berupa kalibrasi batang kendali, pengukuran reaktivitas lebih, dan pengukuran reaktivitas padam, serta margin reaktivitas padam reaktor.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## 5. Hasil Uji Tahap IV

Uji tahap IV adalah uji bagian nuklir terakhir yang meliputi kegiatan peningkatan daya operasi reaktor untuk mencapai daya nominal Teras-1 sebesar 10 MW (PRSG, 1988b). Peningkatan daya dilakukan secara bertahap melalui 4 tahap, yaitu pada tingkat daya 1, 5, 9, dan 10 MW. Pada setiap tahap, daya reaktor dipertahankan untuk melaksanakan uji termal-hidrolika, kalibrasi daya, dan pengesetan instrumentasi. Pengoperasian pada tingkat daya berikutnya dilakukan berdasarkan hasil evaluasi tahap sebelumnya hingga akhirnya tercapai langkah terakhir pada daya nominal Teras-1, 10 MW. Seluruh parameter pada daya 10 MW kemudian dicek dan dievaluasi. Perangkat instrumentasi kemudian diset dan dikalibrasi dengan parameter yang didapatkan pada Teras-1.

Gambar 3.4 menunjukkan ditunjukkan operasi teras pertama dengan daya 10 MW dan warna biru di teras reaktor menunjukkan radiasi *Cherenkov*. Setelah operasi pada daya 10 MW tercapai dengan selamat, dilakukan uji parameter fisika reaktor pada daya tinggi yang mencakup parameter neutronik maupun termal-hidrolika, seperti peracunan xenon di teras reaktor, pengukuran fluks neutron, pengukuran dan pengesetan laju aliran, kalibrasi daya, pengukuran koefisien reaktivitas, dan pengukuran suhu pada pelat bahan bakar dan pendingin bahan bakar dengan peralatan yang tersedia, diikuti dengan pengujian sistem sirkulasi alamiah pada teras reaktor.

Parameter neutronik dari hasil uji komisioning Teras-1 disajikan pada Tabel 3.3 (Jujuratisbela, 1989; Liem, P. H., 1999). Tabel 3.3 menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara hasil eksperimen dengan harga desain. Parameter keselamatan seperti margin reaktivitas padam bernilai negatif dan koefisien reaktivitas suhu juga bernilai negatif, yang mana hal tersebut menunjukkan bahwa reaktor beroperasi dengan aman.

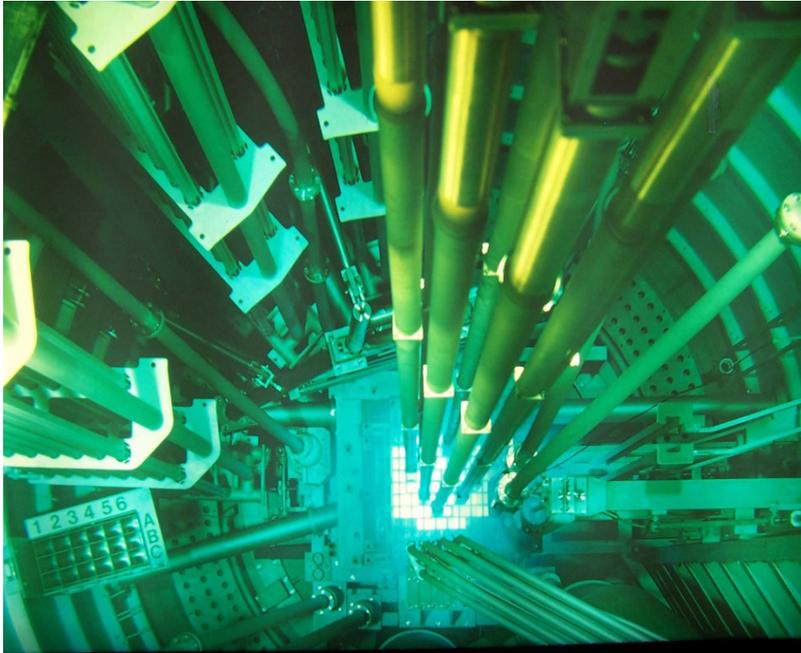


Foto: Dokumen PRSG (2005)

**Gambar 3.4** Sinar Biru yang Tampak dari Fenomena Radiasi Cherenkov pada Saat Operasi Reaktor RSG-GAS

**Tabel 3.3** Parameter Neutronik Teras-1

Parameter nuklir	Desain	Hasil Eksperimen
Jumlah elemen bakar/elemen kendali	12 / 6	12 / 6
Reaktivitas lebih saat BOC, <i>cold, clean</i> (%)	9,20	8,46
Nilai reaktivitas batang kendali (%)	-17,80	-17,79
Reaktivitas padam saat BOC, <i>cold, clean</i> (%)	-8,80	-11,67
Margin reaktivitas padam (5 batang kendali masuk) (%)	-2,99	-2,76
Koefisien reaktivitas suhu moderator ( $\Delta\rho/^\circ\text{C}$ )	-1,10 x $10^{-4}$	-1.77 x $10^{-4}$

Sumber: BATAN (2017); Jujuratisbela (1989); Liem, P. H., (1999)

Parameter termal-hidrolika dari hasil komisioning ditunjukkan pada Tabel 3.4, yang mana terlihat tidak ada perbedaan yang signifikan antara harga desain dan hasil eksperimen. Suhu pelat bahan bakar maksimum berdasarkan hasil eksperimen adalah 86.75°C yang nilainya masih lebih rendah dari batas desain 200°C. Hasil komisioning parameter neutronik dan termal-hidrolika masih sesuai dengan nilai batas pada *Safety Analysis Report RSG-GAS* maka tahapan selanjutnya adalah dapat dilakukan pembentukan teras transisi untuk mencapai teras kerja pada RSG-GAS (Interatom, 1987).

**Tabel 3.4** Parameter Termal-hidrolika Teras-1

<b>Parameter termal-hidrolika</b>	<b>Desain</b>	<b>Hasil Eksperimen</b>
Laju alir sistem pendingin primer total (kg/s)	860	703
Kecepatan aliran di teras rerata (m/s)	3,7	3,6
Suhu masukan teras (°C)	40,5	39,75
Kenaikan suhu sepanjang teras (°C)	10,0	8,66
Suhu rerata keluaran teras (°C)	50.5	48,03
Suhu permukaan pelat bahan bakar maksimum (°C)	145	86,75
Suhu maksimum di pusat bahan bakar (°C)	175	113,9

Sumber: BATAN (2017); PRSG (1988a)

Pada bab ini telah dijelaskan tentang proses uji bagian non-nuklir dan uji bagian nuklir pada Teras 1 yang mana parameter teras reaktor yang didapatkan dari pengujian telah sesuai dengan batas keselamatan operasi reaktor. Selanjutnya, akan dilakukan pembentukan teras transisi untuk mencapai teras kerja dengan daya nominal 30 MW.



# 4

## OPERASI TERAS TRANSISI REAKTOR RSG-GAS

Tahap operasi selanjutnya adalah operasi teras transisi yang merupakan kelanjutan dari proses komisioning nuklir dalam rangka mencapai teras kerja dengan daya nominal 30 MW. Teras transisi dilakukan dengan pengoperasian reaktor secara terbatas dan melalui proses penambahan bahan bakar secara bertahap untuk membentuk teras yang lebih besar mulai dari Teras-2 hingga Teras-6. Pada tahap ini, reaktor telah menjadi milik BATAN, sehingga pengoperasian dilakukan oleh personil BATAN namun masih tetap berada di bawah supervisi dan mendapat bantuan dari INTERATOM untuk memberikan jaminan bahwa reaktor dapat beroperasi dengan selamat pada daya nominal desain RSG-GAS, 30 MW.

### A. PROGRAM OPERASI TERAS TRANSISI

Sasaran dari pengoperasian teras transisi adalah untuk mendapatkan bahan bakar dalam kelompok/kelas tertentu dengan fraksi bakar (*burn up*, BU) tertentu yang mana untuk RSG-GAS, terdapat 8 kelas BU, yakni 0 %, 8%, 16%, 24%, 32%, 40%, 48%, dan 56% seperti yang dibutuhkan untuk membentuk teras penuh atau teras kerja pada daya 30 MW (Kuntoro et al., 2021). Rekap jumlah elemen bakar FE dan CE

**Tabel 4.1** Program Pengoperasian dan Pembentukan Teras Penuh

Kelas	Teras-1		Teras-2		Teras-3		Teras-4		Teras-5		Teras-6	
	BOC	EOC										
56%												
48%												12/6
40%									12/6	12/6	12/6	4/0
32%							12/6	12/6	12/6	12/6	4/0	6/2
24%						12/6	12/6	4/0	4/0	4/0	6/2	6/0
16%			12/6	12/6	12/6	4/0	4/0	6/2	6/2	6/0	6/0	5/0
8%	12/6	12/6	4/0	4/0	4/0	6/2	6/2	6/0	6/0	5/0	5/0	7/0
0%	12/6	0/0	4/0	0/0	6/2	0/0	6/0	0/0	5/0	0/0	7/0	0/0
FE/CE	12/6	12/6	16/6	16/6	22/8	22/8	28/8	28/8	33/8	33/8	40/8	40/8

Keterangan: BOC = awal siklus; EOC = akhir siklus; FE = elemen bakar; CE = elemen kendali

**Tabel 4.2** Pelaksanaan Operasi Teras Transisi

Teras	Daya Nominal (MW)	Siklus /Waktu Operasi	Lama (Bulan)	Catatan
2	13.5	01 Januari 1989–08 Juli 1989	7	Modifikasi Kanal Daya
3	18.0	09 Juli 1989–31 Desember 1989	6	Pemasangan <i>In Pile Loop I</i>
4	22.0	01 Januari 1990–10 Juli 1990	8	Perbaikan kanal JKT01 CX821 yang bocor
5	25.0	11 Oktober 1990–10 Juli 1991	10	Pemasangan Spektroskopi neutron (3 bulan)
6	30.0	18 Juli 1991–31 Maret 1992	8	Pemasangan <i>In Pile Loop II</i>

Sumber: PRSG (1992)

Buku ini tidak diperjualbelikan.

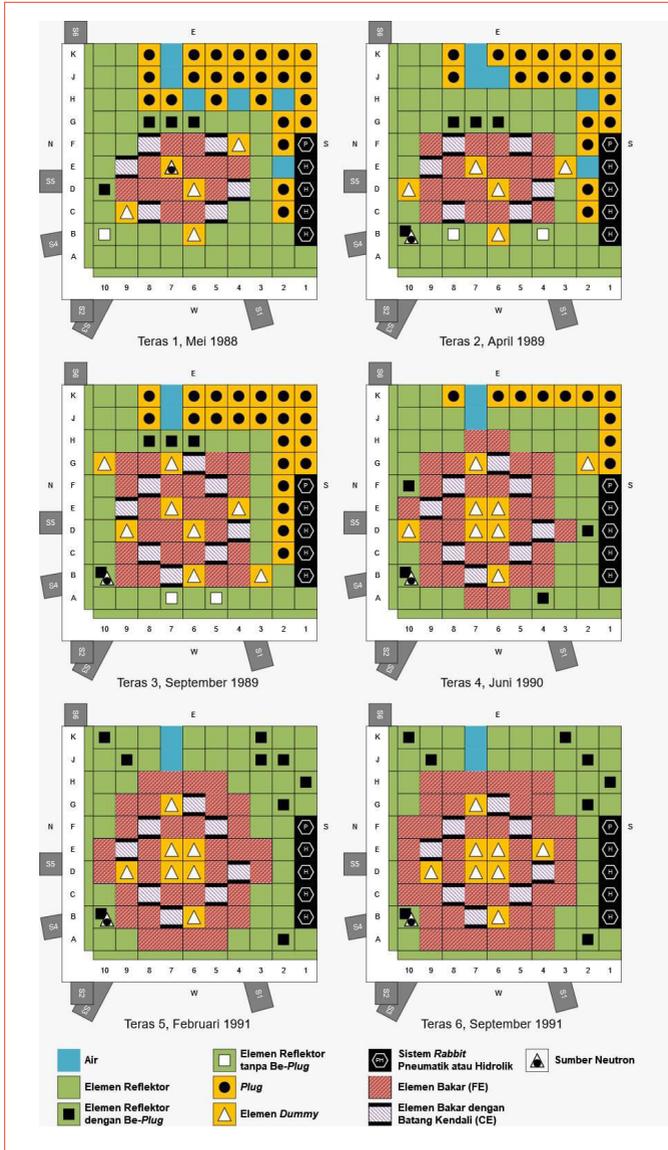
pada program pengoperasian dan pembentukan teras penuh dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Teras transisi dilakukan setelah operasi Teras-1 yang dimuati dengan 12 elemen bakar (FE) dan 6 elemen kendali (CE) terlaksana dengan baik. Pembentukan konfigurasi teras selanjutnya dapat dilihat pada Gambar 4.1, dengan detail sebagai berikut.

- 1) Teras-2 berisi 18 buah bahan bakar dan tidak ada penambahan elemen kendali.
- 2) Teras-3 berisi 22 buah bahan bakar dan 8 elemen kendali.
- 3) Teras-4 berisi 28 buah elemen bakar dan 8 buah elemen.
- 4) Teras-5 berisi 33 buah bahan bakar dan 8 buah elemen kendali.
- 5) Teras-6 berisi 40 buah elemen bakar dan 8 buah elemen kendali.

Pada setiap teras transisi, dilakukan pengukuran parameter neutronik dan termal-hidrolik (Pinem et al., 2004; Luthfi et al., 2022; Pinem et al., 2023). Hasil eksperimen ini kemudian dievaluasi untuk memastikan bahwa reaktor memenuhi kriteria keselamatan operasi reaktor. Daya nominal 30 MW telah dicapai pada tanggal 23 Maret 1992 dengan konfigurasi Teras 6 sehingga keseluruhan uji komisioning reaktor RSG-GAS hingga tercapai teras kerja yang dapat beroperasi pada daya 30 MW telah terlaksana dalam waktu 68 bulan atau lima tahun 8 bulan.

Besar daya reaktor RSG-GAS dan siklus operasi pada setiap teras transisi ditunjukkan pada Tabel 4.2. Seperti telah disebutkan sebelumnya, di Teras-1 sempat dilakukan perbaikan *beam tube* S-5 selama 9 bulan sehingga durasi siklus teras pertama lebih panjang daripada siklus teras berikutnya. Panjang siklus pada teras transisi selanjutnya berlangsung sesuai dengan rencana.



Sumber: PRSG (1992) dengan proses olah kembali  
**Gambar 4.1** Konfigurasi Teras 1 hingga Teras 6 RSG-GAS

## B. HASIL OPERASI TERAS TRANSISI

Hasil penting dari uji komisioning teras transisi dari teras pertama sampai dengan teras keenam dapat dilihat pada Tabel 4.3. Pada setiap teras, dilakukan pengukuran fraksi bakar dan reaktivitas lebih (*excess reactivity*), yakni pada awal siklus teras (BOC-*Beginning of Cycle*) dan pada akhir siklus teras (EOC-*End of Cycle*). Hasil pengukuran ini kemudian dibandingkan dengan harga desain untuk dievaluasi.

**Tabel 4.3** Hasil Komisioning Parameter Bahan Bakar Teras Transisi

Teras		1	2	3	4	5	6
MWD	Eksperimen	564	572	578	583	590	600
	Desain	547.87	587.64	601.75	583.07	654.48	621.38
Fraksi bakar BOC (%)	Eksperimen	0.00	6.42	10.56	15.25	20.25	23.93
	Desain	0.00	6.08	10.37	15.56	20.61	25.13
Fraksi bakar EOC (%)	Eksperimen	8.00	14.42	18.56	23.25	28.25	31.93
	Desain	7.43	14.14	18.64	23.47	29.42	33.08
Reaktivitas lebih (% Dk/k)	Eksperimen	10.46	10.89	11.02	10.96	11.04	10.92
	Desain	9.37	10.59	8.90	11.79	11.20	9.87
Massa kritis (g)	Eksperimen	3324.93	3530.61	3646.24	5384.80	6045.60	6454.70
Massa total (g)	Eksperimen	4074.68	4760.68	5535.04	7107.20	7686.50	8581.30

Sumber: PRSG (1992); Jujuratisbela et al. (1991)

Tabel 4.4 menyajikan hasil komisioning teras kerja, yaitu Teras-6 yang meliputi hasil pengukuran parameter neutronik seperti neraca reaktivitas dan parameter kinetik (Jujuratisbela et al., 1991). Berdasarkan Tabel 4.4, nilai neraca reaktivitas yang didapatkan dari pengukuran tidak memiliki perbedaan signifikan dengan data desain yang di dalamnya terdapat nilai-nilai parameter neutronik dan kinetik sehingga dapat dikatakan bahwa hal tersebut masih memenuhi syarat keselamatan operasi reaktor.

**Tabel 4.4** Parameter Nuklir Teras Kerja Teras-6

<b>Parameter Nuklir</b>	<b>Desain</b>	<b>Eksperimen</b>
<b>Karakteristik teras:</b>		
Jumlah elemen bakar/elemen kendali	40/8	40/8
Jumlah batang kendali (absorber)	8	8
Panjang siklus, FPD (750 MWD)	25	25
Fraksi bakar rerata saat BOC, % hilang U-235	23.3	25.13
Fraksi bakar rerata saat EOC, % hilang U-235	31.3	33.08
Fraksi bakar buang rerata saat EOC, % hilang U-235	53.7	52.35
<b>Neraca reaktivitas saat BOC:</b>		
Reaktivitas lebih, %	9.2	9.87
Nilai reaktivitas sistem batang kendali, %	-14.5	-15.68
Reaktivitas padam saat, %	-5.3	-5.81
Margin reaktivitas padam, %	-2.2	-3.66
<b>Karakteristik kinetika:</b>		
Koefisien suhu bahan bakar, Dr/OC	$-0.6 \times 10^{-5}$	$-1.7 \times 10^{-4}$
Koefisien suhu moderator, Dr/OC	$-1.1 \times 10^{-4}$	$-5.7 \times 10^{-5}$

Sumber: PRSG (1992); Jujuratisbela et al. (1991)

Parameter termal-hidrolika teras kerja RSG-GAS disajikan dalam Tabel 4.5 dengan hasil pengukuran parameter termal-hidrolika masih mendekati harga desain dan memenuhi syarat operasi berdasarkan analisis keselamatan reaktor. Berdasarkan hasil uji komisioning pada parameter neutronik dan termal-hidrolika maka teras kerja RSG-GAS telah memenuhi kriteria desain dan kriteria keselamatan operasi reaktor (Bakhri & Hastuti, 2021). Reaktor dapat beroperasi dengan selamat pada daya 30 MW dan menghasilkan fluks neutron dalam orde  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>-s dengan seluruh sistem bekerja sesuai dengan kriteria desain (Pinem et al., 1989; Pinem & Kuntoro, 1993). Dengan begitu, teras transisi yang dilaksanakan untuk mencapai teras kerja RSG-GAS telah tercapai sesuai dengan desain dan reaktor dapat dioperasikan dengan selamat.

**Tabel 4.5** Parameter Termal-hidrolika Teras Teras-6

<b>Parameter termal-hidrolika</b>	<b>Desain</b>	<b>Eksperimen</b>
Laju alir sistem primer total, kg/s	860	900
Laju alir efektif pendingin pelat bahan bakar, kg/s	618	613
Kecepatan aliran rerata di teras, m/s	3.7	4.1
Suhu masukan teras, °C	40.5	40
Kenaikan suhu sepanjang teras, K	10.0	11.1
Suhu rerata keluaran teras, °C	50.5	51.1
Suhu permukaan pelat bahan bakar maksimum, □	145	102.1
Suhu maksimum di pusat bahan bakar, °C	175	112.5
Margin keselamatan instabilitas aliran min.	3.38	4.85

Sumber: Bakhri & Hastuti (2021)

Buku ini tidak diperjualbelikan.



# 5

## OPERASI RUTIN REAKTOR RSG-GAS

Setelah melalui teras transisi untuk mencapai teras kerja yang memenuhi kriteria keselamatan maka operasi rutin RSG-GAS dapat dilakukan sesuai dengan kebutuhan penggunaan reaktor. Teras kerja reaktor RSG-GAS dapat dioperasikan secara rutin dengan panjang siklus 25 hari pada daya penuh, 30 MW. RSG-GAS dioperasikan dengan skema pemuatan bahan bakar “*scattered*”, yaitu kombinasi dari pemuatan bahan bakar dari luar-ke tengah dan dari tengah-ke luar. Bahan bakar segar dimasukkan di tepi luar teras, kemudian diikuti dengan pergeseran ke tengah, namun ada pula sebagian kelas bahan bakar dengan fraksi bakar yang lebih rendah yang digeser dari tengah ke luar.

### A. TERAS KERJA

Teras kerja adalah konfigurasi teras reaktor yang tersusun dari bahan bakar dengan distribusi fraksi bakar tertentu dan dilengkapi fasilitas eksperimen untuk mendukung kerja reaktor dalam satu siklus operasi. Penyusunan teras kerja dilakukan berdasarkan pada suatu pola pemuatan bahan bakar atau yang sering disebut dengan pola *loading*. Pada awalnya, reaktor RSG-GAS menggunakan pola pemuatan 6/1 atau 6/2 yang artinya setiap awal siklus akan ada 6 buah elemen bakar standar dan 1 buah elemen bakar kendali segar yang dimasukkan.

Hal ini bertujuan agar teras setimbang RSG-GAS dapat dioperasikan selama satu siklus, yaitu 25 hari pada daya penuh (Susilo et al., 2003).

Setiap pola pemuatan menggunakan batasan bahwa jumlah bahan bakar dalam teras adalah 48 buah yang terdiri atas 40 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali, sedangkan jumlah posisi untuk iradiasi dijaga agar tetap. Setelah dilakukan penelitian lebih lanjut, manajemen bahan bakar RSG-GAS diubah ke pola 5/1 sehingga hanya diperlukan 5 elemen bakar dan 1 elemen kendali segar yang masuk pada saat pembentukan teras baru. Dengan jumlah yang sama, elemen bakar dan elemen kendali yang fraksi bakarnya tertinggi keluar dari teras sehingga jumlah bahan bakar dalam teras tetap terjaga (Suparlina & Sembiring, 2000).

## 1. Pola Pemuatan 6/1

Pola pemuatan bahan bakar di dalam teras dapat memengaruhi keselamatan operasi reaktor dan berkaitan pula dengan ekonomi reaktor dari sisi utilisasi bahan bakar. Untuk itu, penting bagi operasi reaktor untuk menggunakan pola pemuatan bahan bakar saat operasi reaktor. Konfigurasi teras kerja reaktor RSG-GAS dengan pola pemuatan 6/1 ditunjukkan pada Gambar 5.1.

Pembentukan teras kerja dengan pola pemuatan 6/1 melalui tahapan berikut.

- 1) Bahan bakar dikelompokkan menjadi 8 kelas fraksi bakar dengan perbedaan fraksi bakar antar kelas sebesar 8%. Kedelapan kelas ini dituliskan sebagai kelas no. 1, 2, 3, ...8, dengan kelas 1 memiliki fraksi bakar 0 % (bahan bakar baru); kelas 2 = 8%; kelas 3 = 16%; kelas 4 = 24%; kelas 5 = 32%; kelas 6 = 40%; kelas 7 = 48%; dan kelas 8 = 56% sebagai fraksi bahan bakar terakhir yang keluar dari teras. Dengan jumlah total bahan bakar 48 maka setiap kelas terdiri atas 7 anggota bahan bakar kecuali kelas ke 7 yang terdiri atas 6 bahan bakar.
- 2) Pada awal siklus (BOC), teras tersusun atas 40 bahan bakar dengan kelas no. 1 sampai dengan no. 7 dan terdistribusi dalam

<b>H</b>		FE 1	FE 3	FE 5	FE 6	FE 6	FE 1	
<b>G</b>		FE 7	FE 3	IP	CE 7	FE 2	FE 7	
<b>F</b>	FE 1	FE 2	CE 2	FE 4	FE 4	CE 1	FE 3	FE 3
<b>E</b>	FE 6	CE 6	FE 4	CIP		FE 4	IP	FE 5
<b>D</b>	FE 5	IP	FE 5			FE 4	CE 5	FE 2
<b>C</b>	FE 1	FE 3	CE 4	FE 4	FE 5	CE 3	FE 2	FE 2
<b>B</b>		FE 7	FE 2	CE 7	IP	FE 3	FE 7	
<b>A</b>		FE 1	FE 6	FE 6	FE 5	FE 6	FE 1	
	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

Sumber: Susilo et al. (2003)

**Gambar 5.1** Konfigurasi Teras Kerja RSG-GAS dengan Pola 6/1

- teras reaktor seperti pada Gambar 5.1. Pada susunan bahan bakar ini, fraksi bakar rerata teras pada awal siklus adalah 23,3%.
- 3) Reaktor kemudian dioperasikan selama satu siklus untuk menaikkan fraksi bakar sebesar 8% untuk setiap bahan bakar dengan fraksi bakar rerata teras menjadi 31,3%.
  - 4) Pada akhir siklus (EOC), konfigurasi bahan bakar yang sebelumnya akan mengalami peningkatan kelas fraksi bakar, dari kelas 1 menjadi 2, dan seterusnya hingga kelas 7 menjadi kelas 8. Jumlah bahan bakar pada kelas ke 8 (56%) sebanyak 7 bahan bakar yang terdiri atas 6 elemen bakar dan 1 elemen kendali dikeluarkan dari teras (tidak digunakan lagi).
  - 5) Kemudian tujuh bahan bakar baru (kelas 1) disiapkan untuk mengganti bahan bakar yang keluar tadi sehingga penyusunan

kembali dan penambahan bahan bakar untuk membentuk teras kerja seperti pada awal siklus operasi dapat dilaksanakan.

## 2. Pola Pemuatan 5/1

Pola pemuatan 5/1 menjadi pola pemuatan yang digunakan secara rutin pada pembentukan teras reaktor RSG-GAS. Konfigurasi teras reaktor RSG-GAS dengan pola pemuatan 5/1 dapat dilihat pada Gambar 5.2.

<b>H</b>		FE 1	FE 2	FE 5	FE 4	FE 5	FE 1	
<b>G</b>		FE 3	FE 8	IP	CE 7	FE 7	FE 6	
<b>F</b>	FE 2	FE 2	CE 3	FE 6	FE 8	CE 2	FE 7	FE 1
<b>E</b>	FE 3	CE 6	FE 4	CIP		FE 6	IP	FE 3
<b>D</b>	FE 5	IP	FE 8			FE 4	CE 5	FE 5
<b>C</b>	FE 2	FE 7	CE 1	FE 7	FE 6	CE 4	FE 3	FE 1
<b>B</b>		FE 6	FE 8	CE 8	IP	FE 8	FE 4	
<b>A</b>		FE 1	FE 7	FE 4	FE 5	FE 3	FE 2	
	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

Sumber: Suparlina & Sembiring (2000); Liem et al. (1998)

**Gambar 5.2** Konfigurasi Teras Kerja Reaktor RSG-GAS dengan Pola 5/1

Proses pemuatan bahan bakar dengan pola pemuatan 5/1 dapat dijabarkan sebagai berikut.

- 1) Bahan bakar dikelompokkan menjadi 9 kelas fraksi bakar dengan beda sebesar 7% sehingga untuk kelas pertama, fraksi

bakarnya adalah 0 % (bahan bakar baru); kelas 2 = 7%; kelas 3 = 14%; kelas 4 = 21%; kelas 5 = 28%; kelas 6 = 35%; kelas 7 = 42%; kelas 8 = 49%; dan kelas 9 menjadi kelas terakhir dengan fraksi bakar 56% untuk keluar dari teras. Dengan jumlah bahan bakar dalam teras 48 buah maka tiap kelas fraksi bakar akan terdiri atas 6 bahan bakar.

- 2) Pada awal siklus (BOC), teras tersusun atas 48 bahan bakar yang terdiri atas kelas no. 1 sampai dengan kelas no. 8 yang terdistribusi dengan pola seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2 dan memiliki fraksi bakar rerata teras 23.8% pada awal siklus.
- 3) Reaktor dioperasikan selama satu siklus dengan peningkatan fraksi bahan bakar rerata sebesar 7% pada setiap bahan bakar sehingga fraksi bakar rerata teras menjadi 30,3%.
- 4) Pada akhir siklus (EOC), kelas fraksi bakar pertama menjadi kedua, dan seterusnya sampai dengan kelas ke 8 menjadi 9. Kelompok kelas no. 9 (56%) sebanyak 6 bahan bakar yang terdiri atas 5 elemen bakar dan 1 elemen kendali kemudian dikeluarkan dari teras.
- 5) Setelah menyiapkan enam buah bahan bakar baru (kelas 1) untuk mengganti bahan bakar yang dikeluarkan maka dilakukan penyusunan kembali dan penambahan bahan bakar baru untuk membentuk teras seperti pada awal siklus operasi.

## **B. SIKLUS OPERASI**

Reaktor RSG-GAS dioperasikan dengan siklus operasi tertentu yang direncanakan sebelumnya sehingga dapat memenuhi kebutuhan para pengguna reaktor dalam kegiatan eksperimen, produksi radioisotop, dan pelayanan iradiasi lainnya. Perencanaan siklus operasi dilakukan dengan tepat agar pengoperasian reaktor dapat memenuhi tujuan operasi selama rentang waktu tertentu dengan selamat dan efisien.

## 1. Siklus Operasi Desain

Siklus operasi ini telah ditetapkan sesuai dengan tujuan dan fungsi reaktor yang dimulai pada Teras-6 di tahun 1992–1998. Satu siklus teras selama periode ini secara garis besar dibagi dalam tiga tahap, yaitu tahap awal siklus, tahap operasi, dan tahap akhir siklus seperti dapat dilihat pada Gambar 5.3. Pada tiap tahap awal siklus, dilakukan kegiatan penggantian bahan bakar, penempatan fasilitas iradiasi, eksperimen dan sampel, penyiapan sarana operasi, kalibrasi batang kendali, kalibrasi daya, atau percobaan lain yang dibutuhkan untuk operasi siklus. Setelah kegiatan awal siklus selesai, reaktor dapat dioperasikan sesuai perencanaan operasi yang telah dibuat. Pada tahap akhir siklus, dilakukan kegiatan pendinginan bahan bakar dalam teras untuk mengurangi panas peluruhan dan paparan radiasinya, penyesuaian fasilitas iradiasi, hingga melakukan eksperimen dan percobaan pada daya rendah bila diperlukan, baik untuk keperluan khusus maupun untuk keperluan operasi reaktor.



**Gambar 5.3** Satu Siklus (Daur) Operasi Reaktor RSG-GAS

Kegiatan dalam satu siklus operasi secara ringkas dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 1) Reaktor dioperasikan pada daya hingga 30 MW.
- 2) Panjang siklus adalah 25 hari pada daya penuh.

- 3) Energi yang dihasilkan per siklus adalah 750 MWD.
- 4) Total durasi operasi tahap awal dan akhir siklus adalah 21 hari.
- 5) Siklus operasi reaktor dapat mencapai 8 siklus per tahun.
- 6) Peningkatan fraksi bakar rerata per bahan bakar adalah 8% per siklus.
- 7) Enam elemen bakar dan satu elemen kendali diganti per siklus.
- 8) Perawatan tahunan reaktor membutuhkan waktu 1 bulan.

Dengan demikian, pada periode ini, reaktor RSG-GAS mampu beroperasi pada daya 30 MW selama total 200 hari atau 4800 jam dalam satu tahun. Apabila reaktor dioperasikan pada daya yang lebih rendah dari 30 MW, maka panjang siklus operasi akan lebih lama, contohnya apabila reaktor beroperasi pada 15 MW, maka reaktor dapat beroperasi selama 50 hari dalam satu siklus (sebelum dilakukan penggantian bahan bakar).

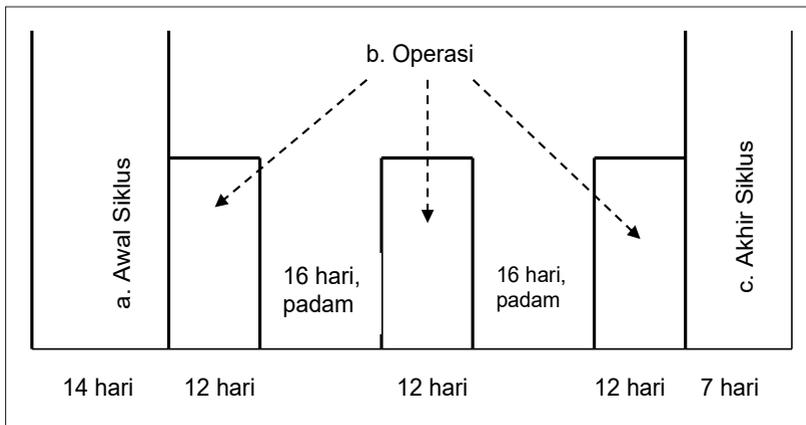
## **2. Siklus operasi saat ini**

Mulai tahun 1998, siklus operasi reaktor RSG-GAS diubah dengan pertimbangan bahwa penggunaan reaktor didominasi oleh kegiatan produksi radioisotop dan penelitian hamburan neutron yang cukup dilayani dengan daya 15 MW. Adapun penggunaan fasilitas untuk eksperimen atau uji material PLTN belum dilakukan karena berhubungan dengan program pembangunan PLTN yang ditunda atau diurungkan. Oleh karena itu, reaktor dioperasikan hanya untuk memenuhi kebutuhan produksi radioisotop dan penelitian. Kegiatan dan kondisi reaktor dapat dijabarkan sebagai berikut.

- 1) Reaktor beroperasi pada daya 15 MW.
- 2) Panjang siklus adalah sekitar 20 hari pada daya 30 MW atau 40 hari pada daya 15 MW.
- 3) Energi yang dihasilkan per siklus adalah 600 MWD.
- 4) Total durasi operasi tahap awal dan akhir siklus adalah 21 hari.
- 5) Reaktor dioperasikan hingga 4 siklus per tahun.
- 6) Tiap siklus terdiri atas 2 tahap operasi, yaitu 12 hari operasi diikuti dengan 16 hari padam.

- 7) Peningkatan fraksi bakar rerata per bahan bakar adalah 7% per siklus.
- 8) Lima elemen bakar dan satu elemen kendali diganti per siklus.
- 9) Perawatan tahunan dilaksanakan selama 1 bulan.

Kegiatan operasi reaktor dalam satu siklus operasi secara singkat ditunjukkan pada Gambar 5.4. Siklus operasi ini dilakukan dengan pola pemuatan bahan bakar 5/1, dengan lima buah elemen bakar dan satu elemen bakar kendali yang diganti baru pada setiap akhir siklus dengan panjang siklus selama 20 hari daya penuh atau 600 MWD.



**Gambar 5.4** Satu Siklus (Daur) Operasi RSG-GAS dengan Pola Pemuatan 5/1

### C. NERACA REAKTIVITAS

Neraca reaktivitas menjadi hal yang penting untuk menjamin keselamatan nuklir dan keandalan operasi reaktor. Neraca ini harus dihitung lebih dahulu sebelum pembentukan teras kerja pada saat penggantian bahan bakar. Selanjutnya, neraca harus ditentukan secara eksperimen setelah teras kerja terbentuk, sebelum operasi reaktor dimulai. Dari segi keandalan operasi, neraca reaktivitas dapat memberikan informasi besarnya reaktivitas yang tersedia untuk mengimbangi gangguan reaktivitas dari peralatan eksperimen/

sampel dan gangguan selama operasi, serta untuk mendukung panjang siklus operasi. Dari sisi keselamatan, perlu diketahui apakah besar reaktivitas batang kendali mencukupi untuk dapat memadamkan reaktor meskipun satu batang kendali dengan reaktivitas terbesar gagal masuk ke dalam teras karena sesuatu dan lain hal. Oleh karenanya, pada operasi awal teras, dilakukan percobaan kalibrasi batang kendali untuk menentukan dan memastikan neraca reaktivitas teras yang digunakan.

Untuk reaktor RSG-GAS yang menggunakan konfigurasi teras kerja dengan pola 6/1, reaktor mempunyai neraca reaktivitas hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 5.1. Berdasarkan Tabel 5.1, margin padam 2,2% masih dalam batas keselamatan operasi reaktor yang diisyaratkan, yakni 0,5%.

**Tabel 5.1** Neraca Reaktivitas Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS Pola 6/1

<b>Reaktivitas (%)</b>	<b>25 hari operasi (750 MWD)</b>
Perubahan dari panas ke dingin	0,30
Reaktivitas xenon	3,50
Perubahan fraksi bakar satu siklus	3,00
Reaktivitas untuk eksperimen	2,00
Reaktivitas untuk pengendalian operasi	0,40
Reaktivitas lebih teras (BOC, dingin, bersih)	9,20
Nilai reaktivitas batang kendali (BOC, dingin, bersih)	-14,50
Reaktivitas padam (BOC, dingin, bersih)	-5,30 (9,20–14,5)
Reaktivitas batang kendali terbesar	-3,10
Margin padam (BOC, dingin, bersih)	-2,20

Sumber: Susilo et al. (2003)

Neraca reaktivitas dengan manajemen teras pola 5/1 ditunjukkan dalam Tabel 5.2. Semua parameter neutronik pada Tabel 5.2 masih memenuhi syarat operasi reaktor berdasarkan laporan analisis keselamatan (LAK) (Batun, 2017). Margin reaktivitas padam sebesar 1,1% yang lebih besar daripada yang disyaratkan, yaitu 0,5%. Dari segi keandalan, teras mampu dioperasikan sesuai dengan yang

direncanakan, yaitu 20 hari pada daya penuh dan memiliki cadangan reaktivitas yang cukup untuk operasi.

**Tabel 5.2** Neraca Reaktivitas Pola Pemuatan 5/1

Reaktivitas (%)	20 hari operasi (600 MWD)
Perubahan dari panas ke dingin	0,60
Reaktivitas xenon	3,60
Perubahan fraksi bakar satu siklus	2,50
Reaktivitas untuk eksperimen	1,00
Reaktivitas untuk pengendalian operasi	2,20
Reaktivitas lebih teras (BOC, dingin, bersih)	9,80
Nilai reaktivitas batang kendali total (BOC, dingin, bersih)	-13,80
Reaktivitas padam (BOC, dingin, bersih)	-4,30 (9,8-13,8)
Reaktivitas batang kendali terbesar	-2,90
Margin padam (BOC, dingin, bersih)	-1,10

Sumber: Suparlina & Sembiring (2000)

## D. PENGENDALIAN REAKTIVITAS

Pengendalian operasi reaktor RSG-GAS dilakukan dengan 8 buah batang kendali yang terletak pada posisi E-9, G-6, F-8, F-5, C-5, C-8, D-4, dan B-7 di teras kerja seperti terlihat pada Gambar 5.2. Harga reaktivitas tiap batang kendali hampir sama dan batang kendali dengan reaktivitas terbesar akan dijadikan sebagai batang kendali pengatur (RR-*regulating rod*). Misalnya, jika batang kendali pengatur berada pada posisi tertentu C-8 maka 7 batang kendali lainnya yang biasa disebut batang kendali "BANK" akan berfungsi sebagai batang kendali kompensasi yang digerakkan bersamaan.

Batang kendali terbuat dari logam paduan perak-indium-kadmium (AgInCd) dengan perbandingan berat 80%:15%:5%, dan berbentuk garpu yang dapat bergerak keluar-masuk sepanjang 600 mm pada arah aksial di elemen bakar kendali. Fungsi dari sistem kendali adalah untuk:

- 1) menghidupkan dan mematikan reaktor;
- 2) menjamin subkritikalitas; dan
- 3) mempertahankan daya pada nilai tertentu secara otomatis.

Daerah operasi efektif batang kendali adalah pada ketinggian 250 mm dari dasar teras di awal siklus dan pada 550 mm pada akhir siklus operasi di mode operasi “*BANK*” (rata, sama tinggi). Batang kendali pengatur (RR) berfungsi untuk mengimbangi perubahan reaktivitas secara otomatis. Bila posisinya telah berbeda sekitar 10 mm terhadap batang kendali “*BANK*” maka operator harus menaikkan/menurunkan batang kendali “*BANK*” satu per satu sehingga tercapai posisi rata kembali untuk seluruh batang kendali. Karakteristik kedelapan batang kendali reaktor RSG-GAS dapat dilihat pada Tabel 5.3, sedangkan Tabel 5.4 untuk batang kendali pengatur.

**Tabel 5.3** Karakteristik Batang Kendali Reaktor RSG-GAS

<b>Parameter</b>	<b>Harga</b>
Jumlah batang kendali	8
Tipe	Garpu
Material	AgInCd
Langkah kerja (mm)	600
Harga reaktivitas total (%)	14,5
Harga rerata (%)	1,81
Kecepatan batang kendali, (mm/menit)	30
Laju reaktivitas rerata, (%/menit)	0,1

Sumber: BATAN (2017)

**Tabel 5.4** Karakteristik Batang Kendali Pengatur RSG-GAS

<b>Parameter</b>	<b>Harga</b>
Harga reaktivitas, (%)	1,9125
Gradien reaktivitas maksimum, (%/cm)	$4,29 \cdot 10^{-3}$
Laju reaktivitas maksimum (%/s)	$2,15 \cdot 10^{-3}$
Laju reaktivitas rerata (%/s)	$2,06 \cdot 10^{-3}$

Sumber: BATAN (2017)

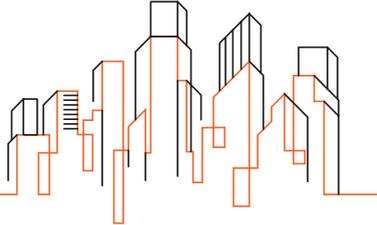
Harga reaktivitas batang kendali total adalah 14,5% dengan laju reaktivitas  $2,82 \times 10^{-2}$  %/s dan gradien reaktivitas maksimum 0,5%/cm. Secara umum, kemampuan batang kendali ini telah memenuhi persyaratannya sebagai pengendali reaktor. Pada mode operasi daya konstan, keandalan operasi bergantung dari kemampuan batang kendali pengatur untuk mengompensasi perubahan reaktivitas yang terjadi.

Berdasarkan Tabel 5.4, terlihat bahwa kemampuan batang kendali pengatur dalam mengatasi gangguan reaktivitas adalah  $2,06 \times 10^{-3}$  %/s atau 0,28 sen/s. Harga ini cukup kecil untuk keperluan pengendalian operasi sehingga kebolehdadian gagal operasi besar. Oleh karena itu, reaktor RSG-GAS didesain untuk tidak memperbolehkan kegiatan pemasukan dan pengeluaran sampel di teras selama reaktor beroperasi. Desain ini cocok untuk reaktor uji material yang mana seluruh fasilitas iradiasi yang digunakan untuk eksperimen bahan bakar dan bahan struktur reaktor ditempatkan saat reaktor belum dioperasikan.

Namun pada kenyataannya, reaktor RSG GAS tidak digunakan untuk melakukan eksperimen tersebut dan fasilitas iradiasi di teras malah digunakan untuk iradiasi sampel radioisotop dan batu topaz. Reorientasi penggunaan ini disebabkan oleh tertundanya atau sempat dibatalkannya program pembangunan PLTN di Indonesia. Oleh karenanya, untuk memfasilitasi proses pemasukan dan pengeluaran sampel iradiasi saat reaktor beroperasi, diperlukan kemampuan batang kendali pengatur yang lebih besar. Dari pengalaman di reaktor Jepang, pemanfaatan reaktor untuk iradiasi target “*moveable*” atau yang dimasukkan dan dikeluarkan pada saat reaktor beroperasi, memerlukan kemampuan kompensasi reaktivitas hingga 2 sen. Untuk mengatasi hal tersebut, penanganan keluar masuknya sampel saat reaktor beroperasi harus dilakukan dengan sangat hati-hati dan perlahan oleh operator reaktor.

Sebelum dioperasikan maka secara administrasi dan teknis, reaktor harus sudah memenuhi persyaratan operasi reaktor. Reaktor dipersiapkan dengan manajemen teras tertentu, yang meliputi kegiatan pembentukan konfigurasi teras dengan pola pemasukan bahan bakar, penentuan fraksi bakar, panjang siklus operasi, dan mekanisme penyiapannya yang aman. Selain itu, reaktor RSG-GAS tidak dioperasikan pada daya tetap karena penentuan daya operasi disesuaikan dengan keperluan pengguna reaktor. Untuk itu, pengoperasian reaktor RSG-GAS harus dilakukan dengan mode operasi yang disesuaikan dengan tujuan operasi dan kondisi reaktor. Agar reaktor dapat beroperasi dengan selamat maka teknik pengoperasian reaktor sangat penting untuk menjamin keselamatan reaktor pada berbagai operasi daya.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



# 6

## TEKNIK PENGOPERASIAN REAKTOR RSG-GAS

### A. MODA OPERASI

Reaktor RSG-GAS mempunyai 4 mode operasi, yaitu.

- 1) Moda 1: Operasi Daya  
Reaktor beroperasi pada rentang daya 3%–100% daya nominal atau 900 kW–30 MW.
- 2) Moda 2: Operasi daya rendah  
Moda 2 terbagi lagi menjadi dua mode, yaitu.
  - a) Operasi daya rendah dengan konveksi alam (sistem pendingin tidak dioperasikan). Reaktor beroperasi dengan daya  $< 1\%$  dari daya penuh atau  $< 300\text{kW}$ , baik pada kondisi kritis maupun subkritis dengan kondisi batang kendali beroperasi, namun sistem pendingin tidak dioperasikan.
  - b) Operasi daya rendah dengan konveksi paksa (sistem pendingin dioperasikan). Reaktor beroperasi dengan daya  $< 3\%$  dari daya penuh atau  $< 900\text{ kW}$ , baik pada kondisi kritis maupun subkritis dengan kondisi batang kendali beroperasi.
- 3) Moda 3: Reaktor Padam  
Kondisi seluruh batang kendali berada di bawah dan ditandai dengan:

- a) penunjuk posisi batang kendali yang berada pada posisi nol;
  - b) sistem 6 kontak yang berada pada posisi terbuka;
  - c) kunci *start-up* yang berada dalam keadaan *off*.
- 4) Moda 4: Pengisian Ulang Elemen Bakar (*Refuelling*)  
Kondisi moda 4 serupa dengan moda 3 di mana pompa primer pada kondisi mati dan sistem pendingin kolam dalam posisi siap beroperasi.

## B. TEKNIK OPERASI REAKTOR RSG-GAS

Reaktor RSG-GAS boleh dioperasikan apabila syarat teknis dan administratif berikut terpenuhi.

- 1) Reaktor RSG-GAS mempunyai izin dari Kepala PRSG dan perintah untuk mengoperasikan reaktor dari Kepala Bidang Operasi Reaktor dalam bentuk "Instruksi Operasi" yang dikeluarkan oleh Kepala Sub Bidang Pelaksanaan Operasi dan disahkan oleh Kepala Bidang Operasi Reaktor dan Kepala PRSG.
- 2) Persiapan Sarana Operasi (PSO) telah dilaksanakan dan telah disimpulkan bahwa reaktor dapat dioperasikan atau siap dioperasikan. Pelaksanaan PSO oleh Bidang Keselamatan dan Bidang Sistem Reaktor, sedangkan kesimpulan hasil PSO oleh Kepala Sub Bidang Keselamatan Operasi.
- 3) Prosedur yang disahkan oleh pejabat berwenang telah disusun apabila terdapat eksperimen tertentu yang akan dilaksanakan bersama pengoperasian reaktor.

Pada kondisi khusus, seperti apabila ada sistem atau komponen yang berhubungan dengan keselamatan yang masih dalam proses perbaikan atau tidak dalam keadaan siap operasi maka yang berhak memutuskan reaktor boleh atau tidak boleh beroperasi adalah Kepala PRSG yang dinyatakan dalam "Formulir Instruksi Operasi", setelah terlebih dahulu dilakukan penilaian keselamatan oleh Bidang Keselamatan, yakni Sub Bidang Keselamatan Operasi. PSO secara

terperinci diatur dalam Prosedur Pelaksanaan Persiapan Sarana Operasi. Kegiatan operasi reaktor RSG-GAS meliputi:

- 1) *start-up*;
- 2) operasi pada daya tetap atau stabil;
- 3) perubahan (transien) daya;
- 4) pemadaman reaktor (*scram*); dan
- 5) *start-up* yang kembali setelah *scram*.

Batasan yang harus diperhatikan dalam pengoperasian reaktor RSG-GAS dan indikatornya yang tersedia pada meja kendali di Ruang Kendali Utama adalah:

- 1) Periode reaktor *scram* berada pada posisi 15 sekon.
- 2) Kanal *start-up* JKT01 CX811/821 mempunyai cacah minimum 2 cps.
- 3) Kanal *start-up* JKT01 CX811/821 mempunyai cacah maksimum  $5 \times 10^5$  cps.
- 4) Inseri reaktivitas yang dianjurkan adalah di bawah 10 sen.
- 5) *Take over* terjadi pada saat kanal daya JKT04 =  $(2,5 - 3,5) \times 10^{-6}$  A.

Pada saat *start-up*, batang kendali hanya bisa dinaikkan apabila kondisi berikut terpenuhi.

- 1) *Bridging* "ON" dimatikan jika beroperasi dengan pendingin primer.
- 2) Kanal *start-up* menunjukkan lebih dari 2 cps.
- 3) Indikator batang kendali tidak ada yang menyala, kecuali *position down* dan *absorber down* 100%.
- 4) Kunci start "ON" berada dalam kondisi lampu *latched* menyala.
- 5) Batang kendali *BANK - up* bisa dilakukan apabila batang kendali pengatur (RR-Regulating Rod) pada "*position down*" dan "*absorber down* 100%" menyala.
- 6) Setelah batang kendali pengatur (RR) naik maka batang kendali hanya boleh dinaikkan satu per satu.
- 7) Pada posisi batang kendali pengatur (RR) yang sudah di atas, 7 batang kendali *BANK* dapat diturunkan bersama-sama, dengan

cara tombol *BANK Single* pada posisi *BANK* diikuti dengan menekan tombol “*BANK DOWN*”.

Selanjutnya, reaktor dipertahankan pada daya tertentu, bisa pada daya rendah atau pada daya tinggi, dengan mengatur posisi batang kendali pengatur (RR) sehingga fluks neutron stabil pada daya tertentu yang diinginkan. Kondisi daya stabil atau tetap ditandai dengan harga parameter periode reaktor menunjukkan angka tak berhingga dan perubahan fluks neutron menunjukkan nilai nol.

## 1. *Start-up* Reaktor

Kondisi awal adalah reaktor dalam keadaan padam dengan seluruh batang kendali (8 buah) berada pada posisi terbawah, ditunjukkan dengan posisi 0 pada meja panel. Tujuh batang kendali yang dioperasikan bersama disebut batang kendali *BANK* dan satu batang kendali sisanya disebut batang kendali pengatur (RR). Pada prinsipnya, cara melakukan *start-up* adalah dengan memberikan reaktivitas positif kepada teras reaktor dengan cara menarik batang kendali secara bertahap sehingga reaksi pembelahan inti (fisi) dapat berlangsung dan meningkat semakin banyak sampai kondisi kritis tercapai. Langkah awal adalah menaikkan batang kendali *BANK* secara bersamaan hingga tercapai posisi ketinggian kritis terakhir pada operasi sebelumnya. Setelah itu, batang kendali pengatur dinaikkan sedikit demi sedikit. Perubahan fluks neutron yang terjadi selama proses *start-up* reaktor dapat dilihat pada Gambar 6.1.

Pada setiap pemberian reaktivitas terjadi peningkatan fluks, namun hanya sampai pada suatu harga atau nilai tertentu. Ketika telah mencapai nilai tersebut, operator harus menarik/menaikkan batang kendali lagi sampai terjadi peningkatan fluks neutron. Demikian diteruskan hingga terjadi kenaikan tidak terhenti pada fluks neutron yang berarti kondisi kritis telah terlampaui dan reaktor sedang bergerak menuju kondisi superkritis. Jika terjadi kenaikan fluks neutron yang tajam ketika batang kendali dinaikkan lebih jauh, ini merupakan tanda bahwa reaktor telah melampaui kondisi kritis.

Ketika daya yang diinginkan akan tercapai maka posisi batang kendali dapat dipertahankan atau disesuaikan hingga akhirnya daya yang stabil tetap tercapai.

Berikut adalah tahapan untuk melakukan *start-up* pada reaktor RSG GAS yang dapat dilakukan oleh operator reaktor (PRSG, 2010).

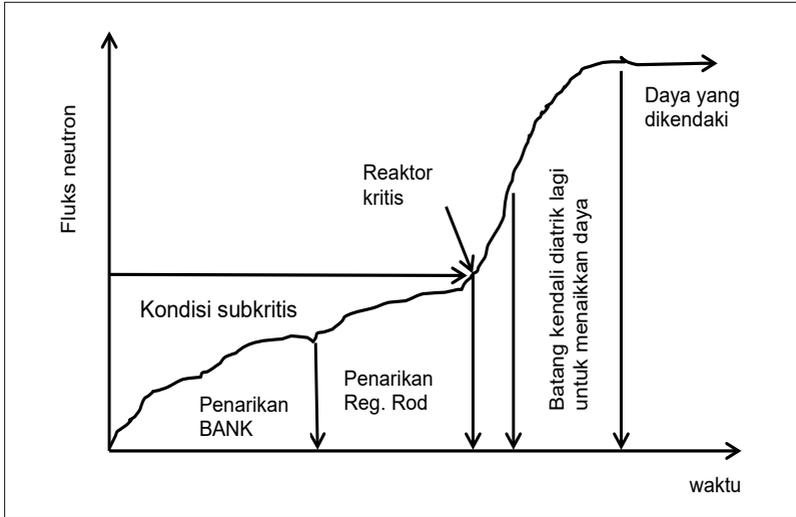
- 1) Menaikkan batang kendali *BANK* pada posisi tertentu (dengan melihat posisi batang kendali pada kondisi operasi bebas sumber sebelumnya atau atas petunjuk Supervisor).
- 2) Menaikkan batang pengatur (*Reg. Rod*) dengan memperhatikan batasan-batasan operasi yang berlaku, seperti periode reaktor (15 sekon), perekam *reactivimeter* (10 sen), kanal *start-up* JKT 01 CX811 dan CX821 ( $5 \times 10^5$  cps), dan kanal daya menengah JKT 02 CX 811 – 821.
- 3) Mengkritiskan reaktor dengan menaikkan/mengatur batang kendali RR pada daya rendah bebas sumber, atau pada kanal pengukur daya JKT 04 yang menunjukkan nilai sekitar  $2,5 \times 10^{-8}$  A.
- 4) Mencatat Informasi tentang jam tercapainya kondisi operasi dan daya reaktor (JKT 04, JKT 01, JKT 02, posisi detektor JKT 01, dan posisi BK) pada Buku Induk Operasi.

Apabila posisi batang kendali RR sudah sama dengan *BANK*, namun belum tercapai kondisi kritis bebas sumber, proses pengkritisan reaktor dapat dilakukan dengan menaikkan batang kendali satu per satu secara merata.

## 2. Operasi Daya Tetap

Penaikan daya dari kondisi kritis bebas sumber hingga mencapai daya tertentu dilakukan melalui tahapan berikut.

- 1) Menentukan level daya tinggi yang akan dituju (JKT 04 = ..... A = .....MW).
- 2) Memberikan reaktivitas positif (sekitar 10 sen) pada batang kendali RR atau menaikkan batang kendali *BANK* satu per satu secara merata dengan memperhatikan batasan-batasan operasi



**Gambar 6.1** Perubahan Fluks Neutron pada Proses *Start-up* Reaktor

yang berlaku: periode reaktor, *reaktivity recorder*, JKT 01, JKT 02, JKT 03, *Un-Balance Load*, JKT 04. Pada JKT 01 CX 811 & 821, apabila penunjukannya mendekati 105 cps, penunjukan tersebut segera diturunkan dengan menaikkan posisi detektor satu per satu secara bergantian (dengan cara menekan tombol *release* dan tombol *up* pada JKT 01 AE 11 atau JKT 01 AE 12).

- 3) Menyesuaikan daerah ukur kanal linier (JKT 04 DX 001F) dengan menekan tombol *Up/Down* sesuai dengan yang dikehendaki.
- 4) Memperhatikan indikator “*Take Over*”; menyala; yang berarti bahwa sudah saatnya operator memutar kunci *take over*, dari daerah *intermediate* ke daerah daya.
- 5) Mengurangi laju kenaikan daya dengan cara menurunkan batang kendali RR atau batang kendali *BANK* satu per satu secara merata apabila sudah mendekati level daya yang dikehendaki

- sehingga pada saat level daya tercapai, yaitu posisi *reaktivty recorder* = 0 (nol) dan perioda reaktor pada posisi tak terhingga.
- 6) Mencatat pada Buku Induk Operasi terkait jam dan level daya (JKT 03; N-16 cor; *Un - Balanced Load*) posisi batang kendali.;
  - 7) Mempertahankan daya reaktor konstan pada level tersebut dengan cara mengatur (naik/turun) batang kendali yang dapat dilakukan dengan cara manual/otomatis.

#### a. Operasi Reaktor pada Daya Konstan dengan Cara Otomatis

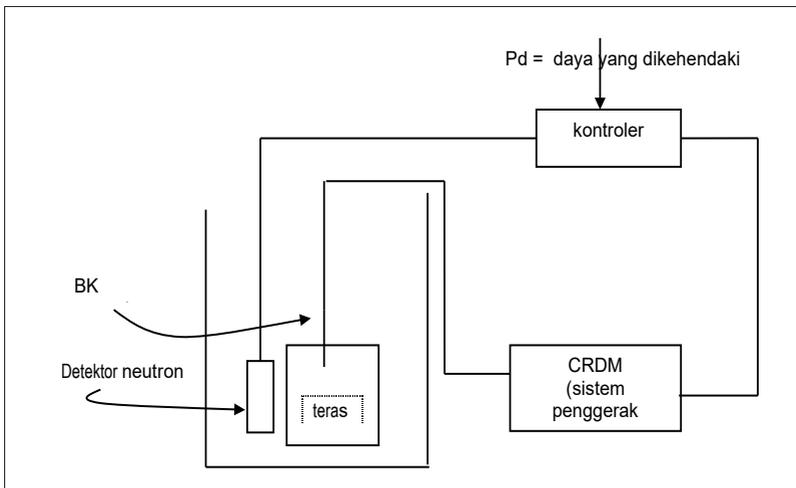
Operasi reaktor pada daya konstan dapat dilakukan secara otomatis dengan mengatur tombol *demand power* sesuai dengan skala JKT 04 = ...% sebagai tahapan awal. Selanjutnya, tombol “*Auto-Hand*” diputar ke posisi “Auto” sehingga batang kendali akan naik/turun secara otomatis sesuai dengan *demand power* yang telah diatur. Apabila daya reaktor melebihi *demand power*, batang kendali (RR) akan turun, begitu pula apabila daya reaktor kurang dari *demand power*, batang kendali pengatur akan naik. Sedangkan apabila beda ketinggian batang kendali pengatur dengan batang kendali *BANK* mencapai 7 atau 8 mm maka penyamaan posisi batang kendali harus dilakukan. Tahapan terakhir adalah mencatat pada lembar data operasi dan buku induk operasi satu kali setiap jam terkait parameter operasi, parameter sistem bantu, dan kedudukan batang kendali.

#### b. Operasi Reaktor dari Mode Otomatis ke Mode Manual

Ketika tombol “*Auto-Hand*” diputar ke posisi “*Hand*” maka pengendalian dapat dilakukan secara manual. Setelah tercapai daya tertentu pada operasi reaktor, pengendalian reaktor secara manual kemudian dialihkan ke sistem pengendalian otomatis dengan mengganti posisi tombol manual ke auto. Pada mode ini, kompensasi perubahan reaktivitas akibat kenaikan suhu, pracunan xenon, dan

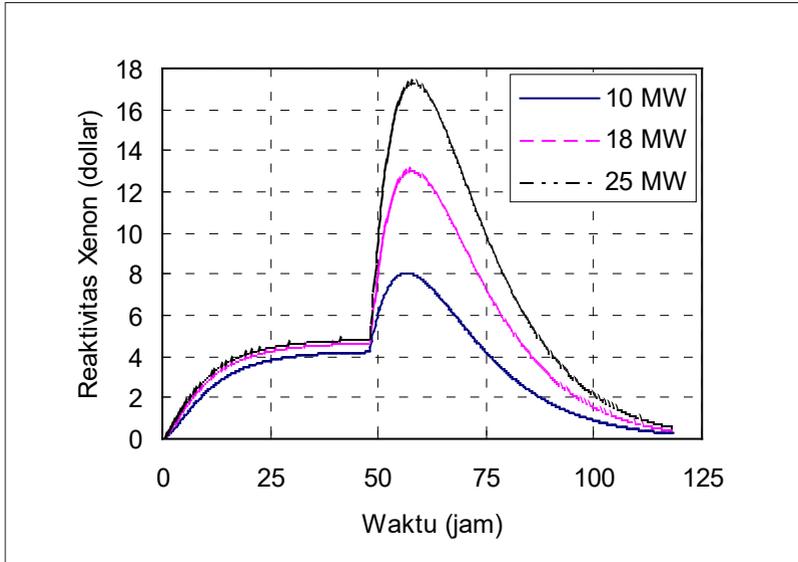
berkurangnya bahan bakar dilakukan secara otomatis sehingga risiko *scram* dapat dikurangi. Diagram alir pengendalian otomatis secara skematis sederhana diilustrasikan dalam Gambar 6.2.

Karakteristik peracunan xenon pada reaktor RSG-GAS untuk daya 10 MW, 18 MW, dan 25 MW mulai dari saat reaktor dihidupkan *start-up*, operasi daya konstan dan setelah dipadamkan dapat dilihat pada Gambar 6.3. Peracunan xenon saat operasi reaktor pada daya konstan akan mencapai kondisi seimbang (jenuh, maksimum) setelah sekitar 48 jam, sedangkan puncak jumlah xenon terjadi pada waktu sekitar 11 jam setelah reaktor dipadamkan seketika (TRIP). Harga reaktivitas peracunan xenon sendiri bergantung pada tinggi rendahnya daya operasi (Misawa et al., 2010). Makin tinggi daya reaktor, makin tinggi peracunan jenuh dan puncak xenonnya. Karakteristik peracunan harus dipahami oleh para operator, karena sangat penting untuk menentukan langkah yang tepat saat berinteraksi dengan



**Gambar 6.2** Diagram Pengendalian Daya Otomatis Reaktor RSG-GAS

reaktor apabila terjadi gangguan berhubungan dengan daya atau saat menanggapi sampel dalam teras reaktor dan memicu reaktor TRIP.



Sumber: PRSG (1992)

**Gambar 6.3** Reaktivitas Xenon Sebagai Fungsi Waktu dan Daya Reaktor

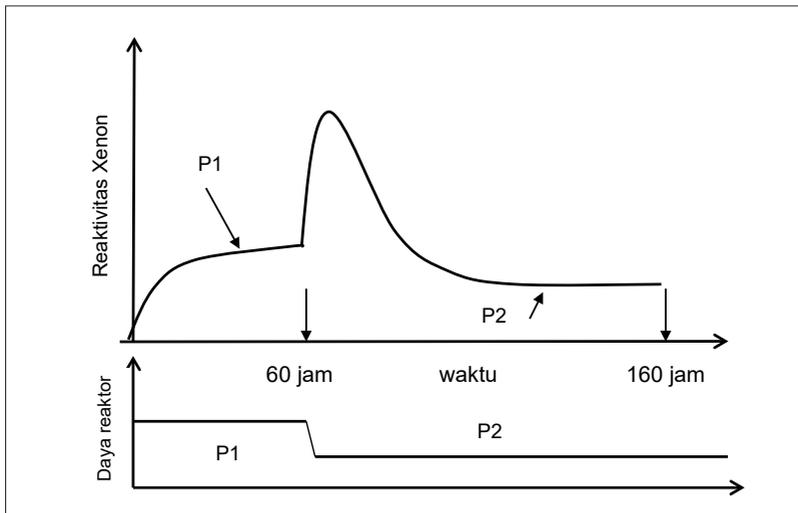
### 3. Perubahan Daya

Reaktor riset dioperasikan tidak pada daya tetap di setiap siklusnya, tapi dioperasikan pada daya yang sesuai dengan penggunaannya. Untuk itu, pengoperasian reaktor yang baik pada saat transien daya sangat penting agar reaktor tidak *scram*. Jika reaktor *scram* dan dibiarkan terlalu lama, reaktor tidak dapat langsung dioperasikan karena peningkatan reaktivitas xenon dalam teras akan mengganggu proses pembangkitan daya pada reaktor sehingga harus menunggu beberapa jam hingga reaktor dapat dioperasikan kembali. Oleh karenanya, perubahan daya reaktor tidak boleh sampai memicu reaktor untuk *scram*, supaya penggunaan reaktor menjadi lebih optimal.

### a. Penurunan Daya

Dinamika reaktivitas xenon dan perubahan daya pada saat penurunan daya reaktor dapat dilihat pada Gambar 6.4 dengan tahapan yang dilakukan operator secara garis besar adalah sebagai berikut.

- 1) Memberikan reaktivitas negatif dengan cara menurunkan batang kendali pengatur (RR) sehingga daya reaktor akan turun dari  $P_1$  ke  $P_2$ .
- 2) Menyesuaikan daerah ukur kanal linier, JKT 04 DX 001 F dengan menekan tombol "Up/Down" sesuai daerah yang dikehendaki.
- 3) Mengurangi laju penurunan daya dengan cara menaikkan batang kendali sedemikian rupa ketika sudah mendekati daerah atau level daya yang dikehendaki dengan melihat JKT 04 DX 001 F sehingga pada saat level daya tercapai, posisi perekam *reactivitymeter* adalah 0 dan periode reaktor tak berhingga.
- 4) Mencatat pada buku induk operasi terkait waktu operasi, level daya, dan posisi batang kendali.

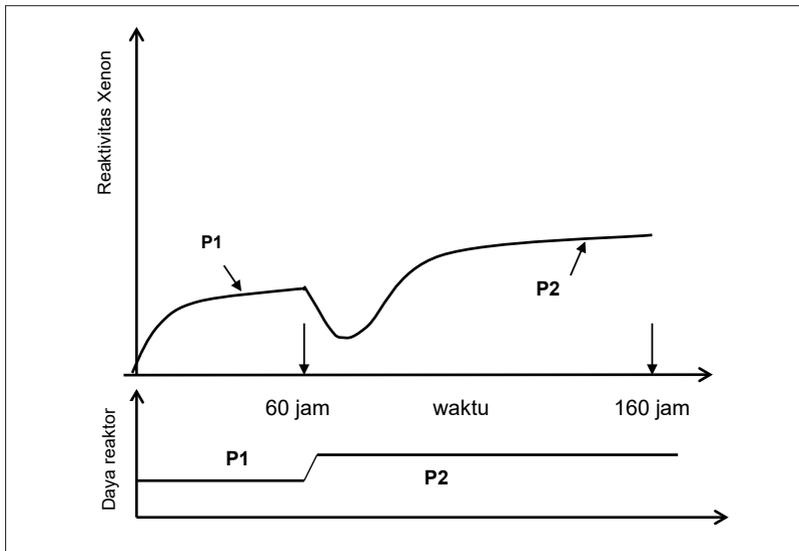


**Gambar 6.4** Reaktivitas Xenon sebagai Fungsi Waktu pada Saat Penurunan Daya Reaktor

## b. Penaikan Daya

Dinamika reaktivitas xenon dan perubahan daya pada saat menaikkan daya reaktor dapat dilihat pada Gambar 6.5 dengan tahapan untuk menaikkan daya reaktor secara garis besar sebagai berikut.

- 1) Memberikan reaktivitas positif (sekitar 10 sen) dengan cara menaikkan batang kendali pengatur yang memicu kenaikan daya reaktor (dari  $P_1$  ke  $P_2$ ).
- 2) Menyesuaikan daerah ukur kanal linier, JKT 04 DX 001 F dengan menekan tombol “Up/Down” sesuai daerah atau daya yang dikehendaki.
- 3) Mengurangi laju kenaikan daya dengan cara menurunkan batang kendali sedikit demi sedikit apabila sudah mendekati daya yang dikehendaki (lihat JKT 04 DX 001 F) sehingga pada saat level daya tercapai, posisi *reactivitymeter* 0 dan periode reaktor tak berhingga.
- 4) Mencatat pada buku induk operasi terkait waktu tercapainya daya yang diinginkan, level daya, dan posisi batang kendali.



**Gambar 6.5** Reaktivitas Xenon Sebagai Fungsi Waktu pada Penaikan Daya Reaktor

## 4. Pemadaman Reaktor

Pemadaman reaktor dapat dilakukan dengan 3 (tiga) cara, yaitu pemadaman normal, pemadaman secara pancung (*scram*), dan pemadaman *scram* otomatis (TRIP). Pemadaman normal reaktor adalah proses mematikan reaktor dengan cara menurunkan posisi batang kendali. Sedangkan pemadaman secara *scram* adalah mematikan reaktor dengan cara memutus arus listrik ke magnet sistem penggerak batang kendali sehingga batang kendali akan jatuh bebas ke dalam teras reaktor.

Pemadaman reaktor secara normal dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

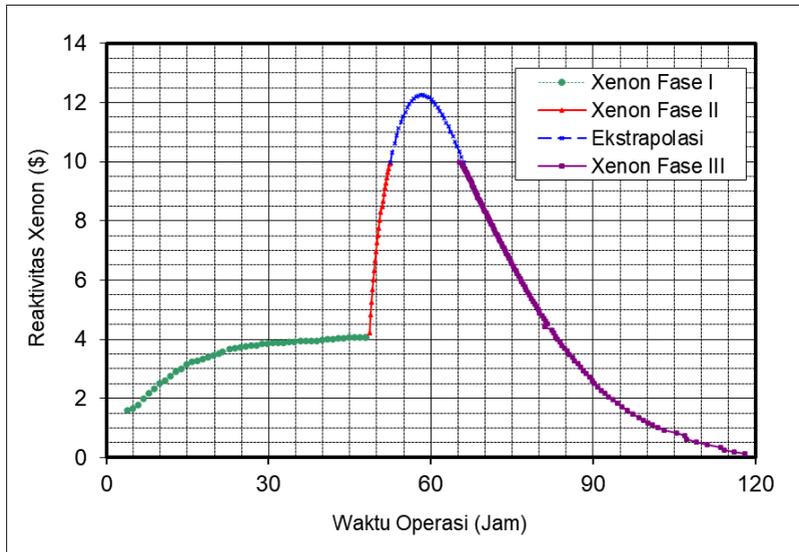
- 1) Menghidupkan *reactivitymeter* dan rekordernya.
- 2) Memindah mode operasi dari otomatis ke manual.
- 3) Memberikan reaktivitas negatif (sekitar -10 sen) dengan menurunkan batang kendali.
- 4) Mengikuti penurunan daya reaktor dengan mengatur penunjukan kanal linier (JKT 04) sesuai dengan “*range*” penunjukan.
- 5) Mempercepat penurunan daya reaktor dengan menurunkan batang kendali secara bersama-sama setelah memasuki daerah *intermediate* yang ditandai dengan lampu “*take-over*” menyala saat JKT04  $\sim 2,6 \times 10^{-6}A$ .
- 6) Menyesuaikan penunjukan kanal *start-up* dengan mengatur posisi detektor.
- 7) Menunggu hingga seluruh batang kendali pada posisi *down*.
- 8) Mematikan kunci *start*, mencabut, dan menempatkan kembali pada lemari kunci setelah batang kendali berada pada posisi *down*.

Pemadaman reaktor dengan *scram* manual dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

- 1) Melakukan *scram* manual secara bersamaan dengan menekan tombol *Scram* yang berada di R KU, R KD, Balai Operasi, dan Balai Eksperimen.

- 2) Melakukan *scram* manual terhadap batang kendali secara bertahap satu per satu dengan cara:
  - a) memosisikan saklar “*operation-test*” di ruang *Bus Bar* darurat pada posisi “*test*”; dan
  - b) menekan tombol catu daya untuk magnet JDA 01 sampai 08 sesuai dengan posisi batang kendali (JDA) yang akan dijatuhkan “*Off*”.

Jika reaktor *scram* (posisi batang kendali di bawah) maka reaktivitas xenon dalam waktu yang singkat akan naik, diikuti dengan peluruhan xenon setelah mencapai puncak jumlah xenon dalam teras. Karakteristik peracunan xenon pada daya 18 MW reaktor RSG-GAS dapat dilihat dalam Gambar 6.6. Sedangkan detail tahapan yang terjadi pada Gambar 6.6 dapat dijabarkan sebagai berikut.



Sumber: PRSG (1992)

**Gambar 6.6** Dinamika Reaktivitas Xenon sebagai Fungsi Waktu pada Daya 18MW Diikuti dengan Pemadaman Reaktor

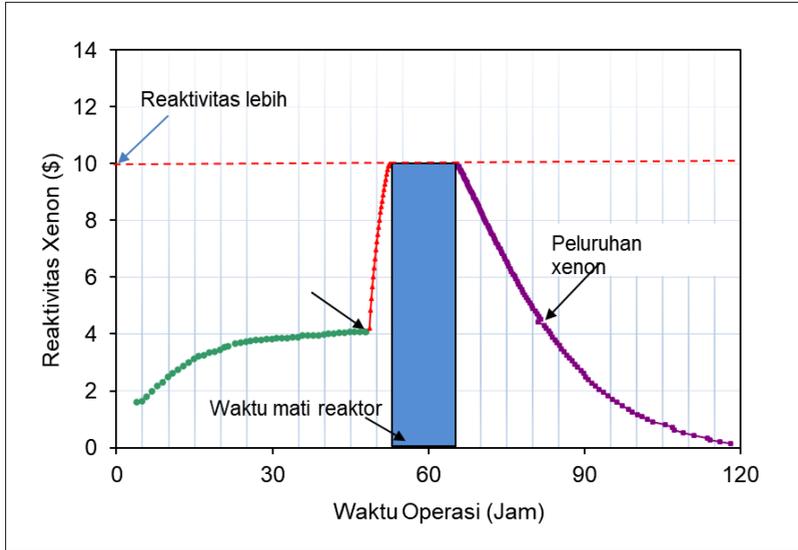
- 1) Reaktor beroperasi naik dari daya rendah ke daya 18 MW (Fase I).
- 2) Reaktor mengalami *scram* dan memicu kenaikan reaktivitas xenon dengan cepat (Fase II) sampai pada tingkatan yang mana reaktor tidak dapat dioperasikan, yaitu ketika reaktivitas xenon lebih tinggi dari reaktivitas lebih teras.
- 3) Ekstrapolasi dilakukan untuk mengetahui puncak xenon.
- 4) Kemudian xenon meluruh hingga akhirnya memberikan reaktivitas negatif yang tidak lagi tinggi di akhir (Fase III).
- 5) Reaktivitas setimbang pada kondisi ini tercapai setelah 48 jam dengan reaktivitas setimbang sekitar 4,07 \$ dan reaktivitas puncak xenon 12,35 \$.

## 5. *Restart-up* Reaktor

Pada umumnya, kemungkinan pengoperasian kembali atau *restart-up* setelah reaktor padam dengan dipancung (*scram*) dari kondisi operasi daya tinggi akan bergantung pada tingkat reaktivitas xenon saat reaktor padam, besar reaktivitas lebih teras yang tersisa dan waktu mati reaktor seperti Gambar 6.7. Gambar 6.7 adalah reaktivitas xenon saat daya reaktor beroperasi 18 MW dan reaktivitas lebih teras 10 \$. Jika reaktivitas xenon yang terakumulasi melebihi 10 \$ akibat waktu padam reaktor terlalu lama, reaktor tidak lagi dapat dioperasikan. Reaktor baru dapat dioperasikan kembali setelah reaktivitas xenon meluruh hingga lebih rendah dari 10 \$ sehingga reaktivitas lebih teras dapat membantu peningkatan daya teras reaktor. Pada skenario ini, reaktor tidak dapat dioperasikan selama kurang lebih 13,6 jam karena menunggu akumulasi reaktivitas xenon berkurang menjadi di bawah 10 \$, sebelum akhirnya dapat dihidupkan kembali.

Beberapa langkah untuk menaikkan daya reaktor (*start-up*) menuju daya tinggi pada saat xenon sedang meluruh (reaktivitas xenon bergerak turun) adalah sebagai berikut.

- 1) Menaikkan batang kendali *BANK* pada posisi yang sama dengan *BANK* pada saat daya tinggi konstan sebelum *scram* terjadi,



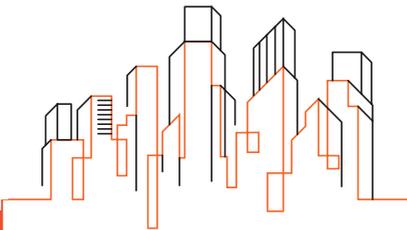
Sumber: PRSG (1992)

**Gambar 6.7** Dinamika Peracunan Xenon pada Kasus *Restart-up* Reaktor

- namun tetap dengan memperhatikan periode reaktor, *Reactivity recorder*, JKT01 CX811 & 821, JKT04, *TAKEOVER*.
- 2) Menaikkan batang kendali RR pada posisi yang sama dengan batang kendali *BANK* (dengan memperhatikan periode reaktor; *Reactivity recorder*; JKT01 CX811 & 821; JKT04; *Take-Over*).
  - 3) Melakukan tahapan untuk mengkritiskan reaktor dengan batang kendali RR pada daya rendah apabila batang kendali RR belum mencapai posisi yang sama dengan *BANK* (tahap 2), tetapi sudah ada tanda-tanda reaktor mencapai kondisi kritis.
  - 4) Mengkritiskan reaktor dengan menaikkan batang kendali satu per satu secara merata hingga tercapai kondisi kritis pada daya rendah apabila setelah posisi batang kendali *BANK* tercapai namun reaktor belum kritis.

- 5) Mencatat informasi waktu, posisi batang kendali, dan daya reaktor pada Buku Induk Operasi.
- 6) Menaikkan daya reaktor secara bertahap menuju daya yang diinginkan dengan cara menaikkan batang kendali secara merata.

Pengoperasian kembali pada saat reaktivitas xenon sedang bergerak turun akan membuat daya reaktor meningkat dengan sendirinya ketika batang kendali dидiamkan. Jadi, saat menaikkan daya reaktor ke level yang lebih tinggi, kemampuan kompensasi dari batang kendali harus dipertimbangkan. Hal ini dikarenakan seiring meningkatnya daya reaktor, makin cepat laju penurunan xenon sehingga apabila batang kendali dидiamkan sekalipun, daya reaktor akan meningkat dengan cepat.



# 7 PENUTUP

Reaktor Serba Guna – G.A. Siwabessy (RSG-GAS) telah melaksanakan fungsinya untuk beroperasi selama usia desainnya, 30 tahun, dengan aman, selamat, dan tidak mengalami kecelakaan nuklir. Hal ini membuktikan bahwa tahapan operasi reaktor mulai dari proses desain, pembangunan, serta pelaksanaan atau pengoperasian reaktor telah dilakukan dengan benar dan memenuhi persyaratan keselamatan yang ditentukan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Reaktor RSG-GAS telah memenuhi tujuan desain sebagai reaktor uji material dengan daya nominal 30 MW dan fluks neutron dalam orde  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s, menggunakan bahan bakar uranium berpengayaan rendah di bawah 20% (LEU, *Low Enriched Uranium*). RSG-GAS menjadi reaktor penelitian dengan daya tinggi pertama di dunia yang menggunakan bahan bakar LEU.

Hal lain yang menjadi kebanggaan adalah bahwa personil BATAN mampu memelihara instalasi reaktor ini sehingga selama masa hidupnya hingga usia desain 30 tahun, kondisi struktur dan sistem reaktor masih dapat beroperasi dalam kondisi baik. Dengan kondisi reaktor yang masih cukup baik maka diajukanlah perpanjangan izin operasi reaktor ke BAPETEN. Dengan beberapa pertimbangan, BAPETEN mengizinkan operasi RSG-GAS untuk diperpanjang selama 10 tahun, hingga Desember 2030, seperti terlihat pada Gambar 7.1. Dengan perpanjangan izin operasi yang telah diberikan maka

pemanfaatan reaktor RSG-GAS dapat dilaksanakan untuk mendukung penelitian, produksi isotop, dan pemanfaatan lainnya. Penggunaan reaktor diharapkan dapat membantu untuk memenuhi kebutuhan radioisotop di dalam negeri, penguasaan teknologi reaktor, teknologi bahan bakar dan ilmu bahan maju, serta peningkatan sumber daya manusia di bidang nuklir. Adapun pengalaman teknik pengoperasian yang telah dilaksanakan oleh operator RSG-GAS menunjukkan kemampuan sumber daya manusia untuk mengoperasikan reaktor dan keahlian ini perlu diteruskan kepada generasi berikutnya.

**BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR**  
Nuclear Energy Regulatory Agency  
Jl. Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120, P.O. BOX. 4005 JKT 10040  
Homepage: [www.bapeten.go.id](http://www.bapeten.go.id)

---

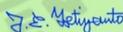
**KEPUTUSAN KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR**  
**NOMOR : 000001.270.22.071220**  
**TENTANG**  
**IZIN PEMANFAATAN TENAGA NUKLIR**  
**OPERASI INSTALASI NUKLIR**

Berdasarkan ketentuan UU No. 10 Tahun 1997 Pasal 17 ayat 1 (LN Tahun 1997 No. 23, TLN No. 3676), PP No. 54 Tahun 2012 (LN Tahun 2012 No. 107, Tambahan LN No. 5313), PP No. 2 Tahun 2014 (LN Tahun 2014 No. 8, Tambahan LN No. 5496), dan PP No. 56 Tahun 2014 (LN Tahun 2014 No. 157, Tambahan LN No. 4839) serta Permohonan Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional nomor: R/1337/BATAN/RSG/KN 00 03/12/2017 tertanggal 5 Desember 2017 perihal Permohonan Perpanjangan Izin Operasi. Dengan ini diberikan kepada:

Nama Instansi : **Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).**  
Alamat Instansi : **Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710.**  
Jenis kegiatan : **Operasi Reaktor NonDaya NonKomersial.**  
Rincian Data Teknis : Sesuai dengan lembar tambahan yang tidak terpisahkan dari Keputusan ini.

Keputusan ini berlaku sejak ditetapkan sampai dengan tanggal **6 Desember 2030.**

Ditetapkan di : **Jakarta**  
Pada tanggal : **7 Desember 2020**

Kepala BAPETEN,  
  
  
Jazi Eko Istiyanto  
NIP. 19611018 198803 1 001

Buku ini tidak diperjualbelikan.



## BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR

Nuclear Energy Regulatory Agency

Jl. Gajah Mada No. 8, Jakarta 10120, PO. BOX. 4005 JKT 10040  
Homepage: [www.bapeten.go.id](http://www.bapeten.go.id)

### LEMBAR TAMBAHAN

#### KEPUTUSAN KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR

NOMOR: 000001.270.22.071220

TENTANG

IZIN PEMANFAATAN TENAGA NUKLIR

OPERASI INSTALASI NUKLIR

#### Data Teknis

1.	Nama Instalasi Nuklir	: Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy.
2.	Daya Operasi	: 30 MW (tiga puluh megawatt).
3.	Desain Instalasi Nuklir	: Tercantum pada Dokumen Laporan Analisis Keselamatan Reaktor RSG GAS (Nomor Identifikasi: LAK 001.001/RN 00 03/RSG 4.2 Rev 11, Terbitan: 2020, Revisi 11, Tanggal disahkan: 20 November 2020).
4.	Jenis Bahan Bakar Nuklir	: Elemen Bakar dan Elemen Kendali tipe <i>Material Testing Reactor</i> jenis U.Si <sub>2</sub> -Al.
5.	Tujuan Pemanfaatan	: Penelitian, Produksi Isotop, Uji Material, dan Pelatihan.

#### Lokasi Pemanfaatan

No.	Alamat
1.	Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy, Kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Puspiptek), Gedung 30, Kelurahan Muncul, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten.

Foto: Dokumen BAPETEN (2020)

**Gambar 7.1** Perpanjangan Izin Operasi Reaktor RSG-GAS

Buku ini tidak diperjualbelikan.



## GLOSARIUM

- bahan bakar nuklir** : bahan atau material yang dapat memicu reaksi fisi (fisil) dan bahan fertil yang dapat memicu terbentuknya bahan fisil melalui proses transmudasi nuklir. Bahan fisil memiliki peluang mengalami fisi yang tinggi, ditandai denganampang lintang fisi yang besar, contohnya adalah U-233, U-235, Pu-239, Pu-241. Sedangkan contoh bahan fertil adalah U-234, U-238, dan Th-232 yang tersedia di alam dan dapat mengalami transmudasi menjadi bahan fisil. U-235 menjadi satu satunya bahan fisil yang tersedia secara natural di bumi.
- batang kendali** : bahan penyerap neutron yang sangat kuat digunakan untuk mengendalikan populasi neutron di dalam reaktor, menghidupkan reaktor, mempertahankan daya reaktor dan memadamkan reaktor. Contohnya adalah bahan Boron, Kadmium, Perak, Indium, Hafnium.
- energi fisi** : energi hasil reaksi fisi yang bisa berupa panas maupun energi foton yang sangat besar dan dapat mencapai 200 MeV per reaksi fisi.

<b>faktor multiplikasi</b>	: perbandingan antara jumlah neutron sesudah terhadap sebelum masuk medium reaksi fisi atau teras reaktor. Faktor multiplikasi bisa juga dinyatakan sebagai perbandingan jumlah neutron pada dua generasi neutron yang berurutan.
<b>fluks neutron</b>	: jumlah neutron pada tiap satuan luas tiap sekon, dengan satuan ( $n/cm^2.s$ ).
<b>fraksi bakar</b>	: energi hasil reaksi fisi yang dilepas per satuan massa bahan bakar dan satuan yang sering dinyatakan dalam satuan MWd/ton.
<b>koefisien reaktivitas</b>	: nilai perubahan reaktivitas yang disebabkan oleh perubahan parameter operasi reaktor.
<b>koefisien reaktivitas suhu</b>	: terdiri dari koefisien reaktivitas suhu bahan bakar dan suhu moderator.
<b>koefisien suhu bahan bakar</b>	: perubahan reaktivitas untuk setiap peningkatan suhu bahan bakar.
<b>koefisien suhu moderator</b>	: perubahan reaktivitas untuk setiap peningkatan suhu moderator.
<b>koefisien reaktivitas void</b>	: perubahan reaktivitas setiap persen volume <i>void</i> yang terbentuk, di mana void bisa berupa uap air yang terbentuk akibat terjadinya pendidihan air dalam teras reaktor.
<b>moderator neutron</b>	: bahan yang berfungsi untuk memperlambat kecepatan neutron dari cepat (energi tinggi) menjadi lambat (energi rendah) melalui proses hamburan neutron dengan bahan moderator.
<b>medium multiplikasi</b>	: susunan bahan bakar dan moderator tempat berlangsungnya reaksi fisi berantai.
<b>reflektor</b>	: bahan yang berfungsi untuk memantulkan kembali neutron agar kembali ke dalam teras.

- massa kritis** : jumlah massa minimum dari bahan bakar dengan komposisi tertentu yang kemudian dapat dibentuk dengan ukuran atau geometri tertentu sehingga dapat memicu reaksi fisi berantai.
- neutron serempak** : neutron yang dihasilkan saat reaksi fisi berlangsung dengan umur berkisar  $10^{-4}$  s.
- neutron kasip** : neutron yang dilepaskan oleh produk fisi sebagai hasil peluruhan dengan umur berkisar 0,1 s.
- peracunan xenon** : Selama reaktor beroperasi, akan dihasilkan berbagai jenis nuklida produk fisi yang beberapa di antaranya memilikiampang lintang serapan neutron yang tinggi sehingga dapat mengurangi populasi neutron dalam teras dan mengganggu kelangsungan operasi reaktor. Produk fisi ini dapat disebut sebagai isotop racun neutron. Dua isotop yang populasinya cukup besar dalam teras reaktor adalah gas ideal xenon dan samarium. Nuklida Xe-135 mempunyaiampang lintang serapan sangat besar, yaitu sebesar  $2,5 \cdot 10^6$  barn dan Sm-149 mempunyaiampang lintang serapan sebesar  $4,1 \cdot 10^4$  barn, sedangkan sebagai pembandingan,ampang lintang fisi Uranium-235 hanya sekitar 584,4 barn.
- peracunan samarium** : Sama seperti penjabaran sebelumnya, namun Sm memberikan pengaruh relatif lebih kecil dibandingkan peracunan xenon karenaampang lintang serapan yang lebih rendah.
- radioaktivitas** : perubahan keadaan inti atom untuk mencapai kondisi stabil yang dapat disertai dengan pancaran radiasi partikel ataupun gelombang elektromagnetik.

- reaktor nuklir** : suatu fasilitas atau instalasi yang menghasilkan energi panas dan radiasi yang bekerja berdasarkan reaksi fisi berantai yang terkendali dari inti bahan bakar nuklir. Reaktor nuklir kemudian dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu reaktor riset yang memanfaatkan radiasinya dan reaktor daya yang memanfaatkan energi panas untuk dikonversi menjadi energi listrik pada PLTN maupun untuk kebutuhan panas di industri.
- reaksi inti** : interaksi antara dua inti atom atau antara inti yang dapat menghasilkan partikel maupun radiasi.
- reaktivitas** : suatu ukuran untuk menunjukkan seberapa jauh kondisi reaktor dari kondisi kritisnya. Besaran ini tidak memiliki dimensi, namun bisa disampaikan dengan satuan dk/k, %, mk, pcm (per cent mile) dan \$ (dollar).
- reaktivitas lebih** : reaktivitas yang ditimbulkan oleh sejumlah massa bahan bakar melampaui massa kritisnya.
- sumber neutron** : bahan yang dapat menghasilkan neutron. Pada praktiknya, dapat dibuat dari isotop yang meluruh dengan memancarkan neutron seperti Cf-252 atau bisa juga dengan mencampurkan 2 bahan yang memiliki karakter tertentu. Bahan yang dicampurkan ini salah satunya dapat memancarkan radiasi *alpha* misal *plutonium* (Pu) dan *americium* (Am), sedangkan bahan kedua adalah bahan yang dapat menghasilkan neutron ketika berinteraksi dengan sinar *alpha* contohnya *berilium* (Be). Contoh sumber neutron yang seperti ini adalah *plutonium* dan *berilium* (Pu-Be) atau *americium berilium* (Am-Be). Kekuatan sumber neutron kemudian dinyatakan dengan jumlah neutron yang dipancarkan per sekon, n/s.

- teras reaktor** : tempat terjadinya reaksi fisi berantai di reaktor yang tersusun atas beberapa komponen, yaitu bahan bakar nuklir, moderator, reflektor, batang kendali, bahan pendingin, dan sumber neutron.
- uranium alam** : terdiri dari U-234, U-235, dan U-238. U-234 berjumlah hanya 0,006%, sedangkan nuklida fisi U-235 berjumlah sebesar 0,7% dan nuklida fertil U-238 sebanyak 99,3%.
- pengujian bagian non-nuklir** : suatu kegiatan uji fungsi sistem-sistem reaktor sehingga seluruh sistem tersebut dapat berfungsi dengan baik dan siap untuk mendukung dilakukannya komisioning nuklir.
- pengujian bagian nuklir** : pemuatan awal bahan bakar dan sumber neutron sebagai langkah awal pemuatan teras untuk kekritisasi, serta berakhir setelah dicapainya keadaan operasi pada daya nominal 30 MW secara kontinu sesuai dengan kemampuan siklus operasi reaktor.
- reaktor daya nuklir** : reaktor nuklir yang memanfaatkan energi panas yang dihasilkan dari reaksi pembelahan berantai yang terkendali untuk menghasilkan listrik, panas proses dan atau uap panas.
- Reaktor riset** : reaktor nuklir yang memanfaatkan neutron yang dihasilkan dari reaksi pembelahan berantai terkendali, dan digunakan untuk penelitian, produksi isotop, uji bahan, serta pendidikan dan pelatihan.
- jenis reaktor** : sekumpulan karakteristik yang mendefinisikan kategori reaktor nuklir yang dapat dibangun, misalnya, sifat moderator, sifat sistem pendingin, dan energi neutron yang menyebabkan reaksi fisi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



- Badan Tenaga Nuklir Nasional. (1982). *Supply contract of multipurpose reaktor between National Atomic Energy Agency (BATAN) and Interatom GmbH*. [Dokumen internal tidak dipublikasikan].
- Badan Tenaga Nuklir Nasional. (2017). *Laporan analisis keselamatan RSG-GA Siwabessy, Rev. 11*. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Bakhri, S., & Hastuti, E. P. (2021). Analysis of oxide fuel element temperature of RSG-GAS by using experiment and calculation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1772(1), 1–9. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1772/1/012053>
- Hamzah, A., & Dauk. (1988). *N-flux measurement, DATA-REPORT, commissioning Code*. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Hastuti, E., P. (2003). Analisis transien teras kerja silisida RSG-GAS dengan tingkat muat 2.96 g U/cc. Dalam Amir Hamzah (Ed.), *Prosiding Seminar Hasil Penelitian P2TRR Tahun 2003*, 175–179. Badan Tenaga Nuklir Nasional. [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:44007582](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:44007582)
- Hong, L. P. (1999). Validation of BATAN's standard 3-D diffusion code, BATAN-3DIFF, on the first core of RSG GAS. *Atom Indonesia*, 25(1), 47–64. <https://citeseerx.ist.psu.edu/documen>

t?repid=rep1&type=pdf&doi=68969d2523ad79107a8b28ecb1e7ec71bcf8563a

- International Atomic Energy Agency. (1992). *Code on the safety of nuclear research reactors: Operation, IAEA safety series No. 35-S2*. IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2006). *Commissioning of research reactors, IAEA safety standards series No. NS-G-4.1*. IAEA. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1268\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1268_web.pdf)
- Interatom. (1987). *Safety analysis report*, Vol.4, Rev.7. [Dokumen internal tidak dipublikasikan].
- Jujuratisbela, U. (1989). Komisioning nuklir teras satu RSG G.A. Siwabessy. Dalam *Prosiding Seminar Seperempat Abad Reaktor Nuklir Mengabdikan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 107–113. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/17476>
- Jujuratisbela, U., Arbie, B., Pinem, S., Tukiran, Suparlina, L., & Singh, O. P. (1991). *Kinetics parameter measurements on RSG-GAS, a low enriched fuel reactor*. International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, 333–350.
- Kuntjoro, S., & Pinem, S. (1987). Kekritisannya pertama reaktor G.A. Siwabessy. Dalam *Prosiding Seminar Teknologi Daur Bahan Bakar dan Keselamatan Nuklir*.
- Kuntoro, I., Pinem, S., Sembiring, T. M., Haryanto, D., & Purwanto, S. (2021). Evaluation of equilibrium core operation of the RSG-GAS Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 23(1), 15–20. <http://dx.doi.org/10.17146/tdm.2021.23.1.6150>
- P. H., Arbie, B., Sembiring, T. M., Prayoto, P., & Nabbi, R. (1998). Fuel management strategy for the new equilibrium silicide core design of RSG GAS (MPR-30). *Nuclear Engineering and Design*, 180(3), 207–219. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(97\)00301-4](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(97)00301-4)

- Liem, P. H., & Sembiring, T. M. (2010). Design of transition cores of RSG GAS (MPR-30) with higher loading silicide fuel. *Nuclear Engineering and Design*, 240(6), 1433–1442. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.01.028>
- Luthfi, W., Pinem, S., Hartanto, D., Suparlina, L., & Haryanto, D. (2022). Measured and calculated integral reactivity of control rods in RSG-GAS First Core. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 24(1), 37–44. <http://dx.doi.org/10.17146/tdm.2022.24.1.6593>
- Misawa, T., Unesaki, H., & Pyeon, C. (2010). *Nuclear reactor physics experiments* (1–129). Kyoto University Press <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/276400/1/9784876989591.pdf>
- Pinem, S., Hamzah, A., & Jujuratisbela, U. (1989). Pengukuran distribusi fluks neutron termal aksial pada elemen bakar teras II RSG G. A. Siwabessy. Dalam *Prosiding Seminar Seperempat Abad Reaktor Nuklir Mengabdikan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi* (150–155). [https://karya.brin.go.id/id/eprint/17663/1/31%20Proceeding\\_Surian\\_BATAN\\_1989.pdf](https://karya.brin.go.id/id/eprint/17663/1/31%20Proceeding_Surian_BATAN_1989.pdf)
- Pinem, S., & Kuntoro, I. (1993). Pengukuran spektrum neutron pada sistem rabbit RSG-GAS. Dalam *Prosiding Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir* (123–131). PRSG, PPTKR -BATAN.
- Pinem, S., Luthfi, W., Liem, P. H., & Hartanto, D. (2023). Evaluation of neutronics parameters during RSG-GAS commissioning by using monte carlo code. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(5), 1775–1782. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.01.008>
- Pinem, S., Tukiran, & Susilo, J. (2004). Pengukuran parameter kinetik teras silisida dengan kerapatan 2,96 g U/cc reaktor RSG-GAS. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*, A4(0218), 1–6. Himpunan Fisika Indonesia. [https://www.researchgate.net/publication/318707892\\_Pengukuran\\_Parameter\\_Kinetik\\_Teras\\_Silisida\\_Dengan\\_Kerapatan\\_296\\_gUcc\\_Reaktor\\_RSG-GAS](https://www.researchgate.net/publication/318707892_Pengukuran_Parameter_Kinetik_Teras_Silisida_Dengan_Kerapatan_296_gUcc_Reaktor_RSG-GAS)

- Pusat Reaktor Serba Guna. (1987). *Laporan percobaan kekritisan reaktor RSG G.A. Siwabessy*. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (1988a). *G.A. Siwabessy multipurpose reaktor commissioning tests 0–10.7 MW power*. Report: PRSG-1. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (1988b). *Report of the operation of RSG-GAS reaktor first core*. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (1992) *Laporan komisioning teras-6 reaktor RSG G.A. Siwabessy*. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (2010). *Petunjuk pelaksanaan start-up, menaikkan daya, dan shut down reaktor G.A. Siwabessy*. No. Ident. RSG.OR.19.03.42.10 Rev.: 00; 2010. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (2020). *Laporan operasi reaktor RSG-GAS teras-100*. [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Sembiring, T. M., Tukiran, & Pinem, S. (2001). Neutronic design of mixed oxide-silicide cores for the core conversion of RSG-GAS reactor. *Atom Indonesia*, 27(2), 85–101.
- Suparlina, L., & Sembiring, T. M. (2000). Analisis keselamatan menggunakan pola penggantian 5/1 teras berbahan bakar silisida dari 2, 96 gr U/cc ke 3, 55 gr U gr/cc. Dalam prosiding *Seminar Hasil Penelitian P2TRR* (140–145). <https://karya.brin.go.id/id/eprint/8500/1/23%20lili%20suparlina.pdf>
- Susilo, J., Sembiring, T. M., & Pinem, S. (2003). Penggunaan pola 6/1 dalam pemuatan bahan bakar teras silisida 2, 96 gU/cc RS-GAS. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, 55(3), 109–117.
- Wickert, M. (1986). *Concept and methods of the program MAIN: controlling the IAEFUEL program cycle for neutronic calculations regarding research reactor*, Interatom Bericht/Report Ident-No:54.07100.4



## TENTANG PENULIS



**Iman Kuntoro** adalah Peneliti Utama di Bidang Teknologi Reaktor Nuklir di PRTRN-BRIN, lahir di Purwokerto, 4 Oktober 1954 dan meninggal dunia pada 1 Juni 2023. Memiliki gelar Sarjana Teknik/Insinyur dari jurusan Teknik Nuklir, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada dengan spesialisasi Teknologi Reaktor pada tahun 1980.

Masuk pertama di BATAN pada 1 Januari 1978 sebagai staf di Dinas Reaktor BATAN Yogyakarta. Jabatan struktural yang pernah disandang antara lain Kepala Subbidang Bahan Bakar Reaktor (1981–1985) di Pusat Penelitian Bahan Murni dan Instrumentasi (PPBMI) Yogyakarta, cukup lama bertugas di Pusat Reaktor Serba Guna Serpong sebagai Kepala Bidang Operasi Reaktor (1986–1992), Kepala Bidang Fisika Reaktor (1992–1996), Kepala Bidang Pengembangan Teknologi Reaktor (1999–2002), dan Kepala Pusat (2002–2007). Kemudian sempat menjabat sebagai Kepala Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) – BATAN (2008–2011) hingga akhirnya bekerja di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor (PTKRN) – BATAN yang berganti nama menjadi Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN) - BRIN. Tugas Luar Negeri: partisipasi desain reaktor RSG-GAS di Interatom, Jerman (6 bulan, 1983); training Operator Reaktor di GKSS Jerman (1 tahun, 1984); 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 kegiatan pembangunan dan komisioning reaktor RSG-GAS (1985–1992); mengikuti beberapa *workshop Utilization of Research Reactor dan Reactor Safety* di Jepang (1999), Australia (2003), Korea (2003), Vietnam (2004), Thailand (2005), dan China (2006). Mengikuti beberapa kali *Technical meeting IAEA* bidang *reactor safety* di Austria (2003–2006; 2012) dan IAEA Expert Mission ke Yordania (1 minggu, 2013).



**Surian Pinem**, Profesor Riset Bidang Fisika Nuklir di PRTRN-BRIN, lahir di Medan, 16 Juni 1957. Memiliki Gelar Sarjana Fisika di Universitas Sumatera Utara pada tahun 1984, selanjutnya meraih gelar Magister Sains, dari jurusan Sains Bahan Fakultas MIPA Universitas Indonesia pada tahun 1999. Masuk pertama di BATAN 1 Maret

1986 sebagai peneliti di Bidang Fisika Reaktor di Pusat Reaktor Serba Guna, Serpong. Pada tahun 2006 mutasi ke Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir hingga akhirnya berganti nama menjadi Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN) - BRIN. Meraih gelar Profesor Riset pada tahun 2009. Mengikuti kegiatan pembangunan dan komisioning reaktor RSG-GAS (1986–1992). Kegiatan ilmiah yang pernah diikuti di antaranya adalah Diklat Keahlian Dasar Bidang Nuklir, Yogyakarta (1986); Diklat Pengantar Fortran dan Aplikasi Komputer, Serpong (1988); dan Diklat Operator dan Supervisor Reaktor Nuklir, Serpong (1989). Tugas luar negeri dalam rangka training, workshop antara lain ITC on Nuclear and Neutron Dosimetry, Uni Soviet (1989); Training in DSA and Reactor Noise Analysis, Belanda (1992); Nuclear Engineering ND, Technology, Hongaria (1996); Neutron Flux Measurement, Jepang (1996); Neutron Spectrum Measurement, Korea Selatan (1996); Candu Physics Analysis, Canada (2000); Research Reactor Technology, Malaysia (2006); dan *The Utilization of Research Reactors*, Philippine (2007).



- absorber, 46, 65
- atom, 85, 86
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir, xvi, 12, 28, 79
- bahan bakar, 2, 12, 16, 17, 20, 24, 30, 34, 35, 36, 38, 40, 41, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 60, 70, 79, 80, 84, 86
- barn*, 85
- batang kendali, 36, 39, 46, 54, 57, 58, 59, 60, 63, 65, 66, 67, 69, 72, 73, 74, 75, 78, 87
- batang kendali bank, 65, 66
- batang kendali pengatur, 59, 60, 65, 66, 72, 73
- cherenkov, 38
- daya reaktor, 30, 33, 38, 67, 69, 70, 72, 73, 74, 78, 83
- dekomisioning, xv
- dollar, 86
- elemen bakar, 16, 35, 36, 39, 42, 43, 46, 55, 56, 58, 64
- elemen kendali, 35, 36, 39, 43, 46
- energi fisi, 84
- energi panas, 86, 87
- fasilitas eksperimen, 17, 49
- fasilitas iradiasi, 16, 17, 20, 54, 60
- fluks neutron, xi, 12, 31, 36, 38, 46, 66, 79
- fraksi bakar, 41, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 84
- gelombang elektromagnet, 85
- inti atom, 85
- isotop, 16, 80, 85, 86, 87
- izin operasi reaktor, 79
- keselamatan operasi, 1, 2, 30, 40, 43, 45, 46, 50, 57
- keselamatan reaktor, xvi
- koefisien reaktivitas, 84

komisioning, xi, xv, 24, 25, 26, 27,  
 28, 29, 31, 32, 34, 36, 38, 41,  
 43, 45, 46, 94  
 kondisi kritis, xi, 24, 34, 36, 37, 66,  
 67, 77, 86  
 konveksi alam, 63  
 kritis bebas sumber, 67  
  
 laju alir, 40, 47  
 LAK, 27  
  
 marjin padam, 57, 58  
 masa hidup reaktor, xi, 32  
 massa kritis, 85, 86  
 massa lebih, 86  
 moda operasi, 59, 60, 63, 74  
 moderator, 39, 46, 84, 87  
  
 Neutron, xi, 12, 15, 16, 17, 19, 31,  
 34, 35, 36, 37, 38, 42, 46, 55,  
 66, 79, 94  
 neutron cepat, 84  
  
 operasi daya, 60, 63, 67, 70  
 operasi daya rendah, 63  
 operasi komisioning, xi  
 operasi rutin, xi, xv, 2, 28, 49  
 operasi teras transisi, xi, 28, 41  
  
 paket serah terima, 32, 33  
 pendingin, 12, 31, 38, 40, 47, 63, 65  
 penerimaan akhir, 28, 33  
 penggunaan reaktor, 19, 20, 55,  
 56, 80  
 peracunan xenon, 38, 69, 70, 75  
 kekayaan rendah, xi, 36, 79  
 kekayaan tinggi, 12  
 PLTN, 16, 17, 20, 55, 60  
 produk fisi, 85  
  
 program jaminan mutu, 25  
  
 radiasi, 38, 85, 86  
 radio isotop, 17  
 reaksi fisi, 84, 85, 86  
 reaktivitas, 30, 36, 38, 39, 46, 56, 57,  
 58, 59, 60, 65, 66, 67, 69, 70,  
 72, 73, 74, 76, 84, 86  
 reaktivitas padam, 39, 46, 57, 58  
 reaktor daya, xi, 16, 36  
 reaktor nuklir, xv, xvi, 24, 36, 93, 94  
 reaktor penelitian, 79  
 reaktor uji material, 60, 79  
 reflektor, 12, 17, 34  
 ruang kendali, 65  
  
 siklus operasi reaktor, 55  
 sistem pendingin, 12, 40, 63  
 sistem rabbit, 16, 17  
 sistem ventilasi, 12  
*start-up*, 29, 65, 66, 67, 74  
 sumber neutron, 87  
  
 tabung berkas neutron, 16, 18, 34  
 tahap desain, xv  
 teras penuh, 41, 45  
 teras reaktor, 16, 18, 20, 30, 35, 66,  
 74  
 teras transisi, xi, 28, 41, 45  
 topaz, 17, 19, 20, 60  
  
 uji konstruksi, 27, 28, 29  
 uji non nuklir, 28, 29, 32  
 uji nuklir, 24, 28, 29, 30, 33, 38  
 umur desain reaktor, 11  
 uranium, xi, 12, 36, 79  
  
 xenon, 85

---

Sebuah kebanggaan bagi bangsa Indonesia di bidang ketenaganukliran atas kerja keras putra-putri bangsa yang telah berhasil membawa Reaktor Serba Guna – G. A. Siwabessy (RSG-GAS) sebagai reaktor daya dengan fluks neutron tinggi pertama di dunia yang menggunakan bahan bakar uranium dengan pengayaan rendah. RSG-GAS merupakan hasil kerja sama “Proyek Putar Kunci” atau “Turn Key Project” dengan INTERATOM, sebuah perusahaan Jerman Barat. Reaktor ini telah memasuki masa hidup kedua sejak tahun 2021, setelah mampu melewati desain masa hidup 30 tahun. Melalui penerapan prinsip-prinsip pengoperasian reaktor dengan baik, RSG-GAS mampu memenuhi syarat keselamatan nuklir selama masa hidup 30 tahun pertamanya.

Buku *Teknik Pengelolaan Reaktor Nuklir RSG-GAS* hadir untuk menyajikan tidak hanya tentang histori pembangunan dan prinsip-prinsip pengelolaan RSG-GAS, tetapi juga tentang bagaimana reaktor ini mampu melewati masa hidup pertamanya sejak mulai dibangunnya instalasi pada tahun 1983.

---

BRIN Publishing  
*The Legacy of Knowledge*

Diterbitkan oleh:  
**Penerbit BRIN**, anggota Ikapi  
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,  
Jln. M.H. Thamrin No. 8,  
Kota Jakarta Pusat 10340  
E-mail: [penerbit@brin.go.id](mailto:penerbit@brin.go.id)  
Website: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)

DOI: [doi.org/10.55981/brin](https://doi.org/10.55981/brin)



ISBN 978-623-8372-74-4



9 786238 137258 4

Buku ini tidak diperjualbelikan.