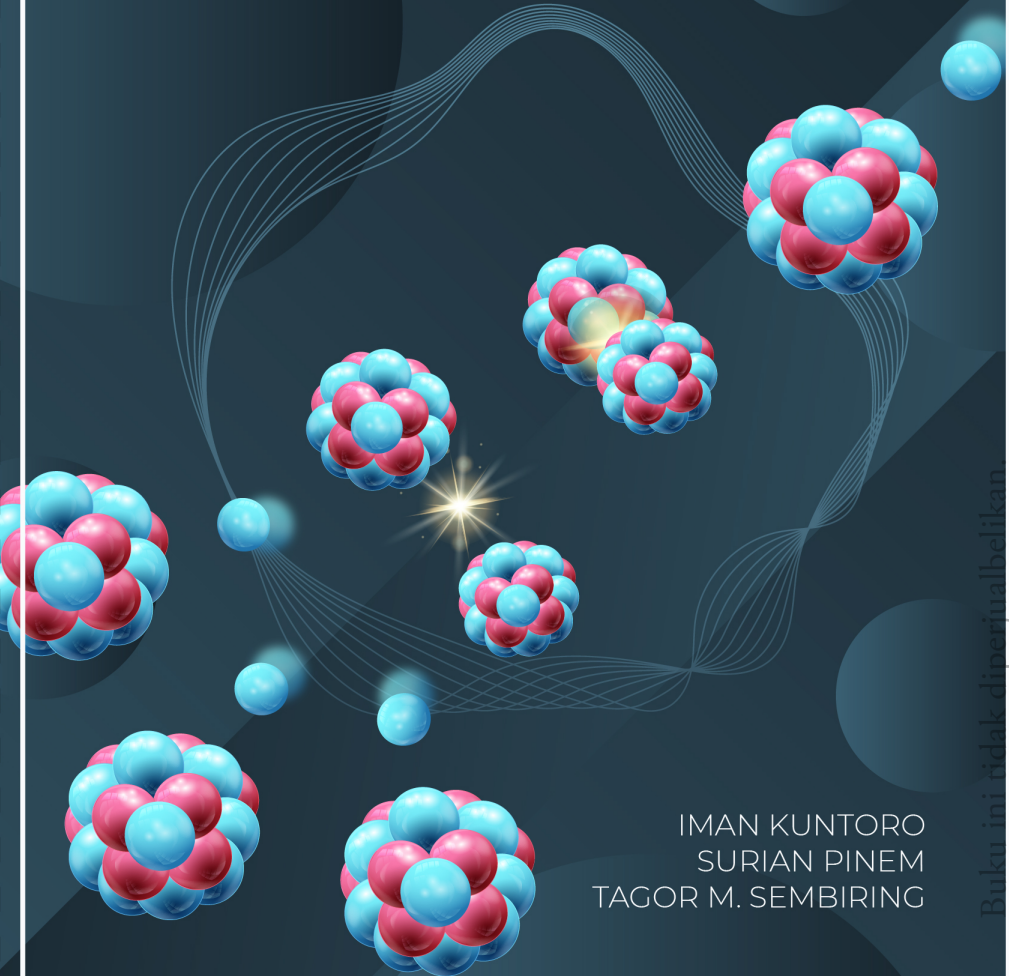




BRIN
BACAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

PENGENALAN ILMU FISIKA DALAM OPERASI REAKTOR NUKLIR



IMAN KUNTORO
SURIAN PINEM
TAGOR M. SEMBIRING

**PENGENALAN ILMU FISIKA
DALAM OPERASI REAKTOR NUKLIR**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

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



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

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

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

PENGENALAN ILMU FISIKA DALAM OPERASI REAKTOR NUKLIR

Iman Kuntoro
Surian Pinem
Tagor Malem Sembiring

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2023 Badan Riset dan Inovasi Nasional
Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Pengenalan Ilmu Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir/Iman Kuntoro, Surian Pinem, & Tagor Malem Sembiring–Jakarta: Penerbit BRIN, 2023.

xviii hlm. + 101 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-623-7425-28-1 (cetak)
978-623-7425-29-8 (*e-book*)
978-623-8052-60-8 (*e-book*)

1. Reaktor Nuklir
3. Siklus Neutron

2. Ilmu Fisika
4. Reaktor

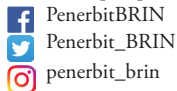
621.483

Copy editor : Annisa' Eskahita Azizah
Proofreader : I Made Dwi Setiadi dan Meita Safitri
Penata isi : Donna Ayu Savanti
Desainer sampul : Donna Ayu Savanti

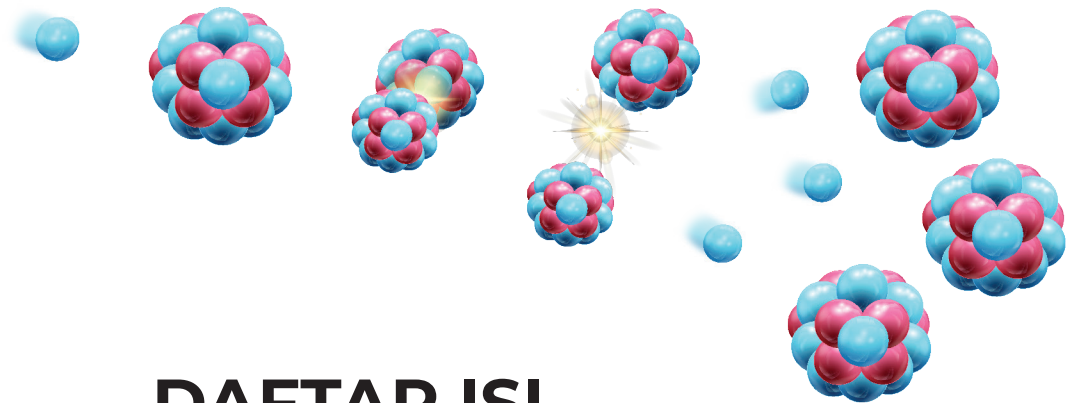
Cetakan pertama : 2021
Cetakan edisi revisi : Maret 2023



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Lantai 8
Jl. M.H. Thamrin No. 8, Kebon Sirih,
Menteng, Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: <https://penerbit.brin.go.id/>



Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
PENGANTAR PENERBIT.....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
PRAKATA.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
BAB 2 BANGUN ATOM.....	5
A. Susunan Atom.....	5
B. Inti Atom.....	10
C. Radioaktivitas.....	14
D. Reaksi Inti.....	19
BAB 3 FISIKA REAKTOR.....	25
A. Reaksi Fisi.....	25
B. Kekritisn Reaktor.....	32

BAB 4	REAKTIVITAS REAKTOR.....	41
	A. Reaktivitas dan Periode Reaktor.....	41
	B. Kinetika Reaktor.....	48
	C. Koefisien Reaktivitas	56
	D. Konversi dan Pembiakan Nuklida Bahan Bakar	61
	E. Peracunan Produk Fisi	62
	F. Pengendalian Reaktivitas	71
BAB 5	DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON DAN RAPAT DAYA	79
	A. Fluks Neutron	79
	B. Daya Reaktor.....	84
	C. Fraksi Bakar	87
BAB 6	PENUTUP.....	89
	DAFTAR PUSTAKA.....	91
	INDEKS	95
	TENTANG PENULIS	99



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Teras Reaktor dan Sinar Cherenkov di Teras Reaktor pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) dengan Daya 30 MW dan TRIGA 2000 dengan Daya 2 MW	2
Gambar 2.1	Ilustrasi Ruang Kosong antara Inti dan Kulit Atom	6
Gambar 2.2	Model Atom Bohr	7
Gambar 2.3	Model Atom untuk Hidrogen, Helium, dan Karbon	8
Gambar 2.4	Energi Ikat Rerata Per Nukleon sebagai Fungsi Nomor Atom	11
Gambar 2.5	Nukleon Inti Helium, Karbon, dan Uranium	12
Gambar 2.6	Jumlah Proton dan Neutron dalam Inti Pembentuk Unsur	15
Gambar 2.7	Jenis Radiasi	16
Gambar 2.8	Peluruhan atom radium memancarkan sinar α	16

Gambar 2.9	Tampang Lintang sebagai Fungsi Energi Neutron	22
Gambar 3.1	Reaksi Fisi Inti Uranium U-235	26
Gambar 3.2	Spektrum Energi Neutron Hasil Fisi	27
Gambar 3.3	Distribusi Nuklida Hasil Fisi dari Pembelahan Inti Beberapa Bahan Bakar	28
Gambar 3.4	Termalisasi Neutron Cepat oleh Material Moderator	30
Gambar 3.5	Reaksi Fisi Berantai U-235 oleh Neutron Termal	33
Gambar 3.6	Persentase Isotop dalam Uranium Alam	35
Gambar 3.7	Siklus Neutron dalam Reaktor	38
Gambar 4.1	Perubahan Fluks Neutron sebagai Fungsi Waktu dan Reaktivitas	44
Gambar 4.2	Karakteristik Fluks Neutron sebagai Fungsi Waktu dan Faktor Perlipatan	46
Gambar 4.3	Perubahan Fluks Neutron pada Proses <i>Start Up</i> Reaktor	47
Gambar 4.4	Perubahan Parameter Reaktor sebagai Fungsi Waktu dalam Sekon	48
Gambar 4.5	Hubungan Periode-Reaktivitas Reaktor RSG-GAS	55
Gambar 4.6	Efek Suhu Bahan Bakar pada Puncak Serapan Resonansi	57
Gambar 4.7	Efek <i>Over</i> dan <i>Under Moderated</i> pada Nilai k_{eff}	58
Gambar 4.8	Perubahan Reaktivitas sebagai Fungsi Temperatur	60

Gambar 4.9	Hubungan Pembentukan I-135 dan Xe-135 Saat Operasi Daya dan Saat Sesudah Pemadaman	64
Gambar 4.10	Konsentrasi Iodin-135 dan Xenon-135 Versus Fluks Neutron	65
Gambar 4.11	Reaktivitas Xenon-135 setelah Reaktor Padam	66
Gambar 4.12	Konsentrasi Racun Xenon sebagai Fungsi Waktu dan Kondisi Reaktor	66
Gambar 4.13	Kurva Xenon pada Operasi Daya Tetap kemudian Dipadamkan	67
Gambar 4.14	Karakteristik Xenon pada saat Terjadi Reaktor Pancung kemudian Dioperasikan Lagi	68
Gambar 4.15	Waktu Mati Suatu Reaktor	69
Gambar 4.16	Reaktivitas Xenon pada Daya 25 MW Reaktor RSG-GAS	69
Gambar 4.17	Karakteristik Peracunan Samarium saat Operasi dan Pemadaman Reaktor	70
Gambar 4.18	Mekanisme Batang Kendali dalam Reaktor	71
Gambar 4.19	Efek Posisi Batang Kendali pada Distribusi Fluks Neutron pada Arah Radial	73
Gambar 4.20	Efek Posisi Batang Kendali pada Distribusi Fluks Neutron pada Arah Aksial	73
Gambar 4.21	Konfigurasi Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS	76
Gambar 4.22	Kurva S Hasil Kalibrasi Batang Kendali (JDA 01–04)	77
Gambar 4.23	Kurva S Hasil Kalibrasi Batang Kendali (JDA 05–08)	77
Gambar 5.1	Spektrum Neutron	80

Gambar 5.2	Distribusi Fluks Neutron Arah Radial di Suatu Teras Reaktor Nuklir	81
Gambar 5.3	Spektrum Neutron RSG-GAS pada Sistem Rabbit	83
Gambar 5.4	Distribusi Fluks Neutron pada Posisi D-6 pada Daya 100 kW	84



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Simbol, Massa Diam, dan Muatan Listrik Partikel Penyusun Atom	6
Tabel 2.2	Nukleon Isoton	14
Tabel 2.3	Sifat Radiasi α , β , dan γ	17
Tabel 3.1	Energi yang Dilepas dalam Reaksi Fisi	29
Tabel 3.2	Sifat Moderasi Beberapa Material	31
Tabel 4.1	Harga Fraksi Neutron Kasip Beberapa Bahan Bakar	43
Tabel 4.2	Prekursor Neutron Kasip	51
Tabel 4.3	Fraksi Neutron Kasip untuk Beberapa Inti Bahan Bakar	51
Tabel 4.4	Harga Parameter Kinetik Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS	54
Tabel 4.5	Koefisien Reaktivitas Umpan Balik Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS	61
Tabel 4.6	Tampang Lintang Serapan Neutron Termal Beberapa Bahan Batang Kendali	72

Tabel 4.7	Neraca Reaktivitas Desain Reaktor RSG-GAS	75
Tabel 4.8	Hasil Kalibrasi Batang Kendali Teras 100	78
Tabel 4.9	Neraca Reaktivitas Reaktor RSG-GAS Teras 100	78
Tabel 5.1	Jenis Bahan Detektor Aktivasi (Keping) untuk Pengukuran Spektrum Neutron	81
Tabel 5.2	Keping untuk Pengukuran Fluks Neutron	84



PENGANTAR PENERBIT

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

Buku yang berjudul *Pengenalan Ilmu Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* ini merupakan edisi revisi dan terbit ulang dari buku yang berjudul *Fenomena Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir*. Terdapat perbedaan dari edisi sebelumnya, seperti revisi judul, beberapa persamaan, dan rujukan. Buku ini berisi banyak hal mengenai ilmu fisika yang berhubungan dengan reaktor nuklir. Buku ini dikemas dengan bahasa sederhana yang mudah dipahami oleh para pembaca terutama kalangan pegiat ketenaganukliran, akedemisi, maupun peneliti dan dijelaskan secara komprehensif dasar-dasar ilmu fisika yang berhubungan dengan reaktor nuklir. Selain itu, buku ini juga akan mempermudah pemahaman operator reaktor nuklir dalam menjalankan tugasnya.

Dengan hadirnya buku ini, diharapkan memberikan manfaat bagi masyarakat luas, khususnya operator reaktor nuklir dan pegiat ketena-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

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

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.



KATA PENGANTAR

Keselamatan operasi reaktor merupakan syarat utama untuk pengoperasian instalasi reaktor nuklir. Untuk itu, perlu pengetahuan dan pemahaman tentang reaktor nuklir, proses pengoperasian, kinerja instalasi, dan penggunaan reaktor bagi para pengelola reaktor nuklir. Salah satu topik yang penting adalah proses atau peristiwa fisika yang terjadi dalam operasi reaktor nuklir tersebut. Topik tersebut telah dirangkum oleh para penulis dalam sebuah buku berjudul *Fenomena Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* berdasarkan pengalamannya selama lebih dari 30 tahun bekerja dan mengajar operator dan supervisor reaktor RSG-GAS, milik eks BATAN di Serpong.

Dengan berintegrasinya BATAN ke dalam BRIN pada 1 September 2021, kami menyambut baik penerbitan edisi revisi buku *Fenomena Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* menjadi *Pengenalan Ilmu Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* dalam rangka dukungan berkelanjutan dalam ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir oleh Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN BRIN). Buku ini sangat penting bagi para operator dan supervisor reaktor nuklir karena merupakan pengetahuan dasar tentang latar belakang peristiwa fisika dalam operasi reaktor nuklir yang disajikan secara sederhana sehingga mudah dipahami. Dengan demikian, buku ini dapat menjadi pegangan para operator dan super-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

visor sehingga dapat melaksanakan operasi reaktor secara aman dan andal.

Selanjutnya, buku ini juga diharapkan bermanfaat bagi para pegiat dan pemerhati di bidang reaktor nuklir yang lain, seperti para petugas proteksi radiasi, perawat reaktor, para pengguna, dan mahasiswa Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam dan Teknik Fisika, serta masyarakat umum.

Serpong, Januari 2023
Kepala Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir
ORTN BRIN

Dr. Topan Setiadipura

Buku ini tidak diperjualbelikan.



PRAKATA

Buku *Pengenalan Ilmu Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* ini merupakan terbitan ulang dari buku yang berjudul *Fenomena Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* yang pada tahun 2021 diterbitkan oleh BATAN Press. Perubahan judul perlu dilakukan untuk lebih jelas menggambarkan isi buku yang menyajikan dasar-dasar ilmu fisika yang terjadi dalam operasi suatu reaktor nuklir. Isi buku tidak berubah, kecuali ada beberapa koreksi bahasa, termasuk tata cara penulisan sitasi dan referensi yang mengikuti sistem APA ke-7.

Buku ini menyajikan peristiwa fisika yang terjadi dalam operasi reaktor nuklir yang terangkum dalam topik fisika reaktor dasar dalam pengoperasian suatu reaktor nuklir. Penyajian dilakukan secara praktis agar mudah dipahami oleh para operator reaktor dalam menjalankan tugasnya menjaga keselamatan operasi reaktor nuklir. Buku berisi beberapa bab, yaitu pengertian tentang bangun atom, radioaktivitas, reaksi inti, tampang lintang, dan moderasi dalam teras yang dapat memberikan gambaran tentang proses fisika terjadinya reaksi berantai sampai siklus neutron dalam reaktor. Selanjutnya dijelaskan tentang peran parameter kinetik dalam pengoperasian reaktor, perubahan reaktivitas reaktor selama reaktor beroperasi, fluks neutron, dan daya termal yang dihasilkan di reaktor nuklir. Materi buku merupakan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

topik-topik yang telah penulis berikan pada kursus operator dan supervisor reaktor Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) selama beberapa tahun yang lalu untuk materi ajar Fisika Reaktor.

Buku ditulis oleh tiga orang, yaitu Iman Kuntoro, Surian Pinem, dan Tagor Malem Sembiring. Setiap penulis memberikan kontribusi pada setiap bab dengan penanggung jawab tiap bab: Bab Bangun Atom dan Fisika Teras adalah Iman Kuntoro, Bab Reaktivitas Reaktor adalah Surian Pinem, dan Bab Distribusi Fluks Neutron dan Rapat Daya adalah Tagor Malem Sembiring.

Buku ini diharapkan bermanfaat dan dapat menjadi pegangan bagi para pegiat di bidang reaktor nuklir, antara lain para operator reaktor, supervisor reaktor, petugas proteksi radiasi, perawat reaktor, dan para penanggung jawab pengoperasian reaktor. Selanjutnya, penulis mengharapkan buku ini juga dibaca oleh masyarakat luas agar dapat memahami prinsip kerja reaktor nuklir.

Penulis sangat berterima kasih kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir BRIN atas izinnya untuk menerbitkan buku edisi revisi ini melalui Penerbit BRIN. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Direktur Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran BRIN beserta staf yang telah membantu memberikan data dan foto tentang reaktor RSG-GAS, terutama Bapak Sigit Purwanto dan Bapak Jaka. Selanjutnya, penulis berharap saran dan kritik dari pembaca untuk menyempurnakan buku ini.

Serpong, Desember 2022

Penulis

The illustration shows a chain reaction of nuclear fission. It starts with a single blue neutron on the left. This neutron strikes a cluster of red and blue spheres representing a fissile nucleus. The nucleus splits into two smaller clusters of red and blue spheres, and releases several more blue neutrons. One of these neutrons strikes another nucleus, which also splits, releasing more neutrons, and so on, creating a chain reaction. A central point of fission is highlighted with a yellow starburst effect.

BAB 1

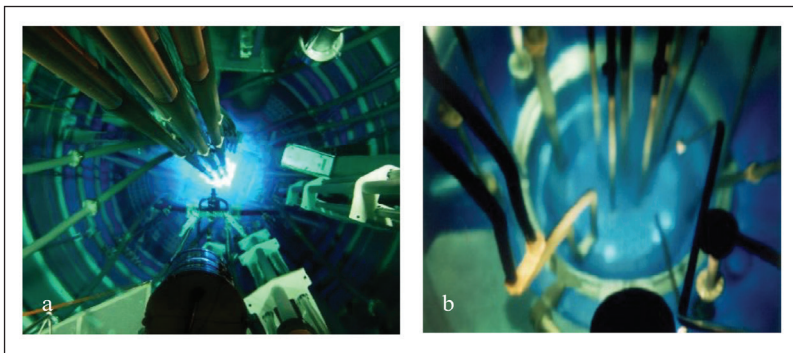
PENDAHULUAN

Reaktor nuklir adalah suatu fasilitas atau instalasi yang menghasilkan energi panas dan radiasi yang bekerja berdasarkan reaksi fisi atau reaksi pembelahan dari inti bahan bakar nuklir. Reaksi fisi inti terjadi secara terus-menerus atau dikatakan secara berantai dan tetap terkendali di dalam suatu bagian terpenting dari fasilitas reaktor yang disebut dengan teras reaktor. Teras reaktor tersusun atas beberapa komponen, yaitu sumber neutron, bahan bakar nuklir, moderator, reflektor, batang kendali, dan bahan pendingin (CEA, 2016). Di dalam sistem inilah proses utama reaktor nuklir terjadi dan dikendalikan.

Gambaran sederhana proses reaksi fisi berantai di teras reaktor adalah sebagai berikut. Apabila ada satu neutron termal (berenergi rendah) menumbuk inti bahan bakar nuklir, misalnya uranium, inti bahan bakar tersebut akan membelah menjadi dua buah inti yang sangat radioaktif dan diikuti dengan lahirnya atau timbulnya beberapa neutron baru dengan energi tinggi serta dihasilkannya energi panas. Bahan moderator, misalnya air, kemudian memperlambat energi neutron yang baru lahir tersebut melalui tumbukan hamburan untuk membentuk neutron termal yang siap untuk melakukan reaksi fisi berikutnya. Panas yang dihasilkan kemudian diambil oleh bahan pendingin,

misalnya air, untuk dipindahkan ke lingkungan melalui suatu sistem pendingin.

Adapun bahan reflektor, misalnya grafit, berfungsi sebagai cermin atau untuk mengembalikan neutron yang akan keluar dari teras reaktor sehingga akan menaikkan efisiensi reaksi fisi. Untuk mengendalikan populasi atau jumlah neutron setiap saat, digunakan suatu alat yang disebut dengan batang kendali. Batang kendali ini terbuat dari bahan penyerap neutron yang sangat kuat, yaitu bahan yang mempunyai kemampuan menyerap neutron sangat besar, misalnya kadmium. Saat batang kendali berada di dalam teras reaktor, semua neutron mampu diserapnya sehingga tidak terjadi reaksi fisi dan keadaan reaktor disebut dalam keadaan padam. Saat batang kendali ditarik keluar dari teras, terjadilah reaksi fisi. Dengan mengatur posisi batang kendali, reaktor dapat dioperasikan untuk menghasilkan populasi neutron tertentu dan menghasilkan daya panas tertentu. Di teras reaktor, radiasi nuklir yang timbul menumbuk atau bereaksi dengan air mengeluarkan sinar kebiruan yang disebut dengan sinar Cherenkov. Makin tinggi daya reaktor, makin tinggi pula populasi (fluks) neutron dan makin terang pula sinar Cherenkov yang ditimbulkan seperti terlihat dalam Gambar 1.1.



Keterangan: (a) RSG-GAS dengan daya 30 MW; (b) TRIGA 2000 dengan daya 2 MW

Foto: (a) Iman Kuntoro (2002); (b) Iman Kuntoro (2004)

Gambar 1.1 Teras Reaktor dan Sinar Cherenkov di Teras Reaktor pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) dengan Daya 30 MW dan TRIGA 2000 dengan Daya 2 MW

Jadi, harus dicatat dan dipahami benar-benar bahwa pengoperasian reaktor nuklir akan menghasilkan dua produk yang sangat penting, yaitu neutron dan energi panas. Reaktor yang memanfaatkan fluks neutron dan membuang energi panasnya disebut dengan reaktor penelitian. Reaktor penelitian memanfaatkan neutron untuk berbagai bidang penelitian, produksi radioisotop, dan keperluan industri. Pada umumnya reaktor penelitian mempunyai fluks neutron tinggi, tetapi mempunyai daya yang rendah dari orde watt (W) sampai dengan beberapa megawatt (MW) (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2010). Adapun reaktor nuklir yang memanfaatkan energi panasnya, baik untuk listrik maupun untuk industri, disebut dengan reaktor daya yang biasanya digunakan dalam suatu instalasi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Reaktor daya mempunyai daya keluaran yang besar dari orde 300 sampai dengan 3.000 megawatt termal atau setara 100 sampai dengan 1.000 megawatt elektrik (IAEA, 2021).

Dari gambaran singkat tersebut, jelaslah reaktor mempunyai manfaat yang besar untuk kesejahteraan masyarakat. Reaktor nuklir juga mengandung radiasi nuklir yang berada di dalam teras reaktor. Oleh karena itu, keselamatan menjadi faktor utama dan pertama yang harus diperhatikan dalam pengoperasian reaktor nuklir.

Dalam pengoperasian reaktor, operator (termasuk supervisor) reaktor merupakan salah satu unsur yang sangat penting dalam melaksanakan prinsip-prinsip keselamatan operasi sehingga mereka dituntut untuk memahami latar belakang fisika selama reaktor beroperasi, mulai dari proses reaksi fisi dan peristiwa fisika yang ditimbulkan selanjutnya di dalam teras reaktor, di samping pengetahuan teknis pengoperasian dari seluruh sistem proses.

Dalam rangka membekali para tenaga pengoperasi reaktor (operator, supervisor, perawat, dan petugas proteksi radiasi) dalam memahami pengetahuan proses fisika dalam pengoperasian reaktor nuklir, disusunlah buku *Pengenalan Ilmu Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* yang meliputi bangun atom, reaksi inti, fisika teras, reaktivitas, fluks neutron, dan daya reaktor secara sederhana dengan sesedikit mungkin rumus sehingga mudah untuk dipahami.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

The illustration at the top of the page shows various representations of atoms and molecules. On the left, there is a single blue sphere representing an atom. To its right are several clusters of spheres: a cluster of red and blue spheres, a cluster of blue and yellow spheres, a cluster of red and blue spheres with a yellow starburst in the center, and several other clusters of red and blue spheres. The background is white.

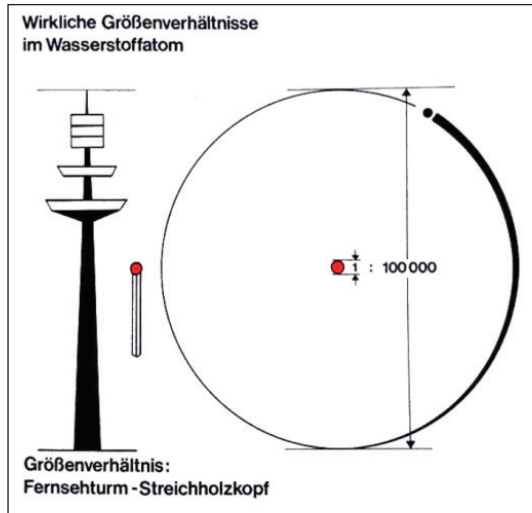
BAB 2

BANGUN ATOM

A. Susunan Atom

Semua materi di alam ini, baik berbentuk padat, cair, maupun gas, tersusun atas atom-atom dari berbagai unsur kimia, misalnya zat air (H), helium (He), oksigen (O), karbon (C), natrium (Na), uranium (U), dan sebagainya. Sampai saat ini sudah ditemukan sebanyak 109 jenis unsur, tetapi hanya 90 unsur yang merupakan unsur alam. Sisanya, misalnya plutonium (Pu), merupakan unsur buatan. Beberapa atom yang sama atau berbeda dapat membentuk suatu molekul. Sebagai contoh, dua buah atom zat air membentuk molekul hidrogen (H_2), atom zat air dan oksigen membentuk molekul air (H_2O) (Krane, 2019).

Pada awalnya, orang beranggapan dan mendefinisikan bahwa atom adalah bagian terkecil dari benda yang tidak dapat dibagi-bagi lagi. Namun, dalam perkembangan selanjutnya, melalui eksperimen-eksperimen, para ahli telah membuktikan bahwa setiap atom terbentuk atas inti atom yang bermuatan listrik positif dengan diameter sekitar 10^{-15} – 10^{-14} cm dan kulit atom dengan diameter 10^{-10} cm. Jadi, antara inti dan kulit atom terdapat ruang kosong yang sangat besar, yaitu sekitar 100.000 kali jari-jari inti atom. Sebagai ilustrasi, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.1, ruang kosong tersebut dapat dibayangkan sebagai suatu ruang dengan diameter setinggi menara TVRI apabila inti berada



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.1 Ilustrasi Ruang Kosong antara Inti dan Kulit Atom

di tengah ketinggian dengan diameter 1 mm. Inti atom ini tersusun atas proton (bermuatan listrik positif) dan neutron (netral, tidak bermuatan) yang disebut dengan nukleon.

Jelasnya, nukleon adalah partikel penyusun inti atom. Jadi, setiap benda pada hakikatnya tersusun atas partikel proton, neutron, dan elektron. Harga besaran partikel penyusun atom tersebut, seperti massa diam dan muatan listrik, diperlihatkan dalam Tabel 2.1.

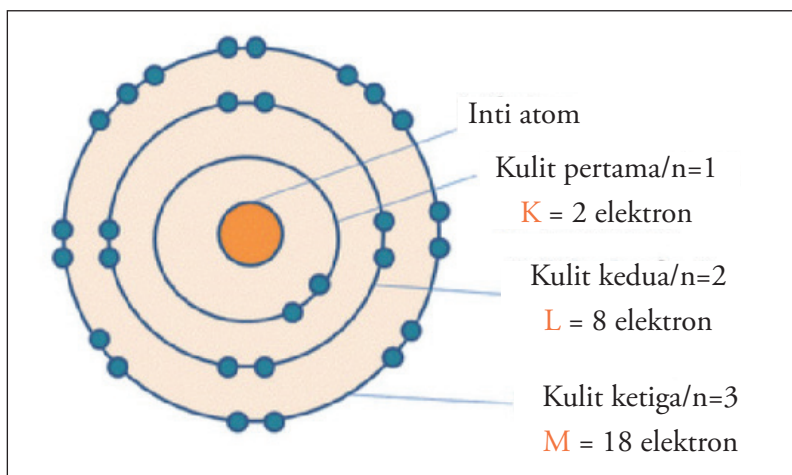
Pada abad ke-20, fisikawan Ernest Rutherford (Inggris) dan Niels Bohr (Denmark) dapat menunjukkan secara teori dan eksperimen bahwa atom tersusun dari inti atom dan kulit atom. Kulit atom meru-

Tabel 2.1 Simbol, Massa Diam, dan Muatan Listrik Partikel Penyusun Atom

Partikel	Simbol	Massa Diam, kg	Muatan Listrik, C
Elektron	${}_0e^{-1}$	$m_e = 9,1094 \times 10^{-31}$	$-1,602 \times 10^{-19}$
Proton	${}_1p^{+1}$	$m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$	$1,602 \times 10^{-19}$
Neutron	${}_1n^0$	$m_n = 1,6749 \times 10^{-27}$	0

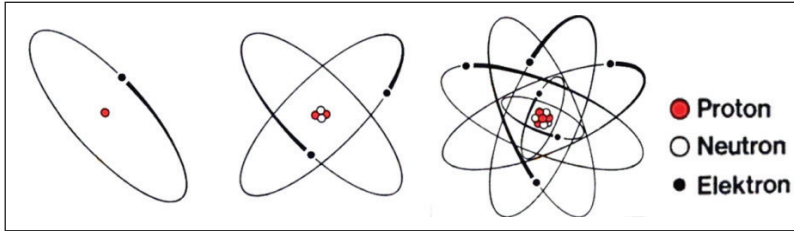
pakan elektron yang menunjukkan sifat dari elemen (unsur). Diameter kulit atom kira-kira 100.000 kali lebih besar dari diameter inti atom. Semua massa atom terkonsentrasi di dalam inti karena massa elektron sangat kecil (mendekati nol), kira-kira hanya $1/2000$ massa proton dan massa proton hampir sama dengan massa neutron. Elektron bermuatan negatif. Muatan satu elektron adalah $-1,6 \times 10^{-19}$ coulomb (C), juga disebut muatan elementer. Kecuali hidrogen, kulit atom dibentuk lebih dari satu elektron. Di antara inti bermuatan positif dan kulit bermuatan negatif, bekerja gaya listrik, yaitu gaya Coulomb. Elektron mengelilingi inti dalam tingkat energi diskret.

Niels Bohr (1913) membuat suatu model untuk menggambarkan struktur dan sifat-sifat suatu atom seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.2. Atom terbentuk atas inti atom yang bermuatan positif yang dikelilingi oleh kulit atom yang merupakan lintasan gerak elektron yang bermuatan negatif, seperti halnya bumi mengelilingi matahari. Ruang hampa di antaranya berjarak sekitar 100.000 kali diameter inti. Dalam Bab 3 akan dibahas lebih rinci mengenai inti atom. Model atom seperti hidrogen, helium, dan karbon ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.2 Model Atom Bohr



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.3 Model Atom untuk Hidrogen, Helium, dan Karbon

Ernest Rutherford memanfaatkan teori kuantum dari Max Planck, yaitu suatu atom mempunyai energi yang tidak kontinu, tetapi terkuantifikasi (diskret), yang besarnya adalah:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

dengan

h = konstanta Planck sebesar $6,626 \times 10^{-34}$ J s (joule sekon); dan

ν = frekuensi = c / λ , yaitu kecepatan cahaya dibagi panjang gelombangnya.

Bohr mengasumsikan untuk atom hidrogen sebagai berikut.

1. Ada lintasan tertentu di mana elektron bergerak tanpa mengeluarkan energi radiasi. Tiap lintasan menunjukkan tingkat energi tertentu.
2. Suatu elektron yang berpindah dari lintasan luar dengan energi E_n ke lintasan dalam dengan energi E_m , akan mengeluarkan radiasi foton dengan energi sebesar:

$$h \cdot \nu = E_n - E_m \quad (2.2)$$

Kulit suatu atom netral dengan nomor atom Z terbentuk oleh Z elektron yang tersebar dalam beberapa tingkat energi tertentu dan membentuk kulit atom tertentu, seperti matahari di pusat dan dikelilingi planet dengan berbagai jarak dari pusat.

Massa diam adalah massa saat partikel mempunyai kecepatan nol. Adapun untuk partikel yang bergerak dengan kecepatan v cm/s, nilai massa akan berubah menjadi lebih berat mengikuti rumus:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.3)$$

dengan

$$c = \text{kecepatan cahaya} = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s.}$$

Massa atom dinyatakan secara relatif terhadap massa (berat) atom unsur lain, yang dipakai sebagai standar. Massa atom biasanya dinyatakan dengan satuan massa atom (sma = amu, *atomic mass unit*). Dalam kongres *Tenth General Assembly of the Union of Pure and Applied Physics*, 1960, telah ditetapkan massa C^{12} sebagai standar, mengganti standar sebelumnya yang menggunakan massa O^{16} .

$$\text{Jadi, } 1 \text{ sma} = 1/12 \text{ massa } C^{12} = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g.}$$

Dalam satuan energi, harga ini harus dikalikan dengan kuadrat kecepatan cahaya.

$$1 \text{ sma} = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g} \times (3 \times 10^{10} \text{ cm/s})^2 = 1,492 \times 10^{-10} \text{ J} = 931,5 \text{ MeV}$$

Dalam satuan ini, partikel penyusun atom elektron, proton, dan neutron mempunyai massa:

$$m_e = 0,000548 \text{ sma} = 9,109 \times 10^{-28} \text{ g} = 0,511 \text{ MeV};$$

$$m_p = 1,007277 \text{ sma} = 1,672 \times 10^{-24} \text{ g} = 938,256 \text{ MeV}; \text{ dan}$$

$$m_n = 1,008665 \text{ sma} = 1,675 \times 10^{-24} \text{ g} = 939,550 \text{ MeV.}$$

Unsur hidrogen mempunyai massa 1,0079 sma dan unsur uranium mempunyai massa 238,0289 sma.

Avogadro menemukan bahwa 1 mol unsur apa saja ternyata mengandung jumlah atom per molekul yang sama, yaitu sebesar $6,023 \times 10^{23}$. Bilangan ini dikenal sebagai bilangan Avogadro, dengan simbol N_A . Berdasarkan pengertian bilangan Avogadro ini, kita dapat mengetahui jumlah atom per molekul dari suatu unsur apabila massa

atomnya, A , diketahui. Misalkan unsur X seberat m gram, unsur tersebut mengandung atom sejumlah:

$$N = \frac{m}{A_x} N_A \quad (2.4)$$

B. Inti Atom

Semua inti atom mempunyai konstruksi yang sama, yaitu tersusun atas proton (simbol p) dan neutron (simbol n). Suatu inti atom yang mempunyai jumlah proton Z dan mempunyai jumlah neutron N maka ia mempunyai jumlah nukleon atau partikel penyusun inti yang disebut dengan nomor massa dengan simbol A . Jadi, nomor massa dapat dituliskan dengan $A = Z + N$, yang mengindikasikan bahwa massa atom suatu unsur terkonsentrasi di dalam inti ini. Hal ini disebabkan oleh kontribusi massa dari elektron sangat kecil (massa elektron memang sangat kecil), yaitu sekitar $1/2000$ massa satu nukleon.

Simbol Z adalah nomor atom suatu unsur pada tabel periodik. Nukleon dapat membentuk inti atom karena terikat oleh adanya gaya ikat inti (*binding force*) yang lebih besar dari pada gaya listrik proton. Gaya ikat akan menimbulkan energi yang disebut dengan energi ikat (*binding energy*).

Energi ikat inti berasal dari selisih antara massa inti dan jumlahan massa dari nukleon pembentuknya. Ternyata, massa inti M lebih kecil dari jumlah massa proton $Z m_p$ dan massa neutron $N m_n$ pembentuknya atau terjadi pengurangan bobot yang disebut dengan massa defek (*defect mass*) dengan simbol Δm , yaitu sebesar:

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - M_A \quad (2.5)$$

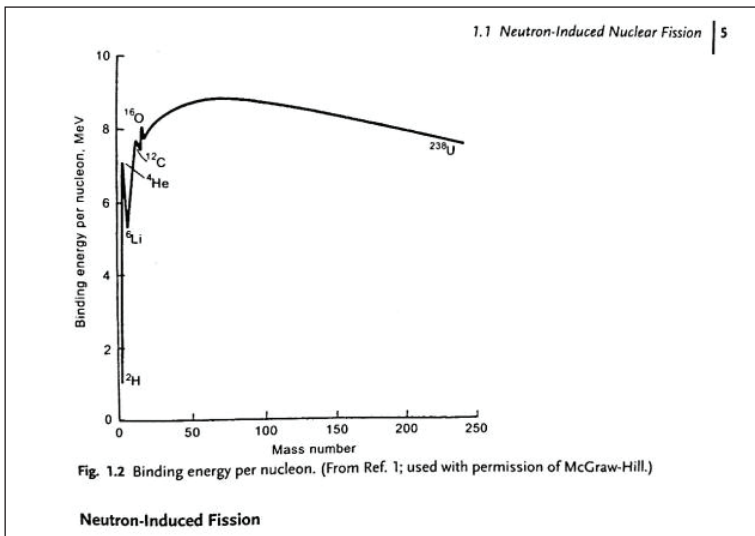
Kesetaraan dalam bentuk energinya mengikuti rumus Einstein, $E = m c^2$, sehingga energi ikat intinya adalah:

$$E_b = \Delta m c^2 = (Z m_p + N m_n - M_A) c^2 \quad (2.6)$$

dengan c adalah kecepatan cahaya sebesar 3×10^{10} cm/s.

Inilah yang disebut dengan energi ikat inti karena kita akan memerlukan energi sebesar itu pula untuk mengurainya kembali. Sebagai contoh, untuk atom deuterium D (${}_1\text{H}^2$) yang tersusun atas 1 proton, 1 neutron, dan 1 elektron, massa defek Δm diperoleh sebesar $3,964 \times 10^{-27}$ g atau $2,387 \times 10^{-3}$ sma maka energi ikatnya adalah 2,22 MeV (ingat 1 sma setara dengan energi sebesar 931,5 MeV).

Energi ikat total dari suatu inti merupakan fungsi dari massa atom (nomor atom) A , yaitu semakin besar energi ikat dengan naiknya harga nomor atom A . Hal ini terlihat dari grafik hubungan antara besaran energi ikat rerata tiap nukleon (E_b/A) sebagai fungsi nomor massa A , seperti disajikan dalam Gambar 2.4. Gambar tersebut dapat dibagi menjadi tiga daerah. Daerah pertama untuk atom ringan dari 1–20, energi ikat naik tajam dari sekitar 1,2 MeV sampai nilai 8 MeV. Kemudian, daerah kedua dari nomor massa 21–49, energi ikat naik landai dari energi 8 sampai 8,8 MeV, dan daerah ketiga dari nomor massa 50, energi ikat rerata turun dengan sangat landai dari 8,8 MeV sampai 7,5 MeV atau hampir konstan dengan harga rerata 8 MeV.



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 2.4 Energi Ikat Rerata Per Nukleon sebagai Fungsi Nomor Atom

Suatu atom yang intinya mempunyai jumlah proton Z yang sama dan jumlah neutron yang sama disebut dengan inti atom tertentu atau nuklida. Simbol nuklida adalah:



dengan

X = nama unsur/elemen;

Z = nomor atom = jumlah proton;

A = nomor massa = jumlah nukleon; dan

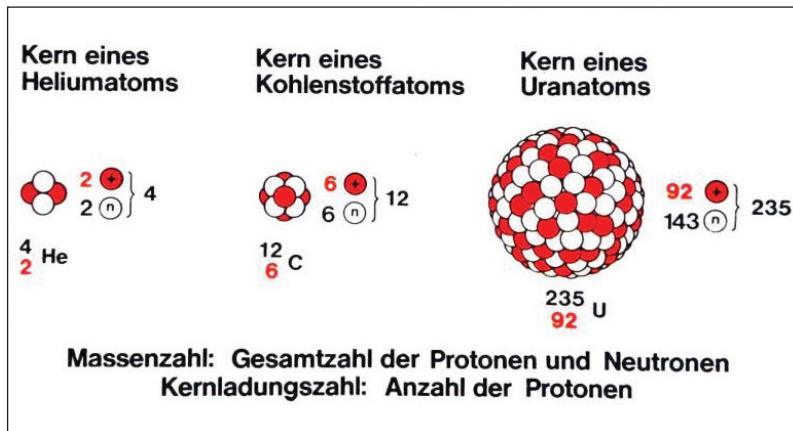
N = jumlah neutron = jumlah nukleon dikurangi jumlah proton = $A - Z$.

Contoh, inti helium, karbon, dan uranium diilustrasikan dalam Gambar 2.5.

Inti helium ditulis: ${}_2\text{He}^4$ atau ${}_2\text{He}-4$;

Inti karbon ditulis: ${}_6\text{C}^{12}$ atau ${}_6\text{C}-12$; dan

Inti uranium ditulis: ${}_{92}\text{U}^{235}$ atau ${}_{92}\text{U}-235$.

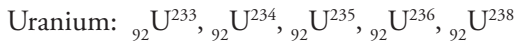


Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.5 Nukleon Inti Helium, Karbon, dan Uranium

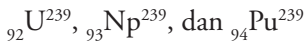
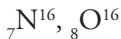
Selanjutnya, akan didefinisikan berbagai bentuk nuklida, yaitu isotop, isobar, isoton, dan isomer. Nuklida dengan nomor atom Z sama, tetapi nomor massa A berbeda, disebut isotop. Isotop suatu unsur mempunyai sifat kimia yang tidak berbeda dengan unsurnya.

Contoh:



Isobar adalah nuklida yang nomor massa A sama dan nomor atom Z berbeda.

Contoh:



Isoton adalah nuklida yang jumlah neutron sama, yaitu $N = A - Z$ adalah sama.

Contoh:

${}_8\text{O}^{16}$ dan ${}_7\text{N}^{15}$ jumlah neutronnya sama, yaitu 8 seperti dijelaskan dalam Tabel 2.2.

Isomer adalah nuklida yang mempunyai nomor atom Z dan nomor massa A sama, tetapi energinya berbeda, yaitu inti yang berada dalam keadaan tereksitasi, diberi tanda dengan m .

Contoh:



Tabel 2.2 Nukleon Isoton

Elemen	A	Z	N
Oksigen	16	8	8
Nitrogen	15	7	8

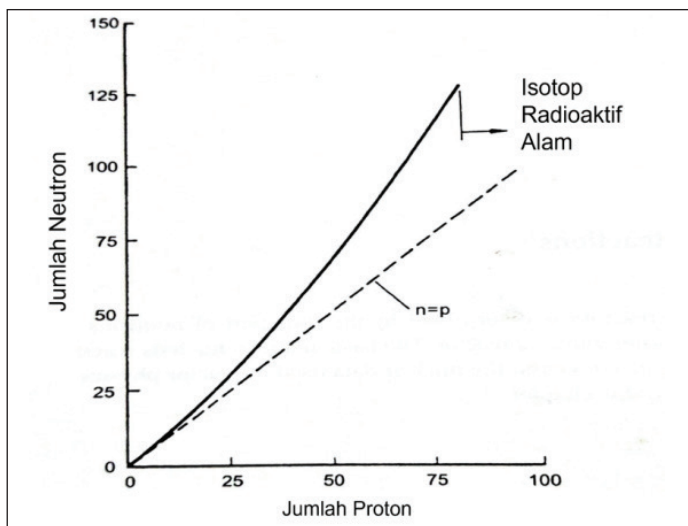
C. Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah perubahan keadaan inti atom sebagai fungsi waktu yang disertai dengan radiasi atau pancaran baik berupa partikel inti ataupun gelombang elektromagnetik. Inti atom dikatakan berada dalam keadaan stabil jika keadaannya, baik komposisi maupun tingkat tenaganya, tidak berubah dengan waktu. Keadaan sebaliknya, jika inti atom berubah dengan waktu, disebut inti dalam keadaan tidak stabil. Inti yang tidak stabil akan meluruh dengan memancarkan partikel inti atau gelombang elektromagnetik. Inti yang tidak stabil ini disebut dengan inti radioaktif, sedangkan partikel atau gelombang elektromagnetik yang dipancarkan disebut dengan radiasi. Inti atau partikel yang radioaktif biasa disebut dengan zat radioaktif.

Zat radioaktif dipilah menjadi dua, yaitu zat radioaktif alam dan zat radioaktif buatan. Zat radioaktif alam adalah zat radioaktif yang terjadi secara alami (tidak direaksikan) karena jumlah proton dan neutron tidak sama seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Untuk nomor massa rendah, jumlah neutron hampir sama dengan jumlah proton dan selanjutnya untuk nomor massa besar, jumlah neutron lebih besar dari pada jumlah proton.

Proses peluruhan nuklida radioaktif dapat melahirkan nuklida baru yang mungkin juga radioaktif dan seterusnya sampai tercapai suatu nuklida yang stabil, membentuk suatu deret. Di alam terdapat tiga deret peluruhan alami yang masing masing berakhir pada nuklida stabil timbal, Pb, yang secara ringkas sebagai berikut.

1. Deret uranium-radium dimulai dari ${}_{92}\text{U}^{238}$ dan berakhir pada ${}_{82}\text{Pb}^{206}$.
2. Deret uranium-aktinium dimulai dari ${}_{92}\text{U}^{235}$ dan berakhir pada ${}_{82}\text{Pb}^{207}$.
3. Deret torium dimulai dari ${}_{90}\text{Th}^{232}$ dan berakhir pada ${}_{82}\text{Pb}^{208}$.



Sumber: Stacey (2018)

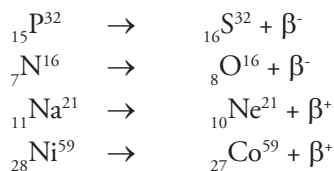
Gambar 2.6 Jumlah Proton dan Neutron dalam Inti Pembentuk Unsur

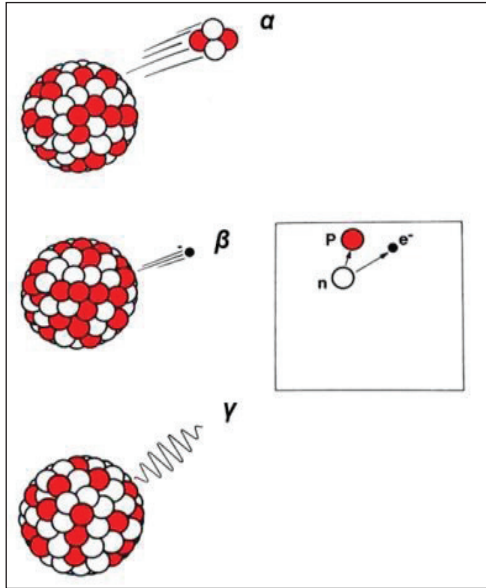
Ada tiga jenis atau macam radiasi yang sangat terkenal, yaitu radiasi α , β , dan γ (lihat Gambar 2.7 dan 2.8).

Radiasi α , terjadi apabila inti meluruh dan memancarkan 2 proton dan 2 neutron atau yang dikenal dengan sinar alfa, simbol α . Contoh:



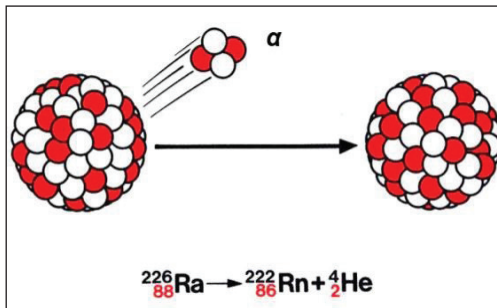
Radiasi β , terjadi apabila inti meluruh dan memancarkan sinar beta dengan simbol β . Sinar beta adalah elektron yang berasal dari inti atom. Contoh:





Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.7 Jenis Radiasi



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 2.8 Peluruhan atom radium memancarkan sinar α .

Radiasi γ mengikuti proses peluruhan α dan β . Inti-inti yang dihasilkan dari peluruhan α dan β berada dalam tingkat eksitasi. Proses transisi dari keadaan tereksitasi menuju stabil ke tingkat energi dasar

akan menghasilkan pemancaran sinar γ . Nuklidanya disebut dengan pemancar gama. Sinar γ berbentuk radiasi gelombang elektromagnetik dan dapat dipandang sebagai suatu paket catu daya tenaga yang disebut dengan foton γ .

Contoh:

Pemancar gamma: Co^{60} , Na^{24} , Ag^{112} .

Sifat ketiga jenis radiasi, α , β , dan γ , dalam interaksinya dengan materi berupa daya tembus, daya ionisasi, dan energi dapat dilihat dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat Radiasi α , β , dan γ

Sifat	Sinar α	Sinar β	Sinar γ
Daya tembus	Sangat pendek	Pendek	Panjang
Daya ionisasi	Paling besar	Besar	Kecil
Energi	Tunggal	Banyak	Tunggal

Radiasi lainnya adalah radiasi neutron yang dipancarkan oleh pembelahan spontan elemen atau unsur berat (nomor massa besar). Selain radiasi alamiah tersebut di atas, zat radioaktif dapat pula dibuat melalui reaksi inti. Nuklida hasil reaksi dapat merupakan nuklida stabil maupun radioaktif. Untuk diingat, bahwa nuklida yang radioaktif meluruh, memancarkan radiasi.

Hukum dasar yang mengatur radioaktivitas adalah bahwa kebolehjadian inti meluruh per satuan waktu atau laju peluruhan atau perubahan cacah inti atom induk per satuan waktu adalah konstan, tidak bergantung kepada waktu. Konstanta ini disebut dengan konstanta peluruhan atau konstanta disintegrasi dengan simbol λ (lambda). Dalam selang waktu dt , kebolehjadian meluruh setiap inti adalah λdt . Jika N adalah inti pada waktu t dan dN adalah jumlah atom yang akan meluruh dalam waktu dt , jumlah atom yang meluruh dapat ditulis:

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.7)$$

sehingga

$$\begin{aligned}dN/N &= -\lambda dt \\ N(t) &= N_0 e^{-\lambda t}\end{aligned}\tag{2.8}$$

Waktu yang diperlukan agar jumlah inti atom menjadi setengah dari jumlah semula disebut dengan waktu paruh dengan simbol $t_{1/2}$ atau T . Jadi, saat $t = t_{1/2}$, jumlah inti atom menjadi $N = \frac{1}{2}N_0$.

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}N_0 &= N_0 e^{-\lambda t} \\ -\lambda T &= \ln(\frac{1}{2}) \\ T &= \frac{1}{\lambda} \ln(2) = 0,693 / \lambda\end{aligned}\tag{2.9}$$

Besaran yang menunjukkan jumlah inti yang meluruh per satuan waktu disebut dengan aktivitas zat radioaktif dan diberi simbol dengan huruf A . Aktivitas pada saat t biasanya dilambangkan dengan A_t dan tidak lain adalah laju peluruhan radioaktif dN/dt .

$$A_t = |dN/dt| = \lambda N\tag{2.10}$$

Karena aktivitas berbanding lurus dengan jumlah inti N , rumus peluruhan aktivitas mengikuti rumus peluruhan inti:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-0,693t/T}\tag{2.11}$$

dengan A_0 adalah aktivitas pada saat $t = 0$.

Satuan aktivitas adalah becquerel (Bq) dan curie (Ci). Satu becquerel didefinisikan sebagai satu disintegrasi per sekon (dps) dan satu curie adalah $3,7 \times 10^{10}$ Bq, ditulis:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Sebagai gambaran, akan dihitung aktivitas nuklida N-16 di air yang keluar dari teras dalam pipa pendingin primer Reaktor Serba

Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) sebelum masuk ke pompa primer. Pada posisi ini, air telah menempuh waktu 49 sekon dari teras reaktor. Apabila diketahui harga aktivitas di teras adalah 10^4 Bq dan waktu paruh N-16 adalah 7 sekon, harga aktivitas dimaksud adalah:

$$A_t = A_0 e^{-0,693t/T} = A_0 e^{-0,693 \cdot 7} = A_0 (1/2)^7 = (1/128) 10^4 \text{ Bq}$$

D. Reaksi Inti

Reaksi inti adalah interaksi antara dua inti atau antara inti dan nukleon yang akan menghasilkan dua atau lebih partikel inti atau radiasi gama. Penulisan reaksi inti dapat dilakukan dengan dua cara:

$$(2.12)$$

$$1. \quad a + b \rightarrow c + d$$

$$(2.13)$$

dengan $a(b,c)$

a = inti atau partikel yang ditumbuk;

b = inti atau partikel yang menumbuk;

c = inti atau partikel yang dihasilkan; dan

d = inti atau partikel yang dihasilkan juga.

Contoh:

$O^{16} + n^1 \rightarrow N^{16} + p^1$ dapat ditulis $O^{16}(n,p)N^{16}$;

${}_4Be^9 + {}_2\alpha^4 \rightarrow {}_6C^{12} + 2{}_0n^1$ dapat ditulis $Be^9(\alpha,n)C^{12}$; dan

${}_1H^2 + {}_0\gamma^0 \rightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1$ dapat ditulis $H^2(\gamma,n)H^1$.

Hukum fisika yang mengatur reaksi inti adalah empat hukum kekekalan (sebelum dan sesudah reaksi sama besar atau jumlahnya) sebagai berikut.

1. Hukum kekekalan nukleon: jumlah nukleon sebelum dan sesudah reaksi tetap.
2. Hukum kekekalan muatan: jumlah muatan sebelum dan sesudah reaksi tetap.
3. Hukum kekekalan momentum: jumlah momentum sebelum dan sesudah reaksi tetap.

4. Hukum kekekalan energi: jumlah energi sebelum dan sesudah reaksi tetap.

Contoh lain reaksi inti sebagai berikut.

1. ${}_4\text{Be}^9 + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_6\text{C}^{12} + {}_0n^1$
2. ${}_1\text{H}^2 + {}_0\gamma^0 \rightarrow {}_1\text{H}^1 + {}_0n^1$, ${}_0\gamma^0 =$ sinar gamma, ${}_1\text{H}^1 = p$ (proton)
3. ${}_5\text{B}^{10} + {}_0n^1 \rightarrow {}_3\text{Li}^7 + {}_2\text{He}^4$, ${}_2\text{He}^4 =$ sinar α

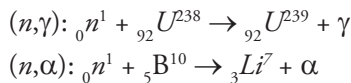
Pembahasan reaksi inti selanjutnya akan difokuskan pada reaksi inti dengan partikel neutron sebagai partikel penumbuknya. Secara garis besar, reaksi neutron dibedakan dalam dua macam, yaitu reaksi hamburan (kedua inti terpisah bebas kembali) dan reaksi serapan (kedua inti menyatu).

Reaksi hamburan dipilah lagi kedalam reaksi hamburan elastis dan inelastis. Sementara itu, reaksi serapan dibagi dalam reaksi serapan murni (serapan radiatif) dan reaksi pembelahan inti.

Apabila inti yang ditumbuk tidak berubah komposisi dan energinya, proses disebut hamburan elastis, dengan simbol (n,n) . Namun, apabila inti yang ditumbuk komposisinya tetap dan energi dalam keadaan tereksitasi, proses disebut hamburan inelastis, dengan simbol (n,n^*) . Inti yang tereksitasi kemudian meluruh dengan memancarkan sinar γ .

Reaksi serapan terjadi jika neutron penumbuk diserap oleh inti materi. Jika neutron tetap diserap dan inti memancarkan sinar radiasi, proses serapan disebut dengan tangkapan radiatif.

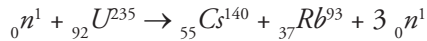
Contoh:



Untuk $(n,2n)$, $(n,2n)$, (n,pn) , reaksi ini dapat terjadi jika neutron berenergi sangat tinggi.

Apabila neutron terserap inti dan kemudian inti menjadi sangat tidak stabil dan akhirnya membelah menjadi dua, reaksi disebut dengan reaksi fisi atau reaksi pembelahan inti.

Contoh:



Jadi, di dalam teras reaktor, neutron bisa mengalami berbagai reaksi inti, yaitu reaksi hamburan elastis, hamburan inelastis, serapan, dan fisi.

Dalam reaksi neutron dengan materi, ada yang disebut dengan reaksi aktivasi neutron, yaitu jika nuklida stabil menyerap neutron menjadi nuklida yang lebih berat dan dalam kondisi tereksitasi, nuklida tersebut kemudian menjadi nuklida yang radioaktif yang memancarkan sinar gama.

Untuk menjelaskan kebolehdjadian interaksi neutron dengan suatu inti/nuklida secara kuantitatif, digunakan besaran yang disebut denganampang lintang mikroskopis dengan simbol σ (sigma). Besaranampang lintang mikroskopis mempunyai satuan berupa satuan luas dengan orde mulai dari 10^{-22} sampai dengan 10^{-26} m². Oleh karena itu, sering dipakai satuan yang sesuai, yaitu barn, 1 barn = 10^{-24} cm².

Kebolehdjadian interaksi neutron dengan suatu material/bahan disebut denganampang lintang makroskopis, dengan simbol Σ (sigma) dan satuannya adalah cm⁻¹. Nilaiampang lintang makroskopis adalah:

$$\Sigma = N\sigma \text{ cm}^{-1} \quad (2.14)$$

dengan N adalah kerapatan atau densitas dari bahan atau material nuklida.

Jika seberkas neutron energi tunggal dengan kerapatan neutron n (n/m³) dan kecepatan neutron v (m/s) melewati suatu material yang mempunyai kerapatan atom N atom/m³, $n v$ adalah jumlah neutron yang jatuh ke suatu luasan 1 m² material target per sekon. Laju reaksi atau reaksi per satuan volume per sekon adalah:

$$R = n v \Sigma \text{ n/(m}^3\text{s)} \quad (2.15)$$

Jarak bebas rerata didefinisikan sebagai jarak rerata yang ditempuh neutron sebelum terjadi interaksi atau bereaksi dengan inti, besarnya adalah kebalikan dari hargaampang lintang makroskopis, $(1/\Sigma)$, simbolnya adalah λ dengan satuan cm.

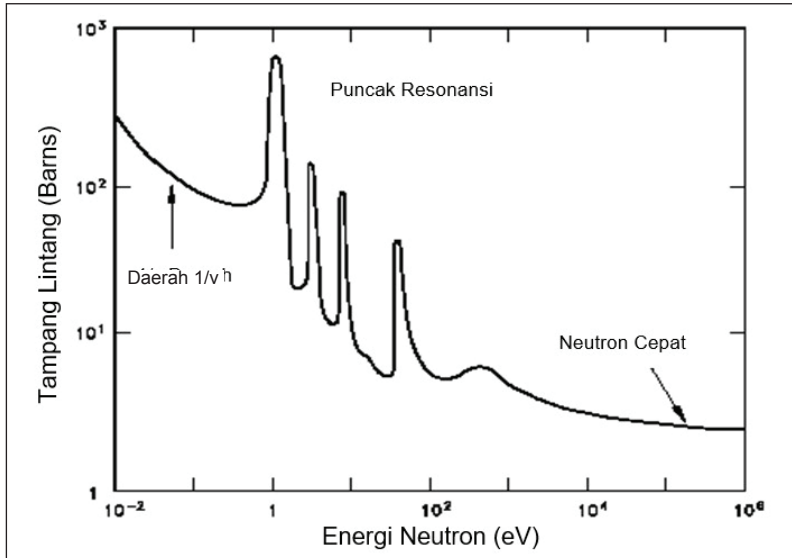
Jadi, jenis interaksi neutron dengan material yang dilaluinya secara matematis dinyatakan dalam tampang lintang adalah:

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a = (\sigma_{se} + \sigma_{si}) + (\sigma_c + \sigma_f) \quad (2.16)$$

dengan

- σ_t = tampang lintang total;
- σ_s = tampang lintang hamburan;
- σ_a = tampang lintang serapan;
- σ_{se} = tampang lintang hamburan elastis;
- σ_{si} = tampang lintang hamburan inelastis;
- σ_c = tampang lintang serapan murni; dan
- σ_f = tampang lintang fisi.

Nilai tampang lintang bergantung kepada tinggi rendahnya energi neutron penumbuk seperti terlihat pada Gambar 2.9. Nilai tampang lintang tersebut boleh jadi merupakan reaksi neutron dengan inti ma-



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 2.9 Tampang Lintang sebagai Fungsi Energi Neutron

terial lain, berkurang atau menurun dengan naiknya energi neutron, yang secara garis besar dapat dibagi dalam tiga daerah energi.

Daerah pertama, disebut daerah energi termal, yaitu daerah energi rendah <1 eV. Nilaiampang lintang berbanding terbalik dengan kecepatan neutron maka disebut dengan daerah $1/v$.

Daerah kedua disebut daerah energi epitermal, yaitu daerah energi menengah antara 1 eV dan 1 keV, ditulis dengan $1 \text{ eV} < E < 1 \text{ keV}$. Nilaiampang lintangnya menurun, tetapi banyak puncak-puncak yang tinggi sehingga disebut dengan daerah resonansi.

Sementara itu, daerah ketiga disebut dengan daerah energi cepat, yaitu >1 keV. Nilaiampang lintangnya menurun dan landai.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 3

FISIKA REAKTOR

Sebagaimana dijelaskan di bab awal bahwa proses utama reaktor nuklir adalah reaksi pembelahan inti atau reaksi fisi inti bahan bakar oleh neutron yang terjadi di dalam bagian teras reaktor maka pembahasan fisika reaktor dapat disebut dengan fisika teras reaktor. Dalam bab ini dibahas tentang kejadian atau peristiwa atau fenomena fisika yang terjadi di teras reaktor pada saat reaktor beroperasi.

A. Reaksi Fisi

Fisika reaktor adalah salah satu cabang ilmu fisika yang membahas tentang fenomena yang terjadi di dalam reaktor nuklir yang biasanya disebut dengan reaktor saja. Reaktor didefinisikan sebagai suatu instalasi atau tempat yang digunakan untuk melangsungkan reaksi fisi nuklir atau reaksi pembelahan inti secara terkendali. Bagian utama reaktor di mana reaksi fisi dilangsungkan disebut dengan teras reaktor. Komponen utama teras reaktor adalah sumber neutron, bahan bakar, moderator, reflektor, dan batang kendali.

Reaksi fisi terjadi jika sebuah neutron termal (berkecepatan rendah) menumbuk inti bahan bakar nuklir, misalnya uranium, yang dapat dituliskan dengan rumus umum 3.1 dan Gambar 3.1 untuk contoh reaksi fisi oleh neutron termal dengan bahan bakar U-235.



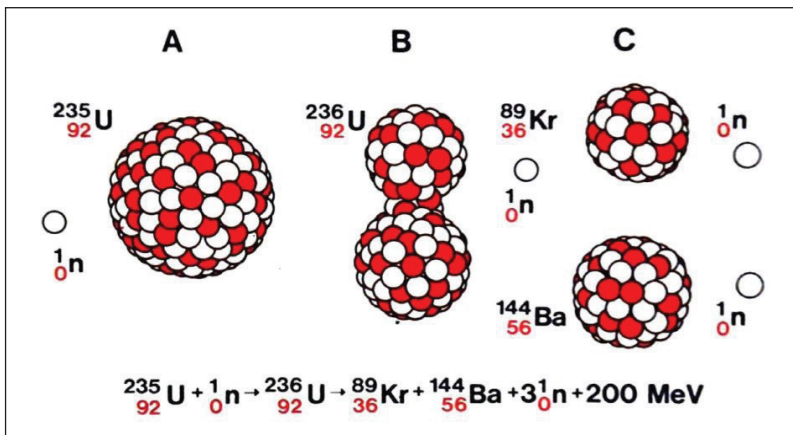
dengan

X adalah inti bahan bakar nuklir, misal U-235;

n adalah neutron, berasal dari suatu sumber neutron, misal AmBe;

X_1 dan X_2 adalah dua buah inti hasil belah atau inti produk fisi yang hampir sama besarnya (massa atomnya), misalnya kripton (Kr-89) dan barium (Ba-144); dan

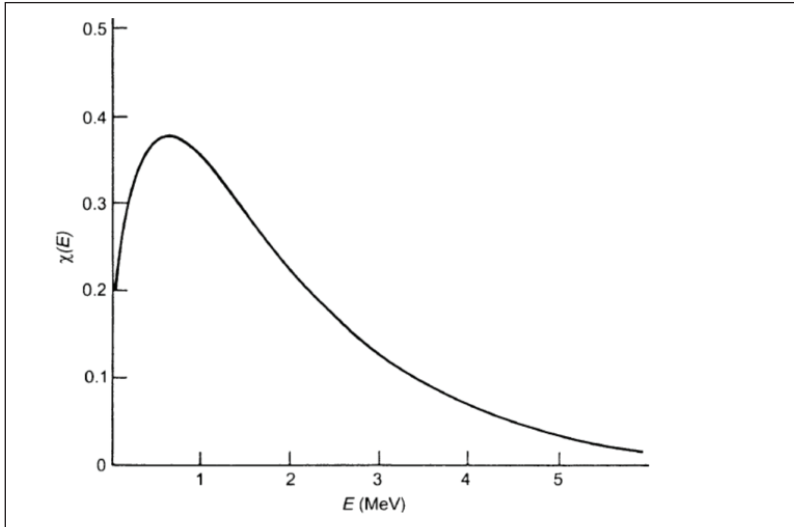
E adalah energi yang dilepaskan dalam proses reaksi fisi.



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 3.1 Reaksi Fisi Inti Uranium U-235

Dalam reaksi fisi, sebuah neutron termal menumbuk inti bahan bakar U-235 dan membentuk suatu inti atom majemuk U-236 yang bersifat sangat tidak stabil dan dalam waktu sangat singkat akan membelah menjadi dua inti hasil belah dan menghasilkan dua atau terkadang tiga neutron baru serta energi. Neutron yang dihasilkan dalam reaksi fisi memiliki energi rerata yang sangat tinggi yang disebut neutron cepat. Untuk inti U-235 misalnya, neutron hasil fisi mempunyai spektrum energi seperti diperlihatkan pada Gambar 3.2, dengan energi kinetik rerata sebesar 2 MeV. Agar neutron dapat melakukan reaksi fisi



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 3.2 Spektrum Energi Neutron Hasil Fisi

lagi, neutron ini harus diperlambat menjadi neutron termal oleh bahan yang disebut dengan moderator. Contoh moderator adalah air.

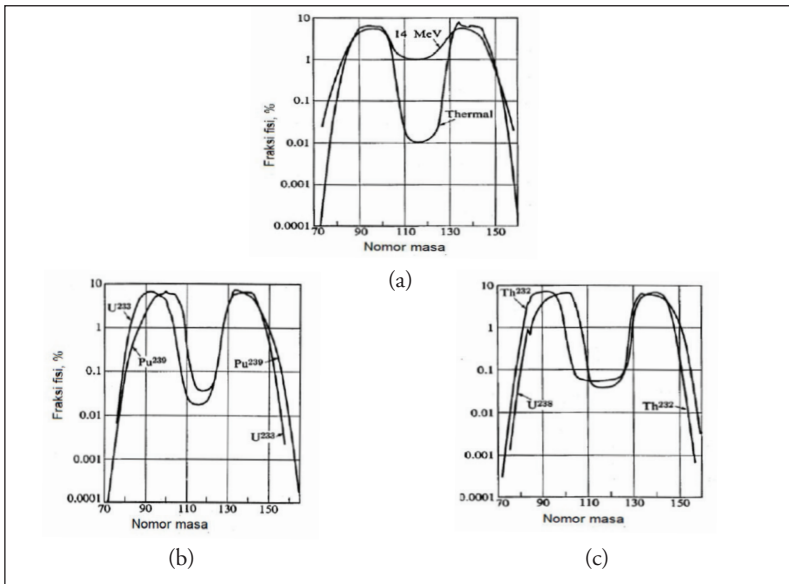
Jadi, dari satu reaksi fisi yang menghasilkan dua atau tiga buah neutron, selanjutnya dapat terjadi reaksi fisi berikutnya secara berantai sebanyak 4, 8, 16, dst., atau sebanyak 3, 9, 27, 81, dst. Oleh karena itu, reaksi fisi yang terus-menerus tersebut disebut dengan reaksi fisi berantai.

Reaksi fisi menghasilkan inti hasil belah atau nuklida produk fisi yang ukurannya hampir sama besar dan bersifat tidak stabil atau radioaktif sehingga terus meluruh dengan memancarkan radiasi dan/atau partikel. Dua inti hasil belah dari reaksi fisi bisa merupakan berbagai macam kombinasi inti/isotop dengan nomor massa berbeda.

Gambar 3.3a memperlihatkan distribusi inti hasil fisi U-235 oleh neutron termal dan neutron cepat 14 MeV. Dari gambar tersebut terlihat bahwa sebagian besar dari reaksi fisi menghasilkan kombinasi hasil fisi yang tidak simetris dengan nomor massa sekitar 95 dan 140.

Sementara itu, frekuensi yang paling jarang adalah inti dengan nomor masa 117 yang hanya sekitar 0,01% dari seluruh reaksi fisi. Gambar 3.3b memperlihatkan distribusi inti hasil belah dari bahan fisil U-233 dan Pu-239 oleh neutron termal dan Gambar 3.3c memperlihatkan distribusi inti hasil belah dari bahan fertile U-238 dan Th-232 oleh neutron cepat hasil fisi.

Dengan demikian, terlihat jelas bahwa reaktor menjadi atau menghasilkan dua buah sumber, yaitu sumber radiasi dan sumber energi. Sumber radiasi, terutama radiasi neutron dan sinar gama, dapat dipakai untuk keperluan eksperimen. Namun, harus diingat pula bahwa sumber radiasi ini juga merupakan sumber potensi bahaya radiasi. Reaksi fisi juga menghasilkan energi panas yang sangat besar, yaitu sekitar 200 MeV dari setiap pembelahan inti dengan rincian seperti disajikan dalam Tabel 3.1.



Keterangan: a) Pembelahan inti U-235 oleh neutron termal dan cepat; b) Pembelahan inti U-233 dan Pu-239 oleh neutron termal; c) Pembelahan inti U-238 dan Th-232 oleh neutron cepat hasil fisi.

Sumber: Lamarsh dan Baratta (2001)

Gambar 3.3 Distribusi Nuklida Hasil Fisi dari Pembelahan Inti Beberapa Bahan Bakar

Tabel 3.1 Energi yang Dilepas dalam Reaksi Fisi

Neutron serempak	Energi, MeV	Peluruhan	Energi MeV
Energi hasil fisi	168	Peluruhan β^-	8
Radiasi γ serempak	8	Peluruhan γ	7
Energi neutron serempak	5	Neutrino	12
Total	181	Total	27

Sumber: Stacey (2018)

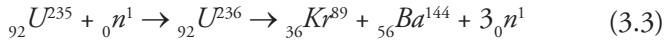
Jumlah energi yang dilepas per fisi adalah 208 MeV, tetapi hanya sejumlah 196 MeV yang berupa produksi panas karena partikel neutrino 12 MeV tidak dapat berinteraksi dengan materi. Dari energi sebesar 196 MeV tersebut, 181 MeV dilepas dengan cara pelepasan serempak (*prompt*). Artinya, dilepas pada saat reaksi fisi berlangsung, dan sisanya 15 MeV dilepas dari hasil peluruhan inti/nuklida hasil fisi. Dari aspek energi ini, reaksi fisi merupakan sumber panas yang sangat besar, yaitu 196 MeV atau biasa dibulatkan menjadi 200 MeV per reaksi fisi.

Neutron adalah salah satu partikel penyusun inti atom. Untuk memperoleh neutron bebas, kita memerlukan suatu sumber neutron. Sumber neutron dapat dibuat dari campuran dua bahan, pertama bahan yang secara alami memancarkan radiasi alfa, misalnya plutonium (Pu) dan amerisium (Am). Bahan kedua adalah bahan yang bereaksi dengan sinar alfa menghasilkan neutron, contohnya berilium (Be). Contoh sumber neutron adalah plutonium dan berilium (PuBe) atau amerisium dan berilium (AmBe). Kekuatan sumber neutron dinyatakan dengan jumlah neutron yang dipancarkan per sekon, n/s .

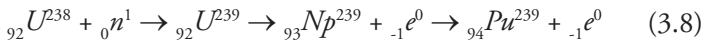
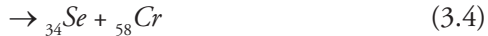
Bahan bakar nuklir adalah bahan fisil atau bahan dapat belah, yaitu yang mempunyaiampang lintang fisi yang besar, contohnya U-233, U-235, U-238, Pu-239, dan Th-232. Bahan U-235, U-238, dan Th-232 terdapat di alam, sedangkan U-233 dan Pu-239 dihasilkan dalam pengoperasian reaktor. Nuklida dengan nomor massa ganjil, seperti U-235, U-233, dan Pu-239, dapat terbelah dengan neutron termal. Sementara itu, nuklida dengan nomor massa genap, seperti U-238

dan Th-232, hanya dapat terbelah dengan neutron cepat, yaitu neutron dengan energi di atas 1 MeV.

Contoh reaksi fisi pada reaktor termal dengan bahan bakar U-235:

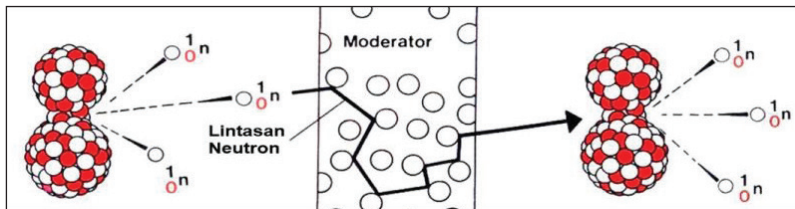


reaksi tersebut dapat pula menghasilkan:



Moderator neutron adalah bahan yang berfungsi untuk memoderasi atau memperlambat neutron cepat. Dari reaksi fisi dihasilkan neutron cepat (energi tinggi) yang energinya harus diturunkan menjadi energi termal dengan kecepatan rendah (neutron termal) agar dapat melangsungkan reaksi fisi berikutnya, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.4.

Energi neutron ini diturunkan melalui reaksi hamburan elastis dan non-elastis. Reaksi hamburan non-elastis terutama terjadi dengan neutron dengan energi diatas 0,1 MeV, sedangkan neutron dengan energi dibawah 0,1 MeV reaksi didominasi oleh hamburan elastis. Di dalam



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 3.4 Termalisasi Neutron Cepat oleh Material Moderator

tumbukan elastis, neutron yang bertumbukan dengan material ringan (yang mempunyai nomor atom kecil) akan kehilangan energi. Untuk itu, kebanyakan neutron ditermalisasi melalui tumbukan elastis.

Elemen dengan nomor massa rendah (kecil) lebih baik berfungsi sebagai moderator dibandingkan dengan elemen dengan nomor massa tinggi karena fraksi kehilangan energi lebih tinggi per tumbukan. Contoh beberapa material moderator yang digunakan di reaktor nuklir adalah air (H_2O), air berat (D_2O), helium (He), berilium (Be), boron (B), dan karbon (C) yang sifatnya disajikan dalam Tabel 3.2. Susunan bahan bakar dan moderator disebut dengan susunan atau medium pengali atau medium multiplikasi karena di medium ini dapat berlangsung reaksi fisi berantai.

Reflektor adalah bahan yang berfungsi memantulkan kembali neutron yang akan keluar teras dan memasukkannya kembali ke teras, dengan kata lain berfungsi untuk mengurangi kebocoran neutron dari teras reaktor melalui reaksi hamburan. Oleh karena itu, bahan reflektor biasanya sama dengan bahan moderator yang terbuat dari unsur ringan, yaitu dengan nomor atom dan nomor massa yang kecil. Contoh bahan reflektor adalah grafit (C), berilium (Be), dan air (H_2O).

Tabel 3.2 Sifat Moderasi Beberapa Material

Material	Jumlah tumbukan sampai tercapai energi termal
H ₂ O	19
D ₂ O	35
Helium	42
Berilium	86
Boron	105
Karbon	114

Sumber: Stacey (2018)

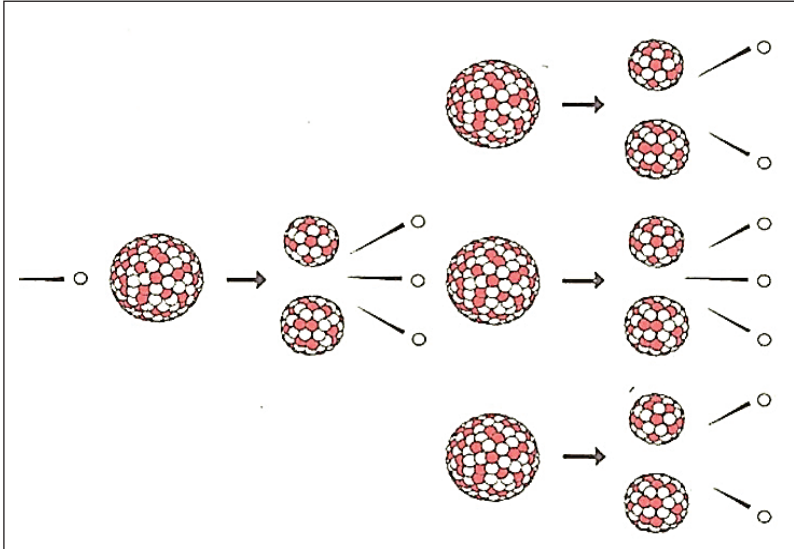
Komponen teras lain yang penting, bahkan sangat penting, adalah batang kendali yang berfungsi mengendalikan reaksi fisi. Batang kendali terbuat dari bahan yang mempunyaiampang lintang serapan terhadap neutron sangat besar sehingga mampu menyerap seberapa pun neutron yang ada dalam proses fisi atau pembelahan inti. Jadi, saat batang kendali masuk ke dalam teras, reaktor akan berada pada kondisi padam karena tidak ada reaksi fisi. Untuk menghidupkan reaktor, batang kendali ditarik keluar pada ketinggian tertentu sesuai kebutuhan sehingga reaksi fisi dapat berlangsung. Bahan untuk pengendali adalah bahan penyerap atau *absorber*, yaitu unsur atau gabungan dari, antara lain C (karbon), B (boron), Cd (kadmium), Ag (perak), dan In (indium). Reaktor RSG-GAS menggunakan bahan penyerap logam paduan AgInCd, sedangkan reaktor TRIGA Bandung dan TRIGA Yogyakarta menggunakan boron karbida, B_4C .

B. Kekritisan Reaktor

1. Reaksi Fisi Berantai dan Faktor Perlipatan

Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa reaksi fisi berantai adalah reaksi fisi yang dapat berlangsung secara terus-menerus dengan sendirinya. Neutron hasil reaksi fisi sebanyak dua atau terkadang tiga buah tidak semuanya hilang setelah mengalami reaksi hamburan atau serapan di reaktor, tetapi paling tidak ada satu neutron yang menumbuk inti bahan bakar dan melakukan reaksi fisi berikutnya seperti dilukiskan dalam Gambar 3.5. Suatu jumlah massa terkecil atau minimum dari bahan bakar dengan komposisi serta bentuk dan ukuran geometri tertentu yang memungkinkan reaksi fisi berantai dapat berlangsung disebut dengan massa kritis.

Apabila jumlah bahan bakar lebih kecil dari massa kritis, reaksi berantai tidak terjadi atau dengan kata lain terhenti. Sebaliknya, apabila massa bahan bakar lebih besar dari pada massa kritis, akan terjadi reaksi berantai yang terus-menerus makin besar secara cepat. Tepat pada saat mencapai massa kritis, reaksi fisi berantai terjadi. Namun, setelah itu massa bahan bakar jadi berkurang, lebih kecil dari pada massa kritis, sehingga akhirnya reaksi fisi menjadi berkurang dan akhirnya berhenti.



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 3.5 Reaksi Fisi Berantai U-235 oleh Neutron Termal

Reaktor yang didesain dengan susunan bahan bakar lebih kecil dari pada massa kritis disebut dengan perangkat subkritis. Reaktor dengan bahan bakar sebanyak massa kritis disebut dengan perangkat kritis. Kedua perangkat tersebut biasanya digunakan untuk percobaan atau eksperimen fisika reaktor. Reaktor yang didesain dengan bahan bakar lebih besar dari pada massa kritis disebut dengan reaktor nuklir. Jadi, reaktor nuklir merupakan medium pengali atau medium multiplikasi dengan muatan bahan bakar lebih dari massa kritis dan dengan bantuan batang kendali dapat dibuat kritis, superkritis, maupun subkritis.

Besaran fisika yang menunjukkan kondisi reaktor atau status reaktor yang menggambarkan kemungkinan reaksi fisi berantai dapat terjadi disebut dengan faktor perlipatan atau faktor multiplikasi dan diberi simbol huruf k . Faktor multiplikasi didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah neutron sesudah dan sebelum reaksi fisi atau sering disebut dengan perbandingan jumlah neutron pada dua generasi neutron yang berurutan. Jadi, faktor multiplikasi adalah:

Buku ini tidak diperjualbelikan.

k = jumlah neutron pada suatu generasi dibagi dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya.

Untuk:

$k = 1$, berarti jumlah neutron selalu tetap, kondisi reaktor disebut kritis;

$k > 1$, berarti jumlah neutron selalu naik, kondisi reaktor disebut superkritis; dan

$k < 1$, berarti jumlah neutron selalu turun, kondisi reaktor disebut subkritis.

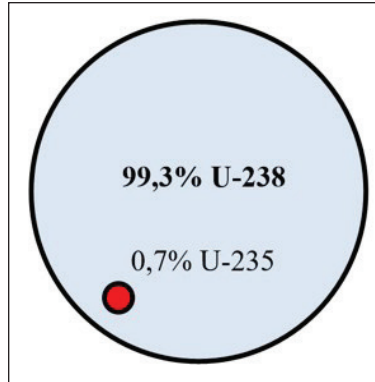
Nilai faktor multiplikasi reaktor bergantung kepada hal-hal sebagai berikut.

1. Jumlah bahan bakar: makin banyak bahan bakar di teras maka k bertambah besar dan makin sedikit bahan bakar maka k berkurang.
2. Posisi batang kendali: apabila batang kendali (bahan *absorber* neutron) dijauhkan, k bertambah dan apabila didekatkan, k menurun.
3. Perubahan suhu dan tekanan di teras.

Uranium alam terdiri dari U-234, U-235, dan U-238. Jumlah U-234 hanya 0,006% sehingga dapat diabaikan, jumlah nuklida fisil U-235 sebesar 0,7%, dan jumlah nuklida fertil U-238 sebanyak 99,3% (Gambar 3.6). Dengan kata lain, uranium alam mengandung persentase bahan fisil U-235 yang sangat kecil padahal merupakan bahan bakar reaktor.

Reaktor yang menggunakan bahan bakar uranium alam dan moderator air tidak pernah akan bisa mencapai kondisi kritis apalagi superkritis meskipun jumlah uranium diperbanyak. Hal ini disebabkan karena jumlah reaksi pembelahan U-235 sangat kecil dibandingkan dengan reaksi penyerapan yang besar oleh U-238 dan air. Jadi, tidak ada reaktor nuklir di dunia yang menggunakan bahan bakar uranium alam dan moderator air.

Untuk dapat mengatasi hal ini ada dua cara yang ditempuh sebagai berikut.



Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 3.6 Persentase Isotop dalam Uranium Alam

1. Tetap menggunakan uranium alam, tetapi harus memakai moderator yang lebih baik yaitu air berat (D_2O) karena penyerapan oleh deuterium lebih kecil dibanding hidrogen. Contohnya adalah reaktor CANDU (*Canadian deuterium uranium*) dari Kanada.
2. Moderator tetap menggunakan air, tetapi bahan bakar uranium alam harus diganti dengan uranium diperkaya dengan menambah persentase U-235-nya, yang disebut dengan uranium yang dipengaya (*enriched uranium*). Sebagai contoh adalah reaktor *pressurized water reactor* (PWR) dan *boiling water reactor* (BWR) menggunakan uranium diperkaya sampai dengan 3% U-235.

Reaktor penelitian RSG-GAS serta TRIGA Bandung dan TRIGA Yogyakarta menggunakan bahan bakar uranium dengan pengayaan 20%. Pengayaannya cukup tinggi untuk memenuhi jumlah massa kritis karena dimensi reaktor penelitian sangat kecil dibandingkan dengan reaktor daya. Pengayaan uranium 20% ini adalah batas maksimal dari klasifikasi uranium perkayaan rendah (*low enriched uranium*, LEU). Uranium dengan pengayaan di atas 20% digolongkan dalam uranium pengayaan tinggi (*high enriched uranium*, HEU). HEU dilarang digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir. Hal ini disebabkan reaktor

dengan bahan bakar pengayaan tinggi dapat memproduksi nuklida plutonium yang cukup banyak dan dapat digunakan untuk pembuatan senjata nuklir.

2. Siklus Neutron dan Rumus Empat Faktor

Untuk menentukan besar faktor perlipatan, perlu dipahami terlebih dahulu siklus neutron yang menerangkan masa hidup dari suatu generasi neutron seperti diperlihatkan pada Gambar 3.7. Perhatikan jumlah neutron fisi dari suatu reaksi pembelahan, misalnya sebesar n_1 . Sebagian neutron ini selanjutnya melakukan reaksi pembelahan cepat dan sisanya hilang dari susunan bahan bakar. Sebagian neutron fisi kemudian mengalami reaksi tangkapan resonansi oleh bahan bakar, sisanya terus mengalami reaksi perlambatan sampai tercapai neutron termal. Dari jumlah neutron termal ini, sebagian hilang dari sistem, sisanya diserap oleh bahan bakar untuk melakukan reaksi fisi kembali sehingga menghasilkan sejumlah neutron fisi baru sebesar n_2 . Proses inilah yang disebut dengan siklus neutron atau generasi neutron pada reaktor nuklir.

Waktu yang ditempuh dari neutron melakukan reaksi fisi sampai lahir neutron yang siap untuk reaksi fisi berikutnya disebut dengan masa generasi neutron atau masa hidup neutron. Perhatikan Gambar 3.7. Misalkan pada generasi tertentu atau disebut generasi 1, jumlah neutron fisi sebesar n_1 . Kemudian, neutron mengalami proses reaksi fisi cepat, termalisasi, dan reaksi fisi termal dengan parameter masing masing adalah:

ϵ = faktor pembelahan cepat;

η = jumlah neutron fisi tiap penyerapan;

ρ = kebolehjadian bebas tangkapan resonansi;

f = faktor penggunaan termal;

P_c = kebolehjadian tidak bocor sebagai neutron cepat; dan

P_t = kebolehjadian tidak bocor sebagai neutron termal.

Setelah melalui reaksi tersebut, jumlah neutron pada generasi 2 berikutnya menjadi sebesar:

$$n_2 = n_1 \eta \epsilon \rho f P_c P_t \quad (3.9)$$

Faktor perlipatan yang diperoleh adalah perbandingan jumlah neutron dua siklus atau dua generasi berurutan:

$$k = \frac{n_2}{n_1} = \eta \epsilon \rho f P_c P_t \quad (3.10)$$

Faktor k disebut rumus enam faktor dan dikenal dengan sebagai faktor perlipatan efektif dengan simbol k_e .

Untuk reaktor dengan ukuran tak berhingga besar maka tidak ada neutron yang hilang, tidak terjadi proses atau reaksi kebocoran neutron, baik neutron cepat maupun neutron termal. Dalam kondisi ini, k disebut dengan faktor perlipatan tak berhingga dengan symbol k_∞ dan rumus faktor perlipatan disebut dengan rumus empat faktor karena terbentuk atas empat faktor, yaitu

$$k_\infty = \eta \epsilon \rho f \quad (3.11)$$

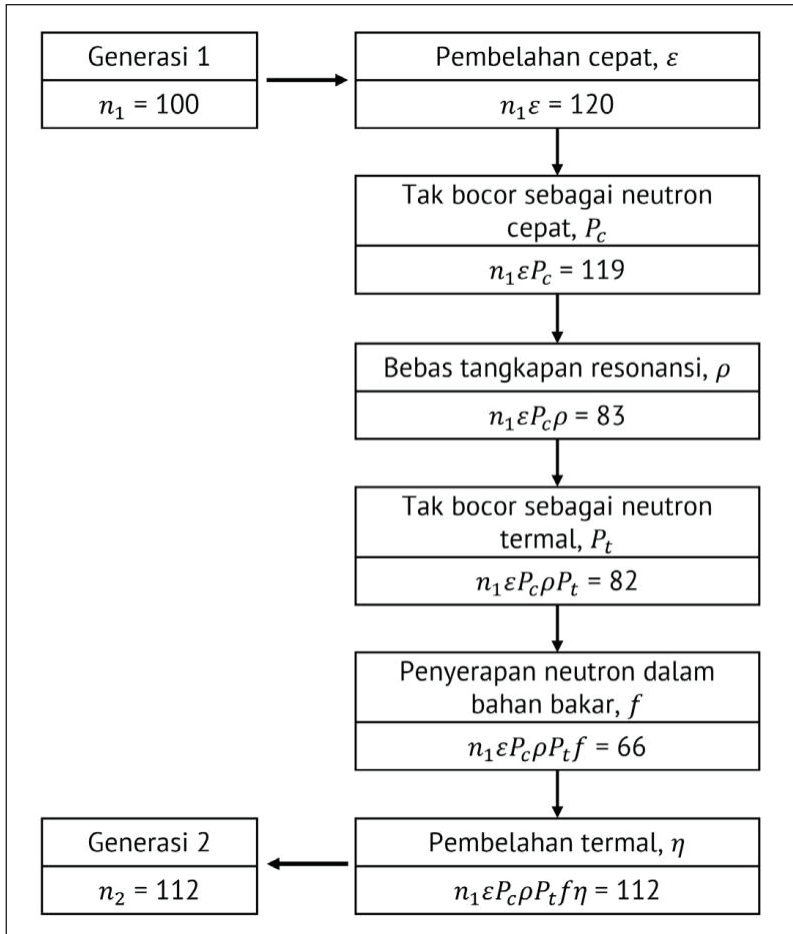
sehingga faktor perlipatan efektif dapat ditulis dengan

$$k_e = k_\infty P_c P_t \quad (3.12)$$

Harga faktor perlipatan akibat pemuatan bahan bakar di teras reaktor bergantung kepada ukuran, susunan geometri, dan komposisi bahan bakar. Dalam Gambar 3.7 disajikan contoh suatu reaktor mempunyai faktor perlipatan sebesar 1,12 (112/100). Persentase ini menunjukkan jumlah neutron lebih besar dari jumlah awalnya, yang berhubungan dengan massa bahan bakar yang lebih besar dari massa kritis, disebut dengan massa lebih. Definisi massa lebih adalah kelebihan massa bahan bakar dari massa kritisnya.

Reaktor nuklir memang dimuati bahan bakar dengan massa lebih tertentu agar dapat beroperasi untuk jangka waktu tertentu (atau dikenal dengan istilah siklus atau daur operasi). Massa lebih ini yang

menentukan lamanya siklus operasi sebelum dilakukan penggantian beberapa bahan bakar baru. Untuk mengimbangi dan mengendalikan massa lebih, reaktor dilengkapi dengan batang kendali yang terbuat dari bahan yang mempunyai sifat penyerap neutron yang sangat kuat dan harus mampu membuat reaktor menjadi subkritis atau mampu me-

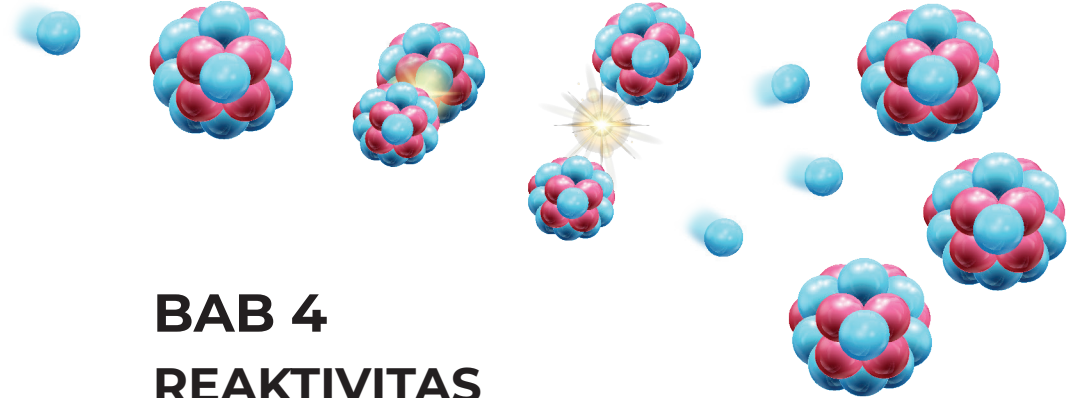


Gambar 3.7 Siklus Neutron dalam Reaktor

madamkan reaktor dengan menyerap semua neutron. Dengan mengatur posisi (memasukkan dan mengeluarkan) batang kendali di dalam bahan bakar reaktor, kondisi reaktor dapat dibuat subkritis, kritis, atau superkritis. Reaktor dapat dihidupkan dan dipadamkan.

Selain parameter n yang menunjukkan jumlah neutron di dalam reaktor, sering pula digunakan parameter atau besaran fluks neutron. Definisi fluks neutron adalah jumlah neutron pada tiap satuan luas tiap sekon, dengan simbol Φ dan satuannya adalah $n/(cm^2.s)$.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 4

REAKTIVITAS REAKTOR

A. Reaktivitas dan Periode Reaktor

Dalam subbab sebelumnya dikatakan bahwa status atau kondisi reaktor dinyatakan dengan besaran atau parameter yang disebut dengan faktor multiplikasi k . Dalam praktik pengoperasian reaktor, kondisi reaktor, yaitu kekritisan reaktor, dinyatakan dengan besaran yang disebut dengan reaktivitas. Besaran ini menunjukkan jauh dekatnya simpangan dari kondisi kritis dan diberi simbol ρ (ro).

Reaktivitas merupakan suatu parameter yang sangat berguna untuk memprediksi perubahan populasi neutron (fluks neutron) dalam suatu reaktor dalam waktu tertentu karena menunjukkan fraksi perubahan populasi neutron pada tiap generasi. Jika terdapat n_0 neutron pada suatu generasi sebelumnya, kemudian ada $n_0 k_e$ neutron pada generasi berikutnya, terjadi perubahan populasi neutron sebesar $(n_0 k_e - n_0)$. Defini reaktivitas secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$\rho = \frac{(n_0 k_e - n_0)}{n_0 k_e} = \frac{k_e - 1}{k_e} \quad (4.1)$$

Hubungan antara reaktivitas dan faktor perlipatan adalah sebagai berikut.

Untuk $k_e = 1$, kondisi reaktor kritis, harga $\rho = 0$.

Untuk $k_e < 1$, kondisi reaktor subkritis, harga $\rho < 0$ (negatif).

Untuk $k_e > 1$, kondisi reaktor superkritis, harga $\rho > 0$ (positif).

Makin besar nilai mutlak reaktivitas reaktor maka makin jauh pula simpangannya dari nilai kritis, baik di daerah subkritis maupun superkritis. Oleh karena itu, sangat baik dan tepat jika reaktivitas dipakai sebagai suatu ukuran untuk menunjukkan seberapa jauh kondisi reaktor dari kondisi kritis.

Tiap bagian dari teras mempunyai nilai reaktivitas tertentu, misalnya bahan bakar mempunyai nilai reaktivitas positif, batang kendali mempunyai nilai reaktivitas negatif. Artinya, sebuah bahan bakar yang mempunyai nilai reaktivitas positif akan memberikan reaktivitas negatif pada saat dikeluarkan dari teras (mengurangi nilai reaktivitas teras). Demikian sebaliknya dengan batang kendali, yang mempunyai harga reaktivitas negatif akan memberikan reaktivitas positif pada saat ditarik keluar teras. Setiap pemberian reaktivitas positif akan menyebabkan fluks neutron naik terus, sebaliknya pemberian reaktivitas negatif akan menyebabkan penurunan harga fluks neutron di teras.

Besaran reaktivitas merupakan besaran tanpa dimensi karena tidak memiliki dimensi waktu, panjang, dan massa, atau kombinasinya. Akan tetapi, untuk memudahkan menyatakan nilai besaran reaktivitas kita perlu memberi satuan. Ada beberapa satuan reaktivitas yang dipakai dalam fisika reaktor, yaitu dk/k, % (persen), mk (mili-k), pcm (per cent mile), dan \$ (dollar) sebagai berikut.

1. (dk/k)
2. % (dk/k) = 10^{-2} (dk/k)
3. mk = 10^{-3} (dk/k)
4. pcm (per cent mile) = 10^{-5} (dk/k)
5. sen = 1/100 dollar
6. dollar = β (dk/k), β adalah harga fraksi neutron kasip

Tabel 4.1 Harga Fraksi Neutron Kasip Beberapa Bahan Bakar

Bahan bakar	Harga β , %	Reaktivitas 1 \$
U-235	0,75	0,75%
Pu-239	0,2	0,2%

Sumber: Stacey (2018); Lamarsh dan Baratta (2001)

Satuan reaktivitas dalam dollar atau sen dollar sangat penting dan lebih praktis dibandingkan dengan satuan lainnya bagi operator reaktor dalam pengendalian reaktivitas reaktor. Hal ini disebabkan karena pemberian reaktivitas sebesar satu dollar akan mengakibatkan perubahan naiknya populasi neutron dengan sangat cepat sekali sehingga reaksi fisi tidak dapat dikendalikan lagi. Kondisi ini sama dengan kondisi apabila teras reaktor tidak mempunyai neutron kasip. Reaktivitas sebesar satu dollar adalah reaktivitas sebesar harga fraksi neutron kasip β (beta) bahan bakar yang dipakai, yang besarnya bergantung kepada jenis bahan bakar itu, seperti contoh dalam Tabel 4.1.

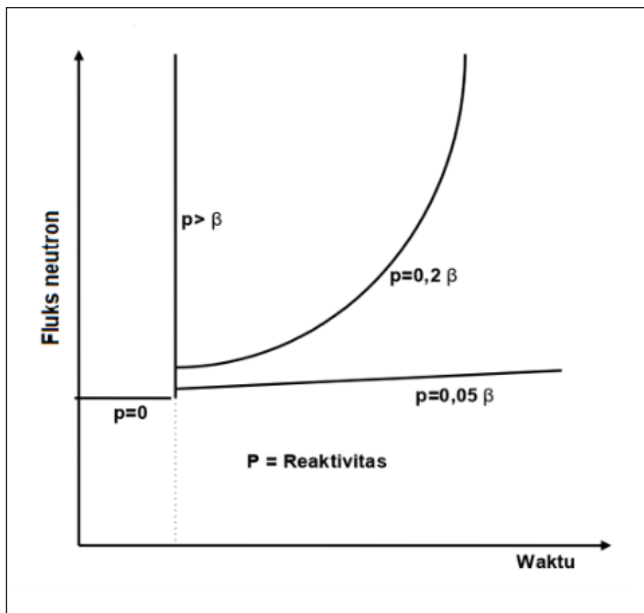
Harga β untuk Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) dengan bahan bakar U_3O_8/Al adalah sebesar 0,765%. Jadi, tidak diperkenankan memberikan reaktivitas sebesar ini karena reaksi fisi—dalam hal ini fluks neutron—akan berkembang secara sangat cepat dan tidak bisa dikendalikan lagi.

Reaktivitas dan faktor perlipatan merupakan besaran yang sama-sama menunjukkan kondisi kekritisan reaktor. Nilai dari kedua besaran ini bergantung kepada konsentrasi bahan bakar, konsentrasi bahan hasil belah, konsentrasi bahan penyerap, kerapatan dan suhu moderator, suhu bahan bakar, dan posisi batang kendali.

Pada saat reaktor padam, kondisi reaktor adalah subkritis dan seluruh batang kendali berada di dalam reaktor. Reaktor dihidupkan dengan cara menaikkan posisi batang kendali. Ini berarti memberikan nilai reaktivitas yang positif kepada reaktor hingga tercapai kondisi kritis, yaitu tercapai n neutron dan daya konstan pada tingkat yang paling rendah (beberapa watt) tanpa menaikkan batang kendali lagi. Selanjutnya, untuk menaikkan daya reaktor, suatu reaktivitas positif harus diberikan ke teras reaktor, misalnya dengan cara menaikkan po-

sisi batang kendali lagi. Pemberian reaktivitas ini harus kecil, jauh di bawah satu dollar. Kecepatan kenaikan daya bergantung pada besar kecilnya reaktivitas positif yang ditambahkan. Setelah tercapai daya yang diinginkan, reaktivitas harus dibuat nol lagi dengan cara menurunkan batang kendali ke posisi semula.

Apabila dilakukan penambahan reaktivitas besar, misalnya $0,2 \beta$ atau 20 sen, perubahan fluks neutron akan sangat cepat sehingga sulit dikendalikan. Apabila diberi satu dollar (seratus sen) kepada reaktor, akan terjadi kenaikan daya reaktor dan tentu saja juga fluks neutronnya dengan sangat cepat sehingga reaktor tidak dapat dikendalikan lagi. Hal ini terjadi karena neutron kasip sudah tidak berpengaruh lagi. Perubahan daya reaktor atau fluks neutron sebagai fungsi waktu dan penambahan reaktivitas disajikan dalam Gambar 4.1.



Sumber: Kuntoro (2018)

Gambar 4.1 Perubahan Fluks Neutron sebagai Fungsi Waktu dan Reaktivitas

Untuk menghidupkan reaktor (*start up*) diperlukan suatu sumber neutron, misalnya campuran plutonium dan berilium (PuBe) atau amerisium dan berilium (AmBe). Andai sumber neutron mempunyai kekuatan memancarkan sebesar n_0 neutron per sekon atau setara dengan fluks neutron Φ_0 dan reaktor mempunyai faktor perlipatan k , jumlah neutron sebagai fungsi waktu adalah:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_0 + k \Phi_0 = \Phi_0 (1 + k) \\ \Phi_2 &= \Phi_0 + k \Phi_1 = \Phi_0 + k (\Phi_0 (1 + k)) \\ &= \Phi_0 + \Phi_0 k + \Phi_0 k^2 = \Phi_0 (1 + k + k^2) \\ \Phi_3 &= \Phi_0 + k \Phi_2 = \Phi_0 + k (\Phi_0 (1 + k + k^2)) \\ &= \Phi_0 + \Phi_0 k + \Phi_0 k^2 + \Phi_0 k^3 = \Phi_0 (1 + k + k^2 + k^3) \\ \\ \Phi_n &= \Phi_0 (1 + k + k^2 + \dots + k^n) \\ \Phi_n &= \Phi_0 \sum k^n\end{aligned}\tag{4.2}$$

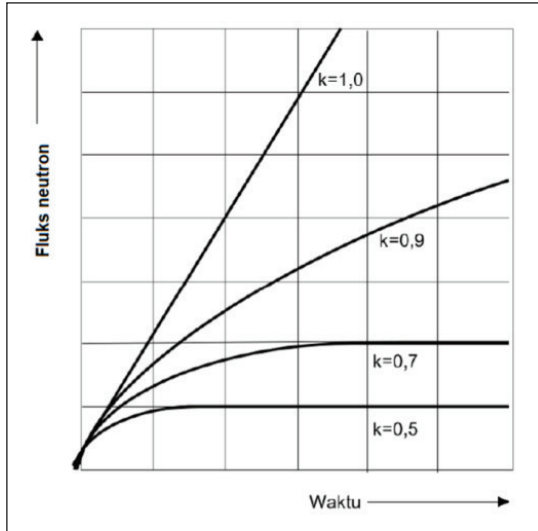
Untuk harga $k < 1$, setelah waktu yang lama atau n mendekati harga tak berhingga, harga neutron akan konvergen berhenti pada suatu harga tertentu Φ_n . Pada kondisi ini reaktor disebut subkritis di mana rumus menjadi:

$$\Phi_n = \Phi_n \frac{1}{1 - k_e} = \Phi_n m\tag{4.3}$$

dengan

$$m = \frac{1}{1 - k_e} \text{ disebut dengan faktor perlipatan subkritis.}\tag{4.4}$$

Untuk reaktor atau medium subkritis, jumlah neutron akan naik terus dengan faktor pengali m sampai pada harga tertentu. Apabila sumber neutron diambil atau dijauhkan dari medium, harga neutron akan turun sampai akhirnya menjadi nol kembali. Sebaliknya, pada reaktor atau medium kritis, neutron akan naik terus meskipun sumber neutron diambil. Ini merupakan tanda atau ciri dalam pengoperasian reaktor, yakni bahwa reaktor telah berada dalam kondisi superkritis dan fluks neutron akan mulai naik terus dan tidak turun meskipun sumber neutron diambil atau dijauhkan dari reaktor. Karakteristik



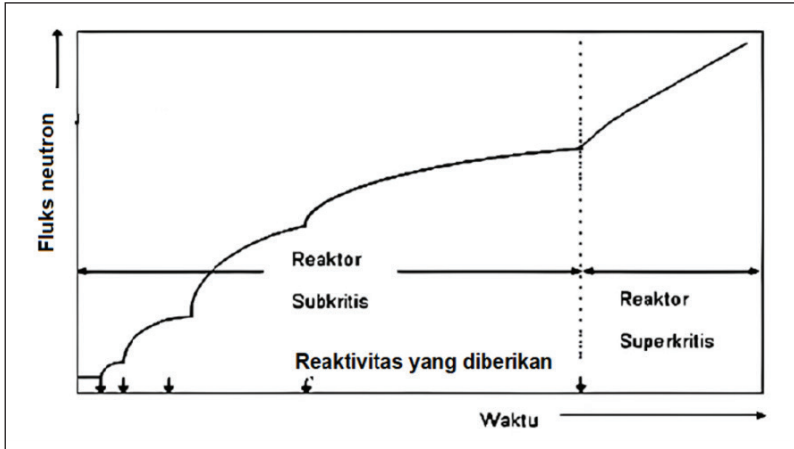
Sumber: Kuntoro (2018)

Gambar 4.2 Karakteristik Fluks Neutron sebagai Fungsi Waktu dan Faktor Perlipatan

fluks neutron sebagai fungsi waktu untuk berbagai harga faktor perlipatan k dilukiskan pada Gambar 4.2.

Parameter penting lain bagi operator adalah kecepatan perubahan relatif fluks neutron yang digambarkan dengan besaran periode reaktor. Definisi periode reaktor adalah waktu yang diperlukan untuk berlangsungnya perubahan fluks neutron sebesar e ($2,72$) kalinya. Simbol periode adalah T dengan satuan sekon, dalam bahasa sehari-hari disebut detik. Periode berharga positif apabila perubahan fluks neutron positif atau bertambah besar dan sebaliknya berharga negatif apabila harga fluks neutron turun sebagai fungsi waktu.

Pada saat *start up*, kita memberikan reaktivitas positif kepada reaktor dengan cara menarik keluar batang kendali sedikit demi sedikit secara bertahap hingga tercapai kondisi kritis. Pemberian reaktivitas tidak terlalu cepat dengan mengamati besarnya periode yang ditimbulkan. Perubahan fluks neutron diperlihatkan pada Gambar 4.3. Pada setiap pemberian reaktivitas, terjadi kenaikan fluks neutron, tetapi hanya



Sumber: Kuntoro (2018)

Gambar 4.3 Perubahan Fluks Neutron pada Proses *Start Up* Reaktor

sampai pada suatu harga tertentu. Artinya, reaktor masih dalam kondisi subkritis dan belum mencapai kondisi kritis (lihat Gambar 4.3). Oleh karena itu, secara berulang operator harus kembali menaikkan batang kendali lagi hingga terjadi kenaikan fluks yang terus meningkat. Pada keadaan ini, berarti kondisi kritis telah terlampaui.

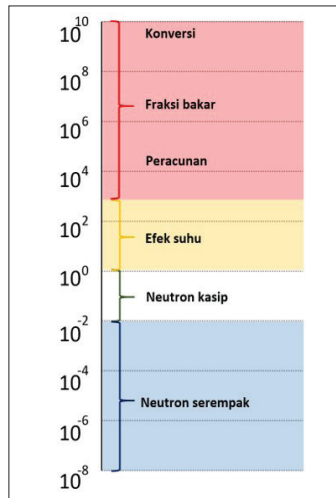
Waktu terjadinya kenaikan fluks neutron yang tajam menjadi penanda bahwa reaktor telah mencapai kondisi kritis. Pada kondisi ini, apabila sumber neutron diambil atau dijauhkan dari teras, nilai fluks neutron akan tetap. Pada kondisi di mana periode menunjuk pada angka tak berhingga dan perubahan fluks neutron menjadi nol, harga fluks neutron dan daya reaktor tetap pada level tertentu. Pada daya konstan terendah ini, reaktor disebut dalam kondisi kritis bebas sumber. Selain itu, reaktor juga masih memiliki suhu kamar dan belum terjadi peracunan atau disebut dalam kondisi dingin dan bersih (*cold & clean*).

Agar reaktor beroperasi untuk waktu yang lama dengan siklus tertentu maka harus tersedia reaktivitas lebih yang besarnya tertentu dengan menambah sejumlah bahan bakar dari massa kritisnya yang disebut dengan massa lebih. Reaktivitas lebih ini harus lebih kecil

harganya dibandingkan dengan nilai reaktivitas negatif dari seluruh batang kendali sehingga batang kendali selalu dapat mengompensasi harga reaktivitas reaktor dan memadamkan reaktor setiap saat. Reaktivitas reaktor total pada saat semua batang kendali berada posisi terbawah (semua batang kendali masuk dalam daerah bahan bakar) disebut dengan reaktivitas padam dan harganya selalu negatif (<0). Kecukupan reaktivitas padam ini yang menjadi ukuran keselamatan operasi reaktor yang harus dapat menjamin bahwa pada kondisi apapun reaktor harus dapat dipadamkan oleh batang kendali.

B. Kinetika Reaktor

Kinetika reaktor menerangkan sifat atau karakteristik populasi neutron di reaktor nuklir sebagai fungsi waktu akibat perubahan faktor perlipatan efektif neutron. Kinetika reaktor sangat diperlukan dalam analisis keselamatan suatu reaktor nuklir. Perubahan populasi neutron—dalam hal ini densitas neutron (n) atau fluks neutron (Φ)



Sumber: Boeck (1991)

Gambar 4.4 Perubahan Parameter Reaktor sebagai Fungsi Waktu dalam Sekon

dalam reaktor—terjadi oleh adanya fenomena fisika mulai dari neutron serempak, neutron kasip, timbulnya panas (suhu), peracunan, fraksi bakar (*burn up*), dan konversi bahan bakar dari orde waktu beberapa nanosekon hingga beberapa hari seperti diperlihatkan pada Gambar 4.4.

Parameter kinetika reaktor berperan penting pada saat menyelesaikan masalah dinamika reaktor dengan pendekatan atau model reaktor titik (*point kinetic equations*). Dalam model kinetika reaktor titik, persamaan difusi neutron fungsi ruang dan waktu direduksi menjadi persamaan yang hanya bergantung pada waktu atau gayut waktu saja dalam bentuk persamaan diferensial biasa sehingga mudah untuk diselesaikan dengan waktu perhitungan yang lebih pendek daripada waktu yang dibutuhkan oleh persamaan aslinya.

1. Persamaan Kinetik

Apabila jumlah neutron pada awal generasi adalah n , jumlah neutron pada akhir generasi dalam satu siklus menjadi nk_{eff} sehingga laju bertambahnya jumlah neutron menjadi (Boeck, 1991; Garland, 2005):

$$\frac{dn(t)}{dt} = n(t) \frac{(k_{eff} - 1)}{l_p} \quad (4.5)$$

dengan

$\frac{dn(t)}{dt}$ = laju perubahan jumlah neutron;

k_{eff} = faktor multiplikasi neutron efektif;

$n(t)$ = jumlah neutron pada waktu t (cm^{-3}); dan

l_p = umur neutron serempak (s).

Jika pada saat $t = 0$ jumlah neutron sebesar n_0 , $n(t)$:

$$n(t) = n_0 e^{\frac{t}{T}} \quad (4.6)$$

Jika T adalah periode reaktor, yaitu waktu yang diperlukan agar jumlah neutron berubah dengan kelipatan eksponensialnya (e), T :

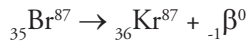
$$T = \frac{l_p}{k_{eff} - 1} \quad (4.7)$$

Umur neutron serempak (k_p) berkisar 10^{-4} s dan jika faktor perlipatan efektif (k_{eff}) = 1,001, dapat diperoleh harga periode reaktor sebesar:

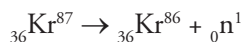
$$T = \frac{10^{-4}}{1,001 - 1} = 0,1 \text{ s}$$

sehingga dalam waktu 1 s, reaktor akan melewati 10 periode dan laju jumlah neutron akan bertambah sebanyak $e^{10} = 2,2 \times 10^4$. Hasil ini menunjukkan bahwa reaktor tidak dapat dikendalikan sebagaimana bom nuklir. Kenyataannya tidaklah demikian, umur generasi neutron ternyata jauh lebih besar atau jauh lebih lambat dibandingkan dengan neutron serempak.

Hal ini disebabkan oleh adanya neutron yang lahir terlambat atau disebut neutron kasip (*delayed neutron*). Inti hasil belah memiliki perbandingan N/Z (neutron-proton) yang sama dengan yang dimiliki inti semula. Oleh karena itu, inti hasil belah terletak di atas kurva kestabilan karena mengandung neutron lebih sehingga mengalami peluruhan beta untuk memperkecil perbandingan N/Z agar tercapai suatu inti yang stabil. Misalnya, proses peluruhan beta dari inti hasil belah ${}_{35}\text{Br}^{87}$ menjadi ${}_{36}\text{Kr}^{87}$ adalah seperti berikut.



Namun, sebagian kecil dari ${}_{36}\text{Kr}^{87}$ yang berada dalam keadaan tereksitasi juga dapat meluruh menjadi ${}_{36}\text{Kr}^{86}$ menurut persamaan:



Neutron yang dihasilkan akibat peluruhan beta dari inti hasil belah disebut sebagai neutron kasip (*delayed neutron*). Sementara itu, inti hasil belah penghasil neutron disebut pelahir atau prekursor (*precursor*). Saat ini diperkirakan terdapat 20 macam inti hasil belah pelahir neutron kasip atau prekursor, yang dikelompokkan ke dalam enam macam kelompok inti yang telah teridentifikasi paling dominan

melaahirkan neutron kasip dengan waktu paruh seperti terlihat dalam Tabel 4.2. Energi neutron serempak = 2 MeV, sedangkan energi neutron kasip jauh lebih rendah, yaitu antara 0,2 dan 0,4 MeV.

Besarnya neutron kasip dinyatakan dalam β , yaitu fraksi neutron kasip di antara neutron serempak hasil pembelahan. Harga β berbeda untuk inti bahan bakar yang berbeda seperti yang disajikan pada Tabel 4.3.

Meskipun neutron kasip jumlahnya sangat kecil, yaitu berkisar 1% dari neutron yang dihasilkan di dalam teras, ia memiliki peranan yang sangat penting dalam operasi reaktor karena memperpanjang

Tabel 4.2 Prekursor Neutron Kasip

k	β_k / β	λ_k (s ⁻¹)	T_k (s)	Keterangan
1.	0,033	0,012	57,7	Br ⁸⁷
2.	0,219	0,030	22,7	I ¹³⁷ + Br ⁸⁸
3.	0,196	0,111	6,2	I ¹³⁸ + Br ⁸⁹ + Rb ⁹³ + Rb ⁹⁴
4.	0,395	0,301	2,3	I ¹³⁹ + Cs, Sb, Te + Br ⁹⁰ + Br ⁹² + Kr ⁹³
5.	0,115	1,136	0,6	I ¹⁴⁰ + Kr
6.	0,042	3,013	0,2	Br, Rb, As

Sumber: Stacey (2018); Lamarsh dan Baratta (2001)

Tabel 4.3 Fraksi Neutron Kasip untuk Beberapa Inti Bahan Bakar

Inti bahan bakar	Fraksi neutron kasip
U ²³³	0,27%
U ²³⁵	0,65%
Pu ²³⁹	0,21%
U ₃ O ₈ (RSG-GAS)	0,765%

Sumber: Stacey (2018); Lamarsh dan Baratta (2001)

generasi neutron atau memperlambat masa hidup neutron. Dengan adanya neutron kasip, umur neutron akan jauh lebih panjang dari pada umur serempak, yaitu

$$l = l_p + \sum_{k=1}^6 \frac{\beta_k}{\lambda_k} \quad (4.8)$$

dengan

l = umur neutron efektif (s);

l_p = umur neutron serempak (s);

β_k = fraksi neutron kasip kelompok ke- k ; dan

λ_k = konstanta peluruhan prekursor kelompok ke- k (s^{-1}).

Jika umur neutron kasip efektif, yaitu $\sum_{k=1}^6 \frac{\beta_k}{\lambda_k}$, 1 s, akan diperoleh harga periode reaktor sebesar: $T = 0,1/(1,001-1) = 100$ s. Dengan adanya neutron kasip, reaktor membutuhkan waktu selama 100 s agar daya reaktor bertambah dengan faktor kelipatan eksponensialnya (e) sehingga dalam waktu 1 s, pertambahannya tidak lagi sebesar $2,2 \times 10^4$ kali, tetapi hanya bertambah sebesar $e^{0,01} = 1,0105$ kali saja. Jadi, dengan adanya neutron kasip ini, umur generasi neutron menjadi jauh lebih panjang sehingga reaktor dapat lebih mudah dikendalikan.

2. Persamaan Per Jam

Persamaan per jam dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan laju peluruhan inti penghasil neutron kasip.

$$\frac{dn(t)}{dt} = \left(\frac{\rho - \beta}{\Lambda} \right) n(t) + \sum_{k=1}^6 \lambda_k C_k \quad (4.9a)$$

$$\frac{dC_k}{dt} = \frac{\beta_k n(t)}{\Lambda} - \lambda_k C_k \quad (4.9b)$$

Andaikan bentuk eksponensialnya bergantung pada waktu, jumlah neutron dan inti neutron kasip adalah:

$$n(t) = n_0 e^{\omega t} \text{ dan } C_k = C_{k0} e^{\omega t}$$

nilai n dan C_k disubstitusi ke dalam persamaan 4.9a dan 4.9b sehingga diperoleh persamaan:

$$C_{k0} = \frac{\beta_k n_0}{(\lambda_k + \omega)\Lambda}$$

Dengan mensubstitusikan harga $n(t)$, C_k , dan C_{k0} ke dalam persamaan laju perubahan jumlah neutron pada persamaan 4.9b, diperoleh:

$$\rho = \frac{\Delta k_{eff}}{k_{eff}} = \left[\Lambda + \sum_{k=1}^6 \frac{\beta_k}{(\omega + \lambda_k)} \right] \omega \quad (4.10)$$

Dengan $\omega = \frac{1}{T}$, persamaan tersebut (4.10) dapat dituliskan kembali dengan persamaan berikut.

$$\rho = \left[\frac{\iota_p}{k_{eff} T} + \sum_{k=1}^6 \frac{\beta_k}{(1 + \lambda_k T)} \right] \quad (4.11)$$

dengan

- ρ = reaktivitas (cent);
- k_{eff} = faktor multiplikasi efektif neutron;
- T = periode reaktor (s);
- λ_k = konstanta peluruhan inti prekursor kelompok ke- k ;
- β_k = fraksi neutron kasip kelompok ke- k ; dan
- ι_p = umur neutron serempak (s).

Persamaan per jam menyatakan hubungan antara periode stabil reaktor dan reaktivitas. Rumus ini merupakan dasar dalam percobaan kalibrasi batang kendali reaktor. Dalam praktik operasi reaktor, insersi

reaktivitas untuk menaikkan atau secara umum mengubah daya harus bernilai kecil sehingga menghasilkan periode reaktor yang besar (lambat). Perubahan daya reaktor dan fluks neutron akan lambat, dapat dipantau, diukur, dan dikendalikan. Setelah diketahui harga periode stabil, selanjutnya berdasarkan persamaan per jam (persamaan 4.11), diperoleh harga reaktivitas yang diinsersi.

Berdasarkan persamaan per jam dapat disimpulkan bahwa makin besar pemberian reaktivitas akan menghasilkan periode reaktor yang semakin pendek atau cepat. Apabila nilai reaktivitas sama dengan harga fraksi neutron kasip, periodenya menjadi pendek, daya akan naik secara sangat cepat, dan reaktor tidak dapat dikendalikan lagi sehingga reaktor akan dipancing (*scram*) oleh batang kendali. Hal ini terjadi karena pengaruh dari neutron kasip sudah tidak ada lagi. Proses reaksi fisi sangat cepat melewati lahirnya neutron kasip.

Untuk reaktor RSG-GAS telah dilakukan perhitungan parameter kinetik untuk teras setimbang. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

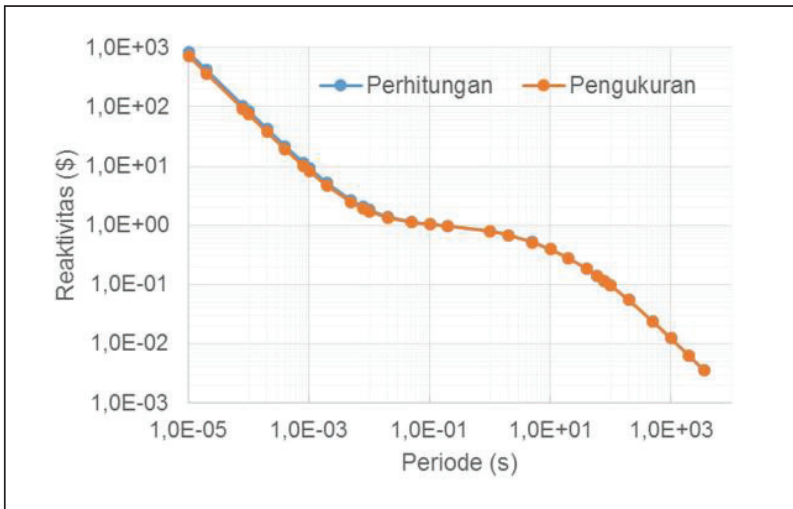
Tabel 4.4 Harga Parameter Kinetik Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS

Kelompok	β_k / β	λ_k (s ⁻¹)
1.	3,81851E-02	1,27039E-02
2.	2,12652E-01	3,16818E-02
3.	1,89046E-01	1,15611E-01
4.	4,04504E-01	3,11763E-01
5.	1,28877E-01	1,39968E+00
6.	2,67348E-02	3,86538E+00
Fraksi Neutron Kasip Total:		7,18629E-03
Konstanta Peluruhan Neutron Kasip Total		7,84341E-02 s ⁻¹
Umur Neutron Serempak		64,5126 μ s

Sumber: Pinem dkk. (2004)

Harga parameter kinetik pada Tabel 4.4 diverifikasi dengan hasil pengukuran hubungan periode-reaktivitas. Pengukuran dilakukan dengan uji batang kendali jatuh. Uji batang jatuh dilakukan pada daya 100 kW. Kanal *start-up* digunakan untuk mengambil cacah neutron untuk mengetahui profil daya reaktor. Ketinggian detektor diatur agar cacah maksimum sebesar 16.000 cps sehingga tidak mengalami saturasi. Pencuplikan data dilakukan dengan menggunakan *multichannel scaler* (MCS) dengan selang waktu 0,2 s dan total data yang direkam sebanyak 8.000 data.

Dari uji batang jatuh akan diperoleh level daya setimbang sebelum batang kendali jatuh, level daya setelah jatuh, dan profil daya selama batang kendali jatuh. Berdasarkan data ini, ditentukan hubungan periode dan reaktivitas. Hasil perhitungan dan pengukuran periode-reaktivitas reaktor RSG-GAS ditunjukkan pada Gambar 4.5, yang memperlihatkan bahwa kurva hubungan periode-reaktivitas reaktor RSG-GAS antara hasil perhitungan dan pengukuran adalah sama (berimpit).



Sumber: Pinem dkk. (2004)

Gambar 4.5 Hubungan Periode-Reaktivitas Reaktor RSG-GAS

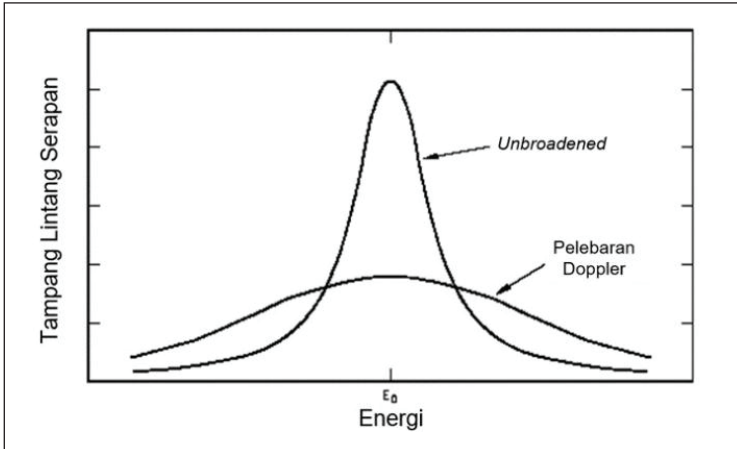
C. Koefisien Reaktivitas

Setelah reaktor beroperasi pada daya tinggi dalam waktu yang lama, akan terjadi perubahan parameter reaktor akibat suhu operasi yang tinggi dan reaktor disebut dalam kondisi panas. Reaktivitas teras reaktor akan berubah jika terjadi perubahan pada saat operasi pada daya tetap pada waktu yang lama. Peristiwa fisika yang memengaruhi perubahan reaktivitas adalah kenaikan suhu, tekanan sistem pendingin, terjadinya peracunan nuklida produk fisi, dan penyusutan jumlah bahan bakar di dalam teras reaktor (Duderstadt & Hamilton, 1976).

Koefisien reaktivitas adalah nilai perubahan reaktivitas yang disebabkan oleh perubahan setiap satuan parameter operasi reaktor. Sebagai contoh, harga reaktivitas reaktor akan berubah saat terjadi perubahan suhu maka nilai perubahan reaktivitas setiap derajat perubahan suhu moderator disebut koefisien reaktivitas suhu moderator dengan satuan $(dk/k)/^{\circ}C$. Koefisien reaktivitas bisa berharga positif ataupun negatif. Apabila nilai atau harga reaktivitas reaktor menurun saat suhu moderator naik, koefisien reaktivitas berharga negatif dan disebut koefisien reaktivitas negatif. Sebaliknya, apabila nilai reaktivitas naik saat suhu moderator naik, disebut reaktivitas positif. Hal yang sama juga berlaku untuk perubahan parameter operasi yang lain. Beberapa koefisien reaktivitas yang penting dalam operasi reaktor akan dijelaskan berikut ini.

1. Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar

Koefisien reaktivitas suhu di teras terdiri dari koefisien reaktivitas suhu bahan bakar dan suhu moderator. Koefisien suhu bahan bakar (*fuel temperature coefficient*) adalah perubahan reaktivitas setiap derajat perubahan suhu bahan bakar. Secara umum, koefisien suhu bahan bakar negatif lebih penting perannya dibanding koefisien suhu moderator negatif karena suhu bahan bakar akan segera naik seiring dengan naiknya daya reaktor. Sementara itu, kenaikan suhu di moderator terjadi dalam orde sekon kemudian karena diperlukan waktu dalam perpindahan panas dari bahan bakar ke moderator. Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar mempunyai efek jauh lebih besar dan lebih cepat (*prompt*) dibandingkan dengan koefisien reaktivitas suhu moderator.



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 4.6 Efek Suhu Bahan Bakar pada Puncak Serapan Resonansi

Nama lain dari koefisien ini adalah koefisien reaktivitas Doppler bahan bakar. Hal ini disebabkan karena adanya efek Doppler pada reaktor termal, sering juga disebut *Doppler broadening*. Nilai koefisien reaktivitas suhu bahan bakar adalah negatif. Fenomena efek Doppler terjadi karena terjadi pelebaran tangkapan neutron pada daerah puncak resonansi seperti pada Gambar 4.6. Nuklida yang mendominasi efek Doppler ini adalah uranium-238 dan plutonium-240.

2. Koefisien Reaktivitas Suhu Moderator

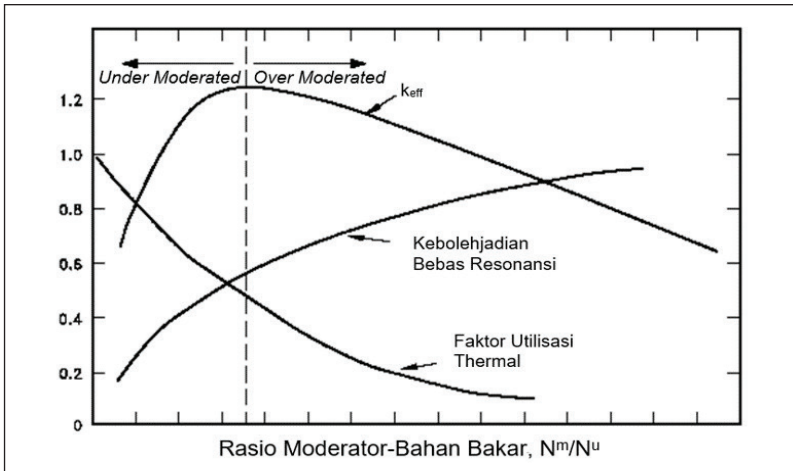
Perubahan reaktivitas setiap derajat perubahan suhu moderator disebut sebagai koefisien reaktivitas suhu moderator (*moderator temperature coefficient*). Besar dan tanda (+ atau -) koefisien suhu moderator ini bergantung pada nilai rasio moderator-bahan bakar (*moderator-to-fuel ratio*). Jika reaktor bersifat bawah moderasi (*under moderated*) (Gambar 4.6), kenaikan suhu moderator akan menurunkan kerapatan moderator di teras yang selanjutnya akan menambah reaktivitas negatif pada teras. Dengan demikian, reaktor memiliki koefisien suhu moderator negatif.

Bahan moderator memiliki beberapa karakteristik, yaitu tampang lintang hamburan yang besar, tampang lintang serapan yang kecil, dan

kebolehjadian hilangnya neutron pada setiap tumbukan yang besar. Di samping itu, makin tinggi rasio moderasi (*moderating ratio*) maka makin efektif suatu material sebagai moderator. Selain itu, rasio moderator-bahan bakar (N_m/N_u) sangat penting di dalam pembahasan suatu moderator.

Jika jumlah moderator ditambah di teras, artinya N_m/N_u meningkat, kebocoran neutron menurun atau berkurang. Hal ini disebabkan serapan neutron di dalam moderator ($\Sigma_{a,m}$) meningkat dan menyebabkan faktor utilisasi termal berkurang. Apabila teras memiliki moderator yang tak cukup, artinya N_m/N_u berkurang, akan menyebabkan peningkatan waktu perlambatan dan menghasilkan makin banyak neutron yang hilang akibat serapan resonansi. Hal ini menyebabkan meningkatnya kebolehjadian kebocoran neutron. Perubahan akibat bervariasinya rasio moderator bahan bakar pada faktor utilisasi termal dan kebolehjadian bebas resonansi ditunjukkan pada Gambar 4.7.

Reaktor didesain memiliki rasio moderator-bahan bakar sedemikian rupa sehingga di bawah moderasi. Alasannya adalah saat daya reaktor



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 4.7 Efek *Over* dan *Under Moderated* pada Nilai k_{eff}

dinaikkan, suhu moderator naik, akibatnya kerapatan moderator turun dan nilai rasio moderator-bahan bakar (N_m/N_u) mengecil. Jika dalam daerah bawah moderasi, mengecilnya N_m/N_u akan menyebabkan nilai k_{eff} mengecil atau dengan kata lain naiknya daya memberikan reaktivitas umpan balik negatif sehingga reaktor lebih aman dalam terjadinya kecelakaan kenaikan daya.

3. Koefisien Reaktivitas Void

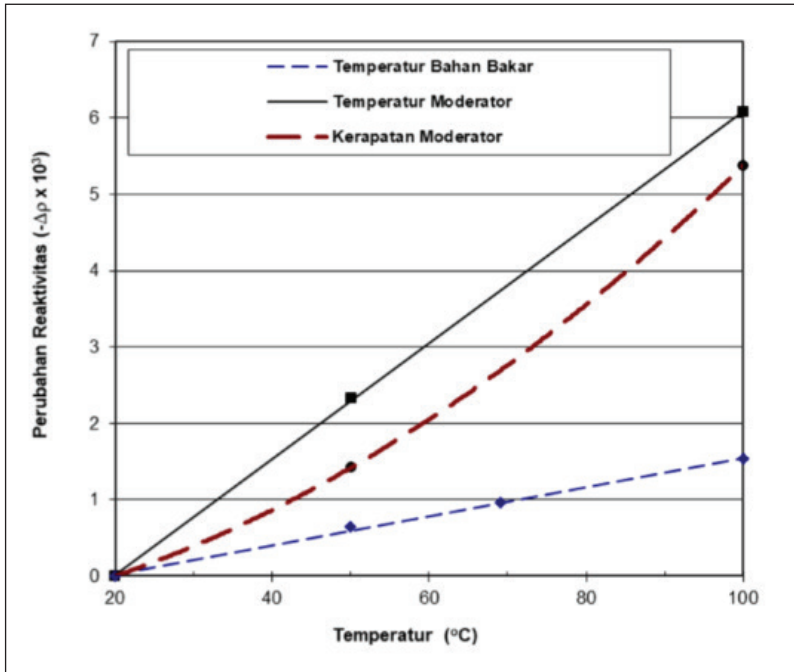
Koefisien reaktivitas void terjadi akibat adanya tekanan pada sistem pendingin. Koefisien reaktivitas void didefinisikan sebagai perubahan reaktivitas setiap persen volume void yang terbentuk. Koefisien reaktivitas void akan besar pengaruhnya jika kondisi moderator dioperasikan pada daerah jenuh atau dekat jenuh, misalnya pada reaktor jenis *boiling water reactor* (BWR). Pada reaktor jenis *pressurized water reactor* (PWR), koefisien void relatif kecil karena jumlah pendinginan yang kecil yang terjadi pada kelongsong. Makin banyak pendinginan, makin kurang moderatornya dalam teras.

4. Koefisien Reaktivitas Daya

Koefisien reaktivitas daya adalah kombinasi dari koefisien suhu moderator, koefisien suhu bahan bakar, dan koefisien void (kerapatan moderator) akibat perubahan daya reaktor. Koefisien daya dinyatakan dalam perubahan reaktivitas setiap perubahan persentase daya.

Untuk reaktor RSG-GAS, koefisien reaktivitas umpan balik sebagai fungsi temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.8. Perubahan reaktivitas akibat temperatur moderator memberikan pengaruh yang besar dibanding pengaruh kerapatan moderator dan temperatur bahan bakar. Perubahan temperatur moderator, tanpa perubahan kerapatan, mengakibatkan bertambahnya serapan resonansi dan perbandingan tangkapan-pembelahan (η). Penambahan ini jauh lebih besar dibanding efek Doppler akibat naiknya temperatur bahan bakar.

Perubahan reaktivitas akibat kerapatan moderator air, temperatur dipertahankan pada temperatur kamar, juga memberikan pengaruh yang lebih besar dibanding pengaruh temperatur bahan bakar. Hal ini diakibatkan oleh perubahan kerapatan air yang mengubah konstanta



Sumber: Sembiring dan Pinem (2002)

Gambar 4.8 Perubahan Reaktivitas sebagai Fungsi Temperatur

kelompok difusi sehingga mengurangi kemampuan hamburan dan menambah tangkapan resonansi. Perubahan reaktivitas akibat kerapatan moderator air tidak linier akibat hubungan kerapatan dan temperatur moderator tidak linier.

Jika perubahan reaktivitas pada Gambar 4.8 dirata-ratakan dalam rentang 20–100°C, diperoleh koefisien reaktivitas umpan balik teras silisida RSG-GAS yang disajikan pada Tabel 4.5. Hasil koefisien reaktivitas reaktor RSG-GAS menunjukkan bahwa seluruh koefisien reaktivitas umpan balik teras RSG-GAS bernilai negatif.

Tabel 4.5 Koefisien Reaktivitas Umpan Balik Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS

Koefisien reaktivitas	Harga
Temperatur bahan bakar ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	$1,92 \times 10^{-5}$
Temperatur moderator ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	$-7,60 \times 10^{-5}$
Daya reaktor ($\Delta k/k/^\circ\text{C}$)	$-9,86 \times 10^{-5}$
Kerapatan moderator:	
Dalam satuan $\Delta k/k/\text{m}^{-3}$ kg	$-9,86 \times 10^{-5}$
Dalam satuan $\Delta k/k/^\circ\text{C}$	$-6,72 \times 10^{-5}$

Sumber: Sembiring dan Pinem (2002)

D. Konversi dan Pemiakan Nuklida Bahan Bakar

Pada reaktor dengan bahan bakar uranium, terjadi pula penyerapan neutron oleh nuklida U-238 menjadi U-239. Nuklida ini adalah radioaktif pemancar beta dengan waktu paruh 23,5 menit yang meluruh menjadi nuklida neptunium, Np-239, yang juga radioaktif pemancar beta dengan waktu paruh 2,36 hari dan meluruh menjadi nuklida plutonium Pu-239. Proses penyerapan neutron oleh U-238 hingga timbul Pu-239 disebut dengan proses konversi dan dapat dinyatakan dengan rumus:



Nuklida Pu-239 merupakan radioaktif pemancar α dan merupakan penyerap kuat neutron. Sebagian mempunyaiampang lintang mikroskopis serapan 269 barn dan menjadi Pu-240. Sebagian Pu-239 yang lain mempunyaiampang lintang fisi sebesar 742 barn yang bertindak sebagai bahan bakar reaksi fisi seperti halnya nuklida U-235. Secara kuantitatif, timbulnya nuklida fisil Pu-239 sebagai tambahan U-235 dinyatakan dengan laju konversi, diberi simbol Cr, dengan definisi:

$$Cr = \frac{\text{Jumlah nuklida Pu - 239 yang timbul}}{\text{Jumlah nuklida U - 235 dan Pu - 239 yang membelah}}$$

Jika $Cr > 1$, artinya pengoperasian reaktor menghasilkan bahan fisil yang lebih banyak dibandingkan dengan bahan fisil yang membelah. Proses ini disebut dengan proses pembiakan. Nuklidanya disebut dengan nuklida fertil atau nuklida subur. Nuklida fertil adalah nuklida yang tidak membelah dengan neutron termal, tetapi dapat diubah menjadi bahan fisil di reaktor dengan reaksi penyerapan neutron. Keuntungan pembiakan diberi simbol B dengan definisi:

$$B = Cr - 1$$

Terdapat dua nuklida fertil, yaitu U-238 dan Th-232 yang dapat diubah menjadi nuklida fisil Pu-239 dan U-233 di reaktor. Jadi, pada reaktor dengan bahan bakar campuran uranium dan torium akan dihasilkan pula nuklida fisil U-233 melalui reaksi:



E. Peracunan Produk Fisi

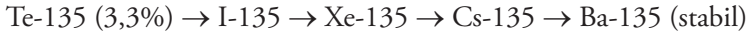
Selama reaktor beroperasi pada daya tinggi (kondisi panas), akan dihasilkan berbagai jenis nuklida produk fisi. Beberapa isotop produk fisi di antaranya mempunyaiampang lintang serapan yang sangat besar terhadap neutron sehingga akan mengurangi jumlah neutron yang akan melakukan reaksi fisi (sangat mengganggu kelangsungan operasi reaktor). Nuklida produk fisi tersebut disebut dengan isotop racun dan reaktor dikatakan mengalami peracunan.

Pada kondisi ini, reaktor disebut dalam kondisi panas dan peracunan (*hot & poison*). Dua jenis racun yang paling besar adalah nuklida yang berbentuk gas ideal, yaitu xenon dan samarium. Nuklida Xe-135 mempunyaiampang lintang serapan sangat besar, yaitu sebesar $2,5 \times 10^6$ barn dan Sm-149 mempunyaiampang lintang serapan sebesar $4,1 \times 10^4$ barn. Sementara itu,ampang lintang fisi uranium-235 hanya 584,4 barn. Konsentrasi racun Sm-149 sangat kecil dibandingkan dengan racun Xe-135.

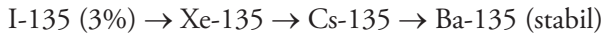
1. Pembentukan Xenon

Isotop Xe-135 timbul di teras reaktor melalui tiga cara reaksi, yaitu reaksi pembelahan dan dari peluruhan isotop produk fisi telurium-135 dan iodin-135, sebagai berikut.

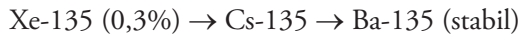
1) Produk fisi telurium:



2) Produk fisi iodium:



3) Produk fisi langsung:



Konsentrasi atom xenon-135 pada saat t sekon dapat ditunjukkan sebagai berikut (Stacey, 2018; Lamarsh & Baratta, 2001)

$$\begin{aligned} \text{Xe}(t) &= \frac{(\gamma_I + \gamma_{Xe}) \Sigma_f \Phi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \Phi_0} [1 - \exp(-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \Phi_0) \cdot t)] \\ &+ \frac{\gamma_I \Sigma_f \Phi_0}{-\lambda_I + \lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \Phi_0} [\exp(-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \Phi_0) \cdot t)] \end{aligned} \quad (4.12)$$

dengan

I, Xe = konsentrasi atom iodin dan xenon-135;

Φ_0 = fluks neutron termal;

λ_I, λ_{Xe} = konstanta peluruhan atom iodin-135 dan xenon-135;

Σ_f = tampang lintang serapan makroskopis fisi;

σ_a^{Xe} = tampang lintang serapan mikroskopis xenon-135; dan

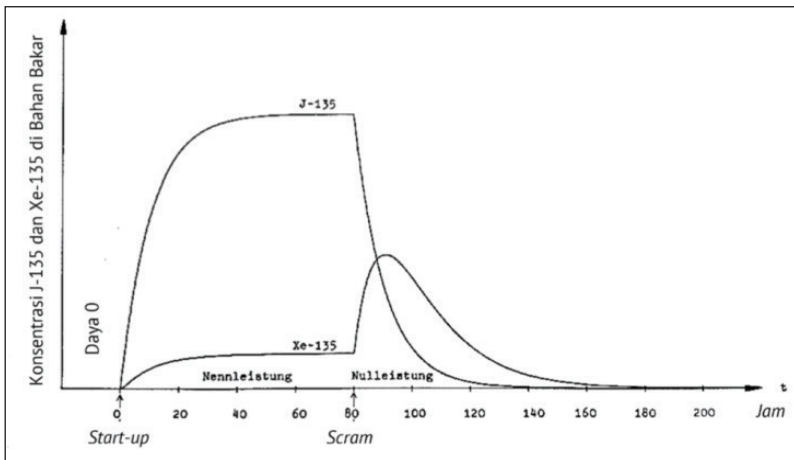
γ_I, γ_{Xe} = persen jumlah iodin-135 dan xenon-135 yang dihasilkan per fisi.

Karena terjadi reaksi-reaksi yang memproduksi xenon-135, peluruhan xenon-135, dan penyerapan neutron termal oleh xenon-135

di dalam teras reaktor yang beroperasi, tercapai konsentrasi xenon-135 pada nilai jenuh atau setimbang. Kondisi tersebut dinamakan xenon setimbang. Besarnya harga kesetimbangan konsentrasi xenon-135 dapat diperoleh dengan cara memasukkan waktu $t = \text{tak berhingga}$ pada persamaan 4.12 sehingga semua harga eksponensial menjadi nol dan persamaan menjadi:

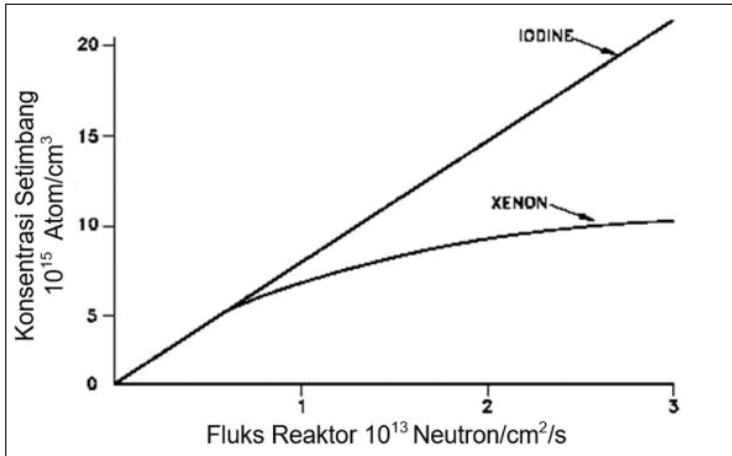
$$Xe_{\infty} = \frac{(\gamma_I + \gamma_{Xe}) \Sigma_f \Phi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \Phi_0} \quad (4.13)$$

Pembentukan nuklida I-135 dan Xe-135 dilukiskan dalam Gambar 4.9. Adapun nilai xenon setimbang sebagai fungsi tingginya fluks neutron disajikan dalam Gambar 4.10.



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 4.9 Hubungan Pembentukan I-135 dan Xe-135 Saat Operasi Daya dan Saat Sesudah Pemadaman



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 4.10 Konsentrasi Iodin-135 dan Xenon-135 Versus Fluks Neutron

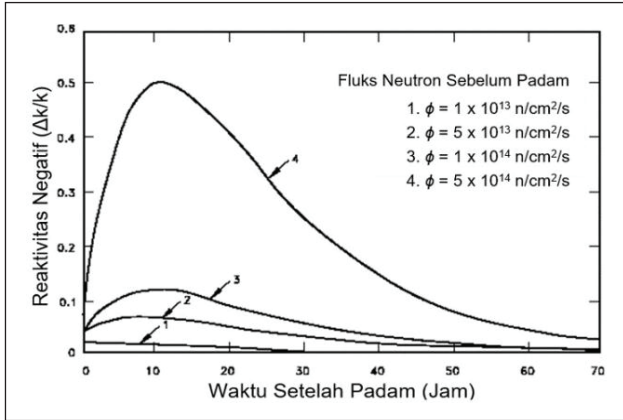
2. Peluruhan Xenon

Setelah reaktor padam, reaksi fisi terhenti sehingga tidak dihasilkan nuklida produk fisi I-135 dan Xe-135. Nuklida tersebut akan meluruh masing-masing menjadi atom Xe-135 dan Cs-135. Waktu paruh I-135 (6,59 jam) yang lebih pendek dari Xe-135 (9,2 jam) mengakibatkan terjadinya akumulasi atom xenon-135 secara cepat membentuk gunung xenon. Puncak xenon terjadi pada waktu sekitar 11 jam.

Besarnya konsentrasi atom xenon t sekon $Xe(t)$ setelah reaktor padam adalah:

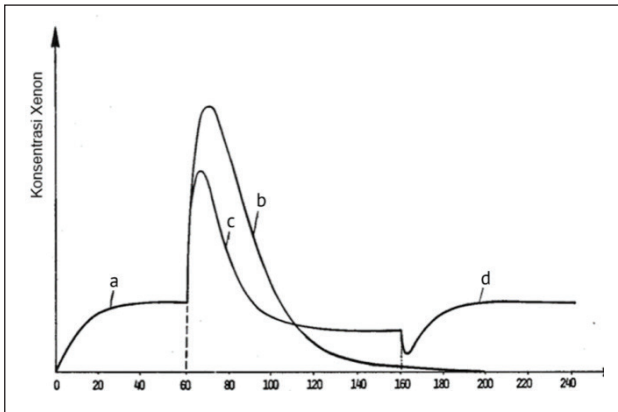
$$Xe(t) = Xe_{\infty} \exp(-\lambda_{Xe} \cdot t) + \frac{\lambda_I I_{\infty}}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} [\exp(-\lambda_{Xe} \cdot t) + \exp(-\lambda_I \cdot t)] \quad (4.14)$$

Pembentukan Xe-135 saat setelah reaktor dipadamkan diperlihatkan pada Gambar 4.11. Sementara itu, konsentrasi xenon yang terbentuk sebagai fungsi operasi reaktor ditunjukkan dalam Gambar 4.12–4.15.



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 4.11 Reaktivitas Xenon-135 setelah Reaktor Padam



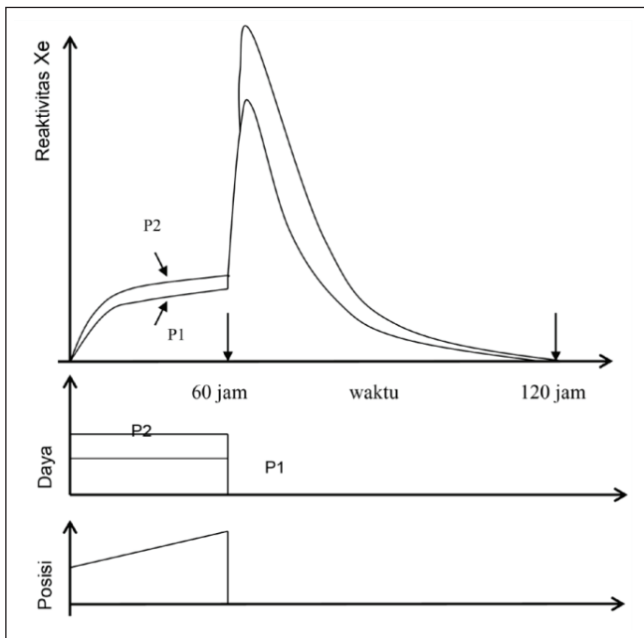
Sumber: Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG), (2005)

Gambar 4.12 Konsentrasi Racun Xenon sebagai Fungsi Waktu dan Kondisi Reaktor

Bagian a pada Gambar 4.12 menunjukkan konsentrasi xenon pada operasi reaktor mulai *start up* sampai tercapai kondisi jenuh setelah daya konstan cukup lama. Sementara itu, bagian b pada Gambar 4.12 menunjukkan perubahan konsentrasi xenon setelah pemadaman reaktor secara *scram*. Konsentrasi xenon meningkat secara cepat terlebih

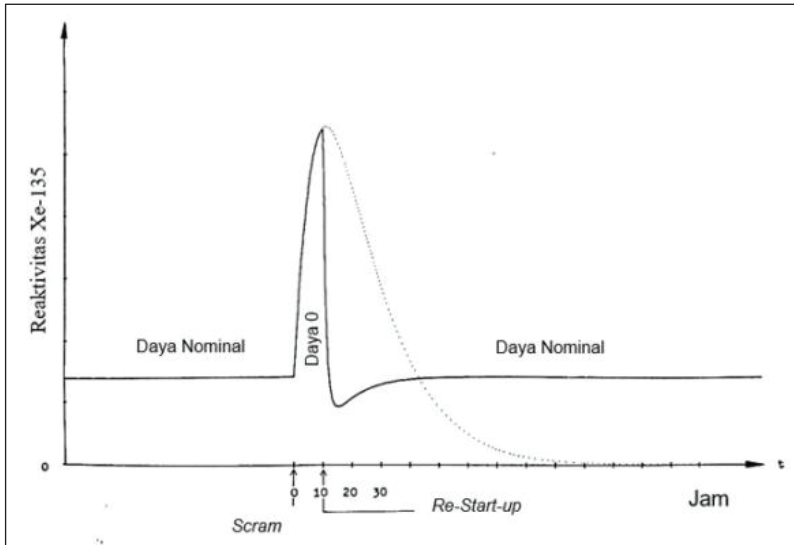
dahulu sampai suatu harga sebagai puncak, baru kemudian turun sampai habis. Bagian c pada Gambar 4.12 menunjukkan perubahan konsentrasi xenon pada saat diturunkan dayanya dan bagian d memperlihatkan perubahan konsentrasi xenon pada saat daya reaktor dinaikkan kembali ke tingkat daya semula.

Gambar 4.13 memberikan gambaran karakteristik xenon pada saat operasi dan pemadaman reaktor dengan tingkat daya yang berbeda. Makin tinggi daya reaktor, makin tinggi pula konsentrasi xenon setimbang dan makin tinggi pula puncak gunung xenon. Gambar 4.14 menerangkan karakteristik xenon setelah reaktor mengalami padam secara pancung kemudian sebelum mencapai puncak gunung xenon, reaktor dihidupkan kembali. Hal ini mungkin terjadi apabila reaktivitas lebih yang ada masih lebih besar daripada reaktivitas xenon.



Sumber: PRSG (2005)

Gambar 4.13 Kurva Xenon pada Operasi Daya Tetap kemudian Dipadamkan

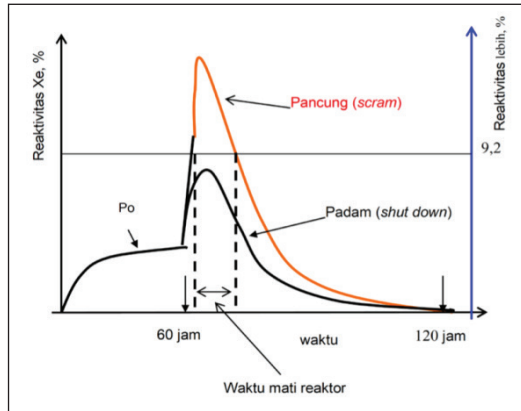


Sumber: PRSG (2005)

Gambar 4.14 Karakteristik Xenon pada saat Terjadi Reaktor Pancung kemudian Dioperasikan Lagi

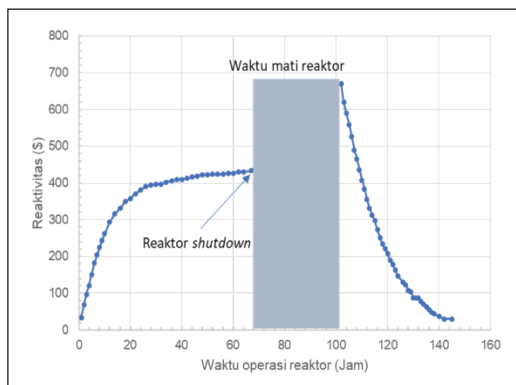
Harga reaktivitas puncak xenon setelah terjadi pancung melebihi besarnya harga reaktivitas lebih teras. Oleh karena itu, teras reaktor tidak dapat segera dioperasikan kembali sampai pada kondisi reaktivitas teras lebih besar dari pada reaktivitas racun. Waktu untuk menunggu sampai pada harga reaktivitas lebih teras memungkinkan untuk menghidupkan reaktor kembali dinamakan waktu mati reaktor karena pada waktu tersebut reaktor tidak dapat dioperasikan (mati) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15.

Pengukuran reaktivitas xenon pada reaktor RSG-GAS pada daya 25 MW. Reaktor dioperasikan untuk mencapai xenon setimbang selama 50 jam dan setelah itu reaktor dipancung (*scram*). Selanjutnya, dilakukan pengukuran peluruhan xenon. Hasil pengukuran reaktivitas xenon dilakukan pada daya 25 MW ditunjukkan seperti dalam Gambar 4.16. Berdasarkan Gambar 4.16, waktu mati reaktor RSG-GAS adalah 32 jam.



Sumber: PRSG (2005)

Gambar 4.15 Waktu Mati Suatu Reaktor



Sumber: PRSG (1992)

Gambar 4.16 Reaktivitas Xenon pada Daya 25 MW Reaktor RSG-GAS

3. Peracunan Samarium

Peracunan samarium memberikan pengaruh kecil dibandingkan dengan peracunan xenon dalam operasi reaktor sehingga dapat diabaikan. Samarium terbentuk dari peluruhan unsur nadium, Nd-149, menjadi prometium, Pm-149, dan akhirnya menjadi Sm-149 yang merupakan nuklida atau isotop stabil. Nd dan Pm merupakan produk fisi dengan fraksi (*yield*) masing-masing 1,1%.

Karakteristik konsentrasi racun $Sm-149$ sebagai fungsi operasi diperlihatkan dalam Gambar 4.17. Pada waktu reaktor beroperasi pertama kali, konsentrasi xenon menuju harga setimbang lalu saat dimatikan naik sampai harga setimbang yang lain. Kemudian saat reaktor dioperasikan kembali, konsentrasi xenon saat setimbang padam turun kembali ke tingkat setimbang operasi (setimbang pertama).

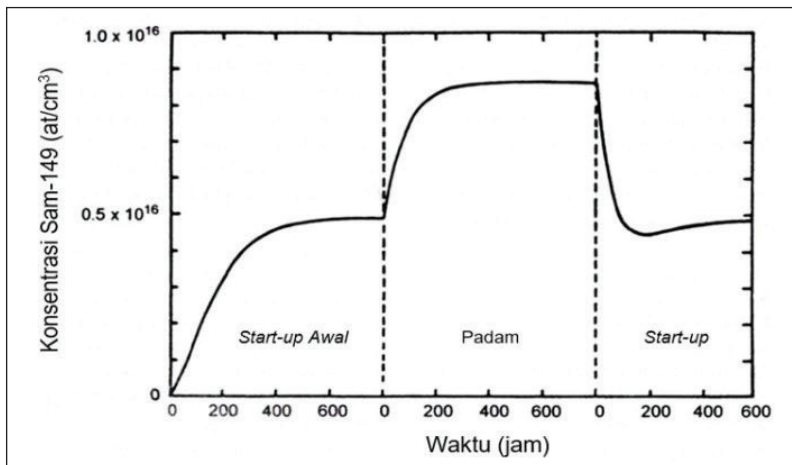
Konsentrasi samarium setimbang dicapai setelah reaktor beroperasi sepuluh hari (Stacey, 2018):

$$(N_{Sm})_0 = (N_{Pm})_0 \lambda_{Pm} \quad (4.15)$$

Ternyata harga konsentrasi setimbang samarium ini tidak bergantung kepada tinggi rendahnya fluks neutron. Nilai reaktivitasnya sekitar 1,2% untuk bahan bakar U-235 dan 0,76% untuk bahan bakar U-alam.

Sesudah reaktor padam, konsentrasi samarium menjadi naik akibat peluruhan Pm:

$$N_{Sm} = (N_{Sm})_0 + (N_{Pm})_0 \quad (4.16)$$



Sumber: Stacey (2018)

Gambar 4.17 Karakteristik Peracunan Samarium saat Operasi dan Pemataman Reaktor

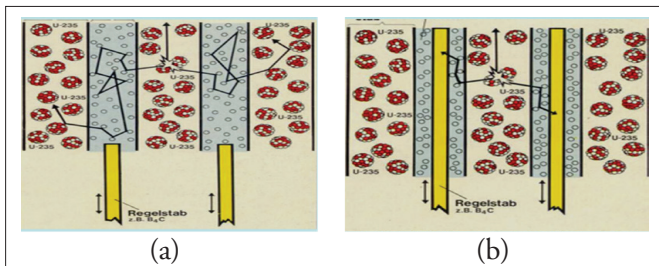
F. Pengendalian Reaktivitas

Pengendalian reaktivitas dalam teras reaktor sangat penting untuk keselamatan operasi reaktor. Reaktor harus dirancang untuk memiliki kemampuan mengendalikan perubahan reaktivitas dalam teras reaktor.

1. Batang Kendali

Fungsi batang kendali adalah untuk mengatur atau mengendalikan populasi neutron di reaktor. Dengan kata lain, batang kendali berfungsi untuk menghidupkan reaktor, mempertahankan daya reaktor, mengubah daya reaktor, dan memadamkan reaktor, yakni dengan mengatur posisinya di dalam teras. Ketika seluruh batang kendali masuk, reaktor menjadi padam (subkritis). Sebaliknya, apabila semua batang kendali ditarik keluar, reaksi fisi berantai menjadi makin besar dan reaktor menjadi superkritis, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.18. Untuk mengoperasikan reaktor pada daya tertentu, batang kendali berada pada posisi di antara teras reaktor.

Bahan batang kendali terbuat dari material yang mempunyaiampang lintang serapan terhadap neutron yang sangat besar, misalnya boron, karbon, kadmium, hafnium. Tabel 4.6 menyajikan beberapa bahan batang kendali reaktor beserta tampang lintang serapan neutronnya. Reaktor RSG-GAS menggunakan bahan paduan AgInCd, sedangkan reaktor TRIGA Bandung dan TRIGA Yogyakarta menggunakan bahan B_4C (boron karbida).



Keterangan: (a) Saat seluruh batang kendali keluar, reaksi fisi berantai terjadi; (b) Saat seluruh batang kendali masuk, reaksi fisi terhenti dan reaktor padam.

Sumber: Volkmer (1982)

Gambar 4.18 Mekanisme Batang Kendali dalam Reaktor

Tabel 4.6 Tampang Lintang Serapan Neutron Termal Beberapa Bahan Batang Kendali

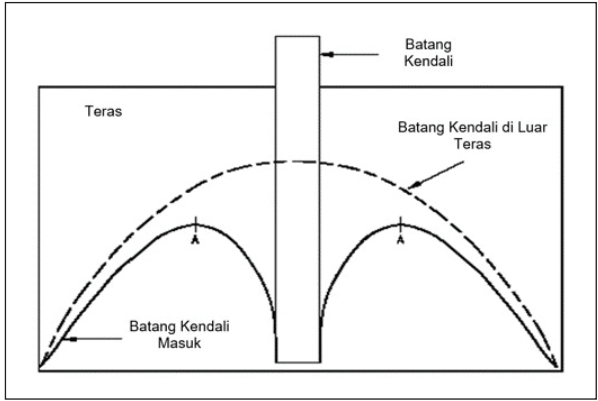
Parameter	B-10	Ag-105	Ag-107	Cd-135	In-115	Hf-177	Hf-178	Hf-179
σ_a , barns	3835	38	91	20600	202	373	84	41
Abundance, %	20	52	48	12	96	19	27	14

Sumber: Gambogi (2012)

Suatu reaktor biasanya mempunyai batang kendali lebih dari dua buah. Bentuk fisik dari batang kendali juga dapat berupa silinder atau plat. Batang kendali biasanya diberi nomor atau nama sesuai dengan fungsinya dalam mengendalikan reaktor tertentu, contohnya sebagai berikut.

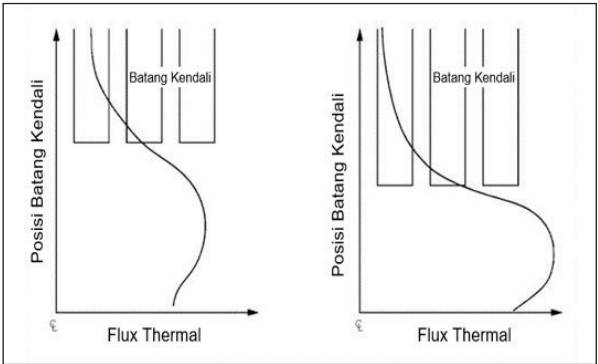
1. Batang kendali keselamatan (*safety rod*): untuk memadamkan reaktor dengan cara pancung (cara cepat, *scram*).
2. Batang kendali kompensasi (*shim rod*): untuk mengimbangi reaktivitas lebih yang diperlukan dan untuk mengompensasi perubahan reaktivitas selama operasi termasuk perubahan fraksi bakar.
3. Batang kendali pengatur (*regulating rod*): untuk mengompensasi perubahan reaktivitas yang kecil akibat perubahan suhu dan perubahan tingkat daya.

Efektivitas sebuah batang sangat bergantung pada nilai perbandingan fluks neutron di lokasi batang kendali itu berada terhadap fluks neutron rerata di seluruh teras. Batang kendali akan memiliki efek maksimum jika diletakkan di daerah yang memiliki fluks neutron yang tinggi. Efek batang kendali terhadap distribusi fluks neutron di reaktor ke arah radial dan aksial diilustrasikan pada Gambar 4.19 (radial) dan Gambar 4.20 (aksial).



Sumber: Nuclear Power (2019)

Gambar 4.19 Efek Posisi Batang Kendali pada Distribusi Fluks Neutron pada Arah Radial



Sumber: Nuclear Power (2019)

Gambar 4.20 Efek Posisi Batang Kendali pada Distribusi Fluks Neutron pada Arah Aksial

2. Neraca Reaktivitas

Neraca reaktivitas adalah keseimbangan reaktivitas reaktor yang menggambarkan besarnya reaktivitas lebih reaktor (positif) untuk menyediakan atau mengompensasi gangguan reaktivitas yang timbul selama satu siklus operasi (negatif) dan kemampuan batang kendali (negatif) untuk memadamkan reaktor pada setiap saat. Reaktivitas positif teras

Buku ini tidak diperjualbelikan.

untuk operasi reaktor diperlukan untuk mengimbangi atau mengompensasi reaktivitas negatif yang timbul akibat operasi, yaitu meliputi reaktivitas fraksi bakar (konsumsi bahan bakar), reaktivitas suhu dan reaktivitas peracunan, serta reaktivitas bahan eksperimen. Dengan demikian, pada prinsipnya neraca reaktivitas adalah reaktivitas lebih dikurangi reaktivitas batang kendali untuk menghasilkan reaktivitas padam. Hasilnya harus menjamin bahwa reaktor dapat dioperasikan dengan aman sepanjang siklus operasi. Neraca ditentukan pada awal siklus operasi karena menggambarkan tingkat keselamatan nuklir sebelum operasi siklus.

Kriteria keselamatan nuklir reaktor adalah bahwa reaktor mempunyai reaktivitas padam minimum sebesar $-0,5\%$ atau dengan kata lain mempunyai margin reaktivitas padam minimum sebesar $0,5\%$ pada kondisi satu batang kendali dengan nilai reaktivitas terbesar gagal masuk ke dalam teras reaktor atau macet. Kriteria ini dikenal dengan nama kriteria satu batang kendali macet atau *one stuck rod criterion*. Berikut ini dijelaskan beberapa definisi yang berkaitan dengan pengendalian reaktivitas oleh batang kendali.

Reaktivitas lebih teras adalah reaktivitas yang ditimbulkan oleh jumlah muatan bahan bakar dalam teras, mempunyai tanda positif. Harga reaktivitas lebih dapat dihitung, yaitu reaktivitas teras pada saat jika dan hanya jika seluruh batang kendali berada di luar teras. Hal ini tidak boleh dilakukan dalam praktik karena akan terjadi reaksi fisi tidak terkendali dan reaktor akan meledak. Dalam praktik, akan diperoleh dengan harga batang kendali total dikurangi dengan reaktivitas pada saat kritis.

Reaktivitas padam adalah reaktivitas teras reaktor pada saat seluruh batang kendali pada posisi masuk penuh (seluruhnya), mempunyai tanda negatif dan menunjukkan reaktivitas minimum teras. Reaktivitas batang kendali adalah reaktivitas negatif yang dimiliki oleh batang kendali untuk memadamkan reaktor. Nilai mutlak dari reaktivitas batang kendali disebut dengan harga reaktivitas atau *reactivity worth*. Harga reaktivitas batang kendali adalah jumlah dari harga reaktivitas lebih dan reaktivitas padam. Sebagai contoh, Tabel 4.7 memperlihatkan hasil pengukuran neraca reaktivitas reaktor RSG-GAS.

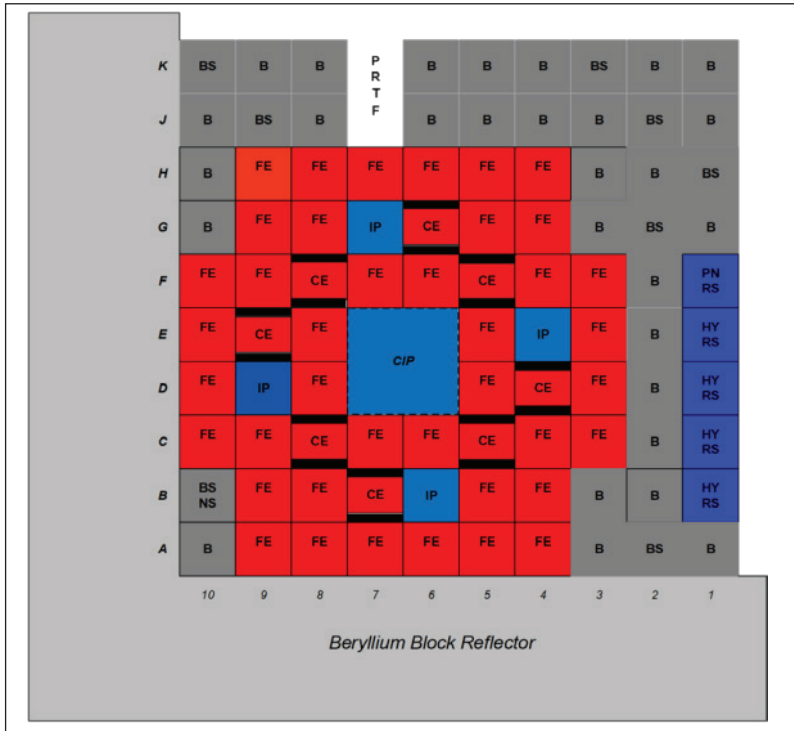
Tabel 4.7 Neraca Reaktivitas Desain Reaktor RSG-GAS

No.	Parameter	(%)
1	Reaktivitas akibat perubahan suhu dari suhu kamar ke suhu operasi	-0,47
2	Reaktivitas akibat peracunan xenon	-3,52
3	Reaktivitas untuk <i>burn up</i> operasi satu siklus	-2,85
4	Reaktivitas untuk eksperimen, iradiasi sampel	-0,93
5	Reaktivitas yang diperlukan untuk satu siklus operasi	-7,77
6	Reaktivitas lebih teras (harus disediakan)	7,77
7	Reaktivitas batang kendali total	-14,58
8	Reaktivitas padam	-6,81
9	Reaktivitas batang kendali terbesar macet	-3,94
10	Reaktivitas padam minimum	-2,87
11	Margin reaktivitas padam	2,87

Sumber: PRSG (2020b)

Pada reaktor RSG-GAS terdapat delapan batang kendali (simbol JDA) sehingga kalibrasi harus dilakukan untuk seluruh batang kendali. Konfigurasi teras setimbang reaktor RSG-GAS diperlihatkan pada Gambar 4.21. Posisi batang kendali pada reaktor RSG-GAS adalah JDA01/E-9, JDA-02/G-6, JDA-03/F-8, JDA-04/F-5, JDA-05/C-5, JDA-06/C-8, JDA-07/D-4, dan JDA-08/B-7.

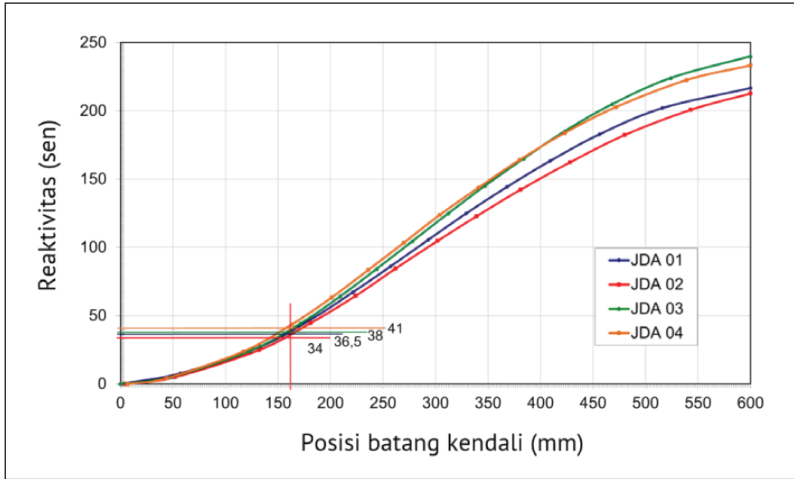
Neraca reaktivitas ditentukan secara eksperimen dengan melakukan kalibrasi batang kendali kemudian menghitung harga reaktivitas lebih, reaktivitas batang kendali, dan reaktivitas padam dari kurva hasil kalibrasi. Contoh hasil kalibrasi batang kendali pada teras T-100 dapat dilihat pada Gambar 4.22 dan 4.23. Dari kurva tersebut ditentukan nilai tiap batang kendali seperti terlihat di dalam Tabel 4.8. Neraca reaktivitas ditentukan setelah mengetahui posisi kritis batang kendali pada daya rendah bebas sumber neutron. Hasilnya disajikan dalam Tabel 4.9.



Keterangan: EB= Elemen Bakar, EK= Eleme Kendali, BE= Elemen Be Reflektor, BS= Elemen Be Reflektor dengan *plug*, IP= Posisi Iradiasi, CIP= *Central Irradiation Possition*, PNRS= *Pneumatic Rabbit System*, HYRS= *Hydraulic Rabbit System*

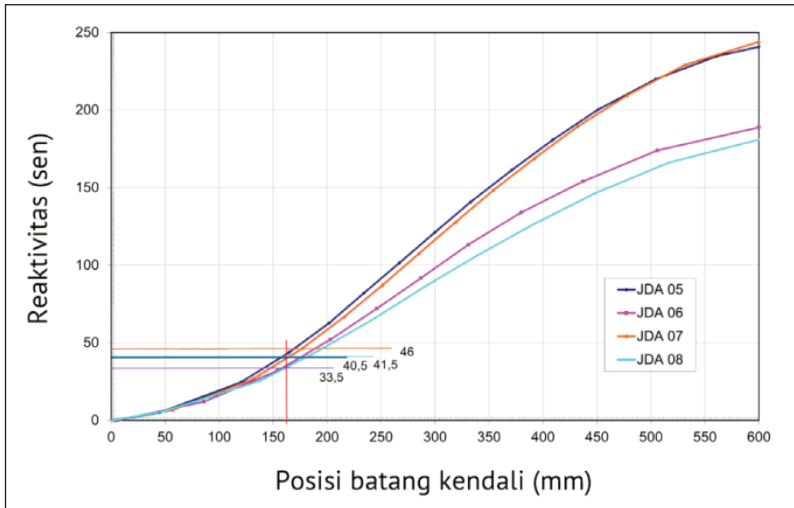
Sumber: Pinem dkk. (2004)

Gambar 4.21 Konfigurasi Teras Setimbang Reaktor RSG-GAS



Sumber: PRSG (2020a)

Gambar 4.22 Kurva S Hasil Kalibrasi Batang Kendali (JDA 01–04)



Sumber: PRSG (2020a)

Gambar 4.23 Kurva S Hasil Kalibrasi Batang Kendali (JDA 05–08)

Tabel 4.8 Hasil Kalibrasi Batang Kendali Teras 100

No.	JDA (Batang Kendali No.)	Nilai Reaktivitas	
		(\$)	(%)
1	Batang kendali JDA-01	2,1675	1,6581
2	Batang kendali JDA-02	2,1275	1,6275
3	Batang kendali JDA-03	2,4000	1,8360
4	Batang kendali JDA-04	2,3325	1,7844
5	Batang kendali JDA-05	2,4075	1,8417
6	Batang kendali JDA-06	1,8875	1,4439
7	Batang kendali JDA-07	1,8100	1,3847
8	Batang kendali JDA-08	2,4400	1,8666

Sumber: PRSG (2020a)

Tabel 4.9 Neraca Reaktivitas Reaktor RSG-GAS Teras 100

No.	Parameter	(%)
1	Reaktivitas total batang kendali	-13,4429
2	Reaktivitas padam	-6,3174
3	Reaktivitas lebih teras 100 awal	7,1256
4	Reaktivitas pada kondisi macet (<i>stuck rod</i>)	-4,4814
5	Reaktivitas batang kendali terbesar (No. 07 Posisi D-4)	-1,8360

Sumber: PRSG (2020a)

Dari Tabel 4.9 diperoleh bahwa reaktivitas padam saat kondisi macet (*stuck rod*) sebesar -4,5% (dibulatkan). Artinya, reaktor mempunyai margin reaktivitas padam sebesar 4,5% yang jauh lebih besar dari batas keselamatan, yaitu 0,5%. Reaktor memenuhi batas keselamatan nuklir dan memenuhi penyediaan reaktivitas positif untuk operasi selama satu siklus.



BAB 5

DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON DAN RAPAT DAYA

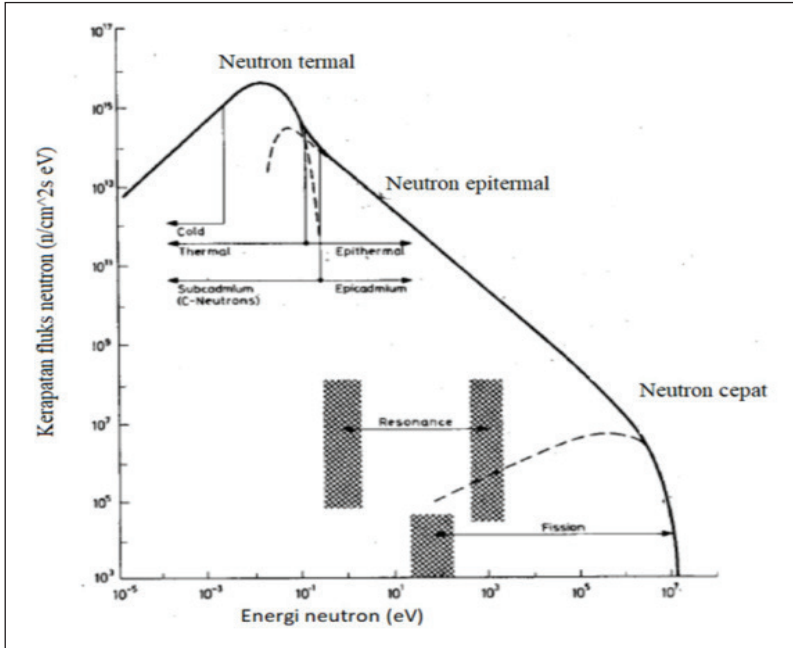
A. Fluks Neutron

Neutron yang ada dalam reaktor mengalami berbagai interaksi dengan material yang ada dalam reaktor. Dengan demikian, neutron tersebut terdistribusi bergerak secara acak dengan kecepatan atau energi tertentu. Untuk menggambarkan keadaan neutron di dalam teras reaktor, digunakan suatu besaran, yaitu fluks neutron. Berdasarkan energinya, neutron dapat dibagi menjadi tiga kelompok (IAEA, 1970; Ali dkk., 1994), yaitu

1. neutron termal, dengan energi $E < 0,5 \text{ eV}$;
2. neutron epitermal, dengan energi, $0,5 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$; dan
3. neutron cepat, dengan energi, $10 \text{ keV} < E < 20 \text{ MeV}$.

Spektrum neutron termal sampai dengan cepat untuk suatu reaktor riset ditunjukkan pada Gambar 5.1.

Rapat neutron didefinisikan sebagai jumlah neutron per satuan volume dengan satuan n/cm^3 . Adapun rapat fluks neutron yang pada umumnya disebut fluks neutron saja adalah jumlah neutron per satu satuan luas per sekon, dengan satuan $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. Fluks neutron sama dengan rapat neutron kali kecepatan geraknya, sedangkan perkalian



Sumber: IAEA (1970); Ali dkk. (1994)

Gambar 5.1 Spektrum Neutron

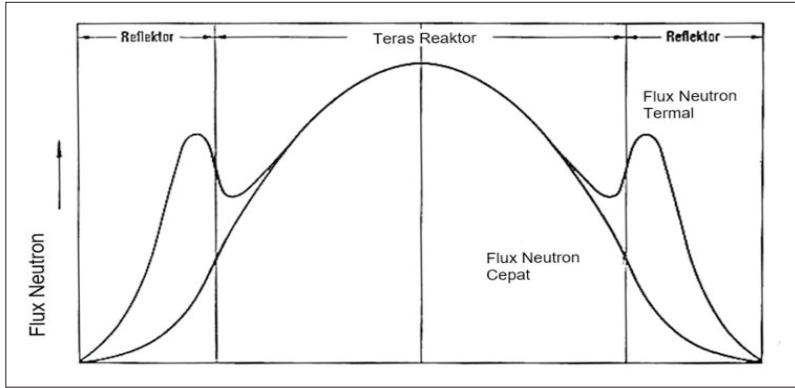
antara fluks neutron dengan waktu disebut dengan fluens yang menunjukkan banyaknya neutron yang telah diterima atau diderita oleh suatu bahan dalam waktu tersebut. Ketiga besaran tersebut dituliskan secara matematis sebagai berikut.

$$\text{Rapat neutron} : N \text{ (n/cm}^3\text{)} \quad (5.1)$$

$$\text{Fluks neutron} : \Phi = N v \text{ (n/(cm}^2\text{/s))} \quad (5.2)$$

$$\text{Fluens} : F = \Phi t = N v t \text{ (n/cm}^2\text{)} \quad (5.3)$$

Dalam reaktor, sangat penting untuk mengetahui distribusi fluks neutron di dalam teras untuk pengguna reaktor dan untuk keselamatan reaktor karena akan memberikan gambaran distribusi beban panas di tiap bahan bakar. Salah satu contoh distribusi fluks neutron pada arah radial dari suatu reaktor dilukiskan pada Gambar 5.2.



Sumber: PRSG (2005)

Gambar 5.2 Distribusi Fluks Neutron Arah Radial di Suatu Teras Reaktor Nuklir

Untuk reaktor RSG-GAS telah dilakukan perhitungan dan pengukuran spektrum neutron. Pengukuran dilakukan pada sistem Rabbit dengan mengiradiasi beberapa keping seperti ditunjukkan pada Tabel 5.1. Hasil perhitungan dan pengukuran pada sistem Rabbit ditunjukkan pada Gambar 5.3.

Tabel 5.1 Jenis Bahan Detektor Aktivasi (Keping) untuk Pengukuran Spektrum Neutron

No.	Elemen	Reaksi inti	Umur paro, $t_{1/2}$		Tampang lintang, σ (10^{-24} cm ²)
			Besaran	Satuan	
Daerah neutron termal					
1.	Dy	$Dy^{164}(n, \gamma)Dy^{165}$	139	menit	920,0
2.	Co	$Co^{59}(n, \gamma)Co^{60}$	5,27	tahun	37,4
3.	Cu	$Cu^{63}(n, \gamma)Cu^{64}$	12,8	jam	4,5
4.	Au	$Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$	2,68	hari	100
5.	In	$In^{115}(n, \gamma)In^{116m}$	54	menit	170
6.	Mn	$Mn^{55}(n, \gamma)Mn^{56}$	2,57	jam	13,2

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Elemen	Reaksi inti	Umur paro, $t_{1/2}$		Tampang lintang, σ (10^{-24} cm ²)
			Besaran	Satuan	

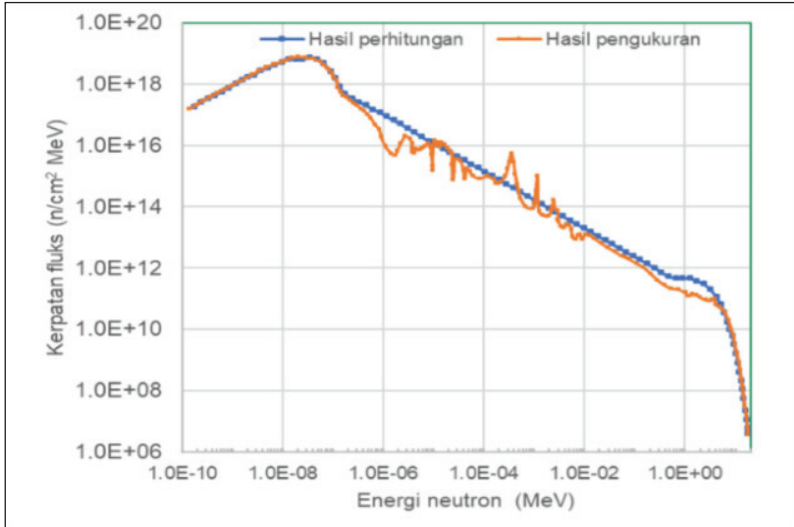
Daerah neutron intermediate

7.	Au	$Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$	2,68	hari	1565
8.	In	$In^{115}(n, \gamma)In^{116m}$	54	menit	3243
9.	Ag	$Ag^{109}(n, \gamma)Ag^{110m}$	252	hari	750
10.	W	$W^{186}(n, \gamma)W^{187}$	24,1	jam	350
11.	Mn	$Mn^{55}(n, \gamma)Mn^{56}$	2,57	jam	14
12.	Cu	$Cu^{63}(n, \gamma)Cu^{64}$	12,8	jam	5,6

Daerah neutron cepat

13.	Nb	$Nb^{93}(n, n')Nb^{93m}$	13,6	tahun	75,2
14.	Ti	$Ti^{47}(n, p)Sc^{47}$	3,43	hari	21,4
15.	Ni	$Ni^{58}(n, p)Co^{58}$	72	hari	109
16.	Fe	$Fe^{54}(n, p)Mn^{54}$	310	hari	78
17.	Ti	$Ti^{46}(n, p)Sc^{46}$	85	hari	10
18.	Al	$Al^{27}(n, p)Mg^{27}$	9,45	menit	4,12
19.	Fe	$Fe^{56}(n, p)Mn^{56}$	2,57	jam	1,05
20.	Al	$Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$	15,06	jam	0,693
21.	Ti	$Ti^{48}(n, p)Sc^{48}$	44	jam	0,303
22.	Mn	$Mn^{55}(n, 2n)Mn^{54}$	310	hari	0,244
23.	Cu	$Cu^{63}(n, 2n)Cu^{62}$	10,1	menit	0,0915
24.	Ni	$Ni^{58}(n, 2n)Ni^{57}$	36	jam	0,0056

Sumber: Pinem dan Kuntoro (1993)



Sumber: Pinem dan Kuntoro (1993)

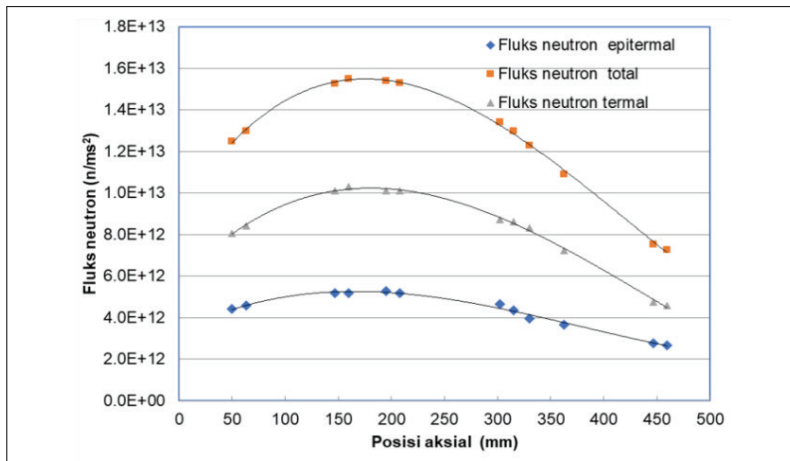
Gambar 5.3 Spektrum Neutron RSG-GAS pada Sistem Rabbit

Pengukuran fluks neutron ditentukan dengan metode aktivasi neutron. Metode ini sangat akurat karena dapat dilakukan pada daerah fluks neutron yang diinginkan. Keping/kawat yang digunakan sesuai dengan fluks neutron yang diinginkan seperti ditunjukkan pada Tabel 5.2. Pengukuran fluks neutron termal reaktor RSG-GAS menggunakan keping Au dan Co, sementara untuk neutron cepat menggunakan Al dan Ni. Aktivitas neutron dari keping yang diiradiasi dalam teras reaktor ditentukan dengan detektor HP-Ge dan dalam menentukan fluks neutron harus ditentukan beberapa faktor koreksi seperti perisai diri keping, daya reaktor, dan *cadmium ratio* untuk neutron termal. Gambar distribusi fluks neutron pada posisi D-6 pada daya reaktor sebesar 100 kW ditunjukkan pada Gambar 5.4.

Tabel 5.2 Keping untuk Pengukuran Fluks Neutron

Material	Reaksi	Isotop abundance (w/o)	Energy (MeV)	Umur paro	Branching ratio (%)
Au	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	100	0,4118	2,69 hari	95,50
Co	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	100	1,333	5,27 tahun	99,98
Ni	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	67,76	0,811	70,8 hari	99,40
Al	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	100	1,014	9,45 menit	29,00

Sumber: : Pinem dan Sembiring (2019)



Sumber: Pinem dan Sembiring (2019)

Gambar 5.4 Distribusi Fluks Neutron pada Posisi D-6 pada Daya 100 kW

B. Daya Reaktor

Dari pembahasan reaksi fisi sebelumnya, kita ketahui bahwa di dalam teras reaktor, energi panas merata yang dihasilkan pada setiap reaksi fisi adalah sekitar 200 MeV. Dari pengertian tersebut dapat diperoleh hubungan antara daya reaktor dan jumlah reaksi fisi yang berbanding lurus. Reaksi fisi sering dinyatakan dengan besaran fluks neutron. Jadi,

dengan mengetahui nilai fluks neutron di dalam teras, besar daya reaktor akan dapat diketahui dan demikian pula sebaliknya. Energi yang dihasilkan dari setiap fisi adalah sebesar 200 MeV atau $3,2 \times 10^{-11}$ watt sekon (Ws). Energi senilai 1 Ws sama dengan energi yang dihasilkan dari 10^{11} dibagi 3,2 fisi atau dari $3,125 \times 10^{10}$ fisi. Jadi, daya panas atau daya termal yang dihasilkan di dalam teras reaktor dapat dihitung dengan persamaan (Agrawal, 2001):

$$P = 3,2 \times 10^{-11} \Phi_{th} \Sigma_f V \quad (5.4)$$

dengan

P = daya reaktor (watt);

Φ_{th} = fluks neutron termal ($n/(cm^2.s)$);

Σ_f = tampang lintang makroskopis pembelahan (cm^{-1}); dan

V = volume teras reaktor (cm^3).

Daya termal reaktor juga dapat ditentukan dari parameter termohidraulika sistem pendingin, yaitu laju alir dan beda suhu di teras reaktor. Energi panas yang timbul di teras reaktor dipindahkan ke sistem pendingin melalui penukar panas. Saat tercapai kesetimbangan panas, sesuai dengan asas Black, panas yang dipindahkan dari teras reaktor sama dengan panas yang diterima oleh pendingin menurut rumus:

$$Q = m c \Delta T \quad (5.5)$$

dengan

Q = energi panas yang ditimbulkan oleh bahan bakar reaktor di teras;

m = massa pendingin;

c = kapasitas panas pendingin; dan

ΔT = kenaikan suhu pendingin teras.

Perhatikan kesetimbangan panas di sistem penukar panas maka daya reaktor, yaitu energi panas yang dihasilkan persatuan waktu adalah:

$$P = dQ/dt = (dm/dt) c \Delta T = 1,15 \times 10^{-3} (dm/dt) \Delta T \text{ MW} \quad (5.6)$$

dengan

- dm/dt = laju alir sistem pendingin reaktor yang melalui, kg^3/jam ;
- c = kapasitas jenis air = $1,15 \times 10^{-3} \text{ MW.jam}/(\text{kg}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; dan
- ΔT = beda suhu pendingin sisi masukan dan keluaran di teras reaktor, $^\circ\text{C}$.

Daya reaktor di RSG-GAS dipantau oleh dua sistem pengukuran, yaitu pengukuran dengan detektor radiasi dan detektor termal. Detektor radiasi dengan *fission chamber* (FC, kamar fisi) digunakan untuk daerah *start up* (daya rendah) dan *compensated ionization chamber* (CIC, kamar ionisasi terkompensasi) digunakan untuk daerah daya menengah dan daya tinggi. Sistem ini sangat peka terhadap perubahan fluks neutron/daya, tetapi tidak akurat untuk pengukuran daya sehingga digunakan untuk memantau saat mengubah daya. Adapun sistem termal sangat akurat, tetapi dengan syarat kondisi reaktor sudah betul-betul stabil pada daya dan aliran pendinginnya.

Oleh karena itu, daya reaktor dikalibrasi secara termal, kemudian hasilnya digunakan untuk menentukan skala sistem pengukur radiasi. Sebagai contoh, disajikan hasil kalibrasi daya reaktor RSG-GAS saat sedang dioperasikan pada daya sekitar 15 MW di teras nomor 100 (PRSG, 2020a) sebagai berikut.

1. Laju alir sistem pendingin primer CF811 = $3150 \text{ m}^3/\text{jam}$.
2. Suhu masuk perpindahan panas CT001 = $38,34 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Suhu keluar perpindahan panas CT006 = $34,88 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Beda suhu, delta $T = 4,01$ °C.
5. Daya yang dihasilkan = 14,63 MW. Dengan menggunakan persamaan 5.6, diperoleh daya reaktor sebesar 12,53 MW. Nilai hasil eksperimen memberikan hasil yang benar karena sudah dikoreksi dengan kondisi sistem pendingin reaktor.

Setelah reaktor padam, energi panas di teras reaktor tidak langsung habis, tetapi menurun secara eksponensial. Hal ini terjadi karena adanya energi panas yang timbul dari peluruhan radioaktif dari nuklida hasil fisi yang disebut dengan panas peluruhan (*decay heat*). Pada saat reaktor padam, panas masih cukup besar, yaitu sekitar 4% dari daya reaktor sebelum padam (P_0) kemudian meluruh sebagai fungsi waktu (t) secara eksponensial mengikuti rumus:

$$P = P_0 \times 0,15 \times 10^{0,1t} \quad (5.7)$$

Oleh karena itu, meskipun reaktor sudah padam, sistem pendingin reaktor harus tetap dioperasikan sampai tercapai suhu awal.

Untuk reaktor RSG-GAS, panas peluruhan saat dipadamkan adalah sekitar $0,04 \times 30$ MW = 1,2 MW. Pendinginan dilakukan oleh sistem pendingin primer dan sekunder reaktor RSG-GAS dengan tetap dioperasikan sampai 2 jam setelah reaktor padam dari beroperasi pada daya 30 MW cukup lama (lebih dari 6 jam).

C. Fraksi Bakar

Pengertian terminologi fraksi bakar atau yang lebih dikenal dengan *burn up* adalah ukuran jumlah energi yang dilepas oleh bahan bakar nuklir atau ukuran dari pengurangan (hilangnya) atau deplesi isotop bahan bakar. Definisi dari fraksi bakar adalah energi fisi yang dilepas per satuan massa bahan bakar.

Satuan yang digunakan untuk besaran fraksi bakar, sering dinyatakan dalam satuan MWd/t , *megawatt-day/tonne* atau megawatt-hari setiap ton bahan bakar (MW hari/ton). Sering juga fraksi bakar di-

nyatakan dalam satuan persentase (%) yang menyatakan persentase dari jumlah atom bahan bakar yang habis terbakar (akibat mengalami reaksi fisi) dibandingkan dengan jumlah atom total bahan bakar awal atau bisa juga persentase berat bahan bakar.

1 gram (gram atom) U-235 = 235 gram = $6,023 \times 10^{23}$ inti = 2×10^{13} Ws
maka:

$$\begin{aligned} 1 \text{ gram U-235} &= (200/235) \times 10^{11} \text{ Ws} \\ &= (200/235) (10^{11}/ 10^6 \times 60 \times 60 \times 24) \text{ MWD} \\ &= 1 \text{ MWD} \end{aligned}$$

Jadi, 1 ton bahan bakar uranium yang terbakar menghasilkan 10^6 MWD sehingga dikatakan bahwa *burn up* atau fraksi bakarnya adalah 10^6 MWD/ton.

Sebagai gambaran, berikut diberikan contoh mengenai pengaturan fraksi bakar dengan satuan % berat uranium-235 yang hilang atau terbakar pada reaktor RSG-GAS untuk teras nomor 100 (PRSG, 2020a).

1. Teras nomor 100 terdiri dari 48 bahan bakar standar dan 8 bahan bakar kendali yang dioperasikan selama satu siklus untuk menghasilkan energi sebesar 626,4 MWD.
2. Pada awal teras, jumlah U-235 = 8.676,4 gram dengan fraksi bakar rerata 23,9%.
3. Pada akhir teras, jumlah U-235 = 7.943,1 gram dengan fraksi bakar rerata 30,4%.
4. Kehilangan bahan bakar sebanyak 733,3 gram dengan fraksi bakar rerata 6,5%. Jadi, setiap bahan bakar kehilangan U-235 sebesar 6,5%

Fraksi bakar ditentukan dengan cara menghitung fraksi bahan bakar tiap bahan bakar sesuai dengan tingkat fraksi bakarnya dan posisi di terasnya pada awal dan akhir siklus, sesuai dengan distribusi fluks neutron yang dibangkitkan.



BAB 6

PENUTUP

Pengoperasian reaktor terdiri dari rangkaian kegiatan *start up* (memulai) peningkatan daya ke daya tertentu yang dikehendaki, operasi pada daya tetap, dan terakhir pemadaman reaktor setelah tujuan operasi reaktor untuk penggunaannya selesai. Pola operasi reaktor berbeda-beda bergantung pada fungsi reaktor. Reaktor daya di suatu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) pada umumnya beroperasi pada daya tetap terus-menerus selama satu tahun. Dengan demikian, reaktor disebut memiliki siklus operasi selama satu tahun. Reaktor kemudian dipadamkan untuk dilakukan penggantian bahan bakar. Lama siklus operasi bergantung jumlah bahan bakar yang dimuat.

Pada reaktor penelitian yang umumnya berdaya rendah, jumlah bahan bakar yang digunakan lebih sedikit dan pola operasi tidak berlangsung terus-menerus. Dalam satu siklus, reaktor dapat dioperasikan dengan beberapa kali operasi berjangka waktu pendek, baik itu dalam orde jam, hari, maupun minggu, bergantung kepada keperluan penggunaan reaktor riset.

Sebagai contoh, pada pengoperasian reaktor penelitian RSG-GAS yang mempunyai daya nominal 30 MW, reaktor RSG-GAS mempunyai siklus operasi selama 20 hari daya penuh atau 600 MWD. Dengan

demikian, apabila reaktor dioperasikan secara terus-menerus pada daya 15 MW, satu siklus reaktor dioperasikan selama 40 hari.

Langkah pertama adalah pengisian bahan bakar untuk membentuk teras kerja dengan muatan bahan bakar (massa lebih) tertentu. Sebelum itu, reaktor dioperasikan pada daya rendah untuk melakukan kalibrasi batang kendali. Hasilnya adalah reaktivitas lebih teras yang harus cukup untuk operasi satu siklus, untuk mengimbangi perubahan (pengurangan) reaktivitas, dan untuk memenuhi persyaratan margin reaktivitas padam.

Langkah berikutnya adalah men-*start up* reaktor sampai daya rendah bebas sumber hingga tercapai kondisi kritis selama beberapa menit. Hal ini dilakukan dengan menaikkan batang kendali ke posisi tertentu (posisi kritis). Pada tahap ini, fenomena fisika yang terjadi adalah peningkatan reaksi fisi sampai tercapai kondisi kritis. Daya reaktor dipertahankan pada daya rendah sehingga tidak timbul panas dan peracunan. Kondisi ini disebut dengan kondisi dingin dan bersih (*cold & clean*).

Kegiatan dilanjutkan dengan menaikkan daya reaktor hingga daya 15 MW selama beberapa hari. Pada tahap ini terjadi fenomena fisika berupa peracunan xenon, kenaikan suhu elemen teras, dan fraksi bakar atau konsumsi bahan bakar termasuk konversi bahan fertil menjadi bahan fisil.

Langkah terakhir adalah pemadaman reaktor dengan cara menurunkan batang kendali sampai ke posisi terbawah. Pada tahap ini, peristiwa fisika yang terjadi adalah penghentian reaksi fisi, peluruhan nuklida hasil fisi, dan timbulnya panas peluruhan.



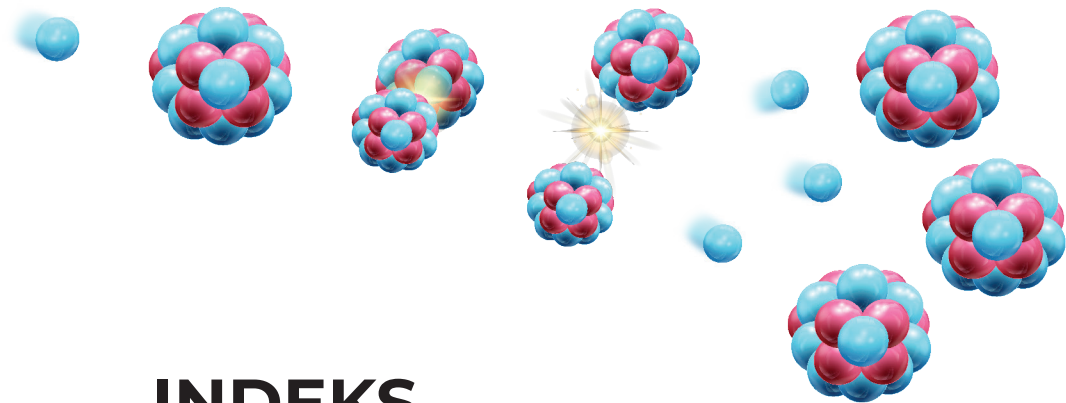
DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, K. C. (2001). *Industrial power engineering and application handbook*. Newnes.
- Ali, L., Ansari, S. A., Shami, Q. D., & Iqbal, M. (1994). *Neutron flux measurements in the full power LEU core of PARR-1*. Nuclear Engineering Division, Pakistan Institute of Nuclear Science & Technology.
- Boeck, H. (1991). *Reaktor kinetics* [Diktat]. Lecture for the IAEA, Regional Training Course on the Use of Personal Computer in Research Reactor Operation. International Atomic Energy Agency.
- Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 26(151), 1–25. DOI: 10.1080/14786441308634955
- CEA. (2016). *Nuclear reactors* [Buklet]. <https://www.cea.fr/english/Documents/thematic-publications/cea-nuclear-reactors.pdf>
- Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear reactor analysis*. John Wiley & Sons.

- Garland, Wm. J. (2005). *Reactor physics: Point kinetics* [Materi kuliah]. <http://www.nuceng.ca/ep4d3/text/10-kinetics-r1.pdf>
- Gambogi, J. (2012). *2010 minerals yearbook: Zirconium and hafnium*. US Geological Survey.
- International Atomic Energy Agency. (1970). *Neutron fluence measurements* (Technical Reports Series No 107). https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/065/34065175.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2010). *Research reactors: Purpose and future* [Brosur]. <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/05/research-reactors-purpose-and-future.pdf>
- International Atomic Energy Agency. (2021). *Nuclear power reactors in the world* (Reference Data Series No. 2, 2021 Edition). https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS-2-41_web.pdf
- Krane, K. S. (2019). *Introductory nuclear physics* (4th ed.). Wiley.
- Kuntoro, I. (2018). *Keselamatan reaktor nulis: Reaktor serba guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS)*. BATAN Press.
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering* 3rd edition. Prentice Hall.
- Nuclear Power. (2019). *Power distribution in conventional reactors*. Diakses pada 20 Februari, 2020, dari <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/neutron-diffusion-theory/power-distribution-conventional-reactors/>.
- Pinem, S., & Kuntoro, I. (1993). Pengukuran spektrum neutron pada sistem rabbit RSG-GAS. Dalam *Prosiding Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir*. PRSG, PPTKR - BATAN.
- 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).

- Pinem, S., & Sembiring, T. M. (2019). Accuracy of Batan-3DIFF and MCNP6 codes for thermal neutron flux distribution at the irradiation position of RSG-GAS reactor. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, 13(4), 295–312. <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2019.106050>
- Pusat Reaktor Serba Guna. (1992). *Kumpulan pelaksanaan eksperimen teras VIII RSG G.A. Siwabessy* [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (2005). *Prosedur start-up, menaikkan daya, mengoperasikan reaktor pada daya konstan otomatis & manual, menurunkan daya, scram, dan shut-down reaktor G.A. Siwabessy* (No. Ident: TRR.OR.55.02.42.05) [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (2011). *Multipurpose reactor G.A. Siwabessy safety analysis report* (Rev. 10) [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (2020a). *Laporan operasi teras no. 100 reaktor RSG-GAS* [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Reaktor Serba Guna. (2020b). *Safety analysis report of the RSG-GA Siwabessy reactor* (Rev. 11) [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Sembiring, T. M., & Pinem, S. (2002). Analisis koefisien reaktivitas umpan balik teras silisida RSG-GAS. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir-Tri Dasa Mega*, 4(2).
- Stacey, W. M. (2018). *Nuclear reactor physics* (3rd ed.). Wiley-VCH.
- Volkmer, M. (1982). *Basiswissen zum Thema Kernenergie: die wichtigsten Erkenntnisse aus Kernphysik und Kerntechnik*. Electricitäts-Werke.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



INDEKS

- absorber, 32, 34
aktivitas, 18, 19
aktivitas neutron, 83
atom, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,
14, 15, 16, 17, 18, 21, 26, 29,
31, 32, 63, 65, 88
- bahan bakar, 1, 25, 26, 30, 31, 32,
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 42,
43, 47, 48, 51, 56, 57, 58, 59,
60, 61, 62, 70, 74, 80, 85, 87,
88, 89, 90
- bahan moderator, 32
barn, 21, 61, 62
batang kendali, 1, 2, 25, 32, 33, 34,
38, 39, 42, 43, 44, 46, 47, 48,
53, 54, 55, 71, 72, 73, 74, 75,
76, 78, 90
- batas keselamatan, 77
bom, 50
burn up, 48, 75, 87, 88
- daya reaktor, 2, 3, 44, 47, 52, 54, 55,
56, 58, 59, 67, 71, 83, 84, 85,
86, 87, 90
dollar, 42, 43, 44
- efek Doppler, 56, 57, 59
elektron, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15
energi fisi, 87
Energi Ikat, 11
energi panas, 1, 3, 28, 84, 85, 86, 87
- faktor perlipatan, 34, 36, 37, 41, 43,
45, 48, 50
fluks neutron, 3, 39, 41, 42, 43, 44,
45, 46, 47, 48, 54, 63, 64, 70,
72, 79, 80, 83, 85, 86, 88
fraksi bakar, 48, 72, 74, 87, 88, 90
fraksi neutron kasip, 42, 43, 51, 52,
53, 54

hamburan elastis, 20, 21, 22, 30, 31
 hasil belah, 26, 27, 28, 43, 50

inti atom, 5, 6, 7, 10, 12, 14, 15, 17,
 18, 26, 29

Isobar, 13
 isomer, 12
 isoton, 13, 14
 isotop, 12, 13, 27, 62, 63, 69, 87

keselamatan operasi, 3, 48, 71
 koefisien reaktivitas, 56, 57, 59, 60,
 93
 kondisi kritis, 35, 41, 42, 43, 46,
 47, 90
 konversi, 48, 61, 90

masa hidup neutron, 36, 52
 massa diam, 6
 massa kritis, 32, 33, 36, 37
 massa lebih, 38, 47, 90
 moderator, 1, 25, 27, 31, 32, 35, 43,
 56, 57, 58, 59, 60, 61

neutron cepat, 26, 27, 28, 30, 37, 79,
 82, 83
 neutron kasip, 42, 43, 44, 48, 50, 51,
 52, 53, 54
 neutron serempak, 48, 49, 50, 51,
 52, 53
 nukleon, 6, 10, 11, 12, 19

partikel inti, 14, 19
 pembiakan, 62
 pendingin, 1, 18, 56, 59, 85, 86, 87
 peracunan xenon, 69, 75, 90
 periode reaktor, 46, 49, 50, 52, 53,
 54
 persamaan per jam, 54
 produk fisi, 26, 27, 56, 62, 63, 65, 69
 proton, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 50

radiasi, 1, 2, 3, 8, 14, 15, 17, 19, 20,
 27, 28, 29, 86
 radioaktif, 1, 14, 17, 18, 21, 27, 61,
 87
 reaksi fisi, 1, 2, 3, 20, 25, 26, 27, 28,
 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 43,
 54, 61, 62, 65, 71, 74, 84,
 88, 90
 reaksi inti, 3, 17, 19, 20, 21
 reaktivitas, 3, 41, 42, 43, 44, 46, 47,
 48, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59,
 60, 61, 67, 68, 71, 72, 73, 74,
 75, 76, 77, 90, 93
 reaktivitas lebih, 47, 67, 68, 72, 73,
 74, 75, 90
 reaktivitas padam, 48, 74, 75, 77, 90
 reaktor nuklir, 1, 3, 25, 31, 33, 35,
 36, 48, 99
 reflektor, 1, 2, 25, 31, 32
 resonansi, 23, 36, 37, 57, 58, 59, 60
 serapan radiatif, 20
 siklus neutron, 36
 siklus operasi, 38, 73, 74, 75, 89
 sinar gama, 21, 28
 sistem pendingin, 1, 56, 59, 85, 86,
 87
 subkritis, 33, 34, 39, 42, 43, 45, 46,
 71

sumber neutron, 1, 25, 26, 29, 44,
45, 47, 76
sumber radiasi, 28
superkritis, 33, 34, 35, 39, 42, 45, 71

tampang lintang makroskopis, 21,
85
tampang lintang mikroskopis, 21,
61
teras reaktor, 1, 2, 3, 19, 21, 25, 31,
37, 43, 44, 55, 56, 63, 64, 68,
71, 74, 79, 83, 84, 85, 86, 87

umur neutron, 49, 52, 53
uranium, 1, 5, 9, 12, 14, 25, 34, 35,
36, 57, 61, 62, 88

waktu mati reaktor, 68
waktu paruh, 18, 19, 51, 61

xenon, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69,
70, 75, 90

Buku ini tidak diperjualbelikan.



TENTANG PENULIS



Iman Kuntoro

Peneliti Utama di bidang teknologi reaktor nuklir di PRTRN BRIN, lahir di Purwokerto, 4 Oktober 1954. Penulis merupakan Sarjana Teknik, Insinyur, dari Fakultas Teknik UGM jurusan Teknik Nuklir dengan spesialisasi Teknologi Reaktor, 1980. Masuk pertama kali di BATAN pada 1 Januari 1978 sebagai staf di Dinas Reaktor BATAN Yogyakarta. Jabatan struktural yang pernah disandang adalah Kasubbid Bahan Bakar Reaktor, 1981–1985; di PRSG BATAN Serpong sebagai Kabid Operasi Reaktor, 1986–1992; Kabid Fisika Reaktor, 1992–1996, Kabid Pengembangan Teknologi Reaktor, 1999–2002; dan Kepala Pusat, 2002–2007, Kepala Pusat PTBIN, 2008–2011. Tugas luar negeri: Partisipasi desain reaktor RSG-GAS di Interatom, Jerman, 6 bulan, 1983; Manajemen operasi reaktor riset di JAERI, Jepang, 2 bulan, 1988; Analisis Keselamatan *In Pile Loop* di Ansaldo, Italia, 1 bulan, 1994; Partisipasi Desain TC-ISFSF di AEA, Inggris, 5 minggu, 1997; Mengikuti kegiatan pembangunan dan komisioning reaktor RSG-GAS, 1985–1992. Penulis juga pernah mengikuti beberapa workshop tentang *Utilization of Research Reactor and Reac-*

tor Safety di Jepang, 1999, Australia, 2003; Korea, 2003, Vietnam, 2004, Thailand, 2005, dan Tiongkok, 2006; Mengikuti beberapa kali IAEA *Technical Meeting* bidang *reactor safety*, di Austria, (2003–2006). Kegiatan lainnya, yaitu terlibat dalam Tim Pembangunan Reaktor Kartini, BATAN, Yogyakarta, 1979; Tim Desain RSG-GAS BATAN, 1983; Tim Komisioning RSG-GAS BATAN, 1985–1987; Panitia Keselamatan RSG-GAS, 1988–2022.



Surian Pinem

Profesor Riset Bidang Fisika Nuklir, di PRTRN BRIN, lahir di Medan, 16 Juni 1957. Penulis meraih gelar Sarjana Fisika di Universitas Sumatera Utara pada tahun 1985, selanjutnya meraih gelar Magister Sains, Fakultas MIPA Universitas Indonesia, jurusan Sain Bahan pada tahun 1986. Masuk pertama di BATAN pada 1 Maret 1986 sebagai peneliti di Bidang Fisika Reaktor di PRSG, Serpong. Pada tahun 2002, mutasi ke Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor di PPTRN yang pada tahun 2021 menjadi PRTRN BRIN. Meraih gelar Profesor Riset pada tahun 2008. Mengikuti kegiatan pembangunan dan komisioning reaktor RSG-GAS 1986–1992. Kegiatan ilmiah yang pernah diikuti di antaranya ialah Diklat Keahlian Dasar Bidang Nuklir, Yogyakarta (1986), Diklat Pengantar Fortran dan Aplikasi Komputer, Serpong (1988), Diklat Operator dan Supervisor Reaktor Nuklir, Serpong (1989). Tugas luar negeri dalam rangka *training* dan *workshop* adalah *ITC on Nuclear and Neutron Dosimetry*, Uni Soviet (1989), *Training in DSA and Reactor Noise Analysis*, Belanda (1992), *Nuclear Engineering ND, Technology*, Hungaria (1996), *Neutron Flux Measurement*, Jepang (1996), *Neutron Spectrum Measurement*, Korea Selatan (1996), *Candu Physics Analysis*, Kanada (2000), *Research Reactor Technology*, Malaysia (2006), dan *The Utilization of Research Reactors*, Filipina (2007).



Tagor Malem Sembiring

Pensiunan BATAN, tahun 2021, sebagai Peneliti Utama Bidang Fisika Nuklir, lahir di Medan, 12 Oktober 1965. Sarjana Teknik, Insinyur, Fakultas Teknik UGM jurusan Teknik Nuklir dengan spesialisasi Teknologi Reaktor, 1992. Masuk pertama di BATAN pada 1 Maret 1993 sebagai peneliti di Bidang Fisika Reaktor PRSG, Serpong. Pada tahun 2002, yang bersangkutan mutasi ke Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir dan meraih jabatan fungsional Peneliti Utama pada tahun 2017. Jabatan struktural yang pernah disandang adalah Kepala Bidang Pengembangan Teknologi Reaktor, 2014–2015 di PTRKN. Mengikuti kegiatan percobaan fisika reaktor RSG-GAS mulai 1993–2002. Kegiatan ilmiah yang pernah diikuti di antaranya ialah Tim Komisioning RSG-GAS, mengajar diklat operator supervisor reaktor, diklat perhitungan fisika reaktor, editor jurnal TDM. Tugas luar negeri dalam rangka *training*, seminar, *workshop* ke Hungaria, Korea, Jepang, Austria, Belgia.

PENGENALAN ILMU FISIKA DALAM OPERASI REAKTOR NUKLIR

Reaktor nuklir merupakan fasilitas atau instalasi yang menghasilkan energi panas dan radiasi yang bekerja berdasarkan reaksi fisi atau reaksi pembelahan dari inti bahan bakar nuklir. Reaktor nuklir dapat dimanfaatkan energi panasnya, baik untuk listrik maupun untuk industri, disebut dengan reaktor daya yang biasanya digunakan dalam suatu instalasi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Reaktor nuklir juga mengandung radiasi nuklir yang berbahaya. Oleh karena itu, keselamatan menjadi faktor utama dan pertama yang harus diperhatikan dalam pengoperasian reaktor nuklir.

Hadirnya buku *Pengenalan Ilmu Fisika dalam Operasi Reaktor Nuklir* ini diharapkan dapat memberikan gambaran pengoperasian reaktor, terutama kepada operator reaktor (termasuk supervisor), yang merupakan salah satu unsur sangat penting ketika melaksanakan prinsip-prinsip keselamatan operasi. Buku ini menjelaskan berbagai fenomena fisika dari awal dan selama reaktor beroperasi. Buku ini dapat dijadikan acuan bagi para mahasiswa, praktisi, maupun peneliti keteneganukliran dalam memahami ilmu fisika reaktor nuklir. Selamat membaca!



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lantai 8,
Jl. M.H. Thamrin No. 8,
Kebon Sirih, Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.584



ISBN 978-623-8052-60-8



9 786238 052608

Buku ini tidak diperjualbelikan.