



BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

Eri Hiswara

Buku Pintar

Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Rumah Sakit



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku Pintar

**Proteksi dan
Keselamatan
Radiasi
di Rumah Sakit**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2023 oleh Penerbit BRIN

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/>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku Pintar

Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Rumah Sakit

Eri Hiswara

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2023 Eri Hiswara

Buku Pintar Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Rumah Sakit/Eri Hiswara–Jakarta: Penerbit BRIN, 2023.

xvi + 156 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN: 978-979-8500-68-8 (cetak)
978-623-8052-55-4 (e-book)

1. Radiasi
2. Rumah Sakit
3. Proteksi dan Keselamatan

539.2

Copy editor : Annisa' Eskahita Azizah
Proofreader : Prapti Sasiwi & Rahma Hilma Taslima
Penata Isi : Hilda Yunita
Desainer Sampul : Imam Setiawan

Cetakan pertama : November 2015
Cetakan Edisi Revisi : Februari 2023

Diterbitkan oleh:



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

Whatsapp: 0811-8612-369

E-mail: penerbit@brin.go.id

Website: penerbit.brin.go.id



PenerbitBRIN



Penerbit_BRIN



penerbit_brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR ISI

Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	ix
Pengantar Penerbit	xi
Prakata	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
BAB 2 KONSEP DASAR RADIASI PENGION	5
A. Atom dan Inti Atom.....	5
B. Radioaktivitas dan Sumber Radiasi	11
C. Deteksi Radiasi	14
D. Efek Kesehatan Radiasi	24
BAB 3 KETENTUAN UMUM PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI	31
A. Sistem Proteksi Radiasi	32
B. Proteksi Radiasi Eksternal.....	46
C. Proteksi Radiasi Internal.....	50
D. Persyaratan Perundang-undangan.....	51
BAB 4 PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA RADIOLOGI DIAGNOSTIK.....	65
A. Sumber Daya Manusia dan Peralatan.....	66
B. Tugas dan Tanggung Jawab.....	68
C. Ruang Pesawat Sinar-X.....	72
D. Perlengkapan Proteksi Radiasi.....	73

Buku ini tidak diperjualbelikan.

E.	Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi.....	74
F.	Pedoman Khusus Proteksi dan Keselamatan Radiasi.....	76
G.	Penanggulangan Kedaruratan.....	84
BAB 5	PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA RADIOTERAPI.....	87
A.	Sumber Daya Manusia dan Peralatan.....	88
B.	Tugas dan Tanggung Jawab.....	90
C.	Perlengkapan Proteksi Radiasi.....	94
D.	Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi.....	95
E.	Pedoman Khusus Proteksi dan Keselamatan Radiasi.....	97
F.	Penanggulangan Kedaruratan.....	103
BAB 6	PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA KEDOKTERAN NUKLIR.....	109
A.	Sumber Daya Manusia dan Peralatan.....	111
B.	Tugas dan Tanggung Jawab.....	112
C.	Perlengkapan Proteksi Radiasi.....	117
D.	Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi.....	118
E.	Pedoman Khusus Proteksi dan Keselamatan Radiasi.....	126
F.	Penanggulangan Kedaruratan.....	134
BAB 7	PENUTUP.....	139
	Daftar Pustaka.....	141
	Daftar Singkatan.....	147
	Indeks.....	149
	Tentang Penulis.....	153



DAFTAR GAMBAR



Gambar 2.1	Model Atom Bohr.....	6
Gambar 2.2	Interaksi Radiasi dengan Atom	8
Gambar 2.3	Proses Pembentukan Sinar-X Karakteristik.....	10
Gambar 2.4	Proses Pembentukan Bremsstrahlung	11
Gambar 2.5	Konstruksi Surveimeter Kamar Pengionan.....	16
Gambar 2.6	Skema Pencacah GM.....	17
Gambar 2.7	Berbagai Jenis Surveimeter	17
Gambar 2.8	Alat Ukur Kontaminasi untuk Mengukur Kontaminasi Radiasi α dan β	18
Gambar 2.9	Dosimeter Film dengan <i>Holder</i> Penyangganya.....	20
Gambar 2.10	Dosimeter Termoluminesensi (TLD) dan <i>Holder</i> Penyangganya	21
Gambar 2.11	Dosimeter OSL.....	21
Gambar 2.12	Dosimeter RPL	22
Gambar 2.13	Dosimeter Saku QFE.....	23
Gambar 2.14	Dosimeter EPD.....	23
Gambar 2.15	Efek Deterministik Radiasi	24

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 2.16	Efek Stokastik Radiasi	27
Gambar 3.1	Faktor Bobot Radiasi Neutron sebagai Fungsi Energi	40
Gambar 3.2	Kurva Jarak Jangkauan vs. Energi untuk Partikel Beta.....	48

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Dosis Rata-Rata dari Sumber Radiasi Alam.....	14
Tabel 2.2	Dosis Radiasi Per Kapita Tahunan dari Sumber Radiasi Buatan	14
Tabel 2.3	Efek Radiasi pada Kulit.....	25
Tabel 3.1	Nilai Batas Dosis.....	36
Tabel 3.2	Faktor Bobot Radiasi, w_R	40
Tabel 3.3	Faktor Bobot Jaringan, w_T	41
Tabel 3.4	Hubungan Besaran Proteksi dengan Besaran Operasional Baru	44
Tabel 3.5	Fantom yang Digunakan untuk Menghitung Koefisien Konversi dari Besaran Lapangan (Fluens, Kerma Udara) untuk Besaran Proteksi dan Besaran Operasional Baru	44
Tabel 3.6	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk <i>CT Scan</i>	59
Tabel 3.7	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Radiografi Umum	60

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 3.8	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Kedokteran Nuklir Diagnostik	60
Tabel 3.9	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Fluoroskopi Intervensional	61
Tabel 4.1	Ukuran Ruang Fasilitas Pesawat Sinar-X	72
Tabel 4.2	Perlengkapan Proteksi Radiasi pada Pelayanan Radiologi Klinik.....	73
Tabel 6.1	Rekomendasi untuk Menunda Kehamilan setelah Menjalani Terapi Radiofarmaka.....	122
Tabel 6.2	Rekomendasi Penghentian Air Susu Ibu (ASI) setelah Pemberian Radiofarmaka.....	122
Tabel 6.3	Aktivitas (dalam MBq) untuk mengizinkan pasien pulang bergantung pada dosis eksternal pada orang lain (dosis efektif dalam mSv).....	125
Tabel 6.4	Tingkat Aktivitas dan Laju Dosis yang di Bawahnya Pasien Diizinkan Pulang.....	126



PENGANTAR PENERBIT



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

Buku ini merupakan edisi kedua, edisi pertama diterbitkan oleh BATAN Press pada tahun 2015. Beberapa rekomendasi dan panduan yang cukup penting terkait upaya proteksi dan keselamatan radiasi di bidang medis telah diterbitkan sehingga dirasa perlu dilakukan pembaruan pada buku ini. Buku ini memberikan panduan praktis upaya proteksi dan keselamatan radiasi untuk kalangan medis agar pemanfaatan radiasi di bidang medis berjalan dengan aman dan selamat.

Buku ini diharapkan dapat dimanfaatkan baik bagi pemegang izin pemanfaatan tenaga nuklir di bidang medis, petugas proteksi radiasi di

Buku ini tidak diperjualbelikan.

bidang medis, dan juga segenap pihak yang tugasnya bersinggungan dengan pemanfaatan radiasi di bidang medis.

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

Penerbit BRIN



PRAKATA

Aplikasi radiasi di berbagai bidang di Indonesia telah cukup meluas. Berdasarkan data Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) yang ditampilkan pada situsnya, sampai 8 November 2022 telah diterbitkan sebanyak 9.878 izin pemanfaatan tenaga nuklir untuk 3.104 instansi di seluruh Indonesia. Dari seluruh izin dan instansi tersebut, sebanyak 5.806 izin, atau sekitar 58,78%, dan 2.150 instansi, atau sekitar 69,26%, merupakan izin dan instansi pemanfaatan di bidang kesehatan. Data ini menggambarkan bahwa bidang kesehatan atau medis, merupakan bidang pemanfaatan tenaga nuklir yang terbesar di Indonesia.

Selain membawa manfaat yang sangat besar, pemanfaatan tenaga nuklir diketahui pula memiliki efek yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Efek radiasi dapat berupa deterministik atau stokastik. Efek deterministik, yang saat ini disebut juga sebagai efek reaksi jaringan, merupakan efek yang dapat terjadi pada suatu organ atau jaringan tubuh tertentu yang menerima radiasi dengan dosis tinggi, sedangkan efek stokastik merupakan efek akibat penerimaan radiasi dosis rendah di seluruh tubuh yang kemungkinan bisa diderita oleh orang yang

Buku ini tidak diperjualbelikan.

menerima dosis setelah selang waktu tertentu. Efek stokastik juga mungkin dapat diderita oleh keturunan dari orang yang menerima dosis radiasi tersebut. Dengan adanya kedua jenis efek yang berbahaya ini, setiap aplikasi radiasi di Indonesia harus diatur dan diawasi secara ketat secara internal oleh bagian keselamatan dan kesehatan kerja dari instansi atau perusahaan yang memanfaatkan radiasi tersebut dan secara eksternal oleh BAPETEN yang diberi tanggung jawab untuk melaksanakan pengawasan tersebut.

Untuk membantu kalangan medis dalam melaksanakan upaya proteksi dan keselamatan radiasi, buku ini memberikan panduan praktis upaya tersebut yang diperlukan agar pemanfaatan radiasi di bidang medis ini berjalan dengan aman dan selamat. Panduan diberikan untuk ketiga aplikasi radiasi di bidang medis, yaitu radiodiagnostik, onkologi radiasi, dan kedokteran nuklir.

Buku ini pertama kali diterbitkan oleh penerbit BATAN Press pada tahun 2015. Setelah tujuh tahun berselang, beberapa rekomendasi dan panduan yang cukup penting terkait upaya proteksi dan keselamatan radiasi di bidang medis telah diterbitkan sehingga dirasa perlu untuk menerbitkan edisi revisinya. Rekomendasi dan panduan tersebut dipublikasikan antara lain secara internasional oleh International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), International Commission on Radiological Protection (ICRP), dan International Atomic Energy Agency (IAEA), dan secara nasional oleh BAPETEN.

Dari segi isi, beberapa perubahan juga telah dilakukan pada edisi revisi ini. Dengan terbitnya Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 24 Tahun 2020 tentang Pelayanan Radiologi Klinik dan direvisinya Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 Tahun 2011 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional menjadi Peraturan BAPETEN Nomor 4 Tahun 2020, perubahan terbesar terjadi pada Bab 4. Perubahan kecil juga dilakukan pada Bab 2 dengan mengganti subbab Dosimetri Radiasi menjadi Deteksi Radiasi dan juga pada Bab 3 dengan mengganti subbab Prinsip Proteksi Radiasi menjadi Sistem Proteksi Radiasi.

Buku ini diharapkan dapat dimanfaatkan baik bagi pemegang izin pemanfaatan tenaga nuklir di bidang medis, petugas proteksi radiasi di bidang medis, dan juga segenap pihak yang tugasnya bersinggungan dengan pemanfaatan radiasi di bidang medis. Aplikasi panduan praktis yang diberikan pada buku ini diharapkan dapat membantu dalam mewujudkan tujuan kecelakaan nihil dalam pemanfaatan tenaga nuklir di bidang medis.

Kepada semua pihak yang telah membantu dalam penerbitan buku ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya. Penghargaan juga ditujukan kepada Penerbit BRIN yang bersedia menerbitkan edisi revisi ini.

Akhir kata, penulis mengucapkan selamat membaca. Semoga penerbitan buku ini mencapai tujuannya.

Jakarta, Desember 2022

Penulis

Buku ini tidak diperjualbelikan.



PENDAHULUAN

1

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997, istilah “ketenaganukliran” pada dasarnya mengacu bahan nuklir, zat radioaktif, dan/atau sumber radiasi lainnya. Bahan nuklir (seperti ^{235}U dan ^{239}Pu) digunakan untuk bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) untuk memproduksi energi listrik. Sementara itu, zat radioaktif (seperti ^{60}Co dan ^{192}Ir) dan/atau sumber radiasi lainnya (seperti pesawat sinar-X atau LINAC, akselerator linier) telah dimanfaatkan di berbagai bidang terutama medis, industri, dan pertanian.

Ketiga sumber radiasi tersebut memiliki satu kesamaan, yaitu sama-sama memancarkan radiasi pengion yang dapat menghasilkan ion dari suatu atom pada materi yang dilintasinya. Radiasi pengion ini dapat berbentuk partikel atau gelombang dengan energi yang tinggi. Beberapa contoh radiasi pengion ialah partikel alfa, partikel beta, sinar gamma, sinar-X, dan neutron.

Selain radiasi pengion, sebenarnya ada satu bentuk radiasi lain yang disebut sebagai radiasi nonpengion. Berbeda dengan radiasi pengion, radiasi nonpengion tidak memiliki energi yang cukup untuk

Buku ini tidak diperjualbelikan.

mengionisasi atom dari materi yang dilintasinya. Beberapa contoh radiasi nonpengion adalah cahaya tampak, gelombang radio, *microwave*, dan ultraviolet.

Buku ini hanya membahas proteksi dan keselamatan terhadap radiasi pengion, mengingat jenis radiasi ini banyak digunakan dan telah memberikan manfaat yang besar bagi kesejahteraan manusia. Untuk selanjutnya, istilah radiasi pengion akan disebut hanya sebagai radiasi.

Setiap jenis radiasi tersebut memiliki kemampuan menembus materi yang berbeda satu sama lain. Karena kemampuannya untuk menembus materi ini, radiasi telah banyak diaplikasikan di berbagai bidang untuk meningkatkan taraf hidup manusia. Aplikasi terbanyak adalah di bidang medis, terutama di rumah sakit, disusul oleh industri, riset, pertanian, dan energi.

Selain membawa manfaat yang sangat besar, diketahui pula bahwa aplikasi ketenaganukliran memiliki efek yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Efek radiasi dapat berupa deterministik maupun stokastik. Efek deterministik merupakan efek yang dapat terjadi pada suatu organ atau jaringan tubuh tertentu yang menerima radiasi dengan dosis tinggi, sedangkan efek stokastik merupakan efek akibat penerimaan radiasi dosis rendah di seluruh tubuh yang baru diderita oleh orang yang menerima dosis setelah selang waktu tertentu atau oleh turunannya.

Dengan adanya kedua jenis efek yang berbahaya ini, setiap aplikasi radiasi harus diatur dan diawasi melalui suatu sistem pengawasan keselamatan yang ketat agar aplikasi tersebut tidak membahayakan nyawa, harta benda, dan lingkungan hidup. Sistem pengawasan tersebut diberikan oleh proteksi dan keselamatan radiasi yang merupakan gabungan aplikasi praktis dari berbagai disiplin ilmu seperti fisika, kimia, biologi, dan juga dari ilmu medis.

Secara umum, proteksi dan keselamatan radiasi pada dasarnya merupakan penerapan ilmu keselamatan dan kesehatan kerja khusus untuk aplikasi di bidang ketenaganukliran. Oleh karena itu,

istilah proteksi dan keselamatan radiasi dapat pula disebut sebagai Keselamatan dan Kesehatan Kerja Radiasi (K3 Radiasi).

Buku ini akan membahas berbagai aspek proteksi dan keselamatan radiasi pada aplikasi ketenaganukliran di rumah sakit, yang terdiri atas aplikasi radiodiagnostik, radioterapi, dan kedokteran nuklir. Khusus untuk kedokteran nuklir, aplikasi ini tidak hanya dapat digunakan untuk kepentingan diagnostik, tetapi juga dapat untuk terapi, bergantung pada jenis sumber radiasi yang digunakan.

Pada buku ini akan diuraikan terlebih dahulu mengenai konsep dasar radiasi pengion. Pengetahuan mengenai konsep dasar ini sangat penting dalam memahami proses yang terjadi pada suatu peralatan medis di rumah sakit yang menggunakan sumber radiasi, jenis-jenis sumber radiasi, cara mengukur dosis radiasi, dan efek kesehatan radiasi yang telah disinggung dengan singkat di atas.

Selanjutnya, diuraikan mengenai ketentuan umum proteksi dan keselamatan radiasi. Prinsip proteksi radiasi akan menjelaskan bahwa iptek proteksi dan keselamatan radiasi disusun dengan dasar prinsip-prinsip yang jelas dan terukur. Sementara itu, uraian tentang proteksi radiasi eksternal dan proteksi radiasi internal akan memberikan pemahaman tentang cara dan upaya yang dapat dilakukan untuk mencegah penerimaan dosis radiasi pada individu dari sumber radiasi baik yang ada di luar tubuh maupun yang telah masuk ke dalam tubuh.

Dalam ketentuan umum proteksi radiasi diuraikan pula beberapa ketentuan yang ditetapkan dalam peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir yang relevan dengan proteksi dan keselamatan radiasi di bidang medis. Ketentuan tersebut meliputi pembagian daerah kerja, pemantauan pajanan daerah kerja dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja, pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas atau instalasi, pemantauan dosis yang diterima pekerja radiasi, pemantauan kesehatan pekerja radiasi, dan penghambat dosis.



KONSEP DASAR RADIASI PENGION

2

Pengetahuan tentang struktur atom, fisika nuklir dasar, sifat radiasi elektromagnetik, dan produksi sinar-X adalah dasar untuk memahami proteksi dan keselamatan radiasi. Bab 2 ini akan diawali dengan rangkuman konsep struktur atom dan radioaktivitas yang mendukung hal-hal tersebut.

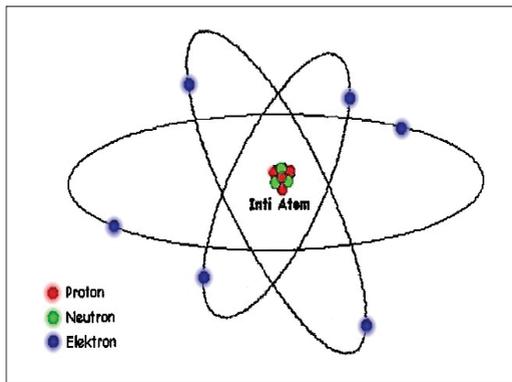
Mengingat radiasi diketahui memiliki efek kesehatan yang berbahaya bagi manusia maka pada Bab 2 ini juga akan dibahas tentang berbagai jenis efek kesehatan radiasi. Dasar untuk memahami efek radiasi ini adalah pengetahuan tentang banyaknya dosis radiasi yang diterima manusia. Untuk itu, akan diuraikan terlebih dahulu beberapa metode dan upaya yang dapat dilakukan untuk mengetahui besar dosis radiasi tersebut melalui deteksi radiasi.

A. Atom dan Inti Atom

Jika semua bahan (materi) yang ada di alam ini dipotong-potong hingga sekecil-kecilnya, akan diperoleh bagian dari materi yang disebut atom. Atom adalah bagian terkecil dari suatu materi yang

memiliki sifat dasar dari materi tersebut. Di alam, atom-atom akan terikat oleh suatu ikatan kimia dalam proporsi tertentu untuk membentuk molekul. Sebagai contoh, air atau H_2O , adalah molekul yang terdiri atas dua atom hidrogen dan satu atom oksigen. Sampai saat ini telah diketahui 92 atom yang terbentuk secara alamiah dan beberapa atom lain yang dibuat manusia.

Banyak teori yang telah dikembangkan untuk mempelajari sifat dan karakteristik atom, tetapi yang paling sering digunakan adalah model atom Bohr. Menurut Niels Bohr, atom terdiri atas inti atom dan elektron-elektron yang mengelilinginya pada orbit atau kulit tertentu. Inti atom sendiri terdiri atas proton dan neutron, yang masing-masing sering pula disebut sebagai nukleon (pembentuk inti). Gambar 2.1 memperlihatkan model atom yang dikembangkan Bohr.



Gambar 2.1 Model Atom Bohr

Setiap kulit elektron mempunyai tingkat energi tertentu. Makin luar kulit dari inti atom, tingkat energinya makin tinggi. Oleh karena itu, elektron-elektron di suatu atom akan selalu berusaha untuk menempati kulit yang lebih dalam. Kulit terdalam (terdekat dengan inti atom) disebut kulit K, orbit berikutnya (menjauhi inti atom) disebut kulit L, kulit M, dan seterusnya. Atom ada dalam keadaan stabil apabila setiap kulit yang lebih dalam berisi penuh dengan elektron sesuai dengan kapasitasnya. Sebaliknya, jika suatu kulit elektron masih

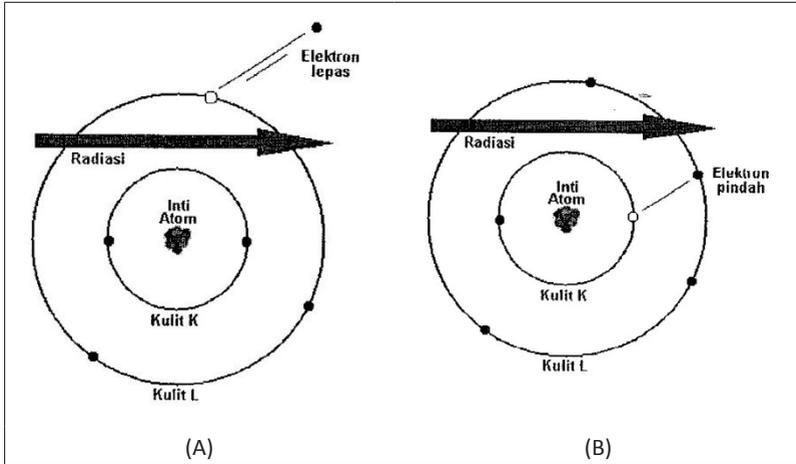
belum penuh namun terdapat elektron di kulit yang lebih luar, atom tersebut dikatakan tidak stabil, atau disebut juga atom dalam keadaan tereksitasi.

Elektron dapat berpindah dari satu kulit ke kulit lainnya. Perpindahan elektron dari satu kulit ke kulit lain ini disebut transisi elektron. Transisi elektron dari kulit lebih luar ke kulit lebih dalam akan memancarkan energi. Sebaliknya, transisi elektron dari kulit lebih dalam ke kulit lebih luar akan membutuhkan energi.

Jika atom menerima energi dari luar, di dalam atom itu akan terjadi eksitasi atau ionisasi. Eksitasi adalah peristiwa perpindahan elektron dari kulit dalam ke kulit luar sehingga atom menjadi atom yang tereksitasi. Peristiwa ini terjadi jika energi yang datang lebih besar dari selisih tingkat energi antara kulit lebih dalam dan kulit lebih luar. Sementara itu, ionisasi adalah peristiwa terlepasnya elektron dari ikatan atomnya sehingga atom menjadi ion. Ion negatif adalah elektron yang terlepas dari ikatan atomnya, sedangkan ion positif adalah atom yang tidak netral karena kehilangan/kekurangan elektron. Peristiwa ini dapat terjadi jika energi yang datang lebih besar dari energi yang diperlukan atom untuk mengikat elektronnya. Gambar 2.2 memperlihatkan proses eksitasi dan ionisasi ini.

Dipandang dari segi massa, massa suatu atom terkonsentrasi pada intinya karena massa elektron sangat kecil dan dapat diabaikan jika dibandingkan massa proton maupun neutron. Namun, jika dipandang dari segi muatan listriknya, muatan atom ditentukan oleh jumlah proton dan jumlah elektronnya. Apabila jumlah proton sama dengan jumlah elektron, muatan atom tersebut nol sehingga dinamakan atom netral. Apabila jumlah protonnya tidak sama dengan jumlah elektron, dinamakan atom tidak netral atau ion.

Jumlah proton menentukan sifat kimia dari atom dan karena itu disebut sebagai unsur. Setiap unsur dituliskan sesuai dengan lambang atomnya. Misalnya, unsur hidrogen dilambangkan H dan emas dilambangkan Au (dari kata aurum).



Ket.: (A) Proses Ionisasi; (B) Proses Eksitasi

Gambar 2.2 Interaksi Radiasi dengan Atom

Selain diberi lambang, setiap unsur juga diberi nomor yang disebut dengan nomor atom dan dilambangkan Z berdasarkan jumlah proton yang dimilikinya. Misalnya, hidrogen diberi nomor 1 dan emas diberi nomor 79.

Jumlah proton dan neutron diberi lambang A . Sementara itu, jumlah neutron diberi lambang N , dengan $N = A - Z$.

Setiap unsur (yang memiliki jumlah proton tertentu) tidak harus memiliki jumlah neutron yang sama. Sebagai contoh, unsur fosfor (P) yang memiliki nomor atom 15 dapat memiliki 13 hingga 19 neutron. Karena adanya variasi jumlah neutron ini, istilah unsur (yang hanya mengacu pada jumlah proton) diperluas menjadi istilah nuklida (yang mengacu pada jumlah proton dan jumlah neutron). Dengan demikian, penulisan lengkap dari nuklida X adalah:

Sebagai contoh, nuklida ${}^4_2\text{He}$ adalah atom helium yang memiliki nomor massa 4 dan nomor atom 2. Nuklida ${}^{60}_{27}\text{Co}$ adalah atom kobalt yang memiliki nomor massa 60 dan nomor atom 27.

Karena nomor atom dan lambang atom (nama atom) memberikan informasi yang sama, nomor atom biasanya tidak ditulis lagi sehingga menjadi ${}^4\text{He}$ atau ${}^{60}\text{Co}$. Lebih lanjut, karena “angka di atas” (*superscript*) sering memperlambat penulisan, cara penulisan disederhanakan lagi menjadi He-4 atau Co-60. Untuk keseragaman, buku ini mengikuti cara penulisan standar yang disederhanakan, yaitu ${}^A\text{X}$, seperti ${}^{60}\text{Co}$.

Dalam hal inti atom, banyak teori yang telah dikembangkan untuk mempelajari inti atom, tetapi yang paling berkaitan dengan pembahasan radiasi adalah model orbit. Menurut model ini, nukleon (proton dan neutron) berada pada tingkat energi tertentu di dalam inti dan berinteraksi satu sama lain. Model ini sama dengan model orbit (kulit) untuk elektron.

Inti atom memiliki gaya inti, atau gaya antar nukleon, yang mengikat nukleon. Gaya inti sangat kuat tapi jangkauannya sangat pendek. Gaya inilah yang menyebabkan inti tetap dalam keadaan stabil meski ada gaya tolak elektrostatis antar-sesama proton yang dapat menghancurkan inti.

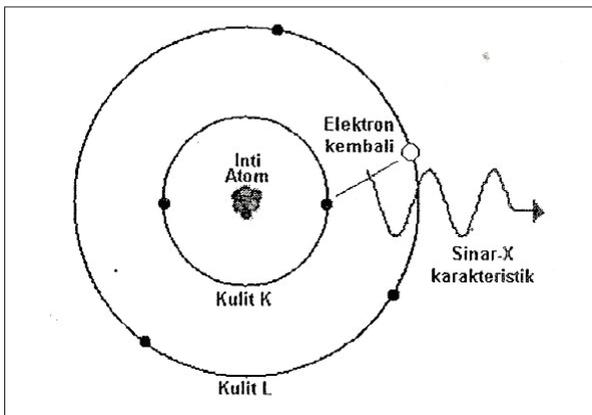
Komposisi jumlah proton dan neutron pada inti atom sangat memengaruhi kestabilan inti atom. Inti atom dikatakan stabil jika komposisi jumlah proton dan neutronnya sudah “seimbang” serta tingkat energinya sudah berada pada keadaan dasar. Secara umum, inti atom berada pada keadaan stabil jika jumlah protonnya “sama dengan” jumlah neutronnya. Apabila terdapat kelebihan jumlah proton, atau kelebihan jumlah neutron, inti akan menjadi tidak stabil.

Inti yang tidak stabil akan berusaha untuk mencapai kondisi stabil dengan memancarkan radiasi, baik berupa gelombang elektromagnetik (sinar-X, sinar gamma) maupun partikel (alfa, beta, neutron). Proses perubahan dari inti atom yang tidak stabil menjadi stabil disebut peluruhan radioaktif. Nuklida yang tidak stabil disebut sebagai radionuklida, isotop yang tidak stabil disebut radioisotop, sedangkan bahan yang mengandung radionuklida atau radioisotop dalam jumlah yang cukup banyak disebut bahan radioaktif.

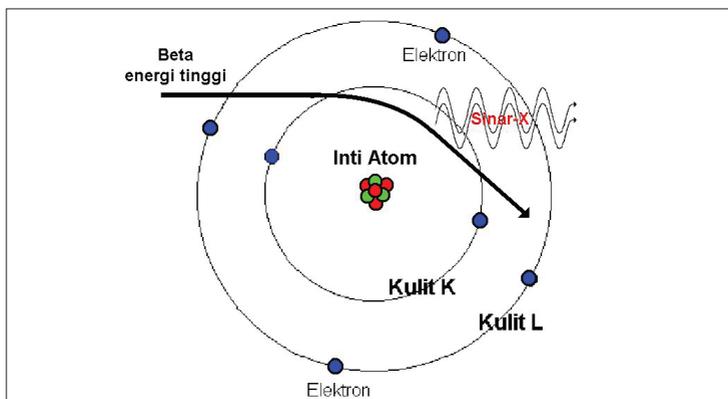
Fenomena menarik dari atom dan inti atom adalah terjadinya pancaran sinar-X dan sinar gamma. Sinar-X dan sinar gamma merupakan gelombang elektromagnetik, yang sering disebut pula sebagai foton. Sinar-X dan sinar gamma pada dasarnya memiliki sifat yang sama, kecuali berbeda dalam proses pembentukannya. Jika sinar gamma berasal dari perubahan dalam inti, sinar-X terbentuk ketika elektron atom mengalami perubahan dalam orbitnya.

Sinar-X dibedakan atas sinar-X karakteristik dan bremsstrahlung. Sinar-X karakteristik dipancarkan oleh atom yang tereksitasi. Sesaat setelah eksitasi terjadi, elektron yang tereksitasi dari suatu orbit ke orbit yang lebih luar dalam waktu yang singkat akan kembali ke orbit semula. Pada saat kembali ini, energi yang berlebih akan dipancarkan dalam bentuk sinar-X karakteristik. Gambar 2.3 memperlihatkan proses pembentukan sinar-X karakteristik ini.

Bremsstrahlung (istilah bahasa Jerman) terjadi jika radiasi beta atau elektron yang datang dibelokkan oleh inti atom. Elektron yang dibelokkan tersebut akan berkurang energinya sehingga menyebabkan terjadinya pancaran sinar-X bremsstrahlung. Berbeda dengan sinar-X karakteristik yang energinya dipancarkan secara diskret, bremsstrahlung dipancarkan secara terus-menerus sehingga disebut pula sebagai sinar-X kontinu. Gambar 2.4 memperlihatkan proses pembentukan bremsstrahlung atau sinar-X kontinu ini.



Gambar 2.3 Proses Pembentukan Sinar-X Karakteristik



Gambar 2.4 Proses Pembentukan Bremsstrahlung

B. Radioaktivitas dan Sumber Radiasi

1. Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah peluruhan spontan inti atom yang tidak stabil yang akan menyebabkan terbentuknya nuklida baru. Peluruhan ini terjadi karena komposisi jumlah proton dan neutron yang tidak seimbang. Dalam hal ini, inti tidak stabil tersebut akan memancarkan radiasi alfa (α) atau radiasi beta (β). Setelah memancarkan radiasi alfa atau beta, adakalanya inti atom masih memiliki kelebihan energi (belum mencapai tingkat energi dasarnya). Dalam usahanya untuk mencapai tingkat energi dasar, pemancaran radiasi alfa atau beta dapat disertai dengan pemancaran radiasi gamma.

Radiasi alfa (α) adalah radiasi berupa partikel yang terdiri atas 2 proton dan 2 neutron. Pada dasarnya, radiasi alfa adalah inti helium yang bersimbol ${}^4_2\text{He}$. Radionuklida yang meluruh dengan memancarkan radiasi alfa akan kehilangan 2 proton dan 2 neutron serta membentuk nuklida baru.

Radiasi beta (β) berupa partikel, yang dapat bermuatan negatif atau bermuatan positif. Partikel beta bermuatan negatif identik

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan elektron, sedangkan partikel beta bermuatan positif, disebut positron, identik dengan elektron yang bermuatan positif.

Dalam proses peluruhan radiasi beta negatif (elektron), terjadi perubahan neutron menjadi proton di dalam inti atom. Sementara itu, dalam proses peluruhan radiasi beta positif (positron), terjadi perubahan proton menjadi neutron di dalam inti atom.

Seperti elektron, nukleon juga bisa tereksitasi jika menerima radiasi. Ketika nukleon yang tereksitasi kembali ke tingkat energi asal, terjadi pancaran foton (gelombang elektromagnetik) yang energinya sama dengan perbedaan energi antara tingkat energi eksitasi dengan tingkat energi asal. Foton yang terpancar ini disebut sebagai sinar gamma atau radiasi gamma.

Namun, berbeda dengan radiasi alfa dan beta, radiasi gamma (γ) tidak menyebabkan perubahan nomor atom maupun nomor massa karena radiasi gamma merupakan foton (gelombang elektromagnetik) yang tidak bermuatan dan tidak bermassa. Peluruhan ini terjadi karena energi inti atom tidak berada pada keadaan dasarnya. Dengan kata lain, energi inti atom berada pada tingkat tereksitasi (isomer). Pada umumnya, peluruhan gamma ini terjadi setelah peristiwa peluruhan alfa atau beta.

Telah diketahui bahwa inti atom yang tidak stabil, atau radionuklida, akan berubah menjadi stabil dengan memancarkan radiasi. Jumlah pengurangan atau peluruhan suatu nuklida yang terjadi dalam satu detik disebut sebagai aktivitas.

Satuan aktivitas dalam sistem internasional (SI) adalah becquerel (Bq), yang didefinisikan sebagai satu disintegrasi (peluruhan) per detik (s^{-1}). Satuan lama yang masih sering dijumpai adalah curie (Ci), dengan $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

Aktivitas suatu radionuklida setiap saat berkurang dengan mengikuti persamaan eksponensial sebagai berikut:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

dengan A menyatakan aktivitas pada waktu t , A_0 menyatakan aktivitas awal dan λ menyatakan konstanta peluruhan.

Waktu yang dibutuhkan agar aktivitas suatu bahan radioaktif berkurang menjadi separuh dari aktivitas awalnya disebut sebagai waktu paro. Waktu paro setiap radionuklida bersifat unik dan tidak berubah. Misalnya, waktu paro ^{60}Co adalah 5,27 tahun dan waktu paro ^{137}Cs adalah 30 tahun.

Waktu paro ditentukan oleh suatu konstanta peluruhan, λ , yang juga unik untuk setiap radionuklida. Hubungan antara waktu paro, $T_{1/2}$, dan konstanta peluruhan, λ , adalah:

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

2. Sumber Radiasi

Radiasi merupakan unsur penting dalam kehidupan di dunia ini dan menjadi bagian dari kehidupan itu sendiri. Ada dua sumber utama radiasi di dunia ini, yaitu sumber radiasi alami dan sumber radiasi buatan.

Radiasi alami merupakan radiasi yang telah ada di bumi ini dengan sendirinya tanpa campur tangan manusia. Radiasi alami terdiri atas radiasi kosmik, yaitu radiasi yang berasal dari luar angkasa termasuk matahari radiasi primordial, yaitu radiasi yang berasal dari dalam bumi sendiri; dan radiasi internal, yaitu radiasi yang telah ada di dalam tubuh manusia sejak dilahirkan dan juga yang masuk ke dalam tubuh manusia secara ingesti (penelanan), inhalasi (penghirupan), atau luka terbuka.

Radiasi buatan adalah sumber radiasi yang dengan sengaja dibuat oleh manusia untuk berbagai kepentingan, termasuk kepentingan militer (senjata nuklir), kedokteran (radiodiagnostik, radioterapi, dan kedokteran nuklir), pembangkitan energi listrik (PLTN), dan industri.

Secara global, Tabel 2.1 memperlihatkan dosis radiasi yang diterima manusia di dunia ini dari sumber alami rata-rata dalam satu tahun. Sementara itu, Tabel 2.2 memperlihatkan dosis radiasi

per kapita tahunan yang diterima setiap penduduk dunia dari radiasi buatan.

Tabel 2.1 Dosis Rata-Rata dari Sumber Radiasi Alam

Sumber	Dosis Rerata Tahunan (mSv)	Rentang Dosis (mSv)
Inhalasi (gas radon)	1,26	0,2–1,0
Terrestrial eksternal	0,48	0,3–1,0
Ingesi	0,29	0,2–1,0
Radiasi kosmik	0,39	0,3–1,0
Total	2,4	1,0–13

Sumber: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR, 2010, 4)

Tabel 2.2 Dosis Radiasi Per Kapita Tahunan dari Sumber Radiasi Buatan

Sumber	Dosis Rerata Tahunan (mSv)	Rentang Dosis (mSv)
Diagnosis medis	0,6	0–beberapa puluh
Percobaan atmosfer senjata nuklir	0,005	Masih besar di sekitar lokasi percobaan
Pajanan kerja	0,005	~0–20
Kecelakaan Chernobyl	0,002	-
Daur bahan bakar nuklir	0,0002	-
Total	0,6	~0–beberapa puluh

Sumber: UNSCEAR (2010, 4)

C. Deteksi Radiasi

Manusia tidak memiliki sensor biologi terhadap radiasi. Oleh karena itu, manusia bergantung sepenuhnya pada instrumentasi atau alat ukur untuk mendeteksi dan mengukur radiasi.

Alat ukur radiasi dirancang dan dibuat berdasar berbagai efek dari interaksi radiasi dengan materi, seperti eksitasi dan ionisasi. Selain itu, untuk tujuan deteksi dan pengukuran, detektor pada alat ukur radiasi juga terdiri atas beberapa jenis, seperti pencacah Geiger-Müller (GM), kamar pengionan, pencacah sintilasi, dan detektor semikonduktor.

Alat ukur radiasi secara umum dapat dikategorikan atas alat ukur untuk menentukan tingkat dosis dan/atau kontaminasi di daerah kerja atau lingkungan dan alat ukur untuk menentukan tingkat dosis radiasi yang diterima oleh seorang pekerja radiasi. Alat ukur radiasi kategori pertama disebut pula sebagai surveimeter dan/atau alat ukur kontaminasi, sedangkan alat ukur radiasi kategori kedua disebut sebagai dosimeter perorangan.

1. Surveimeter dan/atau Alat Ukur Kontaminasi

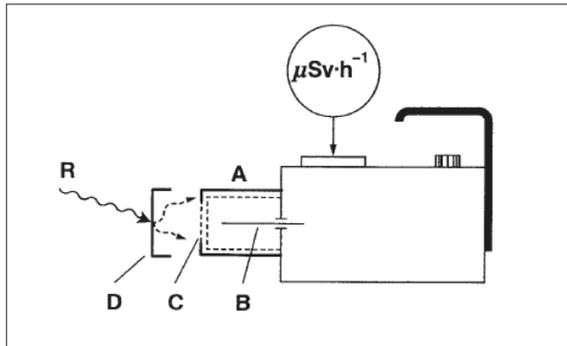
Surveimeter merupakan alat ukur radiasi yang digunakan untuk menentukan tingkat dosis atau laju dosis yang ada di daerah kerja, yang kadang disebut sebagai surveimeter area, dan di lingkungan yang disebut sebagai surveimeter lingkungan. Surveimeter area umumnya memiliki kemampuan untuk mengukur dosis radiasi yang lebih besar dibandingkan surveimeter lingkungan karena potensi pajanan di daerah kerja juga lebih besar daripada di lingkungan.

Surveimeter area harus mampu memberikan bacaan langsung dosis radiasi dalam orde mSv atau μSv . Pada surveimeter lama yang masih banyak digunakan, satuan yang digunakan adalah miliroentgen (mR).

Sebagian besar surveimeter area memberikan bacaan dalam laju dosis radiasi dengan satuan milisievert per jam (mSv/jam), sedangkan bacaan laju dosis pada surveimeter lingkungan umumnya lebih rendah (orde $\mu\text{Sv}/\text{jam}$, atau bahkan nSv/jam). Pada beberapa alat ukur laju dosis ini, satuan lama milirem per jam (mrem/jam) atau mR/jam masih digunakan, dengan $10 \mu\text{Sv}/\text{jam}$ sama dengan $1 \text{ mrem}/\text{jam}$ dan $1 \text{ mR}/\text{jam}$ dianggap sama dengan $1 \text{ mrem}/\text{jam}$.

Kamar pengionan merupakan jenis detektor yang telah digunakan untuk surveimeter area maupun surveimeter lingkungan. Konstruksi kamar pengionan untuk keperluan ini diberikan pada Gambar 2.5, dengan R adalah radiasi yang datang, A adalah detektor yang berfungsi sebagai katode (elektrode negatif), B adalah anode (elektrode positif), C adalah jendela beta yang terbuat dari keping

tipis ($3\text{--}7\text{ mg/cm}^2$), dan D adalah selubung protektif yang terbuat dari plastik keras atau aluminium ($200\text{--}300\text{ mg/cm}^3$).



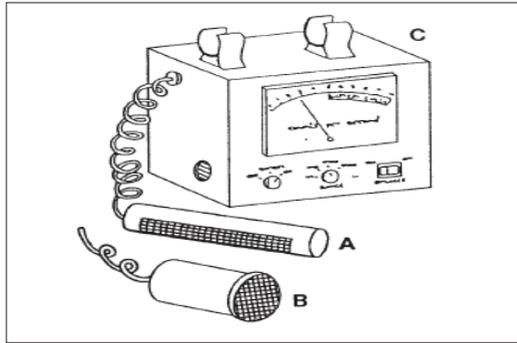
Sumber: Burchfield (2009, 172)

Gambar 2.5 Konstruksi Surveimeter Kamar Pengionan

Selubung protektif pada Gambar 2.5 digunakan untuk memperbaiki efisiensi detektor saat mengukur foton energi tinggi. Sebaliknya, selubung akan dibuka saat mengukur laju dosis dari foton energi rendah ($10\text{--}100\text{ keV}$) dan beta.

Namun, pencacah GM merupakan detektor isian gas yang paling banyak digunakan sebagai surveimeter karena rangkaiannya relatif lebih sederhana dan karena itu menjadi lebih murah. Detektor GM dapat digunakan baik hanya sebagai pencacah maupun sebagai alat ukur dosis.

Sebagai pencacah, yaitu hanya berfungsi untuk mendeteksi keberadaan radiasi, detektor GM bisa memiliki jendela samping atau depan yang dapat dibuka atau ditutup. Penutup jendela adalah logam metal dengan tebal sekitar 2 mg/cm^2 . Jendela berfungsi sebagai diskriminator yang akan ditutup saat mendeteksi radiasi tembus kuat, seperti foton, dan dibuka saat mendeteksi radiasi tembus lemah, seperti foton energi rendah dan beta. Gambar 2.6 memperlihatkan skema pencacah GM, dengan R adalah *ratemeter*, A adalah detektor dengan jendela samping, dan B adalah detektor dengan jendela depan.



Gambar 2.6 Skema Pencacah GM

Sebagai alat ukur dosis, detektor GM perlu dilapis dengan metal tipis untuk melemahkan respons pada energi foton rendah yang cukup tinggi. Dengan cara ini, suatu pencacah GM terkompensasi akan memiliki respons energi dengan fluktuasi $\pm 20\%$ pada rentang energi 50 keV–1,25 MeV. Teknik ini juga mencegah agar radiasi beta dan foton dengan energi sangat rendah tidak masuk ke dalam tabung pencacah. Berbagai surveimeter yang banyak digunakan di Indonesia saat ini diberikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Berbagai Jenis Surveimeter

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dalam hal alat ukur kontaminasi, alat ini digunakan untuk mengukur tingkat aktivitas pada suatu permukaan akibat terjadinya tumpahan bahan radioaktif tersebut. Tingkat aktivitas akibat kontaminasi untuk mengakibatkan bahaya internal umumnya lebih rendah dibanding dengan tingkat aktivitas yang dapat mengakibatkan bahaya eksternal. Oleh karena itu, alat ukur kontaminasi harus lebih sensitif dibanding dengan surveimeter.

Untuk memenuhi persyaratan terkait sensitivitas tersebut, alat ukur kontaminasi dibuat dari detektor yang memiliki sistem penguat bawaan, seperti pencacah GM atau sintilasi. Alat ukur kontaminasi sebelumnya harus dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengetahui sensitivitasnya terhadap suatu bahan radioaktif tertentu sehingga tingkat kontaminasi dapat diketahui dengan pasti dengan mengalikan bacaan alat dengan faktor kalibrasi yang ada.

Gambar 2.8 memperlihatkan alat ukur kontaminasi yang dapat mengukur kontaminasi radiasi α dan radiasi β . Pengukuran kontaminasi β dilakukan dengan sintilator fosfor plastik sebagai detektor dan bersama dengan saringan seng sulfida membentuk probe ganda yang memungkinkan pemantauan α dan β secara bersamaan. Untuk membedakan pulsa yang berasal dari radiasi α dan β digunakan tabung pelipat foto tunggal.



Sumber: Martin dkk. (2012, 104)

Gambar 2.8 Alat Ukur Kontaminasi untuk Mengukur Kontaminasi Radiasi α dan β

2. Dosimeter Perorangan

Dosimeter perorangan merupakan alat ukur yang digunakan untuk menentukan dosis radiasi yang diterima oleh seorang pekerja radiasi. Metode pengukuran dosis radiasi perorangan mensyaratkan bahwa sumber radiasi dan identitas pekerja radiasi harus diketahui dengan pasti.

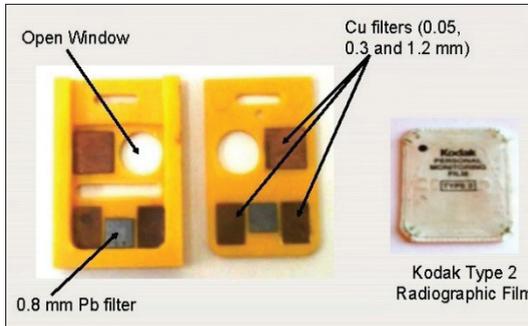
Dosimeter perorangan juga digunakan untuk beberapa hal lain, seperti berikut ini.

- 1) memverifikasi keefektifan kerja pengendalian radiasi di daerah kerja;
- 2) mengonfirmasi atau mendukung alat ukur radiasi yang terpasang tetap;
- 3) mengidentifikasi cara kerja yang dapat meminimalkan paparan; dan
- 4) memberikan informasi dosis radiasi jika terjadi kecelakaan.

Dosimeter perorangan secara praktis dapat dibedakan atas dua jenis, yaitu dosimeter yang bekerja secara akumulasi dan dosimeter yang dapat dibaca langsung. Sesuai dengan karakteristik dan sensitivitasnya, dosimeter perorangan untuk dosis akumulasi dapat digunakan selama 1–3 bulan sebelum kemudian diproses untuk dibaca besar dosis radiasi yang diakumulasi selama periode waktu tersebut.

Dosimeter film merupakan dosimeter perorangan yang biasanya digunakan selama sekitar satu bulan. Dosimeter ini menggunakan kristal AgBr yang saat menerima penyinaran radiasi akan membuat atom Ag menjadi netral sehingga terbentuk bayangan laten. Bayangan laten tersebut sebanding dengan dosis radiasi yang diterima.

Berdasar karakteristik bahan penyusunnya, kemampuan menyimpan dosis pada dosimeter film akan berkurang setelah periode satu bulan tersebut. Karakteristik ini menjadi kelemahan dosimeter film sebagai dosimeter perorangan sehingga saat ini praktis sudah tidak digunakan lagi. Gambar 2.9 memperlihatkan contoh dosimeter film dengan *holder* penyangganya.

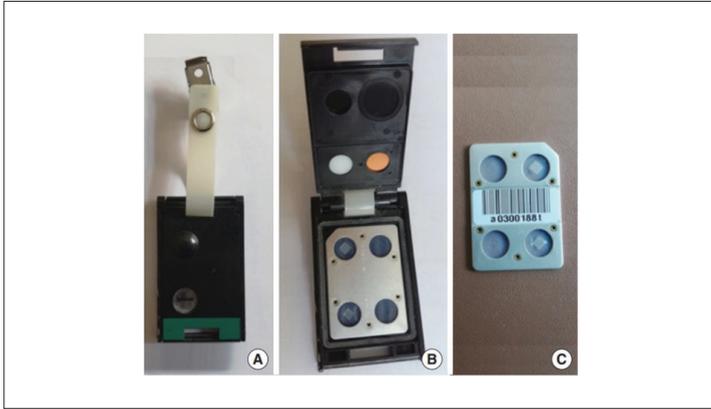


Sumber: International Atomic Energy Agency (IAEA, t.t.)

Gambar 2.9 Dosimeter Film dengan *Holder* Penyangganya

Kemampuan menyimpan dosis yang lebih lama sebelum informasinya berkurang akibat terjadinya rekombinasi elektron-lubang pada kristal detektor merupakan karakteristik dosimeter termoluminesensi (TLD). Oleh karena itu, TLD dapat digunakan sebagai dosimeter perorangan untuk periode pemakaian tiga bulan. Dosimeter perorangan jenis lain yang juga dapat digunakan selama tiga bulan adalah dosimeter *optically stimulated luminescence* (OSL) dan dosimeter *radiophotoluminescence* (RPL).

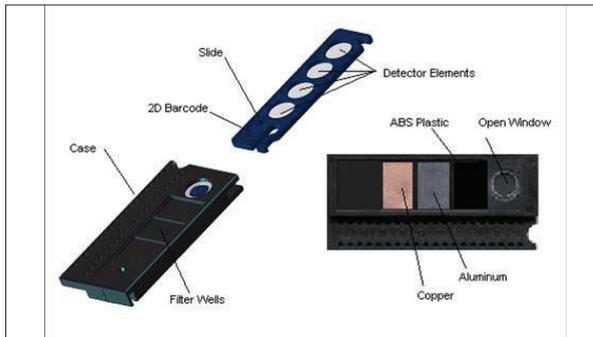
TLD dan OSL adalah dua jenis dosimeter perorangan yang memiliki kesamaan dalam hal bahan pendaran (*luminescence*) yang digunakan, yaitu kristal. Bahan kristal untuk TLD yang digunakan antara lain LiF , CaF_2 , CaSO_4 , dan $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, sedangkan Al_2O_3 paling banyak digunakan untuk OSL. Baik TLD maupun OSL menggunakan prinsip pancaran pendaran yang sebanding dengan dosis radiasi yang diterima, dengan TLD menggunakan panas untuk merangsang pendaran tersebut, sedangkan OSL menggunakan optik. Gambar 2.10 dan Gambar 2.11 memperlihatkan contoh TLD dan OSL dengan masing-masing penyangganya.



Ket.: (A) Penyangga TLD; (B) Kartu TLD yang Berada di dalam Holder Penyangga; (C) Kartu TLD

Sumber: Kim, dkk. (2019)

Gambar 2.10 Dosimeter Termoluminesensi (TLD) dan *Holder* Penyangganya



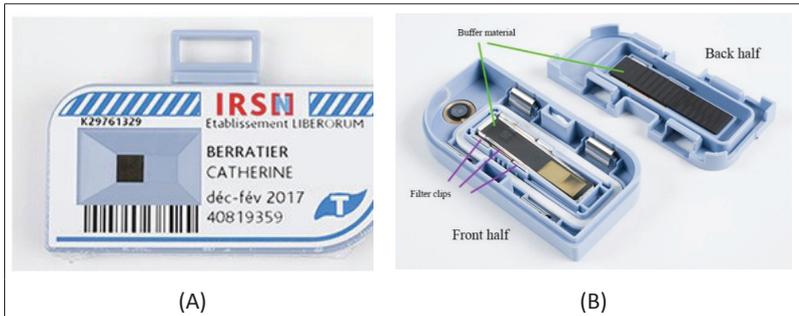
Sumber: Ministry of Health Malaysia (2017)

Gambar 2.11 Dosimeter OSL

Sementara itu, RPL yang menggunakan kaca fosfat teraktivasi perak telah mulai dikembangkan sejak tahun 1990-an. Ketika gelas disinari dengan radiasi ultraviolet, cahaya tampak dipancarkan dengan intensitas yang berbanding lurus dengan dosis yang diserap dari radiasi pengion. Tidak seperti TLD dan OSL, pusat pendaran

Buku ini tidak diperjualbelikan.

yang terkait dengan RPL tidak rusak dalam proses pembacaan normal dan juga sangat stabil sehingga pemudaran pada suhu kamar dapat diabaikan selama beberapa tahun. Dosis informasi dapat diperoleh berulang kali setiap saat selama akumulasi dosis jangka panjang. Gambar 2.12 memperlihatkan contoh RPL yang secara perlahan mulai memasuki pasar komersial.



Ket.: (A) Holder Penyangga; (B) Dosimeter RPL di dalam Holder Penyangganya

Sumber: IRSN (t.t.)

Gambar 2.12 Dosimeter RPL

Seperti terlihat pada Gambar 2.9, Gambar 2.10, Gambar 2.11, dan Gambar 2.12, *holder* keempat dosimeter mengandung beberapa filter yang dirancang untuk memberikan respons tertentu terhadap energi radiasi yang diterima. Dengan mengombinasikan respons di bawah filter-filter tersebut, dosis dan jenis radiasi yang diterima dapat diketahui dengan baik.

Jenis dosimeter perorangan yang lain adalah dosimeter saku. Dosimeter saku dirancang untuk dapat membaca langsung dosis radiasi yang diterimanya. Dosimeter saku yang paling banyak digunakan adalah dosimeter dengan elektrometer serat kuarsa (*quartz fiber electrometer*, QFE).

Dosimeter saku serat kuarsa memiliki kekurangan karena sensitif terhadap kejutan, getaran, suhu, kontaminasi lingkungan, dan beberapa faktor lainnya. Namun, dosimeter ini cukup murah dan

memberikan perkiraan dosis yang diterima secara cepat. Oleh karena itu, dosimeter ini sangat berguna untuk dipakai dalam keadaan ke-daruratan atau kecelakaan. Pada saat bekerja di daerah radiasi tinggi, pekerja radiasi umumnya juga menggunakan dosimeter ini sebagai pelengkap dosimeter pasif, seperti TLD dan film.

Dewasa ini telah dikembangkan dosimeter saku yang lebih canggih yang dikenal dengan nama dosimeter perorangan elektronik (*electronic personal dosimeter, EPD*). Selain memberikan bacaan langsung, EPD juga mencatat laju dosis puncak, dosis tara, dan kronologi dosis yang diterima. Selain itu, EPD dilengkapi dengan alarm yang bisa diatur dan dapat dihubungkan langsung ke komputer sehingga data yang tersimpan dapat dialihkan dan direkam. Gambar 2.13 dan Gambar 2.14 memberikan contoh dosimeter saku QFE dan EPD yang banyak digunakan saat ini.



Sumber: Arrow-Tech (t.t.)

Gambar 2.13 Dosimeter Saku QFE



Sumber: Perspective Instruments (t.t.)

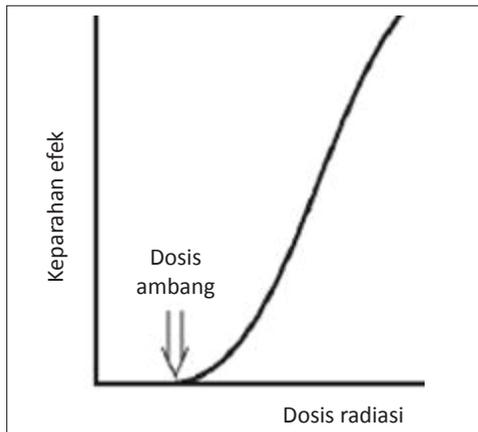
Gambar 2.14 Dosimeter EPD

D. Efek Kesehatan Radiasi

Interaksi radiasi pengion dengan tubuh manusia akan mengakibatkan terjadinya efek kesehatan. Efek kesehatan ini, yang dimulai dengan peristiwa yang terjadi pada tingkat molekuler, akan berkembang menjadi gejala klinis. Sifat dan keparahan gejala, dan juga waktu kemunculannya, sangat bergantung pada jumlah dosis radiasi yang diserap dan laju penerimaannya.

1. Efek Deterministik

Efek deterministik terjadi akibat adanya kematian sel sebagai akibat pajanan radiasi sekejur maupun lokal. Pada Gambar 2.15, efek terjadi jika dosis radiasi yang diterima tubuh melebihi nilai dosis ambang untuk terjadinya efek. Efek juga terjadi pada individu yang terpajan dalam waktu yang tidak lama setelah pajanan terjadi. Tingkat keparahannya akan meningkat jika dosis yang diterimanya juga makin besar. Berikut adalah beberapa dosis ambang pada organ yang dapat mengalami efek deterministik berdasarkan International Commission on Radiological Protection (ICRP, 2012) pada publikasi ICRP 118.



Sumber: Jadiyahpa (2018)

Gambar 2.15 Efek Deterministik Radiasi

a. Kulit

Efek deterministik pada kulit bervariasi dengan besarnya dosis. Beberapa jenis efek radiasi dan dosis ambangnya yang dijumpai pada kulit diberikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Efek Radiasi pada Kulit

Efek Radiasi	Perkiraan Dosis Ambang (Gy)	Waktu Kemunculan
Kemerahan (erythema) transien awal	2	2–24 jam
Reaksi kemerahan utama	6	» 1,5 minggu
Kerontokan (epilasi) sementara	3	» 3 minggu
Kerontokan tetap	7	» 3 minggu
Deskuamasi kering	14	» 4–6 minggu
Deskuamasi basah	18	» 4 minggu
Ulserasi sekunder	24	> 6 minggu
Kerontokan tertunda	15	8–10 minggu
Nekrosis dermal iskemik	18	> 10 minggu
Atrofi dermal (fase pertama)	10	> 52 minggu
Telangiectasia	10	> 52 minggu
Nekrosis dermal (fase tertunda)	>15?	> 52 minggu

Sumber: ICRP (2012, 89)

b. Mata

Lensa mata merupakan bagian mata yang sangat sensitif terhadap radiasi. Terjadinya kekeruhan (katarak) atau hilangnya sifat transparansi lensa mata sudah mulai terdeteksi setelah pajanan radiasi rendah sekitar 0,5 Gy, bersifat kumulatif, dan dapat berkembang hingga terjadi kebutaan. Katarak dapat terjadi setelah masa laten sekitar 6 bulan hingga 35 tahun, dengan rata-rata sekitar 3 tahun.

c. Paru

Paru adalah organ yang relatif sensitif terhadap pajanan radiasi eksternal maupun internal. Efek berupa pneumonitis (radang paru) biasanya mulai timbul setelah beberapa minggu atau bulan. Efek utamanya adalah pneumonitis interstisial yang dapat diikuti dengan

terjadinya fibrosis (jaringan ikat) sebagai akibat dari rusaknya sistem vaskularisasi sel kapiler dan jaringan ikat yang dapat berakhir dengan kematian.

Kerusakan sel yang mengakibatkan terjadinya peradangan paru akut biasanya terjadi pada dosis 5–15 Gy. Dosis ambang tunggal 6–7 Gy dianggap sebagai dosis ambang terjadinya pneumonitis akut.

d. Organ Reproduksi

Efek deterministik pada gonad atau organ reproduksi pria adalah kemandulan. Paparan radiasi pada testis akan mengganggu proses pembentukan sel sperma yang akhirnya akan memengaruhi jumlah sel sperma yang dihasilkan. Dosis radiasi sebesar 0,15 Gy merupakan dosis ambang kemandulan sementara karena sudah mengakibatkan terjadinya penurunan jumlah sel sperma selama beberapa minggu. Dosis ambang kemandulan tetap diperkirakan sekitar 3,5–6 Gy.

Selain kemandulan, radiasi juga dapat mengakibatkan terjadinya menopause dini sebagai akibat dari gangguan hormonal sistem reproduksi. Di samping itu, juga diketahui bahwa pengaruh radiasi pada sel telur sangat bergantung pada usia. Makin tua usia, makin sensitif terhadap radiasi.

e. Tiroid

Tiroid atau kelenjar gondok merupakan organ yang berfungsi mengatur proses metabolisme tubuh melalui hormon tiroksin yang dihasilkannya. Jika terjadi inhalasi isotop yodium, zat radioaktif ini akan terakumulasi di dalam tiroid dan menyebabkan tiroidis akut dan hipotiroidisme. Dosis ambang untuk tiroidis akut sekitar 200 Gy.

f. Janin

Efek deterministik pada janin sangat bergantung pada usia kehamilan saat janin menerima paparan radiasi. Pada usia kehamilan 0–2 minggu, dosis radiasi sekitar 0,05 Gy akan menyebabkan kematian. Dosis radiasi yang sama yang diterima pada usia kehamilan 2–7 minggu akan menimbulkan malformasi organ tubuh. Sementara itu, pada

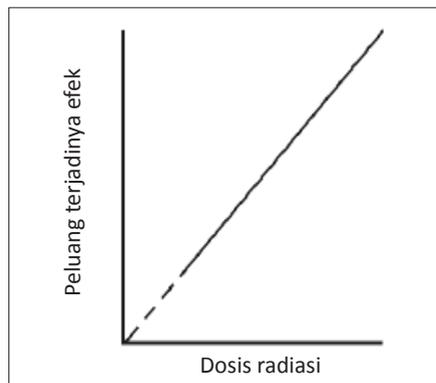
usia kehamilan 8–25 minggu akan terjadi retardasi mental jika janin menerima dosis sekitar 0,1–0,6 Gy.

2. Efek Stokastik

Berbeda dengan efek deterministik, efek stokastik tidak mengenal dosis ambang. Seperti terlihat pada Gambar 2.16, serendah apa pun dosis radiasi yang diterima, selalu ada peluang untuk terjadinya perubahan pada sistem biologis, baik pada tingkat molekuler maupun seluler. Dalam hal ini yang terjadi bukan kematian sel, tetapi perubahan sel dengan fungsi yang berbeda.

Apabila sel yang mengalami perubahan adalah sel somatik, sel tersebut dalam jangka waktu yang lama ditambah dengan pengaruh dari bahan toksik lainnya akan tumbuh dan berkembang menjadi kanker. Periode laten untuk terjadinya induksi leukemia, salah satu jenis kanker, diperkirakan sekitar delapan tahun dan dua atau tiga kali lebih panjang untuk kanker solid (padat), seperti kanker payudara atau kanker tulang.

Kanker akibat radiasi pada dasarnya tidak berbeda dengan kanker akibat mekanisme lain. Oleh karena itu, kebolehjadian induksi kanker hanya dapat dilihat secara epidemiologi berdasar kejadian berlebih secara statistik di atas kejadian alamiah atau spontan.



Sumber: Jadiyahappa (2018)

Gambar 2.16 Efek Stokastik Radiasi

Jika sel yang mengalami perubahan adalah sel genetik, sifat sel yang telah berubah ini dapat diwariskan ke keturunannya sehingga timbul efek genetik atau efek terwaris. Pada berbagai percobaan di laboratorium dengan hewan percobaan, terbukti bahwa efek ini bisa terjadi. Namun, bahkan dari studi terhadap para korban yang selamat dari bom atom di Jepang, efek terwaris ini belum terbukti terjadi pada manusia.

Secara umum, dengan demikian, selain tidak memiliki dosis ambang, efek stokastik muncul setelah masa laten yang cukup lama dan keparahannya tidak bergantung pada dosis radiasi yang datang meski peluang terjadinya lebih besar pada dosis yang lebih tinggi.

3. Sindrom Radiasi Akut

Sindrom radiasi akut (SRA) merupakan efek yang terjadi jika seluruh tubuh menerima dosis radiasi sekitar 1 Gy atau lebih dan dapat berakhir dengan kematian dalam waktu yang singkat. Kematian terjadi sebagai akibat kerusakan dan kematian sel organ dan sistem vital tubuh dalam jumlah yang banyak.

SRA terdiri atas tiga tahap. Tahap pertama adalah fase inisial atau sindrom prodromal, dengan gejala hilangnya nafsu makan, rasa mual, muntah, dan diare (gejala yang bersifat umum dan tidak bisa dibedakan dari gejala penyakit yang lain). Mual dan muntah terjadi 2–3 jam setelah pajanan dosis 1–2 Gy pada sekitar 50% pasien atau 1–2 jam setelah pajanan 2–4 Gy pada sekitar 75–80% pasien.

Tahap kedua adalah fase laten, suatu periode saat pasien tidak mengalami gejala apa pun setelah sindrom prodromal selesai. Lama fase ini tidak pasti dan bergantung pada dosis yang diterima. Makin besar dosis, makin singkat fase latennya.

Tahap ketiga adalah fase pada saat SRA itu sendiri muncul. Fase manifestasi kerusakan sistem tubuh ini dapat digolongkan atas tiga tingkat keparahan sebagai berikut.

- 1) Sindrom sistem pembentukan darah (*hematopoietic syndrome*). Dosis ambang sindrom ini adalah 1 Gy dan menyebabkan jumlah

- sel darah menurun setelah 2–4 minggu. Dosis sekitar 2 Gy dapat menyebabkan kematian dalam waktu 2–8 minggu.
- 2) Sindrom sistem pencernaan (*gastrointestinal syndrome*). Dosis ambang sindrom ini sekitar 5 Gy dalam waktu 3–5 hari dan dapat menyebabkan kematian dalam waktu 3 hari hingga 2 minggu dengan dosis ambang 10 Gy.
 - 3) Sindrom sistem saraf pusat (*central nervous system syndrome*). Dosis ambang untuk sindrom ini sekitar 20 Gy dan muncul dalam waktu kurang dari 3 jam.

Secara umum diketahui pula bahwa jika dosis radiasi seluruh tubuh yang diterima antara 6–10 Gy, kebanyakan individu akan mengalami kematian, kecuali jika segera mendapat pertolongan medis yang tepat untuk mencegah terjadinya infeksi dan perdarahan. Namun, pada dosis di atas 10 Gy, kematian akan terjadi meskipun telah dilakukan usaha seperti transplantasi sumsum tulang dari donor yang sesuai.



3

KETENTUAN UMUM PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI

Standar proteksi dan keselamatan radiasi yang berlaku di hampir seluruh negara di dunia pada saat ini didasarkan pada standar yang disusun oleh International Atomic Energy Agency (IAEA) dengan sponsor dan persetujuan dari beberapa organisasi internasional lainnya, yaitu World Health Organization (WHO), International Labour Organization (ILO), Food and Agricultural Organization (FAO), Pan American Health Organization (PAHO), United Nations Environment Programme (UNEP), European Commission (EC), dan Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). Standar keselamatan yang dimaksud adalah *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, yang sering disingkat sebagai BSS (IAEA, 2014).

Dalam prosesnya, BSS sendiri mengambil publikasi *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* yang memberikan rekomendasi terkait proteksi dan keselamatan radiasi sebagai acuan utama. Rekomendasi ICRP yang menjadi dasar bagi penyusunan BSS

yang berlaku saat ini adalah yang diberikan pada publikasi ICRP 103 (ICRP, 2007).

Dalam Bab 3 ini akan diuraikan secara singkat beberapa pokok ketentuan proteksi dan keselamatan radiasi yang diberikan pada rekomendasi ICRP maupun standar keselamatan IAEA di atas. Ketentuan nasional yang berlaku di Indonesia selanjutnya juga diuraikan untuk menambah wawasan terkait ketentuan keselamatan proteksi dan keselamatan radiasi ini secara komprehensif.

A. Sistem Proteksi Radiasi

Seperti telah diuraikan pada Bab 2, setiap orang di dunia ini menerima pajanan radiasi yang berasal dari sumber alami dan sumber buatan. Proses penerimaan pajanan radiasi tersebut secara sederhana dapat dipandang sebagai rangkaian peristiwa dan situasi. Rangkaian diawali dari sumber radiasi yang kemudian terpancar bergerak melalui jalur lingkungan atau lainnya dan berakhir dengan pajanan pada individu seseorang. Sistem proteksi radiasi merupakan semua tindakan yang diambil pada setiap bagian dari proses ini.

Untuk mempermudah dalam memahami sistem proteksi radiasi, ICRP (2007) pada publikasi ICRP 103 mengembangkan pendekatan berbasis karakteristik dari tiga jenis situasi pajanan radiasi. Selain itu, ICRP juga membedakan kategori pajanan radiasi atas tiga jenis dan kemudian memberikan prinsip proteksi radiasi berdasar jenis situasi dan kategori pajanan radiasi tersebut.

1. Situasi Pajanan Radiasi

Untuk mengarakterisasi situasi yang dapat mengakibatkan terjadinya pajanan radiasi, ICRP (2007) membedakan situasi pajanan atas situasi pajanan terencana (*planned exposure situations*)—yang merupakan kegiatan yang melibatkan sumber radiasi dengan sengaja, situasi pajanan darurat (*emergency exposure situations*)—situasi pajanan yang memerlukan tindakan segera untuk menghindari atau mengurangi akibat yang tidak diinginkan dari pajanan radiasi, dan situasi pajanan

eksisting (*existing exposure situations*)—yang merupakan situasi pajanan yang ada dari sumber radiasi alam dan juga situasi pajanan yang berkepanjangan setelah terjadinya situasi darurat. Pembagian situasi pajanan ini akan bermanfaat dalam menentukan tindakan apa yang diperlukan dalam setiap situasi agar pajanan radiasi dapat dikendalikan.

Sebelumnya, pada publikasi ICRP 60, ICRP membedakan pajanan atas jenis kegiatan yang dilakukan terhadap sumber radiasi, yaitu pemanfaatan dan intervensi (ICRP, 1991). Pemanfaatan adalah setiap kegiatan manusia yang menambah sumber pajanan atau jalur pajanan atau memperluas pajanan ke orang lain atau mengubah rantai jalur pajanan dari sumber yang telah ada sehingga pajanan atau kemungkinan pajanan terhadap satu atau banyak orang menjadi meningkat. Sementara itu, intervensi adalah setiap tindakan yang dimaksudkan untuk mengurangi atau menghindarkan pajanan atau kemungkinan pajanan dari sumber yang bukan bagian dari pemanfaatan yang terkendali atau yang di luar kendali seperti akibat suatu kecelakaan.

2. Kategori Pajanan Radiasi

Sistem proteksi juga mempertimbangkan keberterimaan pajanan, yang menggambarkan manfaat langsung atau tak langsung terkait pajanan radiasi tersebut. Untuk ini, pajanan dikategorikan atas pajanan kerja, pajanan medis, dan pajanan publik (ICRP, 2007).

Pajanan kerja adalah pajanan yang diterima sebagai akibat pekerjaan yang dilakukan dan merupakan tanggung jawab manajemen pemegang izin. Dalam hal ini, pekerja dipandang memperoleh manfaat dari pekerjaannya tersebut.

Pajanan medis adalah pajanan yang diterima seseorang—baik pasien, pendamping pasien, ataupun relawan riset medis—dari suatu tindakan diagnosis, intervensional, atau terapi. Manfaat dari pajanan medis umumnya dapat dirasakan langsung.

Pajanan publik adalah pajanan yang diterima masyarakat secara luas yang bukan termasuk pajanan kerja atau pajanan medis. Individu masyarakat umumnya tidak menerima manfaat langsung dari pajanan, tetapi secara kelompok mungkin memiliki manfaat yang lebih luas.

ICRP juga menetapkan tujuan proteksi radiasi sebagai upaya untuk mengelola dan mengendalikan pajanan radiasi sehingga munculnya efek deterministik atau efek reaksi jaringan dapat dicegah dan peluang terjadinya efek stokastik dapat ditekan serendah mungkin.

Untuk mencapai tujuan proteksi radiasi ini, diperlukan suatu prinsip dalam tindakan proteksi radiasi. Prinsip proteksi radiasi terdiri atas justifikasi, optimisasi proteksi, dan pembatasan dosis. Dalam kaitan ini dapat disebutkan bahwa prinsip justifikasi dan optimisasi proteksi berlaku untuk semua situasi pajanan dan terkait sumber, sedangkan pembatasan dosis berlaku untuk situasi pajanan terencana dan terkait individual.

3. Prinsip Proteksi Radiasi

Tindakan proteksi radiasi dilaksanakan berdasarkan tiga prinsip, yaitu justifikasi, optimisasi proteksi dan keselamatan, dan pembatasan dosis. Prinsip justifikasi dan optimisasi berlaku untuk semua situasi pajanan dan terkait sumber, sedangkan aplikasi nilai batas dosis hanya berlaku untuk situasi pajanan terencana dan terkait individu. “Terkait sumber” adalah tindakan proteksi radiasi yang dapat dilakukan pada sumber radiasinya untuk memastikan adanya perlindungan terhadap kelompok individu dari sumber radiasi tersebut. Sementara itu, “terkait individu” berarti tindakan proteksi radiasi dilakukan pada individu itu sendiri.

a. Justifikasi

Suatu pemanfaatan harus dapat dibenarkan jika menghasilkan keuntungan bagi satu atau banyak individu dan bagi masyarakat terpajan untuk mengimbangi kerusakan radiasi yang ditimbulkannya. Kemungkinan dan besar pajanan yang diperkirakan timbul dari suatu pemanfaatan harus diperhitungkan dalam proses pembenaran.

Sementara itu, pajanan medis harus mendapat pembenaran dengan menimbang keuntungan diagnostik dan terapi yang diharapkan terhadap kerusakan radiasi yang mungkin ditimbulkan. Keuntungan dan risiko dari teknik lain yang tidak melibatkan pajanan medis juga perlu diperhitungkan.

Dalam radiologi diagnostik, untuk mendorong praktik pembenaran dan memastikan bahwa pasien dirujuk untuk prosedur yang sesuai, beberapa negara telah menerbitkan publikasi yang di negar-negara Eropa dikenal sebagai pedoman rujukan (*referral guidelines*) atau di AS sebagai kriteria kesesuaian (*appropriateness criteria*). Berdasarkan Vom dan Williams (2017), sebuah studi menyatakan bahwa pedoman rujukan telah berhasil mencegah 58% dari pemeriksaan radiografi yang tidak dapat dibenarkan. Namun, seperti dikutip pula oleh Vom dan Williams (2017), studi lain menunjukkan 20–77% dari pemeriksaan yang dilakukan tidak sesuai atau tidak dapat dibenarkan karena kurangnya kesadaran akan pedoman rujukan yang tersedia.

b. Optimisasi Proteksi dan Keselamatan

Dalam kaitan dengan pajanan dari suatu sumber tertentu dalam pemanfaatan, proteksi dan keselamatan harus dioptimisasikan agar besar dosis individu, jumlah orang terpajan, dan kemungkinan terjadinya pajanan ditekan serendah mungkin (*as low as reasonably achievable, ALARA*), dengan memperhitungkan faktor ekonomi dan sosial serta dengan pembatasan bahwa dosis yang diterima sumber memenuhi penghambat dosis.

Dalam hal radiologi diagnostik dan kedokteran nuklir, tujuan optimisasi adalah untuk memastikan bahwa dosis radiasi yang diberikan kepada pasien serendah mungkin untuk memperoleh informasi radiografi yang dibutuhkan. Tanggung jawab untuk memastikan dosis pasien telah dioptimisasikan berada pada dokter (yang membenarkan diberikannya pajanan) dan operator (yang melakukan penyinaran atau pajanan).

Salah satu alat untuk melakukan optimisasi pajanan medis adalah tingkat panduan diagnostik (*diagnostic reference level, DRL*). Uraian

lebih lanjut mengenai DRL diberikan pada Subbab D, Subsubbab Penghambat Dosis dan Tingkat Panduan Diagnostik.

c. Pembatasan Dosis

Jika prosedur pembenaran dan optimisasi telah dilakukan dengan benar, secara teori sebenarnya nilai batas dosis hampir tidak perlu diberlakukan. Namun, nilai batas ini dapat mencegah kerugian individu yang berlebihan, yang dapat timbul akibat kombinasi pemanfaatan. Selain itu, aplikasi pembatasan dosis ini juga memberikan premis kesetaraan bagi semua orang dalam menghadapi efek radiasi yang berbahaya.

Nilai batas dosis (NBD) adalah dosis terbesar yang diizinkan yang dapat diterima oleh pekerja radiasi dan anggota masyarakat dalam jangka waktu tertentu tanpa menimbulkan efek genetik dan somatik yang berarti akibat pemanfaatan tenaga nuklir. Prinsip pembatasan dosis tidak diberlakukan pada kegiatan intervensi (kegiatan yang dilakukan untuk mengurangi atau menghindari terjadinya atau kemungkinan terjadinya pajanan radiasi) mengingat dalam pelaksanaan kegiatan ini melibatkan banyak pajanan radiasi yang tidak dapat dielakkan.

Tabel 3.1 Nilai Batas Dosis

Aplikasi	Pekerja Radiasi	Masyarakat Umum
Dosis efektif	20 mSv per tahun, dirata-rata selama periode 5 tahun ¹	1 mSv per tahun ²
Dosis ekuivalenekuivalen tahunan pada:		
Lensa mata	20 mSv	15 mSv
Kulit	500 mSv	50 mSv
Tangan dan kaki	500 mSv	-

Ket.:

¹ Dengan ketentuan tambahan bahwa dosis efektif tidak melampaui 50 mSv dalam satu tahun tertentu. Pembatasan lebih lanjut berlaku untuk pajanan kerja bagi wanita hamil.

² Dalam keadaan khusus, nilai dosis efektif yang lebih tinggi dapat diizinkan dalam satu tahun, asal rata-rata selama lima tahun tidak melebihi 1 mSv per tahun.

Sumber: Perka BAPETEN No. 4 (2013)

NBD yang saat ini berlaku ditunjukkan pada Tabel 3.1. Nilai pada aplikasi dosis efektif adalah NBD untuk penyinaran seluruh tubuh dan dimaksudkan untuk mengurangi peluang terjadinya efek stokastik. Sementara itu, nilai pada aplikasi dosis ekuivalen tahunan adalah NBD untuk penyinaran organ atau jaringan tertentu dan dimaksudkan untuk mencegah terjadinya efek deterministik pada organ atau jaringan tersebut.

4. Dosimetri Radiasi

Dosimetri merupakan salah satu cabang ilmu yang secara kuantitatif berupaya untuk menentukan jumlah energi yang mengendap pada suatu bahan tertentu oleh radiasi pengion. Dengan demikian, sejumlah besaran dan satuan perlu didefinisikan untuk menguraikan proses pengendapan energi tersebut.

Besaran fisik merupakan besaran yang menggambarkan sifat penyerapan energi pada suatu bahan. Namun, untuk kepentingan proteksi radiasi diperlukan suatu besaran yang dapat digunakan untuk mengkaji hubungan dosis dengan risiko kesehatan akibat penyerapan energi tersebut. Untuk ini diperkenalkan suatu besaran yang disebut dengan besaran proteksi. Besaran proteksi secara operasional ternyata tidak dapat diukur secara langsung pada jaringan tubuh. Untuk kepentingan pengukuran langsung selanjutnya diperkenalkan besaran operasional yang dapat digunakan untuk mengkaji dosis pada besaran proteksi.

a. Besaran Fisik

Berkas radiasi pengion monoenergetik sebagai besaran fisik biasa dinyatakan dalam besaran fluens partikel dan fluens energi. Kedua besaran ini juga bisa digunakan untuk menjelaskan berkas foton dan berkas partikel bermuatan.

1) Fluens Partikel

Fluens partikel merupakan jumlah partikel yang datang pada suatu bola hipotesis dengan luas penampang lintang tertentu. Arah partikel

yang datang tersebut tegak lurus dengan luas penampang sehingga fluens partikel tidak bergantung pada sudut datang radiasi. Satuan fluens partikel adalah m^{-2} .

2) Fluens Energi

Definisi yang mirip berlaku untuk fluens energi. Dalam hal ini, energi datang pada suatu bola hipotesis dengan luas penampang tertentu secara tegak lurus. Satuan fluens energi adalah J m^{-2} .

Namun, hampir semua foton atau berkas partikel sebenarnya bersifat polienenergetik. Oleh karena itu, konsep spektrum fluens partikel dan spektrum fluens energi kemudian digunakan untuk menggantikan konsep fluens partikel dan fluens energi.

3) Kerma dan Dosis Serap

Besaran fisik yang lain adalah kerma dan dosis serap. Kerma adalah singkatan dari *kinetic energy released per unit mass* atau energi kinetik yang dilepaskan per satuan massa. Besaran ini merupakan besaran yang berlaku untuk radiasi tak langsung, seperti foton dan neutron, dan menguantifikasi jumlah energi rata-rata yang dialihkan dari radiasi tak langsung ke radiasi langsung tanpa memedulikan apa yang terjadi setelah pengalihan berlangsung.

Dalam proses ini dapat dijelaskan bahwa energi foton diberikan ke suatu bahan melalui proses dua tahap. Pada tahap pertama, radiasi foton mengalihkan energinya sebagai energi kinetik ke partikel bermuatan sekunder (elektron) melalui tiga jenis interaksi foton (efek fotolistrik, efek Compton, dan produksi pasangan). Pada tahap kedua, partikel bermuatan mengalihkan energi kinetiknya dalam bentuk elektron dan positron ke bahan melalui proses eksitasi dan ionisasi. Kerma merupakan proses tahap pertama, sedangkan tahap kedua disebut sebagai dosis serap.

Jika pada proses pengalihan energi dari radiasi tak langsung ke suatu bahan merupakan proses tahap kedua, dosis serap merupakan tahapan langsung pengalihan energi pada radiasi langsung alfa dan

beta. Dosis serap didefinisikan sebagai energi rata-rata radiasi yang diserap pada suatu titik dari bahan per satuan massa bahan tersebut.

Pada sistem internasional (SI), kerma dan dosis serap masing-masing memiliki satuan joule per kilogram (J/kg). Satuan tersebut memiliki nama khusus gray (Gy).

b. Besaran Proteksi

Besaran proteksi adalah konsep besaran yang digunakan untuk tujuan penentuan nilai batas dosis dan terdiri atas dosis serap organ, dosis ekuivalen, dan dosis efektif. Besaran proteksi ini dikembangkan oleh Komisi Internasional untuk Proteksi Radiologik (International Commission on Radiological Protection, ICRP) dengan konsep yang saat ini masih digunakan adalah yang diberikan pada publikasi ICRP 103 yang terbit tahun 2007.

1) Dosis Serap Organ, D_T

Dosis serap organ, D_T , memiliki definisi yang hampir sama dengan dosis serap, kecuali ditetapkan dirata-ratakan ke seluruh jaringan atau organ. Oleh karena itu, dosis serap organ juga dapat disebut sebagai dosis serap rata-rata. Satuan dosis serap organ adalah J/kg atau Gy.

2) Dosis Ekuivalen, $H_{T,R}$

Penggunaan dosis rata-rata sebagai indikator peluang efek stokastik bergantung pula pada kelinieran hubungan dosis-tanggapan. Hubungan ini tidak linier untuk efek deterministik sehingga dosis serap rata-rata tidak serta-merta relevan untuk efek deterministik, kecuali jika dosisnya tersebar merata di seluruh jaringan atau organ.

Peluang terjadinya efek stokastik diketahui bergantung, tidak hanya pada dosis serap, tetapi juga pada jenis dan energi radiasi yang datang. Dosis serap dari radiasi yang berbeda akan memberikan efek biologis yang berbeda pula di dalam organ atau jaringan tubuh. Untuk memperhitungkan kedua parameter terakhir ini diperkenalkan faktor bobot radiasi, w_R . Dosis serap rata-rata dari radiasi R pada organ atau

jaringan T disebut dosis ekuivalen dan merupakan hasil kali dari dosis serap rata-rata dengan faktor bobot radiasi.

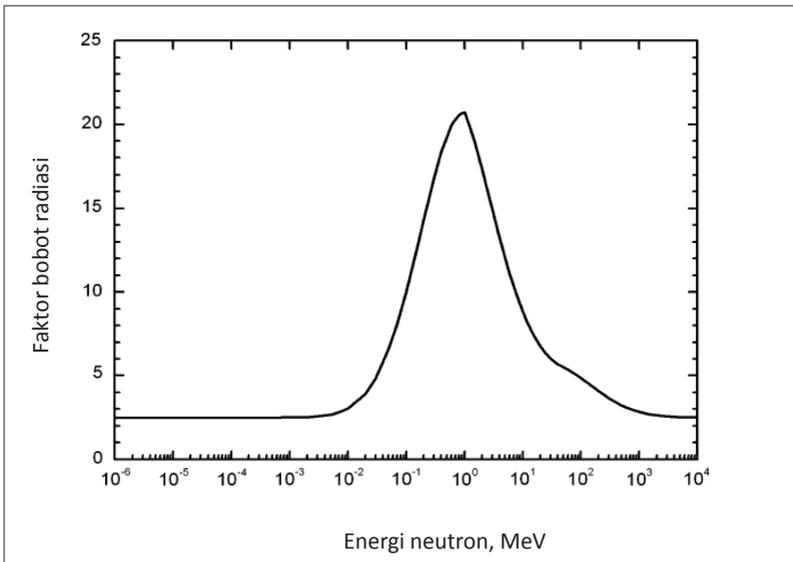
Satuan dosis ekuivalen dalam SI adalah joule per kilogram (J/kg), dengan nama khusus sievert (Sv). Satuan lama untuk dosis ekuivalen adalah rem, dengan $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. Tabel 3.2 memberikan faktor bobot radiasi yang diberikan oleh ICRP (2007) pada publikasi ICRP 103.

Tabel 3.2 Faktor Bobot Radiasi, w_R

Jenis Radiasi	Faktor Bobot Radiasi, w_R
Foton	1
Elektron, muon	1
Proton, pion bermuatan	2
Alfa, fragmen fisi, ion berat	20
Neutron	Fungsi energi neutron *)

Ket.: *) Lihat Gambar 3.1.

Sumber: ICRP (2007, 64)



Sumber: ICRP (2007, 66)

Gambar 3.1 Faktor Bobot Radiasi Neutron sebagai Fungsi Energi

3) Dosis Efektif, E

Karena hubungan antara peluang terjadinya efek stokastik dan dosis ekuivalen diketahui bergantung pula pada organ atau jaringan tersinar, besaran selanjutnya ditentukan untuk menunjukkan kombinasi berbagai dosis dengan berbagai jaringan yang berbeda sedemikian rupa sehingga berkorelasi langsung dengan efek stokastik total. Besaran ini disebut dosis efektif, E , dan merupakan hasil kali dosis ekuivalen di jaringan atau organ dengan faktor bobot jaringan yang sesuai. Tabel 3.3 memberikan faktor bobot radiasi yang diberikan oleh ICRP (2007) pada publikasi ICRP 103.

Tabel 3.3 Faktor Bobot Jaringan, w_T

Jaringan atau Organ	Faktor Bobot Jaringan, w_T
Gonad	0,08
Sumsum tulang (merah), kolon, paru-paru, lambung	0,12
Payudara	0,12
Bladder, esofagus, hati, tiroid	0,04
Permukaan tulang, kulit	0,01
Otak, kelenjar ludah	0,01
Jaringan sisa *)	0,12
Total	1,00

Ket.: *) Jaringan sisa: adrenalin, ekstratoraksik, *gall bladder*, jantung, ginjal, *lymph nodes*, otot, mukosa oral, prostat (laki), usus kecil, limpa, *thymus*, uterus/serviks (perempuan)

Sumber: ICRP (2007, 65)

Seperti dosis ekuivalen, satuan dosis efektif dalam SI adalah joule per kilogram (J/kg), dengan nama khusus sievert (Sv). Satuan lama untuk dosis ekuivalen adalah rem, dengan $1 Sv = 100 rem$.

c. Besaran Operasional

Besaran dosis operasional adalah besaran yang digunakan untuk tujuan praktis dalam proteksi radiasi eksternal dan terdiri atas besaran untuk tujuan pemantauan daerah kerja dan pemantauan individu.

1) Dosis Ekuivalen Ambien, $H^*(d)$

Dosis ekuivalen ambien, $H^*(d)$, adalah dosis ekuivalen yang digunakan untuk pemantauan daerah kerja dan untuk radiasi dengan daya tembus kuat seperti gamma dan neutron. Besaran ini dipandang telah memadai dalam memenuhi tujuan untuk memperkirakan pemenuhan nilai batas dosis yang berlaku. Kedalaman d yang direkomendasikan adalah 10 mm sehingga $H^*(d)$ ditulis sebagai $H^*(10)$.

2) Dosis Ekuivalen Berarah, $H'(d, \Omega)$

Dosis ekuivalen berarah, $H'(d, \Omega)$, adalah dosis ekuivalen yang juga digunakan pada pemantauan daerah kerja, tetapi berlaku hanya untuk radiasi tembus lemah, seperti beta dan sinar-X lemah. Kedalaman d yang direkomendasikan adalah 0,07 mm sehingga $H'(d, \Omega)$ ditulis sebagai $H'(0,07, \Omega)$.

3) Dosis Ekuivalen Perorangan, $H_p(d)$

Dosis ekuivalen perorangan, $H_p(d)$, adalah dosis ekuivalen pada jaringan di bawah titik tertentu tubuh pada kedalaman d . Besaran ini digunakan pada pemantauan radiasi perorangan, dan berlaku baik untuk radiasi tembus kuat maupun lemah. Untuk radiasi tembus kuat kedalaman yang direkomendasikan adalah 10 mm sehingga $H_p(d)$ ditulis sebagai $H_p(10)$, sedangkan untuk radiasi tembus lemah kedalamannya 0,07 mm sehingga $H_p(d)$ ditulis sebagai $H_p(0,07)$.

Untuk lensa mata, kedalaman yang direkomendasikan adalah 3 mm sehingga $H_p(d)$ ditulis sebagai $H_p(3)$. Penempatan alat ukur untuk $H_p(3)$ ini sangat penting terutama dalam kaitannya dengan pengukuran dosis pada lensa mata yang dapat diterima oleh pekerja medis pada pemeriksaan fluoroskopi atau intervensional.

4) Besaran Operasional Mutakhir

Besaran operasional yang diuraikan di atas merupakan besaran operasional yang dikembangkan dan diperkenalkan oleh International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) hingga tahun 1993 melalui ICRU Report 51. Pada tahun 2020, ICRU

mengeluarkan ICRU Report 95 yang memberi paradigma baru dalam definisi besaran operasional untuk mengakomodasi kebutuhan akan penambahan jenis dan energi radiasi yang dapat diukur.

Dengan paradigma baru ini, dosis ambien, H^* , pada suatu titik pada medan radiasi, adalah hasil kali fluens partikel pada titik tersebut, F , dengan koefisien konversi, h^* . Koefisien konversi ini menghubungkan fluens partikel dengan nilai maksimum dosis efektif, E_{maks} , untuk berbagai kondisi penyinaran.

Beberapa definisi baru yang lain adalah sebagai berikut.

- 1) Dosis serap berarah pada lensa mata, $D'_{\text{lens}}(\Omega)$, pada suatu titik pada medan radiasi dengan arah datang tertentu, Ω , adalah hasil kali fluens partikel pada titik tersebut, $F(\Omega)$, dengan koefisien konversi, $d'_{\text{lens}}(\Omega)$. Koefisien konversi ini menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis serap pada lensa mata.
- 2) Dosis serap berarah pada kulit lokal, $D'_{\text{kulit lokal},i}(\Omega)$, pada suatu titik pada medan radiasi dengan arah datang tertentu, Ω , adalah hasil kali fluens partikel pada titik tersebut, $\Phi(\Omega)$, dengan koefisien konversi, $d'_{\text{kulit lokal}}(\Omega)$. Koefisien konversi ini menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis serap pada kulit lokal.
- 3) Dosis perorangan, H_p , pada suatu titik pada tubuh adalah hasil kali fluens partikel yang datang pada titik tersebut, F , dengan koefisien konversi, h_p . Koefisien konversi menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis efektif, E .
- 4) Dosis serap perorangan pada lensa mata, $D_{\text{p lensa}}$, pada suatu titik pada kepala atau tubuh adalah hasil kali fluens partikel yang datang pada titik tersebut, Φ , dengan koefisien konversi, $d_{\text{p lensa}}$. Koefisien konversi menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis serap pada lensa mata.
- 5) Dosis serap perorangan pada kulit lokal, $D_{\text{p kulit lokal}}$, adalah hasil kali fluens partikel yang datang pada tubuh atau ekstremitas, Φ , dengan koefisien konversi, $d_{\text{p kulit lokal}}$. Koefisien konversi menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis serap pada kulit lokal.

Hubungan antara besaran proteksi dan besaran operasional baru ini diberikan pada Tabel 3.4. Fantom komputasi yang digunakan untuk menghitung koefisien konversi untuk besaran operasional ini diberikan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.4 Hubungan Besaran Proteksi dengan Besaran Operasional Baru

	Sekujur	Lensa Mata	Kulit Lokal
Besaran proteksi	Dosis efektif, E	Dosis ekuivalen pada lensa mata, $H_{T \text{ lensa}}$	Dosis ekuivalen pada kulit lokal, $H_{T \text{ kulit lokal}}$
Besaran operasional:			
Pemantauan area	Dosis ambien, H^*	Dosis serap berarah pada lensa mata, $D'_{\text{lensa}}(\Omega)$	Dosis serap berarah pada kulit lokal, $D'_{\text{kulit lokal}}(\Omega)$
Pemantauan perorangan	Dosis perorangan, H_p	Dosis serap perorangan pada lensa mata, $D_{p \text{ lensa}}$	Dosis serap perorangan pada kulit lokal, $D_{p \text{ kulit lokal}}$

Sumber: International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU, 2020, 29)

Tabel 3.5 Fantom yang Digunakan untuk Menghitung Koefisien Konversi dari Besaran Lapangan (Fluens, Kerma Udara) untuk Besaran Proteksi dan Besaran Operasional Baru

	Sekujur	Lensa Mata	Kulit Lokal
Besaran proteksi	Fantom acuan dewasa ICRP/ICRU sekujur	Model mata terpasang pada fantom sekujur	Fantom jaringan kulit 100 mm × 100 mm
Besaran operasional:			
Pemantauan area	Fantom acuan dewasa ICRP/ICRU sekujur	Model mata terpasang pada fantom sekujur	Fantom slab*: Jaringan ICRU 300 m × 300 mm × 148 mm, permukaan depannya ditutup dengan kulit 2 mm
Pemantauan perorangan	Fantom acuan dewasa ICRP/ICRU sekujur	Model mata terpasang pada fantom sekujur	Fantom slab*: Jaringan ICRU 300 m × 300 mm × 148 mm, permukaan depannya ditutup dengan kulit 2 mm

Sekujur	Lensa Mata	Kulit Lokal
		Fantom pilar ^a : Jaringan ICRU Ø69 mm × 300 mm, permukaan silindrisnya ditutup dengan kulit ICRP 2 mm
		Fantom batang ^a : Jaringan ICRU Ø15 mm × 300 mm, permukaan silindrisnya ditutup dengan kulit ICRP 2 mm

Ket.: ^a *Scoring* dalam silinder kulit ICRP dengan luas penampang 1 cm², sumbu tegak lurus terhadap permukaan, kedalaman antara dari 50 µm hingga 100 µm, di tengah permukaan fantom.

Sumber: ICRU (2020, 29)

5) Koefisien Konversi

Koefisien konversi menghubungkan besaran proteksi dan operasional ke besaran dosimetri yang mencirikan medan radiasi yang ada. Dalam praktiknya, besaran yang biasa digunakan atau dihitung pada proteksi radiasi eksternal adalah fluens partikel, Φ , dari suatu jenis radiasi. Untuk foton, kerma udara di udara bebas, K_{udara} , juga dapat digunakan.

Dosis efektif, E , dapat dihubungkan dengan fluens partikel dengan koefisien konversi yang tepat. Koefisien konversi untuk besaran operasional yang lama telah diberikan pada publikasi ICRP 116 (2010), sementara ICRU Report 95 (2020) memberikan koefisien konversi untuk besaran operasional yang baru.

Koefisien konversi dari fluens ke besaran operasional dan dari kerma udara ke besaran operasional untuk foton, yang diberikan oleh ICRU (2020) pada ICRU Report 95 terdiri atas:

- dosis ambien;
- dosis perorangan;
- dosis serap berarah dan perorangan pada lensa mata;
- dosis serap berarah dan perorangan pada kulit lokal;
- besaran operasional untuk foton untuk energi hingga 50 MeV pada medan dengan kesetimbangan partikel bermuatan;
- kerma udara;

- g. dosis serap berarah dan perorangan pada lensa mata, dosis serap pada sel sensitif, $D_{\text{lensa sensitif}}$; dan
- h. foton dengan energi hingga 50 MeV pada medan dengan keseimbangan partikel bermuatan.

B. Proteksi Radiasi Eksternal

Proteksi radiasi eksternal adalah upaya proteksi terhadap segala macam sumber radiasi yang berada di luar tubuh manusia. Dapat dilakukan dengan menggunakan satu atau beberapa teknik, yaitu membatasi waktu pajanan, memperbesar jarak dari sumber, dan menggunakan penahan radiasi.

1. Waktu Pajanan

Pembatasan waktu pajanan untuk mengurangi bahaya radiasi eksternal didasarkan pada asumsi bahwa untuk suatu laju dosis yang konstan, dosis serap total sebanding dengan lamanya pajanan, atau

$$\text{Laju pajanan} \times \text{lama pajanan} = \text{dosis total}$$

Dengan demikian, jika harus bekerja pada medan radiasi yang tinggi, pembatasan waktu pajanan harus dilakukan agar perkalian laju dosis dengan waktu pajanan tidak melebihi NBD yang berlaku. Jika, misalnya, seorang operator pesawat sinar-X diagnostik harus melakukan pekerjaan 5 hari seminggu pada medan radiasi sebesar 0,12 mSv/jam, pajanan berlebih dapat dicegah dengan membatasi waktu kerjanya hanya 40 menit per hari. Dengan pembatasan waktu kerja ini, dosis yang diterima dalam satu hari menjadi 0,08 mSv sehingga NBD per tahun sebesar 20 mSv tidak dilampaui (satu tahun kerja diasumsikan sama dengan 50 minggu). Jika volume pekerjaan membutuhkan waktu pajanan yang lebih panjang, hal tersebut dapat dilaksanakan oleh dua orang pekerja secara bergiliran atau operasi kerja harus diubah agar intensitas medan radiasi dapat diturunkan.

2. Jarak dari Sumber

Jika lama operasi kerja sudah ditentukan, upaya pengurangan bahaya radiasi eksternal dapat dilakukan dengan sedapat mungkin bekerja pada jarak yang sebesar-besarnya dari sumber. Untuk suatu sumber radiasi gamma berbentuk titik, atau jika jarak dari sumber gamma lebih dari sepuluh kali dimensi linier sumber yang terbesar, variasi laju dosis dengan jarak diberikan secara sederhana sebagai:

$$\frac{\dot{D}_1}{\dot{D}_2} = d_2^2/d_1^2$$

dengan \dot{D}_1 dan \dot{D}_2 adalah laju dosis di titik 1 dan 2, sedangkan d_1 dan d_2 adalah jarak dari sumber di titik 1 dan 2. Rumusan sederhana ini disebut sebagai hukum kebalikan jarak pangkat dua.

3. Penahan Radiasi

Bergantung pada jenis radiasinya, penahan radiasi dapat dibedakan atas penahan radiasi alfa, penahan radiasi beta, penahan radiasi gamma, dan penahan radiasi sinar-X. Ketebalan masing-masing penahan akan bergantung pada jarak jangkauan radiasi di media yang dilaluinya.

a. Penahan Radiasi Alfa

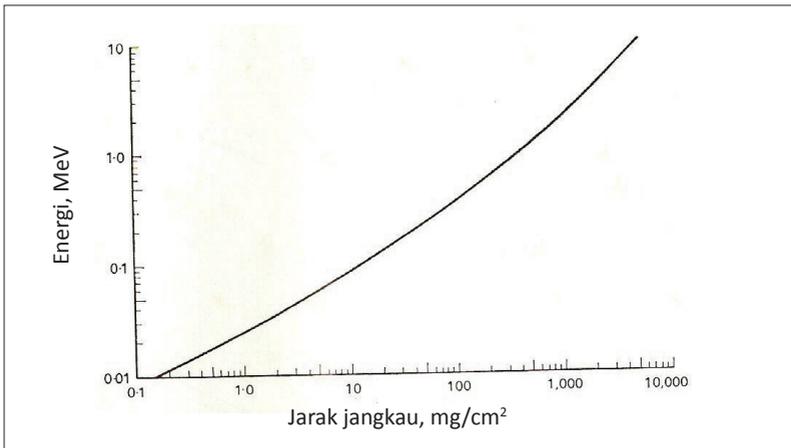
Energi kinetik partikel alfa yang dipancarkan selama peluruhan radioaktif umumnya memiliki jarak jangkauan sangat pendek. Dengan jarak jangkauan yang pendek itu, pajanan eksternal partikel alfa dapat ditahan cukup dengan selembar kertas atau bahan lain dengan ketebalan yang cukup tipis. Dengan kata lain, partikel alfa bukan merupakan persoalan dalam proteksi radiasi eksternal.

b. Penahan Radiasi Beta

Secara umum, radiasi beta dapat ditahan oleh selembar aluminium. Untuk perhitungan yang lebih teliti, tebal penahan radiasi dapat ditentukan dengan menggunakan kurva universal hubungan energi

beta (dalam MeV) dan jarak jangkauan partikel beta (mg/cm^2) seperti terlihat pada Gambar 3.2.

Jika energi beta diketahui, jarak jangkauannya dapat diperkirakan dengan bantuan Gambar 3.2. Tebal penahan beta (dalam cm) selanjutnya dengan sederhana dapat dihitung dengan membagi nilai jarak jangkauan (mg/cm^2) dengan kerapatan bahan (mg/cm^3). Bahan yang umumnya dipakai adalah bahan dengan nomor atom Z yang rendah seperti polietilen.



Sumber: Cember dan Johnson (2009, 147)

Gambar 3.2 Kurva Jarak Jangkauan vs. Energi untuk Partikel Beta

c. Penahan Radiasi Gamma

Tidak seperti radiasi alfa dan beta, radiasi gamma memiliki jarak jangkauan yang lebih jauh. Oleh karena itu, radiasi gamma hanya dapat dihentikan oleh bahan yang cukup tebal, seperti timbal (Pb).

Konsep lapisan nilai paro sangat berguna dalam perhitungan penahan radiasi gamma. Lapisan nilai paro (*half value layer*, HVL) adalah tebal yang diperlukan untuk mengurangi intensitas menjadi separuh dari intensitas awal. Dengan demikian, satu HVL mengurangi intensitas menjadi separuhnya, dua HVL menjadi seperempatnya, tiga HVL menjadi seperdelapannya, dan seterusnya.

Selain itu, diberikan pula lapisan nilai sepersepuluh (*tenth value layer*, TVL). TVL adalah tebal yang akan mengurangi intensitas awal menjadi sepersepuluhnya.

d. Penahan Sinar-X

Penahan sinar-X terdiri atas dua kategori, yaitu penahan sumber dan penahan struktur. Penahan sumber biasanya disediakan oleh pembuat pesawat sinar-X dalam bentuk penahan timbal di mana tabung pesawat ditempatkan. Sementara itu, penahan struktur dirancang untuk melindungi bahaya akibat berkas langsung sinar X, radiasi bocor, dan radiasi hamburnya.

Penahan struktur untuk melindungi bahaya akibat berkas langsung disebut sebagai penahan radiasi primer, sedangkan penahan radiasi bocor dan hambur disebut sebagai penahan radiasi sekunder. Dalam merancang penahan struktur ini digunakan konsep nilai batas dosis dalam perhitungannya. Nilai batas dosis yang digunakan bergantung pada ruangan atau daerah di balik penahan. Jika ruangan di balik penahan digunakan untuk staf, nilai batas dosis yang digunakan adalah 20 mSv per tahun, atau untuk keperluan perhitungan praktis dengan proses optimisasi proteksi menjadi 0,1 mGy per minggu. Sementara itu, jika daerah di balik penahan digunakan oleh masyarakat umum, nilai batas dosis yang digunakan adalah 1 mSv per tahun, atau untuk keperluan perhitungan praktis menjadi 0,02 mGy per minggu.

Beberapa parameter yang digunakan dalam perhitungan tebal penahan struktur ialah:

- 1) tegangan maksimum (kV) operasi tabung pesawat sinar-X;
- 2) arus maksimum (mA) operasi pesawat sinar-X;
- 3) beban kerja (W), yang merupakan ukuran penggunaan pesawat sinar-X (biasanya dinyatakan dalam satuan mA-menit per minggu);
- 4) faktor guna (U), yang merupakan fraksi beban kerja selama berkas utama ditujukan pada target; dan
- 5) faktor okupansi (T), yaitu faktor pengubah beban kerja untuk mengoreksi derajat atau jenis okupansi di daerah yang dihitung.

C. Proteksi Radiasi Internal

Bahaya radiasi internal dapat timbul akibat penggunaan sumber radiasi terbuka, yaitu sumber yang tidak terikat dalam suatu bahan atau terbungkus oleh suatu wadah tertutup yang cukup kuat. Bahan radioaktif yang terlepas dari sumber terbuka ini disebut sebagai kontaminan, sedangkan peristiwanya disebut kontaminasi.

Jika suatu bahan radioaktif masuk ke dalam tubuh manusia, bahan tersebut akan terus menyinari tubuh sampai radioaktivitasnya meluruh atau tubuh mengeluarkan bahan tersebut. Laju peluruhan radioaktif bergantung pada waktu paro, yang bervariasi dari sekitar nano detik sampai ribuan tahun. Sementara itu, laju keluaran bahan dari tubuh bergantung pada sejumlah variabel, seperti komposisi kimia bahan dan laju perpindahan dari satu organ ke organ lain, dan dapat berlangsung dalam beberapa hari sampai tahunan. Dengan demikian, penyinaran tubuh oleh kontaminasi dapat berlangsung cepat dalam beberapa hari atau cukup lama sampai puluhan tahun.

Bahan radioaktif, seperti halnya agen toksik yang lain, dapat masuk ke dalam tubuh melalui tiga jalan, yaitu

- 1) inhalasi—melalui penghirupan debu atau gas;
- 2) ingesi—melalui makanan atau minuman terkontaminasi yang masuk melalui mulut; dan
- 3) penyerapan melalui kulit atau luka yang terbuka.

Dengan demikian, proteksi radiasi internal dapat dilakukan dengan menutup jalan masuk ke dalam tubuh atau dengan menghalangi kemungkinan diteruskannya radioaktivitas dari sumber ke manusia. Upaya penghalangan dapat dilakukan pada sumber—dengan cara menutup atau mengikat sumber, dengan mengendalikan lingkungan—dengan menggunakan ventilasi dan rancangan ruangan yang baik, atau pada manusianya sendiri—dengan menggunakan pakaian pelindung dan peralatan pelindung lain, seperti respirator.

D. Persyaratan Perundang-undangan

Undang-Undang (UU) Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenag nukliran merupakan peraturan tertinggi dalam penerapan ketenag nukliran di Indonesia. Dalam hal proteksi dan keselamatan radiasi, pasal 16 UU No. 10 Tahun 1997 ini menyatakan bahwa “setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketenteraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup”.

Ketentuan pada pasal 16 UU No. 10 Tahun 1997 kemudian diuraikan dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif. PP No. 33 Tahun 2007 ini mengatur keselamatan radiasi terhadap pekerja, masyarakat, lingkungan hidup, keamanan sumber radioaktif, dan inspeksi dalam pemanfaatan tenaga nuklir.

Beberapa Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Perka BAPETEN, sampai tahun 2017) atau Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (PerBAPETEN, sejak tahun 2018) selanjutnya menjadi peraturan pelaksana dari PP No. 33 Tahun 2007. Peraturan pelaksana tersebut, yaitu

- 1) Perka BAPETEN Nomor 6 Tahun 2010 tentang Pemantauan Kesehatan Untuk Pekerja Radiasi, yang mewajibkan pemegang izin menyelenggarakan pemantauan kesehatan bagi pekerja radiasi yang ada di tempat kerjanya;
- 2) Perka BAPETEN Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir, yang mengatur persyaratan izin, persyaratan keselamatan radiasi, intervensi, rekaman dan laporan dalam kegiatan penggunaan kedokteran nuklir;
- 3) Perka BAPETEN Nomor 3 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Radioterapi, yang mengatur persyaratan izin, persyaratan keselamatan radiasi, intervensi, dan rekaman dan laporan dalam penggunaan radioterapi;
- 4) Perka BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam pemanfaatan Tenaga Nuklir, yang mengatur penanggung jawab keselamatan radiasi, penerapan per-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

- syarat proteksi radiasi, dan program proteksi dan keselamatan radiasi dalam pemanfaatan tenaga nuklir;
- 5) Perka BAPETEN Nomor 6 Tahun 2015 tentang Keamanan Sumber Radioaktif, yang mengatur ketentuan mengenai kategori sumber radioaktif dan tingkat keamanan sumber radioaktif, persyaratan izin dan persyaratan persetujuan, upaya keamanan sumber radioaktif, dan rekaman dan laporan;
 - 6) PerBAPETEN Nomor 2 Tahun 2018 tentang Uji Kesesuaian Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional, yang mengatur kewajiban uji kesesuaian, lembaga uji kesesuaian, tata laksana penunjukan lembaga uji kesesuaian, survailen, pelatihan uji kesesuaian, rekaman dan laporan, dan sanksi administratif; dan
 - 7) PerBAPETEN Nomor 4 Tahun 2020 tentang Keselamatan Radiasi pada Penggunaan Pesawat Sinar-X dalam Radiologi Diagnostik dan Intervensional, yang mengatur persyaratan keselamatan radiasi yang harus dipenuhi oleh pemegang izin pada penggunaan pesawat sinar-X dalam radiologi diagnostik dan radiologi intervensional.

1. Petugas Proteksi Radiasi

Petugas proteksi radiasi (PPR) adalah seseorang yang secara teknis kompeten dalam menangani isu-isu proteksi radiasi yang relevan untuk jenis pemanfaatan tertentu yang ditunjuk oleh pendaftar, pemegang izin lisensi atau pemberi kerja untuk mengawasi penerapan persyaratan peraturan (IAEA, 2014, 410). Berdasarkan peraturan perundangan di Indonesia, PPR didefinisikan sebagai petugas yang ditunjuk oleh pemegang izin dan oleh BAPETEN dinyatakan mampu melaksanakan pekerjaan yang berhubungan dengan proteksi radiasi (PP No. 33, 2007).

Tanggung jawab PPR di Indonesia secara rinci adalah (Perka BAPETEN No.4, 2013):

- 1) mengawasi pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi;

- 2) mengkaji ulang efektivitas penerapan program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 3) memberikan instruksi teknis dan administratif secara lisan atau tertulis kepada pekerja radiasi tentang pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 4) mengidentifikasi kebutuhan dan mengorganisasi kegiatan pelatihan;
- 5) memastikan ketersediaan dan kelayakan perlengkapan proteksi radiasi dan memantau pemakaiannya;
- 6) membuat dan memelihara rekaman dosis yang diterima oleh pekerja radiasi;
- 7) melaporkan kepada pemegang izin jika pekerja radiasi menerima dosis melebihi pembatas (atau penghambat) dosis;
- 8) memberitahukan kepada pekerja radiasi mengenai hasil evaluasi pemantauan dosis;
- 9) membuat dokumen yang berhubungan dengan proteksi radiasi;
- 10) melakukan kendali akses di daerah pengendalian;
- 11) melaksanakan latihan penanggulangan dan pencarian fakta dalam hal kedaruratan; dan
- 12) memberikan konsultasi yang terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi di instalasinya.

2. Pembagian Daerah Kerja

Pembagian daerah kerja merupakan salah satu cara dalam memastikan bahwa nilai batas dosis tidak akan terlampaui. Daerah kerja dapat dibedakan atas daerah pengendalian dan daerah supervisi.

Daerah pengendalian adalah suatu daerah kerja yang memerlukan tindakan proteksi dan ketentuan keselamatan khusus untuk mengendalikan pajanan normal atau mencegah penyebaran kontaminasi selama kondisi pajanan normal, dan untuk mencegah atau membatasi tingkat pajanan potensial (Perka BAPETEN No. 4, 2013). Secara sederhana, daerah pengendalian adalah daerah yang pekerja radiasinya mungkin dapat menerima dosis sama dengan atau lebih besar dari 3/10 nilai batas dosis.

Tindakan proteksi dan keselamatan radiasi di daerah pengendalian meliputi (Perka BAPETEN No. 4, 2013):

- 1) menandai dan membatasi daerah pengendalian dengan tanda fisik yang jelas;
- 2) memasang atau menempatkan tanda peringatan dan petunjuk pada titik akses dan lokasi lain yang dianggap perlu;
- 3) membatasi akses ke daerah pengendalian hanya untuk pekerja radiasi dan pengunjung yang masuk ke daerah pengendalian didampingi oleh PPR;
- 4) menyediakan peralatan pemantauan, peralatan protektif radiasi (misalnya: apron, jas laboratorium, alat pelindung napas, sarung tangan, *glove box*) dan tempat penyimpanan pakaian di pintu masuk daerah pengendalian; dan
- 5) menyediakan sarana pada pintu keluar daerah pengendalian, yang meliputi (a) peralatan pemantauan kontaminasi kulit dan pakaian, (b) peralatan pemantau kontaminasi terhadap benda atau zat dipindahkan dari daerah pengendalian, (c) fasilitas mencuci dan mandi untuk dekontaminasi, dan (d) tempat penyimpanan untuk peralatan protektif radiasi yang terkena kontaminasi.

Daerah supervisi adalah daerah kerja di luar daerah pengendalian yang memerlukan peninjauan terhadap paparan kerja dan tidak memerlukan tindakan proteksi atau ketentuan keselamatan khusus (Perka BAPETEN No. 4, 2013) Secara sederhana, daerah supervisi adalah daerah kerja yang pekerja radiasinya menerima dosis lebih kecil dari 3/10 nilai batas dosis.

Penetapan daerah supervisi dilakukan dengan mempertimbangkan sifat dan besarnya bahaya radiasi. Daerah supervisi selanjutnya harus ditandai dan dibatasi dengan tanda yang jelas, dipasang tanda di titik akses masuknya, dan dilakukan kaji ulang radiologik apabila ada indikasi perlunya perubahan terhadap tindakan proteksi dan keselamatan atau batas daerah supervisi.

3. Pemantauan Paparan Daerah Kerja dan/atau Kontaminasi di Daerah Kerja

Pemantauan paparan daerah kerja dan/atau kontaminasi di daerah kerja dilakukan sebagai bagian dari upaya untuk memastikan tidak dilampauinya nilai batas dosis oleh pekerja radiasi. Pemantauan paparan kerja meliputi pemantauan terhadap paparan radiasi eksternal, kontaminasi permukaan, dan/atau kontaminasi udara. Untuk ini diperlukan peralatan seperti alat ukur laju dosis atau dosis, alat ukur kontaminasi udara, dan/atau alat ukur kontaminasi permukaan.

Pemantauan paparan daerah kerja radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja dapat dilakukan secara terus-menerus, berkala, dan/atau sewaktu-waktu. Periode pemantauan yang ditentukan oleh pemegang izin harus mendapat persetujuan Badan Pengawas dengan mempertimbangkan jenis dan risiko pemanfaatan tenaga nuklir yang dilakukan.

4. Pemantauan Radioaktivitas Lingkungan di Luar Fasilitas atau Instalasi

Pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas atau instalasi dilakukan sebagai bagian dari upaya untuk memastikan tidak dilampauinya nilai batas dosis bagi masyarakat umum. Oleh karena itu, pemantauan radioaktivitas lingkungan hanya dilakukan jika kegiatan fasilitas atau instalasi diperkirakan akan melepaskan radioaktivitas ke lingkungan di sekitarnya.

Pemantauan radioaktivitas lingkungan meliputi pemantauan terhadap kontaminasi udara, kontaminasi air, kontaminasi tanah, kontaminasi biota, dan/atau kontaminasi permukaan. Alat yang diperlukan untuk keperluan ini meliputi alat ukur kontaminasi udara, pencacah latar belakang rendah, spektrometer alfa, dan spektrometer gamma.

Pemantauan radioaktivitas lingkungan ini harus dilakukan sesuai dengan Rencana Pengelolaan Lingkungan (RKL) dan Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL). RKL dan RPL itu sendiri merupakan

bagian dari persyaratan untuk memperoleh izin lingkungan jika ingin melakukan suatu usaha dan/atau kegiatan berskala besar. Di bidang ketenaganukliran, usaha dan/atau kegiatan tersebut meliputi pembangunan dan pengoperasian reaktor nuklir, pembangunan dan pengoperasian instalasi nuklir nonreaktor, pembangunan dan pengoperasian instalasi pengelolaan limbah radioaktif, dan produksi radioisotop yang berasal dari reaksi fisi.

5. Pemantauan Dosis yang Diterima Pekerja Radiasi

Pemantauan dosis pekerja juga merupakan salah satu cara dalam memastikan bahwa nilai batas dosis untuk pekerja radiasi tidak terlampaui. Pemantauan dosis pekerja dilaksanakan secara rutin dan khusus.

Pemantauan dosis pekerja secara rutin dilakukan dengan menggunakan peralatan dosimeter perorangan. Periode pemakaian peralatan ini disesuaikan dengan kemampuan teknisnya, misalnya jika menggunakan dosimeter film periode pemakaiannya adalah satu bulan, sementara TLD digunakan selama tiga bulan. Setiap pekerja harus memiliki dua buah dosimeter perorangan yang bergantian digunakan dan dianalisis hasil bacaannya setiap tiga bulan.

Sementara itu, pemantauan dosis pekerja secara khusus dilakukan pada saat komisioning, pengujian setelah dilakukan modifikasi fasilitas atau instalasi atau perubahan prosedur operasi, pengujian terhadap program pemantauan rutin, dekomisioning, dan/atau penanganan kondisi abnormal/insiden. Selain peralatan pemantauan perorangan film atau TLD, peralatan pemantauan perorangan yang bisa dibaca langsung umumnya digunakan untuk keperluan pemantauan khusus ini.

6. Pemantauan Kesehatan Pekerja Radiasi

Pemantauan kesehatan pekerja radiasi didasarkan pada prinsip-prinsip pemeriksaan kesehatan pada umumnya. Pemantauan kesehatan ini meliputi pemeriksaan kesehatan, konseling, dan/atau penatalaksana-

an kesehatan pekerja yang mendapatkan pajanan radiasi berlebih. Ketentuan terkait pemantauan kesehatan pekerja radiasi telah diatur, baik pada tingkat pemerintah pusat (Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007) maupun pada tingkat lembaga (Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2010).

Pemeriksaan kesehatan secara umum dapat dibedakan atas pemeriksaan kesehatan umum dan pemeriksaan kesehatan khusus. Pemeriksaan kesehatan umum dilaksanakan pada saat sebelum bekerja, selama bekerja, dan pada saat akan memutuskan hubungan kerja. Hasil pemeriksaan kesehatan berlaku paling lama satu tahun sejak tanggal pemeriksaan kesehatan dilakukan. Pemeriksaan kesehatan khusus, sementara itu, harus dilaksanakan pada saat pekerja radiasi mengalami atau diduga mengalami gejala sakit akibat radiasi dan penatalaksanaan kesehatan pekerja yang mendapatkan pajanan radiasi berlebih.

Konseling dilaksanakan melalui pemeriksaan psikologi dan/atau konsultasi. Konseling diberikan kepada pekerja wanita yang sedang hamil atau diduga hamil, pekerja wanita yang sedang menyusui, pekerja yang menerima pajanan radiasi berlebih, dan pekerja yang ingin mengetahui tentang pajanan radiasi yang diterimanya. Sementara itu, penatalaksanaan kesehatan pekerja yang mendapatkan pajanan radiasi berlebih dilaksanakan melalui kajian terhadap dosis yang diterima, konseling, dan pemeriksaan kesehatan serta tindak lanjut.

7. Penghambat Dosis dan Tingkat Panduan Diagnostik

Penghambat dosis, atau pembatas dosis¹, dan tingkat panduan diagnostik merupakan dua teknik yang digunakan untuk tujuan optimisasi.

¹ Pembatas dosis adalah istilah yang digunakan sebagai terjemahan kata *dose constraint* pada Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif. Istilah “pembatas dosis” cukup membingungkan karena akan rancu dengan istilah “nilai batas dosis” yang merupakan terjemahan dari *dose limit*. Untuk menghilangkan kerancuan tersebut penulis memilih menggunakan istilah “penghambat dosis”

Penghambat dosis adalah batas atas prospektif dosis pekerja radiasi dan anggota masyarakat yang nilainya lebih kecil dari nilai batas dosis, sedangkan tingkat acuan diagnostik hanya diperuntukkan bagi pajanan medis dalam radiologi diagnostik, intervensional, dan kedokteran nuklir.

a. Penghambat Dosis

Penghambat dosis merupakan nilai dosis yang besarnya ditetapkan oleh pemegang izin pemanfaatan tenaga nuklir pada tahap desain yang diterapkan pada saat konstruksi, pada tahap operasi jika terjadi perubahan prosedur operasi dari sebelumnya, dan pada tahap dekomisioning. Jika dalam tahap perencanaan kegiatan yang akan memanfaatkan tenaga nuklir dijumpai bahwa dosis radiasi yang terjadi akan lebih besar dari penghambat dosis, rencana kegiatan tersebut harus dihentikan atau tidak jadi dilaksanakan.

Penghambat dosis tidak perlu dikaji ulang jika fasilitas atau instalasi berjalan dengan rutin dan juga tidak perlu dilakukan pada tahap komisioning yang mestinya sudah tercakup pada tahap desain. Namun, nilai penghambat dosis yang ditetapkan pemegang izin harus mendapat persetujuan Badan Pengawas sebelum diterapkan secara resmi pada fasilitas atau instalasinya.

Penghambat dosis diterapkan pada situasi pajanan terencana, sementara untuk situasi pajanan darurat dan eksisting diterapkan konsep tingkat acuan. Di Indonesia, ketentuan terkait penghambat dosis diberikan secara umum pada Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 dan lebih rinci pada Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013. Namun, konsep tingkat acuan dalam situasi pajanan darurat dan eksisting sampai saat ini belum diatur.

b. Tingkat Panduan Diagnostik

Tingkat panduan diagnostik (*diagnostic reference level*, DRL) merupakan alat penting yang digunakan dalam proses optimisasi proteksi dan keselamatan pada aplikasi radiasi di bidang medis. DRL diberikan

dan bukan “pembatas dosis” sesuai dengan fungsinya, yaitu menghambat agar nilai batas dosis tidak dicapai.

dalam bentuk nilai dosis pada pajanan medis radiologi diagnostik dan intervensional serta nilai aktivitas radiofarmaka pada kedokteran nuklir untuk menunjukkan bahwa pajanan radiasi atau radiofarmaka yang diberikan untuk suatu prosedur medis lebih rendah atau lebih tinggi dari yang semestinya untuk prosedur tersebut.

Jika nilai DRL untuk suatu prosedur dilampaui, suatu penyelidikan terkait teknik radiografi atau kinerja peralatan harus segera dilakukan untuk menentukan penyebabnya. Jika tindakan korektif diperlukan, rencana perbaikan yang telah disiapkan sebelumnya harus segera dilaksanakan.

DRL tidak dimaksudkan untuk digunakan sebagai tingkat pemicu diaktifkannya alarm untuk suatu individu pasien atau suatu pemeriksaan tertentu. DRL juga bukan nilai batas dosis.

Untuk kondisi Indonesia, BAPETEN telah menetapkan tingkat panduan diagnostik yang berlaku di Indonesia untuk kelompok usia di atas 15 tahun. Tabel 3.6, Tabel 3.7, Tabel 3.8, dan Tabel 3.9 masing-masing memberikan tingkat panduan diagnostik untuk *CT scan*, radiografi umum, kedokteran nuklir diagnostik, dan fluoroskopi intervensional.

Tabel 3.6 Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk *CT Scan*

Jenis pemeriksaan	CTDIvol (mGy)*	DLP (mGy.cm)**
CT abdomen kontras	20	1360
CT abdomen nonkontras	17	885
CT abdo pelvis kontras	16	1775
CT abdo pelvis nonkontras	17	885
CT cardiac studies kontras	47	1200
CT chest kontras	16	810
CT chest nonkontras	11	430
CT head kontras	60	2500
CT head nonkontras	60	1275
CT neck kontras	50	2600
CT urologi nonkontras	17	830

Ket.:

* Nilai CTDIvol merupakan rerata dari serial pemindaian setiap pasien.

** Nilai DLP merupakan total nilai DLP dari serial pemindaian setiap pasien.

Sumber: Keputusan Kepala BAPETEN Nomor 1211/K/V/2021 (2021)

Tabel 3.7 Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Radiografi Umum

Jenis Pemeriksaan	ESAK (mGy)*	INAK (mGy)**
Abdomen AP	2,0	1,4
Ankle joint AP	0,2	0,1
Antebrachia AP	0,1	0,1
BNO AP	1,7	1,3
Chest AP	0,4	0,3
Chest PA	0,4	0,3
Cervical LAT	1,4	1,0
Cervical AP	0,7	0,5
Femur AP	0,5	0,4
Genu AP	0,4	0,3
Genu LAT	0,4	0,3
Lumbar spine AP	2,0	1,4
Lumbar spine LAT	4,4	3,1
Manus AP	0,2	0,1
Pedis AP	0,2	0,2
Pelvis AP	1,8	1,4
Shoulder	0,4	0,3
Skull AP	1,3	0,9
Skull LAT	1,2	0,9
GR-cruris/tibia fibula	0,3	0,2
Wrist joint AP	0,2	0,2
Waters	1,7	1,2

Ket.:

* ESAK, *Entrance Surface Air Kerma*, kerma udara dengan hamburan balik. Nilai ESAK diperoleh dengan mempertimbangkan faktor hamburan balik sebesar 1,35.

** INAK, *Incident Air Kerma*, kerma udara tanpa hamburan balik.

Sumber: Keputusan Kepala BAPETEN No.1211/K/V/2021 (2021)

Tabel 3.8 Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Kedokteran Nuklir Diagnostik

Jenis Pemeriksaan	Radiofarmaka	Aktivitas (MBq)
PET tumor	¹⁸ F FDG	340
Thyroid scan	^{99m} Tc pertechnetate	170
Thyroid WBS scan	¹³¹ I iodide	150
WBS scan	^{99m} Tc MIBI	1030
Renal scan	^{99m} Tc DTPA	200

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Jenis Pemeriksaan	Radiofarmaka	Aktivitas (MBq)
Myocardial Perfusion Imaging (MPI) stress*	^{99m} Tc tetrofosmin, MIBI	410
Myocardial Perfusion Imaging (MPI) rest*	^{99m} Tc tetrofosmin, MIBI	410
Myocardial Perfusion Imaging (MPI)**	^{99m} Tc tetrofosmin, MIBI	1260
Bone scan	^{99m} Tc MDP, pyrophosphate	770

Ket.:

- 1) Nilai di atas untuk kelompok usia di atas 15 tahun.
- 2) Tanda * mengindikasikan bahwa jenis pemeriksaan tersebut dilaksanakan pada hari yang berbeda (*over two days*).
- 3) Tanda ** mengindikasikan bahwa pemeriksaan MPI rest/stress dilakukan pada hari yang sama (*one day services*).

Sumber: Keputusan Kepala BAPETEN No. 3426/K/XI/2022 (2022)

Tabel 3.9 Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Fluoroskopi Intervensional

Jenis Pemeriksaan	Total Kerma (mGy)	Dose Area Product (Gy.cm ²)
Abdominal angiogram	140	12
Cerebral angiogram (1–3 vessels)	400	34
Coronary angiogram (1–3 vessels)	460	20
Coronary angiogram (CAG)	330	24
Coronary (CAG) dan Percutaneous transluminal coronary angioplasty (PTCA)	510	14
Directional coronary atherectomy (DCA)	290	20
Tunneled double lumen catheter (TDLC)	6,5	2,7
Digital subtraction angiography (DSA) kepala	350	71
Endoscopic retrograde cholangio pancreatography (ERCP)	375	105
Open reduction and internal fixation (ORIF)	1,3	0,3
Percutaneous coronary intervention (PCI)	790	53
Pulmonary artery catheter (PAC)	320	19
PAC dan PCI	1100	68
Trans arterial chemo infusion (TACI)/Trans arterial chemo embolization (TACE)	170	45

Ket.: Nilai di atas untuk kelompok usia di atas 15 tahun.

Sumber: Keputusan Kepala BAPETEN No. 3426/K/XI/2022 (2022)

8. Budaya Keselamatan

Budaya keselamatan adalah paduan sifat dari sikap organisasi dan individu dalam organisasi yang memberikan perhatian dan prioritas utama pada masalah-masalah keselamatan radiasi (PP No. 33, 2007). Untuk itu penanggung jawab proteksi dan keselamatan radiasi pada suatu instalasi atau fasilitas ketenaganukliran wajib mewujudkan budaya keselamatan dengan cara:

- 1) mendorong komitmen individu dan kolektif terhadap proteksi dan keselamatan radiasi pada semua tingkat organisasi;
- 2) memberikan pemahaman umum mengenai aspek dasar budaya keselamatan dalam organisasi;
- 3) menyediakan sarana yang mendukung individu atau kelompok dalam melaksanakan tugas dengan mempertimbangkan interaksi antara individu, teknologi, dan organisasi;
- 4) membangun partisipasi personel yang relevan dalam pengembangan dan pelaksanaan kebijakan, peraturan, dan prosedur terkait proteksi dan keselamatan radiasi;
- 5) menetapkan akuntabilitas organisasi dan individu untuk proteksi dan keselamatan radiasi;
- 6) membangun komunikasi terbuka mengenai proteksi dan keselamatan radiasi dalam organisasi dan dengan pihak terkait;
- 7) mendorong sikap bertanya dan belajar, menjauhkan dari rasa puas, terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi; dan
- 8) menyediakan sarana bagi organisasi untuk terus berusaha berkembang dan memperkuat budaya keselamatan.

Dalam kehidupan nyata, tantangan dalam budaya keselamatan adalah meningkatkan dibanding dengan membangun atau membentuknya. Pembentukan budaya keselamatan memerlukan pendidikan berkelanjutan dari para staf fasilitas, komunikasi yang efektif di antara para pemangku kepentingan di setiap tingkatan, dan penerapan program jaminan mutu yang baik.

Pembentukan budaya keselamatan didorong dari manajemen tertinggi. Pimpinan tertinggi fasilitas medis, para profesional dan

perhimpunan profesi diharapkan dapat memainkan peranan penting dalam menanamkan dan mempromosikan budaya keselamatan di fasilitas masing-masing. Penerapan budaya keselamatan diyakini dapat membantu mencegah cedera dan kematian, meningkatkan kesadaran atas risiko radiasi, meminimalkan cara kerja yang tidak aman, dan membantu mengurangi dosis radiasi yang tidak perlu atau tidak diinginkan kepada pasien dan staf medis secara keseluruhan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA RADIOLOGI DIAGNOSTIK

Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (PerBAPETEN) Nomor 4 Tahun 2020 mendefinisikan radiologi diagnostik sebagai teknik radiologi untuk mendiagnosis suatu penyakit atau kelainan morfologi dalam tubuh pasien dengan menggunakan pesawat sinar-X. Selain itu, PerBAPETEN ini juga mendefinisikan radiologi intervensional sebagai teknik radiologi dengan menggunakan pesawat sinar-X untuk pemandu citra secara langsung (*real-time image-guided*) dalam mendiagnosis dan melakukan tindakan terapi dengan memasang kawat penuntun, *stent*, dan komponen terkait di dalam tubuh pasien.

Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) Nomor 24 Tahun 2020, memperkenalkan istilah radiologi klinik, yang didefinisikan sebagai pelayanan medis yang menggunakan semua modalitas yang menggunakan sumber radiasi pengion dan nonpengion untuk diagnosis dan/atau terapi dengan panduan imejing. Meski redaksionalnya agak berbeda, tetapi tampaknya dua definisi yang diberikan PerBAPETEN Nomor 4 Tahun 2020 telah diwakili oleh hanya satu definisi yang diberikan dalam Permenkes ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Berdasarkan kemampuan pelayanan yang diberikan, pelayanan radiologi klinik terdiri atas pelayanan radiologi klinik pratama, madya, utama, dan paripurna. Kemampuan pelayanan yang dimaksud didasarkan pada sumber daya manusia dan peralatan yang dimiliki oleh setiap pelayanan radiologi klinik tersebut.

Pada Bab 4 ini akan diuraikan secara ringkas sumber daya manusia dan peralatan yang dibutuhkan untuk memberikan pelayanan radiologi secara maksimal. Di samping itu, Bab 4 ini juga akan menguraikan tugas dan tanggung jawab setiap personel yang bekerja pada fasilitas radiologi diagnostik, ukuran ruangan pesawat sinar-X yang direkomendasikan, perlengkapan proteksi radiasi yang dibutuhkan, pedoman umum dan pedoman khusus proteksi dan keselamatan di fasilitas radiologi diagnostik, dan penanggulangan kedaruratan yang perlu dilakukan pada suatu fasilitas radiologi diagnostik.

A. Sumber Daya Manusia dan Peralatan

Sumber daya manusia yang diperlukan pada suatu fasilitas radiologi diagnostik berbeda untuk setiap jenis pelayanan yang diberikan. Demikian pula peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan pelayanan bergantung pada jenis pelayanan yang disediakan.

1. Sumber Daya Manusia

Sumber daya manusia pada pelayanan radiologi klinik pratama terdiri atas:

- 1) dokter spesialis radiologi;
- 2) radiografer;
- 3) petugas proteksi radiasi (PPR); dan
- 4) tenaga administrasi.

Jika suatu fasilitas pelayanan kesehatan belum memiliki dokter spesialis radiologi, dokter atau dokter spesialis lain dengan kewenangan tambahan dapat memberikan pelayanan radiologik klinik pratama. Kewenangan ini diberikan setelah dokter atau dokter spesialis lain

menerima pelatihan untuk mendapatkan kompetensi terbatas yang dibuktikan dengan sertifikat dari kolegium radiologi.

Untuk pelayanan radiologi klinik madya, utama, dan paripurna, sumber daya manusia yang harus dimiliki paling sedikit ialah:

- 1) dokter spesialis radiologi;
- 2) radiografer;
- 3) fisikawan medis;
- 4) elektromedis;
- 5) perawat; dan
- 6) tenaga administrasi.

Fisikawan medis di ketiga pelayanan radiologi ini dapat bertindak sebagai PPR setelah memiliki surat izin bekerja sebagai PPR. Jika izin belum dimiliki, pelayanan radiologi harus memiliki PPR tersendiri.

2. Peralatan

Dalam hal peralatan, pelayanan radiologi klinik pratama memiliki kemampuan modalitas alat radiologi terbatas berupa pesawat sinar-X bergerak (*mobile*), pesawat sinar-X gigi, dan/atau peralatan ultrasonografi (USG). Pelayanan radiologi jenis ini dapat diselenggarakan di rumah sakit, balai, puskesmas, dan klinik.

Untuk pelayanan radiologi klinik madya, peralatan yang dimiliki adalah peralatan untuk pelayanan radiologi klinik pratama ditambah pesawat sinar-X panoramik/sefalometri, mammografi, fluoroskopi, dan *CT scan*. Pelayanan radiologi ini dapat diselenggarakan di rumah sakit dan balai.

Selanjutnya, pelayanan radiologi klinik utama memiliki peralatan untuk pelayanan radiologi klinik madya ditambah densitometri tulang, *C-arm*, dan *magnetic resonance imaging* (MRI). Sementara itu, pelayanan radiologi klinik paripurna memiliki peralatan untuk pelayanan radiologi klinik utama ditambah *digital subtraction angiography* (DSA), kamera gamma, dan modalitas energi pengion dan nonpengion untuk diagnosis dan terapi lain. Pelayanan radiologi

klinik utama dan paripurna hanya dapat diselenggarakan di rumah sakit.

B. Tugas dan Tanggung Jawab

Dalam kerangka hukum ketenaganukliran di Indonesia, pemegang izin pemanfaatan tenaga nuklir adalah penanggung jawab semua kegiatan terkait proteksi dan keselamatan radiasi di instalasi atau fasilitasnya. Untuk itu, pemegang izin penggunaan radiasi di rumah sakit memiliki tanggung jawab berupa (PerBAPETEN No. 4, 2020):

- 1) mempromosikan dan mengembangkan budaya keselamatan;
- 2) menyusun, menetapkan, mengembangkan, melaksanakan, dan mendokumentasikan program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 3) membentuk dan menetapkan penyelenggara proteksi dan keselamatan radiasi;
- 4) menyelenggarakan pemantauan kesehatan bagi pekerja radiasi;
- 5) menyediakan personel sesuai dengan jenis pesawat sinar-X yang digunakan dan tujuan penggunaan;
- 6) menetapkan personel yang menjadi PPR dan pekerja radiasi sesuai dengan beban kerja;
- 7) memfasilitasi pelatihan proteksi dan keselamatan radiasi bagi personel;
- 8) menyelenggarakan pemantauan radiasi di daerah kerja;
- 9) menyelenggarakan pemantauan dosis perorangan bagi pekerja radiasi;
- 10) menyediakan perlengkapan proteksi radiasi bagi personel;
- 11) menetapkan prosedur dengan semua pihak yang terkait dengan keselamatan radiasi; dan
- 12) memelihara rekaman yang terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi.

Program proteksi radiasi sebagaimana dimaksud pada butir 2) merupakan suatu dokumen yang menguraikan semua aspek terkait proteksi dan keselamatan radiasi yang diselenggarakan oleh suatu instalasi atau fasilitas. Program ini berisi antara lain penyelenggara

proteksi dan keselamatan radiasi, deskripsi fasilitas, prosedur proteksi dan keselamatan radiasi dalam operasi normal maupun kecelakaan, dan rekaman serta laporan.

Dalam hal dokter spesialis radiologi, tugas dan tanggung jawabnya adalah (Permenkes No. 24, 2020):

- 1) menyusun dan mengevaluasi secara berkala SOP tindak medis radiodiagnostik, imejing diagnostik, dan radiologi intervensional, serta melakukan revisi jika perlu;
- 2) melaksanakan dan mengevaluasi tindak radiodiagnostik, imejing diagnostik, dan radiologi intervensional sesuai yang telah ditetapkan dalam SOP;
- 3) melaksanakan pemeriksaan dengan kontras dan fluoroskopi bersama dengan radiografer (khusus pemeriksaan yang memerlukan penyuntikan intravena, dikerjakan oleh dokter spesialis radiologi atau dokter lain/tenaga kesehatan yang mendapat pendelegasian);
- 4) menjelaskan dan menandatangani *informed consent* (izin tindakan medis) kepada pasien atau keluarga pasien;
- 5) melakukan pembacaan terhadap hasil pemeriksaan radiodiagnostik, imejing diagnostik, dan tindakan radiologi intervensional;
- 6) melaksanakan telerradiologi dan konsultasi radiodiagnostik, imejing diagnostik dan radiologi intervensional sesuai kebutuhan;
- 7) memberikan layanan konsultasi terhadap pemeriksaan yang akan dilaksanakan;
- 8) menjamin pelaksanaan seluruh aspek proteksi radiasi terhadap pasien;
- 9) menjamin bahwa pajanan pasien serendah mungkin untuk mendapatkan citra radiografi yang seoptimal mungkin dengan mempertimbangkan tingkat panduan pajanan medis;
- 10) memberikan rujukan dan justifikasi pelaksanaan diagnosis atau intervensional dengan mempertimbangkan informasi pemeriksaan sebelumnya;
- 11) mengevaluasi kecelakaan radiasi dari sudut pandang klinis; dan
- 12) meningkatkan kemampuan diri sesuai perkembangan iptek radiologi.

Untuk radiografer, tugas dan tanggung jawabnya meliputi (Permenkes No. 24, 2020):

- 1) mempersiapkan pasien, obat-obatan, dan peralatan untuk pemeriksaan dan pembuatan foto radiologi;
- 2) memosisikan pasien sesuai dengan teknik pemeriksaan;
- 3) mengoperasikan peralatan radiologi sesuai SOP (khusus untuk pemeriksaan dengan kontras dan fluoroskopi, pemeriksaan dikerjakan bersama dokter spesialis radiologi);
- 4) melakukan kegiatan *processing* film (kamar gelap dan *work station*);
- 5) memberikan proteksi terhadap pasien, dirinya sendiri, dan masyarakat di sekitar ruang pesawat sinar-X;
- 6) menerapkan teknik dan prosedur yang tepat untuk meminimalkan pajanan yang diterima pasien sesuai kebutuhan; dan
- 7) merawat dan memelihara alat pemeriksaan radiologi secara rutin.

Fisikawan medis memiliki tugas dan tanggung jawab berupa (Permenkes No. 24, 2020):

- 1) melakukan pengukuran dan analisis data radiasi serta menyusun tabel data radiasi untuk penggunaan klinik;
- 2) melaksanakan aspek teknis dan perencanaan radiasi;
- 3) melaksanakan pengadaan prosedur *quality assurance* (QA) dalam radiologi diagnostik, meliputi pelaksanaan diagnosis dan terapi, keamanan radiasi, dan kendali mutu;
- 4) melakukan perhitungan dosis, terutama untuk menentukan dosis janin pada wanita hamil;
- 5) memberikan jaminan bahwa spesifikasi peralatan radiologi diagnostik sesuai dengan keselamatan radiasi;
- 6) melakukan uji keberterimaan (*acceptance test*) dari unit yang baru;
- 7) melakukan supervisi perawatan berkala peralatan radiologi diagnostik;

- 8) berpartisipasi dalam meninjau ulang secara terus-menerus keberadaan sumber daya manusia, peralatan, prosedur, dan perlengkapan proteksi radiasi;
- 9) berpartisipasi dalam investigasi dan evaluasi kecelakaan radiasi;
- 10) meningkatkan kemampuan sesuai perkembangan iptek; dan
- 11) menjadi PPR.

Dalam hal elektromedis, tugas dan tanggung jawabnya adalah (Permenkes No. 24, 2020):

- 1) melakukan perawatan peralatan radiologi diagnostik, bekerja sama dengan fisikawan medis secara rutin;
- 2) melakukan perbaikan ringan; dan
- 3) turut dengan pemasok (*supplier*) pada tiap pemasangan alat baru atau perbaikan besar.

Untuk perawat, tugas dan tanggung jawabnya adalah (Permenkes No. 24, 2020):

- 1) mempersiapkan pasien dan peralatan yang dibutuhkan untuk pemeriksaan radiologi;
- 2) membantu dokter dalam pemasangan alat-alat pemeriksaan dengan bahan kontras;
- 3) membersihkan dan melakukan sterilisasi alat; dan
- 4) bertanggung jawab atas keutuhan dan kelengkapan peralatan.

Dalam hal tenaga administrasi, tugas dan tanggung jawabnya adalah melakukan pencatatan dan pelaporan semua kegiatan pemeriksaan yang dilakukan di institusi pelayanan.

Selanjutnya, tugas dan tanggung jawab PPR adalah (PerBAPE-TEN No. 4, 2020):

- 1) membantu pemegang izin dalam menyusun, mengembangkan, serta melaksanakan program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 2) memantau pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi;

- 3) memastikan ketersediaan dan kelayakan perlengkapan proteksi radiasi dan memantau pemakaiannya;
- 4) memberikan konsultasi yang terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 5) berpartisipasi dalam mendesain ruangan radiologi;
- 6) mengidentifikasi kebutuhan dan mengoordinasikan pelatihan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 7) melaporkan kepada pemegang izin setiap kejadian kegagalan operasi yang berpotensi menimbulkan kecelakaan radiasi;
- 8) memantau pelaksanaan verifikasi keselamatan radiasi; dan
- 9) menyiapkan laporan tertulis mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi.

C. Ruang Pesawat Sinar-X

Ukuran ruangan pesawat sinar-X harus sesuai dengan spesifikasi teknis pesawat sinar-X yang diberikan pabrikan atau rekomendasi internasional. Jika spesifikasi dari pabrik tidak ada atau tidak jelas, ukuran ruangan seperti yang diberikan pada Tabel 4.1 dapat digunakan sebagai acuan dalam membuat masing-masing fasilitas ruangan pesawat sinar-X.

Jika ruangan memiliki jendela, jendela ruangan paling kurang terletak pada ketinggian 2 m dari lantai. Dinding ruangan untuk semua jenis pesawat sinar-X terbuat dari bata merah ketebalan 25 cm dengan rapat jenis 2,2 g/cm³ atau beton dengan ketebalan 20 cm atau setara dengan 2 mm Pb.

Tabel 4.1 Ukuran Ruang Fasilitas Pesawat Sinar-X

No.	Jenis Pesawat Sinar-X	Ukuran Minimum Ruang (Panjang x Lebar x Tinggi)
1	Pesawat sinar-X dengan tegangan s/d 125 kV	4 m × 3 m × 2,8 m
2	Pesawat sinar-X dengan tegangan >125 kV	6,5 m × 4 m × 2,8 m
3	Pesawat sinar-X fluoroskopi	7,5 m × 5,7 m × 2,8 m
4	CT scan	6 m × 4 m × 3 m

No.	Jenis Pesawat Sinar-X	Ukuran Minimum Ruangan (Panjang x Lebar x Tinggi)
5	DSA	8,5 m × 7,5 m × 2,8 m
6	Mammografi	4 m × 3 m × 2,8 m
7	Panoramik-cefalometri	3 m × 2 m × 2,8 m

Sumber: Permenkes No. 24 (2020)

D. Perlengkapan Proteksi Radiasi

Berdasarkan pasal 36 Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013, pemegang izin wajib menyediakan perlengkapan proteksi radiasi. Untuk pelayanan radiologi klinik, perlengkapan proteksi radiasi minimal yang harus dimiliki sesuai dengan yang diberikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perlengkapan Proteksi Radiasi pada Pelayanan Radiologi Klinik

Pelayanan Radiologi Klinik	Perlengkapan Proteksi Radiasi	Jumlah (minimal)
Pratama	Apron Pb tebal minimal 0,25 mm Pelindung tiroid Pb tebal minimal 0,25 mm Pelindung gonad Pb tebal minimal 0,5 mm Surveimeter <i>Film badge</i> /TLD	Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Satu/pekerja
Madya	Apron Pb tebal minimal 0,5 mm Sarung tangan Pb, tebal minimal 0,5 mm Kacamata Pb, tebal minimal 1 mm Pelindung tiroid Pb tebal minimal 1 mm Pelindung gonad Pb tebal minimal 0,5 mm Tabir <i>mobile</i> minimal tinggi 200 cm dan lebar 100 cm setara 2 mm Pb + kaca Pb +, ukuran kaca sesuai kebutuhan, tebal 2 mm Pb Surveimeter <i>Film badge</i> /TLD	Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Satu/pekerja

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Pelayanan Radiologi Klinik	Perlengkapan Proteksi Radiasi	Jumlah (minimal)
Utama	Apron Pb tebal minimal 0,5 mm Sarung tangan Pb, tebal minimal 0,5 mm Kacamata Pb, tebal minimal 1 mm Pelindung tiroid Pb tebal minimal 1 mm Pelindung gonad Pb tebal minimal 0,5 mm Tabir <i>mobile</i> minimal tinggi 200 cm dan lebar 100 cm setara 2 mm Pb + kaca Pb +, ukuran kaca sesuai kebutuhan, tebal 2 mm Pb Surveimeter Analog/digital dosimeter kantong <i>Film badge</i> /TLD	Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan 1 per unit <i>mobile X-ray</i> Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Satu/pekerja
Paripurna	Apron Pb tebal minimal 0,5 mm Sarung tangan Pb, tebal minimal 0,5 mm Kacamata Pb, tebal minimal 1 mm Pelindung tiroid Pb tebal minimal 1 mm Pelindung gonad Pb tebal minimal 0,5 mm Tabir <i>mobile</i> minimal tinggi 200 cm dan lebar 100 cm setara 2 mm Pb + kaca Pb., ukuran kaca sesuai kebutuhan, tebal 2 mm Pb Surveimeter Analog/digital dosimeter kantong <i>Film badge</i> /TLD <i>TLD reader</i> untuk pengukuran dosis pasien, dengan 1 tabung nitrogen dan 1 oven <i>annealing</i> TLD pasien	Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan 1 per unit <i>mobile X-ray</i> Sesuai kebutuhan Sesuai kebutuhan Satu/pekerja Satu unit Minimal 1 per <i>reading</i>

Sumber: Permenkes No. 24 (2020)

E. Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 24 Tahun 2020 dan Peraturan BAPETEN Nomor 4 Tahun 2020, beberapa pedoman umum proteksi dan keselamatan radiasi pada pelayanan radiologi klinik atau radiologi diagnostik dan intervensional dapat diberikan sebagai berikut.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

- 1) Pelayanan radiologi klinik dilakukan atas permintaan tertulis dengan keterangan klinis yang jelas dari dokter, dokter gigi, dokter spesialis, dokter gigi spesialis, dan dokter subspecialis.
- 2) Poliklinik, instalasi, atau ruangan yang memberikan pelayanan radiologi klinik dapat menerima pasien atas permintaan tertulis dari internal dan/atau eksternal fasilitas pelayanan kesehatan.
- 3) Selain melalui permintaan tertulis, pelayanan radiologi klinik untuk diagnostik dapat dilakukan melalui teleradiologi.
- 4) Fasilitas pelayanan kesehatan yang akan menyelenggarakan pelayanan radiologi klinik harus melakukan uji kesesuaian alat dan memiliki izin pemanfaatan sumber radiasi.
- 5) Departemen, instalasi, unit, atau bagian yang menyelenggarakan pelayanan radiologi klinik harus melakukan pencatatan kegiatan pelayanannya, termasuk dosis radiasi pekerja radiasi dan pasien, serta kejadian akibat kecelakaan radiasi.
- 6) Setiap pemeriksaan radiologi diagnostik dan intervensional yang dilakukan untuk keperluan pekerjaan, legal, atau asuransi kesehatan harus berdasarkan justifikasi dan hanya untuk keperluan pemberian informasi penting mengenai kesehatan orang yang diperiksa atau proses pembuktian atas terjadinya suatu pelanggaran hukum.
- 7) Setiap pemeriksaan massal secara selektif terhadap kelompok populasi dengan pesawat sinar-X hanya diperbolehkan jika manfaat yang diperoleh individu yang diperiksa orang perseorangan yang diperiksa atau bagi populasi secara keseluruhan, lebih besar dari risiko yang ditimbulkan dan harus mengacu pada pedoman acuan nasional atau internasional.
- 8) Justifikasi untuk pemeriksaan payudara dengan pesawat sinar-X mamografi mempertimbangkan:
 - a) bagi wanita usia di bawah 35 tahun: hasil pemeriksaan dengan USG mengindikasikan gambaran mikrokalsifikasi dan memerlukan pemeriksaan lanjutan;
 - b) bagi wanita usia 35–40 tahun: hasil pemeriksaan klinis mengindikasikan adanya benjolan dan memerlukan pemeriksaan lanjutan;

- c) bagi wanita usia di atas 40 tahun: hasil pemeriksaan klinis tidak mengindikasikan adanya benjolan, tetapi dianjurkan oleh tenaga medis di bidang radiologi untuk melakukan pemeriksaan mamografi.
- 9) Pendamping pasien harus berusia di atas 18 tahun, tidak dalam kondisi hamil atau diduga hamil, menggunakan peralatan proteksi radiasi sesuai kebutuhan, dan diberi informasi mengenai prinsip optimisasi proteksi dan keselamatan, cara dan posisi pendampingan yang tepat, dan cara penggunaan peralatan proteksi radiasi yang tepat.
 - 10) Dalam satu ruangan pesawat sinar-X tidak boleh terdapat dua atau lebih pesawat sinar-X yang dioperasikan secara bersamaan.
 - 11) Pada pintu ruangan pesawat sinar-X terpasang dengan jelas tanda radiasi, peringatan bahaya radiasi, dan peringatan terhadap wanita hamil, dan juga terpasang lampu peringatan yang harus menyala saat penyinaran berlangsung.
 - 12) Jika pekerja radiasi wanita hamil:
 - a) kondisi kerjanya harus sedemikian rupa untuk memastikan bahwa dosis tambahan untuk embrio/janin tidak akan melebihi sekitar 1 mSv selama sisa kehamilan;
 - b) pembatasan dosis tidak berarti pekerja hamil harus menghindari bekerja dengan radiasi atau bahan radioaktif, atau tidak boleh memasuki atau bekerja di daerah kerja radiasi, namun manajemen harus memastikan kondisi kerja sedemikian rupa sehingga kemungkinan terjadinya dosis kecelakaan menjadi sangat rendah;
 - c) pekerja wanita yang hamil tidak boleh terlibat dalam tindakan darurat yang dapat menyebabkan terjadinya penyinaran dengan dosis radiasi tinggi.

F. Pedoman Khusus Proteksi dan Keselamatan Radiasi

Modalitas penyinaran pada pelayanan radiologi klinik terdiri atas berbagai jenis pesawat sinar-X. Sesuai dengan karakteristik modali-

tasnya, upaya proteksi dan keselamatan radiasi khusus perlu dilakukan untuk masing-masing modalitas tersebut. Berdasarkan IAEA (2018) pada publikasi SSG-46, pedoman khusus tersebut antara lain sebagai berikut.

1. Radiografi Umum

Untuk radiografi umum, pedoman khusus meliputi:

- 1) Tabung sinar-X tidak boleh diarahkan ke area konsol kontrol.
- 2) Mengingat pasien merupakan sumber radiasi hambur, posisi pasien harus dipastikan sejauh mungkin dari konsol kontrol, dengan mempertimbangkan konfigurasi ruangan dan peralatan yang ada, atau paling sedikit lebih dari 1 m dari kontrol.

2. Radiografi *Mobile*

Untuk radiografi *mobile* beberapa pedoman khusus yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

- 1) Operator harus memakai apron Pb dan harus menjaga jarak sejauh mungkin antara dirinya dan pasien (untuk meminimalkan pajanan radiasi hambur) sambil tetap mempertahankan pengamatan visual yang baik terhadap pasien dan mampu berbicara dengan pasien tersebut.
- 2) Staf lain (misalnya perawat, staf medis, dan staf lainnya) tidak dianggap sebagai pekerja radiasi sehingga harus diberikan proteksi sebagai anggota masyarakat. Hal ini dicapai dengan memastikan staf tersebut berada sejauh mungkin dari pasien selama pajanan (biasanya sekitar 3 m) atau berada di belakang penghalang yang sesuai.
- 3) Dalam situasi di mana seorang staf harus dekat dengan pasien, apron pelindung harus dipakai (misalnya spesialis anestesi dengan pasien yang memakai ventilator atau seorang perawat dengan pasien yang tidak stabil).
- 4) Jika pajanan akan segera dilakukan, peringatan verbal harus diberikan.

- 5) Pertimbangkan kehadiran pasien lain yang berada di dekat pasien yang akan menerima penyinaran.

3. CT

Untuk CT, jika seorang staf perlu berada di dalam ruangan selama penyinaran berlangsung, tindakan tambahan berikut perlu dilakukan.

- 1) Dalam hal intervensi CT, ahli intervensi harus menggunakan alat pelindung diri yang sesuai (apron pelindung, pelindung tiroid, dan kacamata pelindung).
- 2) Hindari agar tangan tidak berada di dalam berkas utama dan segera beritahukan ke spesialis intervensi jika hal ini terjadi.
- 3) Untuk staf lain yang memberikan dukungan medis (seperti spesialis anestesi), apron pelindung harus dipakai dan staf tersebut harus berada sejauh mungkin dari *gantry* sambil tetap mempertahankan pandangan visual yang baik terhadap pasien.

4. Mammografi

Untuk mammografi, radiografer harus berdiri di belakang penghalang pelindung yang terpasang pada unit mammografi saat penyinaran dilakukan.

5. Sinar-X Gigi Intraoral dan Panoramik

Untuk fasilitas gigi dengan peralatan intraoral dan panoramik, tindakan berikut harus dilakukan.

- 1) Alat pelindung diri biasanya tidak diperlukan dan proteksi radiasi diberikan melalui penggunaan jarak dari pasien minimal 2 m.
- 2) Operator tidak boleh memegang reseptor citra selama penyinaran.
- 3) Peralatan sinar-X portabel genggam untuk radiografi intraoral digunakan hanya untuk pemeriksaan di mana pasien tidak praktis atau secara medis tidak dapat diterima jika dipindahkan ke unit tetap atau menggunakan unit bergerak (misalnya di panti jompo, fasilitas perawatan perumahan atau rumah untuk penyandang

disabilitas, dalam odontologi forensik, atau untuk operasi militer di luar negeri tanpa fasilitas gigi).

6. *Cone Beam Computed Tomography* (CBCT)

CBCT digunakan di beberapa fasilitas gigi dan harus ditempatkan di ruangan yang telah dirancang dan diberi pelindung yang sesuai. Selain itu, staf harus berada di belakang penghalang pelindung di konsol kontrol saat penyinaran dilakukan.

7. *Dual-energy X-ray Absorptiometry* (DXA) atau Densitometri Tulang

Untuk DXA, tingkat radiasi di sekitar unit sangat rendah dan tidak ada tindakan pencegahan khusus yang harus diambil sehubungan dengan proteksi radiasi kerja. Biasanya, operator dapat berada di ruangan dengan pasien saat mesin beroperasi. Meja operator harus ditempatkan setidaknya 1 m dari balok pensil dan setidaknya 2 m dari sistem balok kipas. Dalam hal konfigurasi balok kipas dan balok kerucut atau jika jarak di atas tidak dapat diakomodasi, penggunaan layar pelindung harus dipertimbangkan.

8. Prosedur Fluoroskopi Diagnostik

Untuk prosedur fluoroskopi diagnostik, ketika staf perlu berada di ruangan, langkah-langkah berikut harus diambil.

- 1) Staf yang melakukan prosedur harus menggunakan alat pelindung diri yang sesuai (apron pelindung, pelindung tiroid, kacamata pelindung, dan sarung tangan).
- 2) Hindari agar tangan tidak berada di dalam berkas utama dan segera beritahukan kepada spesialis fluoroskopi jika hal ini terjadi.
- 3) Untuk staf lain yang memberikan dukungan medis (misalnya spesialis anestesi), apron pelindung harus dipakai dan staf tersebut harus berada sejauh mungkin dari pasien selama pajanan berlangsung.

9. Prosedur Fluoroskopi *Mobile* (C-arm)

Untuk prosedur radiologi yang dilakukan dengan unit fluoroskopi *mobile* (sistem C-arm), langkah-langkah berikut harus dilakukan.

- 1) Staf yang melakukan prosedur harus menggunakan alat pelindung diri yang sesuai (apron pelindung, pelindung tiroid, kacamata pelindung, dan sarung tangan).
- 2) Hindari agar tangan tidak berada di dalam berkas utama dan beritahukan ke spesialis fluoroskopi jika hal ini terjadi.
- 3) Hanya staf penting yang harus tetap berada di dalam ruangan dan semua staf tersebut dianggap sebagai pekerja radiasi.
- 4) Dalam situasi di mana seorang staf harus dekat dengan pasien, apron pelindung harus dipakai (misalnya spesialis anestesi dengan pasien yang memakai ventilator atau perawat dengan pasien yang tidak stabil). Anggota staf yang hamil tidak boleh mengambil peran ini.

10. Prosedur Intervensional

Pedoman proteksi dan keselamatan radiasi yang lebih rinci untuk prosedur intervensional diberikan oleh ICRP (2018) pada publikasi ICRP 139. Pedoman ini secara singkat diberikan sebagai berikut.

- 1) Proteksi tubuh
 - a) Alat pelindung diri seperti apron harus digunakan oleh seluruh staf intervensional yang bekerja dalam fluoroskopi di dalam ruang sinar-X. Apron biasanya memiliki kesetaraan Pb 0,25; 0,45; atau 0,5 mm. Beberapa desain memiliki kesetaraan 0,5 mm Pb di bagian depan dan 0,25 mm Pb di bagian lain.
 - b) Apron yang pas dengan tubuh kadang kala lebih penting dalam mengurangi dosis radiasi dibanding dengan kesetaraan Pb. Organ toraksik, termasuk paru-paru dan kerongkongan (*oesophagus*), dapat menerima dosis radiasi lebih tinggi saat operator menerima penyinaran dari sisi melalui lubang tangan apron.

- c) Apron Pb yang berat sering membuat ketidaknyamanan bagi penggunaannya. Sebagai alternatif, terdapat apron yang lebih ringan yang mengandung dua atau lebih lapisan komposit dari unsur dengan nomor atom tinggi, seperti timah atau bismut.
- 2) Proteksi tiroid
- a) Jika pelindung tiroid tidak digunakan, dosis pada tiroid akan bertambah sekitar dua kali dibanding dengan jika pelindung digunakan.
 - b) Simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa pelindung Pb 0,5 mm akan mengurangi dosis ekuivalen pada tiroid hingga 12 kalinya, sedangkan pelindung Pb 0,35 mm akan mengurangi dosis hingga tujuh kalinya.
 - c) Pelindung tiroid sering dipasang agak longgar karena umumnya tidak nyaman jika terlalu ketat. Namun, pelindung yang dipasang di bawah pangkal tenggorok (*larynx*) akan membuat 10 mm tiroid bagian atas tidak terlindungi dan mengurangi faktor proteksi sebesar 6 dan 5 kali untuk masing-masing ketebalan pelindung.
- 3) Proteksi kepala dan mata
- a) Pelindung akrilik Pb yang digantung di langit-langit (*ceiling-suspended lead acrylic shields*) harus selalu tersedia karena dapat mengurangi dosis ke seluruh kepala dan leher hingga 2 sampai 10 kalinya.
 - b) Perlindungan terhadap mata dengan pelindung di langit-langit atau kacamata Pb dapat diukur sebagai faktor pengurangan dosis (*dose reduction factor, DRF*). Nilai DRF bervariasi antara 1,3–7 untuk prosedur intervensi dengan pengukuran klinik skala besar, antara 0,7–2,5 untuk prosedur yang sama yang dilakukan di beberapa rumah sakit, dan sekitar 5 jika pelindung digunakan saat dilakukan perbandingan laju dosis antara saat digunakan dengan tidak digunakan.
 - c) Pelindung langit-langit memberikan pengurangan dosis yang jauh lebih tinggi dibandingkan kacamata Pb dan melindungi tidak hanya mata, tetapi juga seluruh kepala dan leher.

- Penempatan pelindung yang tepat pada intervensi koroner perkutan memberikan nilai DRF sekitar 19 kali lebih tinggi.
- d) Penempatan pelindung yang tepat adalah persis di atas pasien dengan operator melihat area pasien yang tersinar melalui pelindung.
 - e) Meski pelindung pada prinsipnya memberikan proteksi yang baik, posisi tabung sinar-X dan dipan yang terus bergerak mengurangi tingkat perlindungan secara keseluruhan pada penggunaan rutin.
 - f) Secara umum, nilai DRF sekitar 2–5 akan memungkinkan seorang spesialis intervensi untuk menjaga agar mata menerima dosis radiasi di bawah nilai batas dosis dan menghindari kekeruhan lensa mata yang mungkin terjadi melalui akumulasi dosis selama kehidupan kerja profesionalnya.
- 4) Proteksi ekstremitas (tangan dan kaki)
- a) Jika tangan operator tanpa sengaja berada di dalam berkas sinar-X yang diteruskan oleh tubuh pasien, tangan tersebut dapat menerima dosis sekitar 2–5 $\mu\text{Gy s}^{-1}$ sehingga pajanan sekitar 1 menit akan memberikan dosis sebesar 100–300 μGy .
 - b) Dosis radiasi dari sinar-X primer yang terhambur dari permukaan pasien di sisi tabung dari dipan akan lebih tinggi dan pajanan langsung berkas primer yang datang bisa 50 kali lebih besar.
 - c) Penyisipan kateter melalui arteri radial dan bukan melalui arteri femoralis akan memberikan mobilitas pasien yang lebih cepat, tetapi tangan spesialis kardiologi akan lebih dekat dengan berkas sinar-X sehingga dosis yang diterima, terutama bagian sisi tangan, akan lebih tinggi.
 - d) Dalam radiologi intervensi, akses femoral sering digunakan, tetapi prosedur perkutan memerlukan operator untuk memanipulasi kateter yang dimasukkan dekat dengan area yang akan diberi citra dan dengan demikian dapat memberikan dosis yang relatif lebih tinggi ke ujung jari.

- e) Pelindung yang digantung di langit-langit memberikan perlindungan yang baik untuk kepala dan tubuh bagian atas, tetapi tangan umumnya diposisikan di bawah pelindung sehingga menerima perlindungan yang lebih sedikit.
- f) Pelindung di atas meja yang dapat disetel dan berdiri bebas (*freestanding adjustable over-table shields*) dapat melindungi tangan operator, tetapi tangan dapat meregang di bawah pelindung sehingga menerima perlindungan yang lebih sedikit. Tirai dan bantalan pelindung juga dapat memberikan perlindungan yang baik untuk tangan dan diketahui memberikan pengurangan dosis ke tangan hingga 29 kali lebih rendah.
- g) Radiasi berkas primer dari pesawat sinar-X yang dipasang di bawah dipan terhambur ke bawah dari dasar dipan sehingga kaki operator bisa menerima dosis yang cukup besar. Jika tidak ada pelindung, prosedur yang memiliki produk kerma-luasan (KAP) sebesar 100 Gy cm^2 akan memberikan dosis serap sekitar 1 mGy kepada kaki operator.
- h) Tirai Pb dengan tebal sekitar $0,5 \text{ mm}$ yang dipasang pada sisi dipan memberikan perlindungan terbaik bagi operator, dengan mengurangi dosis ke kaki hingga 2–7 kali jika dipasang dengan benar selama prosedur.
- i) Tirai Pb yang digantung dari meja biasanya tidak memanjang sepanjang meja sehingga posisi tirai sangat penting bagi operator dan pembantunya. Operator yang berdiri di sisi meja akan terlindungi dengan baik. Namun, jika operator berdiri di atau dekat kepala meja, tirai hanya akan memberikan perlindungan jika dapat dipindahkan ke kepala meja.
- j) Pelindung yang dapat bergerak bebas dapat digunakan sebagai pelindung kaki, namun perlu dipasang sebelum tindakan medis dimulai untuk menjaga kesterilan ruangan. Risiko benturan pelindung dengan dipan dan *C-arm* saat digerakkan ke atas dan ke bawah, atau dimiringkan, perlu diperhatikan. Pelindung ini juga dapat digunakan untuk

melindungi staf lain yang membantu dalam pengerjaan tindakan yang dilakukan.

G. Penanggulangan Kedaruratan

Radiologi diagnostik merupakan tindakan medis yang sebagian besar menggunakan sinar-X sebagai modalitas kerjanya. Karena itu, mematikan sumber listrik primer yang mengaktifkan pesawat sinar-X merupakan cara terbaik untuk menghindari terjadinya pajanan yang tidak diinginkan.

Semua staf yang bekerja dengan pesawat sinar-X harus sudah diberi pelatihan untuk mengetahui dengan cepat jika peralatan radiologik tidak berfungsi dengan benar atau jika diduga terjadi kesalahan dalam pemrograman pesawat. Jika ada implikasi bagi proteksi pekerja atau pasien dan jika pertimbangan medis mengizinkan, tindakan radiologik yang tengah dilakukan dapat dihentikan dan pesawat sinar-X dimatikan.

Pencegahan merupakan upaya terbaik dalam menghindari terjadinya keadaan darurat. Untuk melaksanakan hal ini perlu ditetapkan tata laksana pekerjaan yang baik dan penerapan pertahanan berlapis.

Berdasarkan IAEA (2014) pada publikasi IAEA GSR Part 3, tata laksana pekerjaan yang baik antara lain:

- 1) memperhitungkan semua standar internasional dan nasional;
- 2) didukung oleh manajerial dan organisasi, dengan tujuan untuk memastikan proteksi dan keselamatan sepanjang masa pakai fasilitas;
- 3) memasukkan margin keselamatan yang cukup dalam desain dan konstruksi fasilitas dan juga dalam operasional fasilitas untuk memastikan kinerja yang andal dalam operasi normal serta memperhitungkan mutu, redundansi, dan kemampuan untuk melakukan inspeksi, dengan penekanan pada pencegahan kecelakaan, mengurangi konsekuensi kecelakaan yang mungkin terjadi, dan membatasi kemungkinan pajanan di masa mendatang;
- 4) mengamati dan menerapkan, jika perlu, perkembangan terkait kriteria teknis, hasil riset dalam proteksi dan keselamatan yang

relevan dan pelajaran yang dapat dipetik dari pengalaman operasi.

Selanjutnya, pertahanan berlapis perlu diterapkan untuk memastikan bahwa jika satu tahap proteksi gagal dilakukan, tahap proteksi berikutnya siap mengambil alih tugas proteksi ini. Tahap proteksi yang independen satu sama lain ini dilakukan untuk tujuan mencegah kecelakaan dan mengurangi konsekuensi kecelakaan yang mungkin terjadi.



PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA RADIOTERAPI

5

Radioterapi adalah modalitas medis klinis yang menggunakan radiasi pengion, baik berdiri sendiri maupun dalam kombinasi dengan modalitas lain, yang memanfaatkan radiasi untuk tujuan penatalaksanaan pasien yang menderita keganasan atau kanker. Tindakan radioterapi mencakup kegiatan diagnosis awal untuk menentukan besar dan luas keganasan, penatalaksanaan, tindak lanjut, dan perawatan suportif pasien sebagai bagian integral dari manajemen multidisiplin pasien.

Penggunaan radioterapi secara umum memberikan manfaat secara sosial, tetapi dosis radiasi tinggi yang digunakan dalam penyinaran terapi memiliki potensi menyebabkan kerugian bagi pasien yang mendapat manfaat dari penyinaran dan juga bagi staf perawatan kesehatan dan anggota masyarakat jika terjadi pajanan radiasi yang tidak diinginkan.

Pada Bab 5 ini akan diuraikan secara ringkas sumber daya manusia dan peralatan yang dibutuhkan untuk memberikan pelayanan radioterapi secara maksimal. Di samping itu, juga akan diuraikan tugas dan tanggung jawab setiap personel yang bekerja pada fasilitas

Buku ini tidak diperjualbelikan.

radioterapi, perlengkapan proteksi radiasi yang dibutuhkan, pedoman umum dan pedoman khusus proteksi dan keselamatan radiasi di fasilitas radioterapi, dan penanggulangan kedaruratan yang perlu dilakukan pada suatu fasilitas radioterapi.

A. Sumber Daya Manusia dan Peralatan

Sumber daya manusia yang diperlukan pada suatu fasilitas radioterapi terdiri atas tenaga medis dan beberapa tenaga kesehatan dengan jumlah yang bervariasi sesuai dengan banyaknya pasien dan infrastruktur peralatan yang tersedia. Terkait peralatan, jenis yang dibutuhkan juga bergantung pada jenis pelayanan yang diberikan, yaitu teleterapi dan/atau brakiterapi.

1. Sumber Daya Manusia

Sumber daya manusia pada suatu instalasi radioterapi paling kurang terdiri atas dokter spesialis onkologi radiasi atau dokter spesialis radiologi konsultan onkologi radiasi, tenaga ahli dan/atau fisikawan medis, PPR, radioterapis, dosimetris, teknisi elektromedis, perawat, dan teknisi ruang cetak (*mould room*). Mengingat tugas dan tanggung jawabnya banyak yang berhimpitan, PPR biasanya dirangkap oleh fisikawan medis.

Secara lebih luas, penentuan jumlah sumber daya manusia pada suatu instalasi radioterapi tidak hanya berkaitan dengan tujuan mutu perawatan, perencanaan dan penganggaran serta keselamatan pasien, tetapi juga berkaitan dengan akreditasi praktik dan kredensial profesional. Untuk itu, estimasi jumlah sumber daya manusia yang mendukung layanan radioterapi sering kali didasarkan pada ukuran populasi pasien, infrastruktur, ketersediaan peralatan, dan insidensi penyakit. Estimasi subjektif retrospektif berdasarkan praktik yang ada sering menjadi tolok ukur untuk memprediksi kebutuhan sumber daya manusia di masa depan.

Untuk melakukan estimasi beberapa metode telah diperkenalkan. Metode yang paling banyak digunakan adalah metode yang diberikan

IAEA (2015) pada publikasi Human Health Reports No. 13. Metode diberikan dalam algoritma dengan pendekatan berbasis aktivitas di seluruh tahapan radioterapi, aktivitas terkait pasien (penilaian klinik termasuk tindak lanjut, berkas radiasi eksternal atau besar aktivitas sumber brakiterapi), aktivitas terkait peralatan (termasuk prosedur kendali mutu), teknik kompleks yang spesifik, dan kegiatan nonklinik lainnya.

2. Peralatan

Radioterapi secara umum dibedakan atas teleterapi dan brakiterapi. Teleterapi, atau terapi radiasi dengan berkas eksternal, dilakukan dengan berkas foton dan elektron, sedangkan brakiterapi dilakukan dengan menempatkan sumber radioaktif langsung ke dalam tubuh pasien (*implant*).

Berkas foton pada teleterapi dihasilkan oleh sumber radioaktif seperti ^{60}Co , sedangkan pesawat akselerator linier digunakan untuk memproduksi berkas foton dan berkas elektron energi tinggi. Beberapa teknik teleterapi yang banyak digunakan antara lain radioterapi konvensional 2-D, radioterapi konformal 3-D, radioterapi 4-D, *intensity modulated radiation therapy* (IMRT), *stereotactic radiosurgery* (SRS), *stereotactic radiotherapy* (SRS), *stereotactic body radiotherapy* (SBRT), *volumetric modulated arc therapy* (VMAT), *robotic radiotherapy*, dan *intraoperative radiotherapy* (IORT).

Sementara itu, Brakiterapi *implant* dapat bersifat sementara atau tetap. Perangkat *afterloading* akan menempatkan sumber radiasi ke dalam kateter yang telah dimasukkan ke dalam tubuh, meski bisa juga dimasukkan secara manual. Teknik memasukkan sumber radiasi ini dapat berupa *interstitial*, *intracavitary*, *surface*, atau *intraluminal*. Sementara itu, teknik brakiterapi sendiri antara lain laju dosis rendah (LDR), laju dosis menengah (MDR), laju dosis tinggi (HDR), dan laju dosis pulsa (PDR).

Tingkat laju dosis yang sesuai dengan teknik brakiterapi yang digunakan adalah sebagai berikut (Suntharalingam dkk., 2005, 454).

- 1) Laju dosis rendah (LDR): umumnya antara 0,4–20,0 Gy jam⁻¹. Pada LDR ini biasanya digunakan *implant* permanen.
- 2) Laju dosis menengah (MDR): umumnya lebih besar dai 2 Gy jam⁻¹, tetapi kurang dari 12 Gy jam⁻¹.
- 3) Laju dois tinggi (HDR): umumnya lebih besar dari 12 Gy jam⁻¹, dengan fraksi penyinaran individual diberikan dalam hitungan menit.
- 4) Laju dosis berdenyut (*pulsed dose rate*, PDR), di mana sumber aktivitas tinggi digunakan dengan pemberian siklik selama fraksi penyinaran sehingga laju dosis mirip dengan HDR selama bagian aktif siklus, namun meniru laju pemberian LDR selama fraksi penyinaran total. Laju dosis sesaat sekitar 1 hingga 3 Gy jam⁻¹.

Peralatan terapi eksternal harus dilengkapi paling kurang dengan:

- 1) pesawat sinar-X simulator dan/atau *CT-scan* simulator;
- 2) *treatment planning system* (TPS);
- 3) peralatan cetak (*mould equipment*); dan
- 4) perlengkapan kendali mutu.

Peralatan brakiterapi harus dilengkapi paling kurang dengan:

- 1) pesawat sinar-X *C-Arm* atau pesawat sinar-X simulator;
- 2) TPS;
- 3) peralatan cetak (*mould equipment*); dan
- 4) perlengkapan kendali mutu.

B. Tugas dan Tanggung Jawab

Setiap tenaga medis dan tenaga kesehatan yang bekerja pada suatu fasilitas radioterapi memiliki tugas dan tanggung jawab masing-masing. Untuk dokter spesialis onkologi radiasi atau dokter spesialis radiologi konsultan onkologi radiasi, tugas dan tanggung jawabnya adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) menentukan dan menjustifikasi penatalaksanaan radioterapi dalam bentuk tertulis;

- 2) memberikan konsultasi dan evaluasi klinis terhadap pasien;
- 3) menetapkan rencana penatalaksanaan yang optimal bekerja sama dengan fisikawan medis;
- 4) mengontrol tindakan penatalaksanaan secara rutin atau berkala;
- 5) memberikan evaluasi penatalaksanaan dan pemantauan pasien pasca penatalaksanaan;
- 6) memberikan ringkasan, tindak lanjut, dan evaluasi penatalaksanaan radioterapi; dan
- 7) memberikan evaluasi dari aspek medis jika ada kecelakaan radiasi.

Tugas dan tanggung jawab fisikawan medis dengan kualifikasi paling kurang S-2, yang disebut pula sebagai tenaga ahli, adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) meninjau ulang program proteksi dan keselamatan radiasi; dan
- 2) memberikan pertimbangan kepada pemegang izin berdasarkan aspek keselamatan radiasi, praktik rekayasa yang teruji, dan kajian keselamatan secara komprehensif untuk peningkatan layanan radioterapi.

Tugas dan tanggung jawab fisikawan medis, yang memiliki pendidikan S-1 fisika medis, adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) berpartisipasi dalam meninjau ulang secara terus-menerus tersedianya sumber daya manusia, peralatan, prosedur, dan perlengkapan proteksi radiasi;
- 2) mengembangkan persyaratan dan spesifikasi dalam pembelian peralatan radioterapi untuk keselamatan radiasi;
- 3) bekerja sama dengan dokter spesialis onkologi radiasi atau dokter spesialis radiologi konsultan onkologi radiasi dalam:
 - a) merencanakan fasilitas radioterapi; dan
 - b) merencanakan, mengevaluasi, dan mengoptimisasi rencana penatalaksanaan radioterapi;

- 4) melaksanakan uji keberterimaan, uji komisioning, dan kalibrasi peralatan radioterapi, bekerja sama dengan teknisi mediselektromedis;
- 5) mengukur dan menganalisis data berkas radiasi dan menabulasinya untuk kebutuhan klinis;
- 6) membuat prosedur perhitungan dosis;
- 7) menetapkan faktor fisika dalam perencanaan dan prosedur penatalaksanaan;
- 8) menerapkan program jaminan mutu radioterapi;
- 9) mengawasi pemeliharaan peralatan radioterapi;
- 10) mengawasi penyiapan dan penanganan, serta pemeliharaan inventarisasi zat radioaktif terbungkus untuk brakiterapi;
- 11) memastikan aktivitas zat radioaktif terbungkus; dan
- 12) membantu pemegang izin dalam mencari fakta dan mengevaluasi kecelakaan radiasi.

Tugas dan tanggung jawab petugas proteksi radiasi adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) membuat program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 2) memantau aspek operasional program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 3) memastikan bahwa perlengkapan proteksi radiasi tersedia dan berfungsi dengan baik;
- 4) memantau pemakaian perlengkapan proteksi radiasi;
- 5) memberikan konsultasi yang terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 6) berpartisipasi dalam mendesain fasilitas radioterapi yang terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 7) mengelola rekaman;
- 8) mengidentifikasi kebutuhan dan mengorganisasi kegiatan pelatihan proteksi dan keselamatan radiasi bagi personel;
- 9) melaporkan kepada pemegang izin setiap kejadian kegagalan operasi yang berpotensi menimbulkan kecelakaan radiasi;

- 10) menyiapkan laporan tertulis mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi, serta verifikasi keselamatan radiasi; dan
- 11) melakukan inventarisasi zat radioaktif terbungkus.

Tugas dan tanggung jawab radioterapis adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) melaksanakan pencitraan untuk simulasi terapi;
- 2) melaksanakan terapi radiasi sesuai dengan perencanaan pemberian radiasi, yang telah ditetapkan oleh dokter spesialis onkologi radiasi atau dokter spesialis radiologi konsultan onkologi radiasi dan fisikawan medis;
- 3) memberikan proteksi terhadap pasien dan masyarakat di sekitar ruang peralatan radioterapi;
- 4) menerapkan teknik dan prosedur yang tepat untuk meminimalkan paparan radiasi yang tidak perlu bagi pasien; dan
- 5) menerapkan dengan benar prosedur kerja dan teknik khusus radioterapi.

Tugas dan tanggung jawab dosimetris adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) membuat perencanaan radioterapi untuk terapi eksternal dan/atau brakiterapi;
- 2) melakukan pengukuran dosimetri; dan
- 3) melaksanakan program jaminan mutu.

Tugas dan tanggung jawab teknisi elektromedis adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) melakukan pemantauan fungsi dan pemeliharaan berkala peralatan radioterapi dan peralatan pendukung;
- 2) melakukan analisis kerusakan dan perbaikan peralatan radioterapi dan peralatan pendukung; dan

- 3) membuat laporan hasil pemeliharaan, analisis kerusakan, dan tindakan perbaikan.

Tugas dan tanggung jawab perawat adalah (Perka BAPETEN No. 3, 2013):

- 1) mendampingi dokter spesialis onkologi radiasi atau dokter spesialis radiologi konsultan onkologi radiasi dalam melakukan pemeriksaan pasien;
- 2) membantu pelaksanaan brakiterapi;
- 3) melakukan perawatan pasien setelah tindakan brakiterapi; dan
- 4) melakukan sterilisasi peralatan brakiterapi.

Tugas dan tanggung jawab teknisi ruang cetak adalah membuat aksesoris berdasarkan posisi dan imobilisasi pasien dan data TPS untuk membantu tindakan penatalaksanaan radioterapi (Perka BAPETEN No. 3, 2013).

C. Perlengkapan Proteksi Radiasi

Perlengkapan proteksi radiasi wajib disediakan oleh pemegang izin dan digunakan oleh pekerja radiasi yang relevan, terutama dokter spesialis onkologi radiasi atau dokter spesialis radiologi konsultan onkologi radiasi. Penggunaan perlengkapan proteksi radiasi dimaksudkan untuk memastikan agar nilai batas dosis bagi pekerja tidak terlampaui.

Perlengkapan proteksi radiasi ini meliputi perlengkapan untuk kepentingan individual pekerja radiasi maupun untuk mengukur tingkat paparan radiasi di daerah kerja, dengan rincian sebagai berikut:

- 1) surveimeter;
- 2) peralatan pemantau dosis perorangan;
- 3) apron; dan
- 4) pelindung organ.

Untuk brakiterapi manual, dilengkapi pula dengan:

- 1) tang penjepit;
- 2) kontener;
- 3) dosimeter jari; dan
- 4) blok Pb.

D. Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi

Berdasarkan Perka BAPETEN Nomor 3 Tahun 2013 dan publikasi SSG-46 oleh IAEA (2018), pedoman umum proteksi dan keselamatan radiasi pada radioterapi, yang harus dipatuhi oleh semua orang yang berkaitan dengan radioterapi, baik personel, pasien, maupun masyarakat umum, diberikan sebagai berikut.

- 1) Paparan radiasi dibatasi hanya pada daerah yang disinari dengan menggunakan perlengkapan kolimasi yang dipasang segaris dengan berkas radiasi.
- 2) Medan radiasi yang berada di dalam daerah terapi harus homogen.
- 3) Hamburan radiasi di sekitar ruangan radioterapi harus dipertahankan serendah mungkin yang dapat dicapai.
- 4) Desain peralatan radioterapi harus dipastikan memiliki paling sedikit dua sistem gagal-selamat (*fail-safe*) yang independen untuk menghentikan penyinaran dan berupa sistem saling-kunci (*interlock*) dan sistem manual.
- 5) Bangunan fasilitas radioterapi harus dilengkapi dengan:
 - a) sistem saling-kunci yang tidak bisa dibuka (*by-pass*) oleh siapa pun, kecuali di bawah kendali langsung teknisi medis-elektromedis pada saat pengoperasian selama pemeliharaan;
 - b) tanda radiasi pada pintu, panel kendali, kepala sumber pada peralatan teleterapi ^{60}Co , mesin *after-loading*, dan kontener penampung zat radioaktif terbungkus; dan
 - c) saluran kabel dosimetri untuk kegiatan kalibrasi peralatan radioterapi yang dipasang membentuk sudut 45° terhadap lantai.

- 6) Semua personel yang terlibat dalam penggunaan radioterapi harus mengetahui dan mematuhi peraturan yang berlaku. Untuk itu, pengembangan serta kajian peraturan tersebut harus melibatkan wakil semua tenaga medis dan tenaga kesehatan yang bekerja di bidang radioterapi ini.
- 7) Peralatan yang ada, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, harus dioperasikan dengan cara yang menjamin kinerja yang tinggi setiap saat, baik dari sisi tugas yang harus diselesaikan maupun dari sisi proteksi dan keselamatan radiasi. Buku manual petunjuk operasi merupakan dokumen acuan yang penting terkait hal ini.
- 8) Staf radioterapi harus memahami *standard operating procedures* (SOP) untuk pengoperasian peralatan yang digunakan, termasuk fitur keselamatannya, dan harus mendapat pelatihan serta penyegaran berkala tentang apa yang harus dilakukan jika terjadi kesalahan. Pendidikan dan pelatihan tambahan harus dilakukan jika perangkat atau teknik baru diperkenalkan ke dalam praktik radioterapi.
- 9) Kecuali pasien yang tengah menerima penyinaran, tidak boleh ada seorang pun berada di ruang penyinaran. Semua personel yang bekerja harus berada di belakang penahan radiasi yang digunakan.
- 10) Sumber tertutup yang digunakan, seperti ^{60}Co , harus menjalani uji bocor sebelum digunakan pertama kali dan secara berkala sesudahnya sesuai dengan standar internasional. Uji harus cukup sensitif untuk dapat mendeteksi keberadaan sejumlah kecil kontaminasi, misalnya 0,2 kBq, yang mungkin ada, tetapi bisa dihilangkan.
- 11) Survei daerah kerja harus dilakukan secara berkala, misalnya setiap enam bulan, di sekitar semua unit penyinaran dan sumber pengecek, termasuk unit ^{60}Co , dan tempat penyimpanan sumber brakiterapi LDR, MDR, dan HDR.
- 12) Persetujuan pasien (*informed consent*) untuk menerima penyinaran brakiterapi harus diperoleh sebelum penyinaran dilakukan.

Jika diperlukan prosedur operasi, izin tertulis harus diberikan sebelum operasi dimulai.

E. Pedoman Khusus Proteksi dan Keselamatan Radiasi

Mengingat setiap peralatan yang digunakan pada fasilitas radioterapi memiliki cara kerja yang berbeda satu sama lain, diperlukan suatu pedoman khusus proteksi dan keselamatan radiasi untuk masing-masing peralatan tersebut.

1. Sumber Teleterapi

Sumber teleterapi umumnya terdiri atas sumber radioaktif ^{60}Co atau ^{137}Cs dan pesawat akselerator linier (LINAC). Mengingat perawatannya yang lebih rumit, pesawat LINAC lebih disukai untuk digunakan dibandingkan sumber radioaktif sebagai sumber teleterapi. Namun, sampai saat ini masih ada fasilitas radioterapi yang masih menggunakan sumber radioaktif ^{60}Co dalam memberikan pelayanan radioterapinya. Pedoman khusus proteksi dan keselamatan radiasi untuk sumber teleterapi antara lain adalah sebagai berikut (Perka BAPETEN No. 3, 2013; IAEA, 2018).

- 1) Peralatan teleterapi ^{60}Co atau ^{137}Cs yang berisi zat radioaktif terbungkus harus dilengkapi dengan alat untuk mengembalikan sumber secara manual pada posisi terperisai.
- 2) Peralatan terapi eksternal harus dipasang dengan berkas utama diarahkan pada penghalang utama dengan perisai yang memenuhi persyaratan proteksi radiasi.
- 3) Pada pengoperasian akselerator linier (LINAC) yang mempunyai energi foton sinar-X di atas 10 MV, dinding perisai harus dilengkapi dengan bahan penyerap neutron.
- 4) Peralatan terapi eksternal harus tetap stabil berada pada setiap posisi dan dapat diubah pada posisi yang diperlukan.
- 5) Fasilitas radioterapi yang mempunyai terapi eksternal harus memiliki:

- a) ruang pemeriksaan;
 - b) ruang simulator;
 - c) ruang cetak (*mould room*);
 - d) ruang TPS;
 - e) ruang penyinaran; dan
 - f) ruang tunggu.
- 6) Operasi unit radioterapi berkas eksternal yang aman memerlukan prosedur untuk survei daerah kerja, pengecekan *interlock*, uji kebocoran (untuk sumber tertutup), dan prosedur untuk kemungkinan insiden, seperti sumber tersangkut pada posisi “on” atau sebagian pada posisi “on”. Prosedur ini harus dilengkapi dengan persyaratan bahwa peralatan yang diperlukan (antara lain pemantau radiasi, alat uji bocor, dosimeter alarm perorangan) tersedia, dikalibrasi, dan berfungsi dengan baik.
 - 7) Jika daerah kerja diduga memiliki medan radiasi tinggi, peman-tauan radiasi daerah kerja dapat dimulai dari luar ruangan tempat sumber berada menuju ke dalam ruangan atau dari daerah dengan tingkat dosis rendah menuju daerah dengan tingkat dosis tinggi.
 - 8) Keberadaan staf lain di sekitar panel kendali harus diupayakan seminimal mungkin untuk menghindari gangguan pada radio-terapis.
 - 9) Kegiatan pada LINAC yang melibatkan penyinaran dengan waktu agak panjang, seperti dalam rangka kalibrasi berkas, dosimetri, dan kendali mutu, harus dijadwalkan untuk dilaksanakan pada akhir daftar kegiatan hari sehingga radionuklida yang teraktif neutron (terutama yang berusia panjang) dapat meluruh secara signifikan dalam semalam.

2. Sumber Brakiterapi In Situ

Sumber brakiterapi in situ dapat dibedakan atas sumber brakiterapi dosis tinggi (HDR) dan sumber brakiterapi dosis rendah (LDR). Pedoman khusus secara umum dan untuk masing-masing jenis sumber brakiterapi adalah sebagai berikut (Perka BAPETEN No. 3, 2013; IAEA, 2018).

- a. Pedoman Khusus Sumber Brakiterapi In Situ Secara Umum
- 1) Untuk sumber brakiterapi in situ secara umum, pedoman khusus dalam kaitannya dengan proteksi dan keselamatan radiasi adalah:
 - a) ruang pemeriksaan;
 - b) ruang persiapan;
 - c) ruang aplikasi;
 - d) ruang TPS;
 - e) ruang penyinaran;
 - f) ruang penyimpanan zat radioaktif terbungkus; dan
 - g) ruang tunggu.
 - 2) Parameter penting, seperti aktivitas sumber radioaktif, waktu penyinaran, dan posisi sumber aplikator, jika ada, harus diperiksa secara independen oleh staf terlatih lain dan ditandatangani serta diberi tanggal pada rekaman penyinaran sebelum penyinaran tersebut dimulai.
 - 3) Kecuali untuk prosedur seperti penggunaan aplikator sinar beta, pada prosedur lain beberapa staf seperti fisikawan medis, PPR, atau staf terkait lainnya, harus hadir selama brakiterapi HDR dan pemberian brakiterapi LDR. Kehadiran ini untuk memastikan bahwa semua sumber telah dihitung sebelum, selama, dan setelah prosedur dilakukan dan bahwa tindakan keselamatan radiasi yang dilakukan telah sesuai dengan persyaratan.
 - 4) Daftar inventaris sumber harus dibuat dan dipelihara serta berisi jenis radionuklida, lokasi, dan aktivitas dengan tanggal acuan setiap sumber di fasilitas serta nomor seri atau *batch* dan pengenal unik. Pengenal unik dapat berupa pengenal dengan kode warna atau pengenal alfanumerik.
 - 5) Sumber radiasi tidak boleh ditinggal pada permukaan meja penyiapan. Sumber tersebut harus selalu berada di tempat penyimpanan, dalam transit, atau dalam penggunaan.
 - 6) Uji kebocoran harus dilakukan untuk sumber tertutup. Untuk sumber brakiterapi LDR berumur panjang, metode yang dilakukan adalah uji usap langsung, sedangkan untuk sumber yang dikendalikan dari jarak jauh, uji usap tidak langsung pada

permukaan terdekat yang dapat diakses. Untuk unit HDR/LDR, uji bocor harus dilakukan hanya pada perangkat penggerak *afterloading* dan kontener pengangkutan karena sumbernya sendiri memiliki laju dosis yang terlalu tinggi untuk dilakukan uji usap langsung.

- 7) Fasilitas atau tempat penyimpanan sumber harus diberi tanda untuk menunjukkan bahwa tempat tersebut mengandung bahan radioaktif. Instruksi tentang cara menghubungi fisikawan medis atau PPR jika terjadi keadaan darurat harus dipasang di depan fasilitas.
- 8) Proses sterilisasi dalam brakiterapi harus sesuai dan konsisten dengan rekomendasi pabrikan untuk mencegah kerusakan pada sumber dan aplikator yang dapat memengaruhi keselamatan.

b. Brakiterapi Dosis Tinggi (HDR)

Untuk sumber brakiterapi dosis tinggi (HDR), pedoman khusus dalam kaitannya dengan proteksi dan keselamatan radiasi adalah:

- 1) Sebelum penyinaran dimulai, rencana penyinaran disiapkan secara tertulis dan diverifikasi, wadah sumber ditaruh ditempatnya, dan sumber diperiksa. Dua orang staf terlatih harus memeriksa kesesuaian pasien yang akan menerima penyinaran dan kemudian menghubungkan peralatan dengan memeriksanya secara silang, memuat informasi pemrograman ke dalam komputer, dan memastikan bahwa alarm sumber-keluar diatur sebelum menutup pintu ke ruangan penyinaran.
- 2) Pada akhir penyinaran sesuai rencana, semua sumber radioaktif harus ditarik kembali. Pasien harus dipantau dengan monitor radiasi yang sesuai untuk memastikan semua sumber telah dikeluarkan dari pasien dan kemudian disimpan di dalam lemari khusus untuk menyimpan sumber.

c. Brakiterapi Dosis Rendah (LDR)

- 1) Brakiterapi LDR dapat diberikan, baik secara manual maupun dengan unit *afterloading* jarak jauh, dalam bentuk *plaque* sementara atau aplikator yang dimasukkan, atau sumber yang ditanam

- secara permanen. Penggunaan alat *afterloading* jarak jauh sangat disarankan daripada aplikasi manual karena memberikan proteksi radiasi yang lebih besar untuk staf dan masyarakat umum.
- 2) Sumber radioaktif harus ditangani dengan menggunakan *forcep* panjang atau penjepit.
 - 3) Setiap sumber radioaktif siap pakai yang tidak digunakan harus segera dikembalikan ke tempat penyimpanannya dan dicatat dengan baik oleh penanggung jawab sumber.
 - 4) Untuk sumber LDR yang akan dikeluarkan dari pasien, tenaga medis harus mengatur agar sumber tersebut dikembalikan sesegera mungkin ke tempat penyimpanannya. Dalam hal *afterloading* jarak jauh, unit penyinaran secara otomatis mengembalikan setiap sumber ke posisi yang terlindungi. Ketika dikeluarkan dari pasien, aplikator radioaktif harus segera diperiksa dari kemungkinan ada bagian yang terlepas.
 - 5) Fisikawan medis atau PPR harus secara berkala mengukur tingkat radiasi di ruangan dengan surveimeter untuk memastikan tidak ada sumber yang secara tidak sengaja tertinggal di pasien atau di ruangan. Tenaga kesehatan ini juga harus merekam waktu pemindehan dan jumlah sumber atau aplikator dalam catatan pasien. Sumber kemudian dikembalikan ke tempat penyimpanannya di mana setiap sumber dicatat oleh penanggung jawab sumber.
 - 6) Setiap sumber yang copot atau dikeluarkan sebelum waktunya dari pasien juga harus segera dikembalikan ke tempat penyimpanannya. Insiden ini harus dicatat dengan baik dan segera dilaporkan ke fisikawan medis atau PPR yang bertanggung jawab atas penyinaran.
 - 7) Jika pasien mendapat kunjungan, fisikawan medis atau PPR harus menentukan waktu maksimum dan jarak minimum dari pasien bagi pengunjung di ruang perawatan pasien. Jika yang digunakan sumber dengan energi rendah seperti ^{125}I , pembatasan minimal dapat diperlukan.
 - 8) Secara umum, wanita dalam kapasitas reproduktif dan anak-anak di bawah 16 tahun tidak boleh mengunjungi pasien yang sedang menjalani perawatan dengan brakiterapi LDR. Namun,

jika kunjungan diizinkan, kepatuhan terhadap batasan waktu dan jarak harus benar-benar diperhatikan.

- 9) Jika pasien brakiterapi LDR perlu dipindahkan dari bangsal ke tempat lain, idealnya sumber yang masih terpasang harus dikeluarkan terlebih dahulu. Jika hal ini tidak bisa dilakukan, petunjuk atau saran dari fisikawan medis atau PPR perlu diminta.

3. Pengelolaan Jasad Pasien yang Menjalani Penyinaran Brakiterapi In Situ

Jika seorang pasien meninggal selama menjalani penyinaran brakiterapi in situ, beberapa tindakan perlu dilakukan untuk menjaga agar pajanan radiasi di tempat kerja dan area publik masih dalam batas yang relevan dan serendah yang dapat dicapai. Beberapa tindakan tersebut adalah sebagai berikut (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, 2008).

- 1) Rekaman terkait status perawatan (rawat inap atau rawat jalan) pasien dan jenis sumber radioaktif yang dipasang pada pasien brakiterapi harus dibuat oleh fisikawan medis atau PPR dan diberikan kepada perawat yang bertugas, keluarga atau pendamping pasien, dan dokter yang menangani pasien.
- 2) Jika seorang pasien yang sedang dipasang aplikator atau *implant* radioaktif in situ meninggal dunia, perawat bangsal atau ruang perawatan harus segera memberi tahu fisikawan medis atau PPR mengenai hal ini. Dalam hal pasien meninggal di luar rumah sakit, pemberitahuan dapat dilakukan oleh keluarga atau pendamping pasien.
- 3) Aplikator atau *implant* sementara, yaitu yang dirancang untuk segera dikeluarkan setelah waktu tertentu (seperti pipa ^{137}Cs atau kawat ^{192}Ir) harus segera ditarik (dengan pembedahan jika perlu) dari tubuh pasien oleh personel yang berwenang segera setelah kematian untuk menghindari pajanan yang tidak diinginkan pada orang lain.
- 4) Untuk pasien yang meninggal saat menjalani *implant* permanen, fisikawan medis atau PPR harus menentukan tindakan proteksi

dan keselamatan radiasi yang diperlukan berdasarkan kajian keselamatan generik terkait pemantauan personel yang akan melakukan prosedur autopsi, pembalseman, penguburan atau kremasi, keperluan untuk pemantauan ruangan, kebutuhan untuk meminimalkan pajanan radiasi eksternal, dan kemungkinan terjadinya kontaminasi.

- 5) Pemantauan sekujur dan pemantauan jari mungkin diperlukan untuk individu yang melakukan autopsi atau pembalseman, karena kontaminasi dan limbah radioaktif kemungkinan besar akan terjadi.
- 6) Pertimbangan lain, seperti isu budaya atau etika, harus diperhitungkan. Contoh khusus adalah kremasi pasien dengan *implant* permanen, di mana pertimbangan proteksi radiasi yang ketat meminta agar abu harus disimpan sampai peluruhan hingga tingkat yang aman telah dicapai sebelum abu tersebut diserahkan ke keluarga. Kremasi juga mungkin tidak boleh dilakukan, dengan pertimbangan waktu kematian dan waktu paro radionuklida.

F. Penanggulangan Kedaruratan

Setiap pesawat teleterapi dapat gagal untuk berhenti atau terus menyinari pasien meskipun waktunya sudah habis. Petunjuk tindakan yang harus dilakukan untuk situasi semacam ini terdapat pada prosedur pemakaian dan harus dipasang di depan panel kendali pesawat. Operator harus berlatih menangani keadaan darurat ini sehingga terbiasa dengan tindakan yang harus dilakukan. Tindakan yang cepat dapat mengurangi bahaya bagi pasien.

Semua pesawat teleterapi menghasilkan radiasi yang menembus tubuh cukup dalam selama beroperasi. Untuk melindungi operator dan orang lain yang mungkin dapat berada di sekitar ruang penyinaran, dinding ruang harus cukup diberi perisai radiasi. Pengukuran tingkat radiasi di daerah sekitarnya harus dilakukan setelah suatu pesawat radioterapi dipasang, dengan berkas menyala dan diafragma pengatur luas lapangan (kolimator atau *jaw*) terbuka penuh. Pengukuran ini

dimaksudkan untuk menjamin keselamatan orang yang berada di daerah tersebut.

Dengan ruangan penyinaran yang diberi perisai radiasi yang cukup, operator pesawat radioterapi hanya akan sedikit atau bahkan sama sekali tidak akan menerima pajanan radiasi pada saat melakukan tugasnya. Pintu saling kunci ke ruangan akan mencegah pesawat bekerja pada saat pintu dibuka. Pengoperasian pesawat dengan pintu terbuka tidak hanya menyebabkan radiasi tersebar, tetapi juga dapat mengakibatkan orang yang tidak berwenang dapat masuk ke dalam ruang selama penyinaran. Pintu masuk dengan demikian perlu pula diberi tanda peringatan.

1. Pencegahan Kecelakaan

Seperti pada radiologi diagnostik, pencegahan merupakan cara terbaik untuk menghindari terjadinya keadaan darurat. Uraian terkait tata laksana pekerjaan yang baik dan penerapan pertahanan berlapis pada radiologi diagnostik juga berlaku untuk radioterapi ini.

Selain itu, beberapa tindakan yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kecelakaan adalah:

- 1) Berdasarkan kajian keselamatan, pemegang izin harus menguraikan langkah-langkah yang akan dilakukan jika terjadi keadaan darurat.
- 2) Menyertakan informasi mengenai tahapan pertahanan berlapis yang telah diidentifikasi pada pengkajian keselamatan dan mengevaluasi keandalan sistem keselamatan yang disusun, termasuk prosedur administratif dan operasional, peralatan, dan desain fasilitas pada dokumen program proteksi dan keselamatan radiasi yang merupakan bagian dari persyaratan permohonan izin pemanfaatan.
- 3) Menyertakan informasi mengenai pengalaman operasi dan pelajaran dari insiden dan kesalahan yang dijumpai di masa lalu ke dalam program pelatihan dan program pemeliharaan dan jaminan mutu.

2. Mitigasi Kecelakaan

Mengingat dosis radiasi yang sangat tinggi dapat diterima dalam waktu yang singkat, jika keadaan darurat terjadi pada fasilitas radioterapi, personel yang bertugas harus dapat bertindak dengan cepat. Karena itu, prosedur kedaruratan harus menentukan waktu tanggap yang pasti dan harus secara berkala diuji dalam latihan atau gladi.

Pajanan kerja yang diterima pekerja radiasi yang terlibat dalam penanggulangan keadaan darurat di fasilitas radioterapi sedapat mungkin harus dijaga di bawah nilai batas dosis untuk situasi pajanan terencana. Namun, jika nilai batas dosis diyakini akan terlampaui, pekerja kedaruratan harus dilindungi sesuai dengan persyaratan dan pedoman untuk situasi pajanan darurat. Dalam hal ini antara lain ditentukan bahwa untuk tujuan penyelamatan nyawa, seorang pekerja kedaruratan diizinkan untuk menerima dosis peorangan $H_p(10)$ hingga 500 mSv.

Beberapa kecelakaan yang mungkin terjadi adalah sumber radiasi macet pada saat digerakkan masuk atau keluar dari wadah penyimpanannya, pada saat pergantian sumber terjadi insiden atau kecelakaan karena ketidak hati-hatian, terjadi kontaminasi karena kebocoran akibat keretakan pada wadah penyimpanan, atau sumber brakiterapi terlempar dari kateter tanpa disadari operator. Tindakan yang dapat diambil untuk mengatasi berbagai kecelakaan tersebut antara lain adalah:

a. Sumber Macet: Umum

Jika terjadi sumber macet pada pesawat teleterapi, tindakan umum yang harus dilakukan adalah:

- 1) Prosedur mitigasi atau prosedur kedaruratan harus singkat, ringkas tidak bersifat ambigu dan sebaiknya diberi ilustrasi dengan gambar tanpa uraian penjelasan. Prosedur harus dapat langsung “tertangkap” dan dilaksanakan, dan berisi tindakan yang harus langsung dilakukan untuk mencegah atau membatasi pajanan berlebihan atau untuk melakukan tindakan penyelamatan nyawa. Tindakan berikutnya untuk memulihkan sumber, memperbaiki,

dan menguji peralatan agar berfungsi kembali seperti biasa tidak memiliki kepentingan mendesak yang sama.

- 2) Pasien pada teleterapi berada langsung pada berkas radiasi, sedangkan pada brakiterapi sumber radiasi dimasukkan ke dalam tubuh pasien. Mengingat hal ini, tanggap darurat akan sama dengan tindakan pemulihan sumber, seperti pengambilan sumber brakiterapi kendali jarak jauh dari pasien dan pengembaliannya ke tempat penyimpanan yang aman, baik secara manual, elektrik, atau menggunakan “engkol” manual.

b. Sumber Macet: Unit Teleterapi ^{60}Co

- 1) Prosedur mitigasi atau prosedur kedaruratan harus dipasang di ruang penyinaran. Prosedur harus memastikan bahwa pasien dipindahkan dari berkas primer secepat dan seefisien mungkin sambil meminimalkan pajanan radiasi pada personel yang terlibat dalam upaya mitigasi.
- 2) Langkah pertama dalam upaya mitigasi adalah mencatat waktu dan segera menggunakan mekanisme penggerak sumber untuk mengembalikan sumber ke posisi terlindung. Jika ada pasien di dipan, pasien harus dipindahkan dari ruangan dan ruangan diamankan agar tidak ada orang lain yang memasukinya dan menerima pajanan dari berkas primer.
- 3) Fisikawan medis atau PPR harus segera diberitahu dan mengam-bil alih kendali tindakan darurat, termasuk memutuskan kapan waktu yang tepat untuk dapat masuk kembali ke ruangan.
- 4) Sebelum penyinaran pasien dapat dilakukan kembali, fisikawan medis harus mengecek keluaran atau kalibrasi sumber terapi dan memverifikasi keluaran tidak berubah, terutama jika terjadi kesalahan pengatur waktu unit teleterapi.
- 5) Tindakan tersebut di atas harus dilakukan hanya oleh personel yang mempunyai pengetahuan dan terlatih dengan baik dalam tindakan tanggap darurat dan telah berpartisipasi secara teratur dalam latihan dan gladi.

c. Sumber Macet: Unit Brakiterapi Kendali Jarak Jauh

Jika terjadi sumber macet pada unit brakiterapi kendali jarak jauh, tindakan yang harus dilakukan adalah

- 1) Rencana kedaruratan pada unit brakiterapi kendali jarak jauh harus memuat kontener darurat yang tersedia di ruang penyinaran, serta kit kedaruratan yang berisi forsep bergagang panjang untuk manipulasi tabung pemandu sumber dan aplikator jika sumber gagal kembali ke tempat penyimpanannya.
- 2) Kontener darurat harus berada di dekat pasien dan cukup besar untuk diisikan seluruh rakitan aplikator yang berisi sumber yang telah dikeluarkan dari pasien. Staf yang bertugas harus telah dilatih untuk melakukan prosedur dan berpartisipasi dalam latihan dan gladi secara berkala.
- 3) Dalam aplikasi HDR, waktu tanggap yang singkat (hitungan menit) yang diperlukan untuk tindakan darurat memerlukan kehadiran yang segera dari tenaga medis, fisikawan medis, dan radioterapis selama semua pelaksanaan aplikasi. Setiap tenaga ini harus telah menerima pendidikan dan dilatih dalam prosedur dan tindakan darurat.
- 4) Pabrikan umumnya memberikan saran terkait prosedur kedaruratan jika sumber gagal kembali ke posisi amannya. Prosedur ini dibuat dengan anggapan bahwa integritas fisik aplikator masih terjaga. Karena itu, perlu diperhatikan apakah aplikator masih utuh jika akan menerapkan prosedur kedaruratan dari pabrikan ini.

d. Insiden dan Kecelakaan Saat Pergantian Sumber

Jika terjadi insiden dan kecelakaan saat pergantian sumber pada pesawat radioterapi, tindakan yang harus dilakukan adalah:

- 1) Insiden atau kecelakaan yang terjadi saat pergantian sumber di unit teleterapi atau brakiterapi kendali jarak jauh hanya boleh ditangani oleh personel pemeliharaan atau servis yang terlatih. Jika partisipasi personel radioterapi lain diperlukan, tugasnya dibatasi hanya untuk mengoperasikan peralatan.

- 2) Tanggung jawab masing-masing personel pemeliharaan atau servis dan personel radioterapi lain harus diuraikan dengan jelas pada prosedur terkait.

e. Kontaminasi

Jika terjadi kontaminasi pada pesawat radioterapi, tindakan yang harus dilakukan adalah:

- 1) Sumber tertutup ^{137}Cs yang digunakan pada *afterloading* manual mempunyai kemungkinan untuk pecah dan terjadi kontaminasi. Dalam kasus ini, daerah kerja yang terkontaminasi harus ditutup untuk mencegah masuknya seseorang ke daerah tersebut.
- 2) Semua individu yang terada di daerah terkontaminasi harus disurvei dengan *contamination meter* dan didekontaminasi jika perlu.
- 3) Jendela ruangan juga harus ditutup dan sistem ventilasi dimatikan.
- 4) PPR harus segera dihubungi jika kontaminasi diduga telah terjadi. Rincian kontak untuk PPR harus dipasang di seluruh fasilitas radioterapi.

f. Hilangnya Sumber Brakiterapi

Jika sumber brakiterapi dinyatakan hilang, tindakan yang harus dilakukan adalah:

- 1) Fisikawan medis atau PPR harus membuat dan memelihara daftar semua sumber yang dimiliki secara terperinci dan terkini sehingga jika ada sumber yang hilang dapat segera diketahui sumber yang mana, jenis dan aktivitasnya, lokasi terakhir yang diketahui, dan siapa yang terakhir menggunakannya.
- 2) Daerah di mana sumber terakhir diketahui harus ditutup dari kegiatan masuk dan keluar sampai suatu survei dilakukan. Pencarian harus dilakukan dengan survei meter yang paling sensitif yang tersedia.
- 3) Jika sumber tidak dapat ditemukan dan diduga berada di luar lokasi, otoritas terkait harus diberitahu dan tindakan untuk menemukannya harus dilakukan dengan segera.



PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI PADA KEDOKTERAN NUKLIR

Kedokteran nuklir adalah modalitas medis klinik yang menggunakan sejumlah kecil bahan radioaktif, yang disebut sebagai radiofarmaka, untuk digunakan memeriksa fungsi dan struktur organ. Modalitas ini dapat digunakan baik untuk tujuan diagnosis maupun mengobati kelainan sejak dini dalam perkembangan suatu penyakit, seperti kanker tiroid.

Seperti diagnostik radiologi dan radioterapi, aplikasi kedokteran nuklir yang memberikan manfaat dalam bidang medis juga memiliki potensi untuk menyebabkan kerugian bagi pasien, tenaga medis dan tenaga kesehatan, serta anggota masyarakat jika terjadi pajanan radiasi yang tidak diinginkan. Untuk itu, aplikasi kedokteran nuklir perlu dilakukan dengan sangat hati-hati dan cermat untuk mencegah terjadinya kecelakaan yang membahayakan kesehatan dan nyawa.

Fasilitas kedokteran nuklir pada umumnya dapat dibedakan atas kedokteran nuklir diagnostik in vitro dan kedokteran nuklir diagnostik in vivo dan/atau penelitian medis klinik dan penggunaan kedokteran nuklir terapi. Kedokteran nuklir diagnostik in vitro

Buku ini tidak diperjualbelikan.

adalah metode kedokteran yang dalam kegiatannya menggunakan radionuklida dan/atau radiofarmaka yang dilakukan di luar tubuh pasien untuk tujuan diagnostik melalui pemeriksaan spesimen biologis pasien, sedangkan kedokteran nuklir *in vivo* adalah metode kedokteran yang dalam kegiatannya menggunakan radionuklida dan/atau radiofarmaka yang dimasukkan ke dalam tubuh pasien untuk tujuan diagnostik. Radiofarmaka dalam hal ini adalah sejumlah kecil senyawa yang diberi label dengan pemancar foton atau positron.

Sementara itu, penelitian medis klinik adalah penelitian dalam kegiatan kedokteran nuklir yang melibatkan pasien sebagai obyek penelitian yang bertujuan untuk uji klinik radiofarmaka dan dilakukan sesuai dengan kode etik kedokteran medis klinik dan kedokteran nuklir terapi. Sedangkan metode kedokterannya menggunakan radionuklida dan/atau radiofarmaka yang dimasukkan ke dalam tubuh pasien untuk tujuan terapi.

John Funkhouser pada tahun 1998 memperkenalkan istilah teranostik untuk suatu metode yang menggabungkan modalitas terapi dengan pencitraan diagnostik (Levine & Krenning, 2017). Dalam kedokteran nuklir, teranostik mengacu pada penggunaan senyawa radioaktif untuk menggambarkan fenomena biologis melalui ekspresi target penyakit tertentu, seperti reseptor permukaan sel atau transporter membran, dan kemudian menggunakan agen yang dirancang khusus untuk mengirimkan radiasi pengion ke jaringan untuk mengekspresikan target ini (Marin dkk., 2020). Berdasar perkembangan ini, fasilitas kedokteran nuklir biasa disebut pula sebagai fasilitas kedokteran nuklir dan teranostik molekuler.

Pada Bab 6 ini akan diuraikan secara ringkas sumber daya manusia dan peralatan yang dibutuhkan untuk memberikan pelayanan kedokteran nuklir secara maksimal. Di samping itu, juga akan diuraikan tugas dan tanggung jawab setiap personel yang bekerja pada fasilitas kedokteran nuklir, perlengkapan proteksi radiasi yang dibutuhkan, pedoman umum dan pedoman khusus proteksi dan keselamatan radiasi di fasilitas kedokteran nuklir, dan penanggulangan kedaruratan yang perlu dilakukan pada suatu fasilitas kedokteran nuklir.

A. Sumber Daya Manusia dan Peralatan

Sumber daya manusia yang diperlukan pada suatu fasilitas kedokteran nuklir berbeda antara fasilitas kedokteran nuklir diagnostik in vitro dan fasilitas kedokteran nuklir in vivo dan/atau penelitian medis klinis dan terapi. Selain itu, peralatan yang dibutuhkan juga berbeda antara peralatan pada prosedur kedokteran nuklir diagnostik dan kedokteran nuklir terapi.

1. Sumber Daya Manusia

Karena kegiatan yang dilakukan cukup sederhana, suatu fasilitas kedokteran nuklir diagnostik in vitro hanya membutuhkan analis kesehatan dan PPR. Sementara itu, fasilitas kedokteran nuklir in vivo dan/atau penelitian medis klinis dan penggunaan kedokteran nuklir terapi membutuhkan sumber daya manusia paling kurang meliputi dokter spesialis kedokteran nuklir, fisikawan medis, PPR, radiofarmasis, radiografer, dan perawat.

2. Peralatan

Semua prosedur kedokteran nuklir melibatkan pemberian radio-nuklida dan/atau radiofarmaka kepada pasien. Untuk prosedur kedokteran nuklir diagnostik, distribusi radiofarmaka pemancar foton dalam tubuh manusia dapat dicitrakan dengan beberapa modalitas yang berbeda, seperti pencitraan planar (termasuk pencitraan sekujur) atau *single photon emission computerized tomography* (SPECT). Untuk pemancar positron, deteksi foton anihilasi memungkinkan dilakukannya pencatatan distribusi spasial 3-D dari radiofarmaka menggunakan *positron emission tomography* (PET). Detektor yang digunakan pada SPECT atau PET biasa disebut sebagai kamera gamma.

Dalam pencitraan hibrida, SPECT dan PET digabungkan dengan modalitas berbasis sinar-X, seperti pada *PET-computerized tomography* (PET-CT, SPECT-CT, baru-baru ini juga dengan *magnetic resonance imaging* (MRI), seperti pada PET-MRI). Selain itu, *probe* dapat digunakan untuk lokalisasi intraoperatif tumor dan kelenjar

Buku ini tidak diperjualbelikan.

getah bening atau kebocoran dan untuk pengukuran serapan pada organ tertentu, seperti tiroid atau paru-paru.

Dalam kedokteran nuklir terapi, kegiatan terapeutik radiofarmaka yang biasanya dilakukan dengan label radionuklida pemancar beta dan/atau gamma kini juga dilakukan dengan label pemancar alfa. Selain itu, terapi dengan elektron Auger saat ini juga tengah dikembangkan. Untuk mengurangi masalah pengangkutan, beberapa instalasi kedokteran nuklir juga memiliki fasilitas siklotron untuk memproduksi radionuklida di tempat.

B. Tugas dan Tanggung Jawab

Seperti pada fasilitas radiologi diagnostik dan fasilitas radioterapi, sumber daya manusia yang terlibat pada pelayanan kedokteran nuklir juga memiliki tugas dan tanggung jawab masing-masing sesuai dengan bidang pekerjaannya.

Sebagai salah seorang personel pada penggunaan kedokteran nuklir diagnostik in vitro, analis kesehatan memiliki tugas dan tanggung jawab sebagai berikut (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) melakukan elusi dan preparasi radionuklida dan/atau radiofarmaka;
- 2) mencatat dan melaporkan jumlah dan aktivitas radionuklida dan/atau radiofarmaka yang telah digunakan;
- 3) mencatat sisa radionuklida dan/atau radiofarmaka yang tidak digunakan dan memastikan penyimpanannya;
- 4) membuat *logbook* harian dan laporan bulanan secara tertulis mengenai penggunaan radionuklida dan/atau radiofarmaka;
- 5) mendokumentasikan seluruh kegiatan penggunaan radionuklida dan/atau radiofarmaka;
- 6) melaporkan segera kepada PPR jika terjadi kecelakaan radiasi; dan
- 7) membantu PPR dalam melakukan dekontaminasi.

Sementara itu, tugas dan tanggung jawab PPR baik untuk kedokteran nuklir in vitro maupun in vivo adalah (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) membuat program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 2) memantau aspek operasional program proteksi dan keselamatan radiasi;
- 3) menjamin bahwa perlengkapan proteksi radiasi tersedia dan berfungsi dengan baik pemakaiannya;
- 4) memantau pemakaian perlengkapan proteksi radiasi;
- 5) meninjau secara sistematis dan periodik pelaksanaan pemantauan pajanan radiasi pada saat penggunaan, pengangkutan, dan penyimpanan radionuklida dan/atau radiofarmaka;
- 6) memberikan konsultasi yang terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 7) berpartisipasi dalam mendesain fasilitas kedokteran nuklir;
- 8) mengelola rekaman;
- 9) mengidentifikasi, merencanakan, dan mengoordinasikan kebutuhan pelatihan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 10) melaksanakan latihan penanggulangan keadaan darurat;
- 11) melaporkan kepada pemegang izin setiap kejadian kegagalan operasi yang berpotensi menimbulkan kecelakaan radiasi;
- 12) melaksanakan penanggulangan keadaan darurat dan pencarian fakta dalam hal terjadi kecelakaan radiasi;
- 13) menyiapkan laporan tertulis mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi, dan
- 14) melakukan inventarisasi radionuklida dan/atau radiofarmaka.

Untuk kedokteran nuklir diagnostik in vitro dan/atau penelitian medis klinik serta penggunaan kedokteran nuklir terapi, dokter spesialis kedokteran nuklir mempunyai tugas dan tanggung jawab (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) menjamin pelaksanaan seluruh aspek keselamatan terhadap pasien;

- 2) memberi rujukan dan menjustifikasi diagnosis maupun terapi secara tertulis, dengan mempertimbangkan informasi terkait dari pemeriksaan sebelumnya;
- 3) menjamin bahwa paparan radiasi yang diterima pasien serendah mungkin yang dapat dicapai sesuai dengan tingkat panduan aktivitas;
- 4) memberikan konsultasi dan evaluasi klinis pasien;
- 5) menetapkan protokol optimisasi untuk kegiatan diagnosis dan terapi bekerja sama dengan fisikawan medis;
- 6) memberikan evaluasi penatalaksanaan dan pemantauan pasien; dan
- 7) memberikan informasi kepada pasien mengenai risiko pemberian radionuklida dan/atau radiofarmaka.

Selanjutnya, fisikawan medis yang memiliki pendidikan paling kurang S-2, yang kadang disebut sebagai tenaga ahli, memiliki tugas dan tanggung jawab sebagai berikut (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) meninjau ulang program proteksi dan keselamatan radiasi; dan
- 2) memberikan pertimbangan kepada pemegang izin mengenai aspek keselamatan radiasi, praktik rekayasa yang teruji, dan keselamatan secara komprehensif untuk peningkatan layanan kedokteran nuklir.

Sementara itu, fisikawan medis dengan pendidikan S-1 memiliki tugas dan tanggung jawab (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) berpartisipasi dalam meninjau ulang secara terus-menerus tersedianya sumber daya manusia, peralatan, prosedur, dan perlengkapan proteksi radiasi;
- 2) melakukan dan menetapkan prosedur perhitungan dosis;
- 3) memberikan kontribusi terhadap program pelatihan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 4) bekerja sama dengan dokter spesialis kedokteran nuklir dan PPR dalam merencanakan fasilitas kedokteran nuklir;

- 5) menyiapkan spesifikasi unjuk kerja peralatan yang berkaitan dengan proteksi dan keselamatan radiasi;
- 6) mengembangkan persyaratan dan spesifikasi dalam pembelian peralatan kedokteran nuklir yang menjamin keselamatan radiasi;
- 7) melaksanakan uji keberterimaan, komisioning, dan kalibrasi peralatan kedokteran nuklir;
- 8) menetapkan faktor fisika dalam perencanaan dan prosedur penatalaksanaan;
- 9) mendesain, menerapkan, dan mengawasi penerapan prosedur jaminan mutu kedokteran nuklir;
- 10) mengawasi pemeliharaan peralatan kedokteran nuklir; dan
- 11) berpartisipasi dalam hal pencarian fakta dan evaluasi kecelakaan radiasi.

Berikutnya, radiofarmasis sebagai personel pada penggunaan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* dan/atau penelitian medis klinik dan penggunaan kedokteran nuklir terapi mempunyai tugas dan tanggung jawab (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) memiliki pemahaman mengenai radionuklida dan/atau radiofarmaka yang digunakan dalam kedokteran nuklir;
- 2) bekerja sama dengan dokter spesialis kedokteran nuklir dalam hal penggunaan radionuklida dan/atau radiofarmaka;
- 3) melaporkan hasil elusi dan preparasi radionuklida dan/atau radiofarmaka kepada dokter spesialis kedokteran nuklir sebelum diberikan kepada pasien;
- 4) membuat petunjuk pelaksana dan kontrol kualitas elusi dan preparasi radionuklida dan/atau radiofarmaka;
- 5) memberikan rujukan dan justifikasi hasil elusi dan preparasi radionuklida dan/atau radiofarmaka kepada dokter spesialis kedokteran nuklir;
- 6) melaporkan segera kepada dokter spesialis kedokteran nuklir, PPR, dan fisikawan medis jika terjadi kecelakaan dalam melakukan elusi maupun preparasi radionuklida dan/atau radiofarmaka; dan

- 7) memastikan bahwa peralatan medis yang telah selesai digunakan disimpan/dibuang pada tempat yang telah ditentukan.

Untuk radiografer, tugas dan tanggung jawabnya adalah (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) memberikan proteksi terhadap pasien dan masyarakat di sekitar fasilitas kedokteran nuklir;
- 2) menetapkan teknik dan prosedur yang tepat untuk meminimalkan pajanan yang diterima pasien sesuai dengan kebutuhan dan standar operasional prosedur yang berlaku;
- 3) menerapkan dengan benar prosedur kerja dan teknik khusus penggunaan peralatan kedokteran nuklir;
- 4) menjamin bahwa pasien diidentifikasi dengan benar dan bahwa informasi mengenai pasien telah direkam dengan benar;
- 5) menyediakan informasi untuk pasien mengenai prosedur yang akan mereka jalani;
- 6) menyediakan informasi kepada orang yang menemani pasien dan kepada personel yang mengurus pasien setelah diagnosis atau terapi kedokteran nuklir;
- 7) memverifikasi radionuklida dan/atau radiofarmaka yang digunakan dan menghitung dosis radionuklida dan/atau radiofarmaka sebelum diberikan kepada pasien;
- 8) melaksanakan akuisisi dan proses citra yang tepat;
- 9) melakukan pemantauan pajanan radiasi dan kontaminasi radioaktif di daerah kerja secara reguler sesuai instruksi PPR;
- 10) menginformasikan PPR dalam kasus kecelakaan radiasi;
- 11) menginformasikan dokter spesialis kedokteran nuklir dan PPR dalam kasus tindakan atau pemberian radionuklida dan/atau radiofarmaka yang tidak sesuai prosedur kerja atau standar pelayanan medis; dan
- 12) berpartisipasi dalam pelatihan teknologi baru kedokteran nuklir.

Sementara itu, perawat mempunyai tugas dan tanggung jawab (Perka BAPETEN No. 17, 2012):

- 1) melaksanakan instruksi kerja dari dokter spesialis kedokteran nuklir dalam hal pelayanan terhadap pasien;
- 2) mempersiapkan peralatan kesehatan yang akan digunakan;
- 3) melakukan pengembalian sampel darah maupun pemberian radionuklida dan/atau radiofarmaka kepada pasien atas instruksi dokter spesialis kedokteran nuklir;
- 4) membersihkan dan membuang peralatan kesehatan yang telah digunakan ke tempat pembuangan yang telah disepakati bersama;
- 5) membuat catatan medis mengenai identifikasi pasien dan pemberian penomoran rekaman medis secara berurutan;
- 6) mempersiapkan ruang isolasi dan ruang rawat inap untuk pasien terapi;
- 7) menjelaskan kepada pasien mengenai prosedur perawatan pasien terapi dengan radionuklida dan/atau radiofarmaka sesuai dengan petunjuk pelaksanaan yang berlaku; dan
- 8) melaporkan kondisi pasien selama perawatan kepada dokter spesialis kedokteran nuklir.

C. Perlengkapan Proteksi Radiasi

Perlengkapan proteksi radiasi yang diperlukan untuk fasilitas kedokteran nuklir diagnostik in vitro cukup berbeda dengan yang diperlukan untuk fasilitas kedokteran nuklir diagnostik in vivo dan/atau penelitian medis klinis dan penggunaan kedokteran nuklir terapi. Perbedaan disebabkan oleh sifat pekerjaannya yang tidak sama.

1. Kedokteran Nuklir Diagnostik In Vitro

Mengingat kegiatan dalam penggunaan kedokteran nuklir diagnostik in vitro tidak terlalu rumit, perlengkapan proteksi radiasi yang diperlukan cukup surveimeter dan/atau monitor kontaminasi serta pemantau dosis perorangan.

2. Kedokteran Nuklir Diagnostik In Vivo dan/atau Penelitian Medis Klinis dan Penggunaan Kedokteran Nuklir Terapi

Kegiatan dalam penggunaan kedokteran nuklir diagnostik in vivo dan/atau penelitian medis klinik dan penggunaan kedokteran nuklir

terapi cukup bervariasi karena melibatkan penyiapan radiofarmaka dalam bentuk cair. Untuk itu, perlengkapan proteksi radiasi yang diperlukan minimal adalah:

- 1) surveimeter;
- 2) monitor kontaminasi;
- 3) monitor perorangan;
- 4) kontener;
- 5) tabung suntik yang diberi perisai radiasi;
- 6) apron;
- 7) jas laboratorium;
- 8) peralatan proteksi pernafasan;
- 9) sarung tangan;
- 10) pelindung organ;
- 11) *glove box*;
- 12) alat penjepit; dan/atau
- 13) monitor area

Untuk kedokteran nuklir terapi, peralatan tersebut perlu ditambah dengan dosimeter perorangan baca langsung dan monitor area di ruang penyiapan dan penyimpanan radionuklida dan/atau radiofarmaka.

D. Pedoman Umum Proteksi dan Keselamatan Radiasi

Beberapa pedoman umum proteksi dan keselamatan radiasi kedokteran nuklir, yang harus dipatuhi oleh semua orang yang berkaitan dengan kedokteran nuklir, baik personel, pasien, maupun masyarakat secara umum, seperti yang diberikan oleh IAEA (2018) pada publikasi SSG-46 dan Perka BAPETEN No. 17 Tahun 2012 adalah sebagai berikut.

- 1) Semua personel yang terlibat dalam penggunaan radiasi dalam kedokteran nuklir perlu mengetahui dan mengikuti aturan dan prosedur setempat. Oleh karena itu, Pengembangan dan

pengkajian aturan dan prosedur setempat ini harus melibatkan perwakilan dari semua tenaga medis dan tenaga kesehatan yang terlibat.

- 2) Peralatan yang ada, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, harus dioperasikan dengan cara yang menjamin kinerja yang tinggi setiap saat, baik dari sisi tugas yang harus diselesaikan maupun dari sisi proteksi dan keselamatan radiasi. Buku manual petunjuk operasi merupakan dokumen acuan yang penting terkait hal ini.
- 3) Staf kedokteran nuklir harus memahami *standard operating procedures* (SOP) untuk pengoperasian peralatan yang digunakan, termasuk fitur keselamatannya, dan harus mendapat pelatihan serta penyegaran berkala tentang apa yang harus dilakukan jika terjadi kesalahan. Pendidikan dan pelatihan tambahan harus dilakukan jika perangkat atau radiofarmaka baru diperkenalkan ke dalam praktik kedokteran nuklir.
- 4) Prosedur kerja, atau SOP, harus disusun sedemikian rupa untuk dapat meminimalkan pajanan dan kontaminasi radiasi, untuk mencegah terjadinya tumpahan dan jika tumpahan terjadi, dapat meminimalkan penyebaran kontaminasi di permukaan dan/atau udara. Misalnya, semua manipulasi untuk mengeluarkan bahan radioaktif harus dilakukan di atas baki dan/atau bantalan penyerap beralas plastik. Pekerjaan dengan sumber terbuka harus dibatasi seminimal mungkin di daerah khusus.
- 5) Makanan, minuman, kosmetik, rokok, dan alat makan tidak boleh dibawa ke daerah di mana bahan radioaktif terbuka digunakan. Pengecualian untuk hal ini adalah makanan yang diberi label dengan bahan radioaktif untuk studi pasien.
- 6) Makanan atau minuman tidak boleh disimpan dalam lemari es yang sama dengan untuk menyimpan bahan radioaktif terbuka. Ponsel dan sapatangan tidak boleh digunakan di daerah tersebut (karena itu, tisu harus disediakan dalam jumlah yang cukup). Sebelum memasuki ruangan di mana bahan radioaktif ditangani, setiap luka atau robekan pada kulit harus ditutup dengan pembalut tahan air.

- 7) Di ruangan yang diklasifikasikan sebagai daerah pengendalian, pakaian pelindung harus dipakai seperti yang ditentukan dalam kajian keselamatan. Pakaian pelindung tidak diperlukan oleh orang yang menemani pasien ke ruangan kamera gamma. Saat meninggalkan daerah pengendalian, pakaian pelindung yang terkontaminasi harus ditempatkan dalam kontener khusus.
- 8) Setelah melepas pakaian pelindung, staf yang meninggalkan daerah pengendalian harus mencuci tangannya dan memantau tangan, pakaian, dan tubuh mereka dari kemungkinan adanya sisa kontaminasi. Sabun cair harus tersedia, kecuali pertimbangan aseptik memerlukan pembersih alternatif. Sikat kuku non-abrasif hanya boleh digunakan jika kontaminasi masih tetap ada.
- 9) Pipet tidak boleh dioperasikan dengan mulut. Jarum suntik yang digunakan untuk menangani cairan radioaktif harus diberi penahan radiasi yang tepat. Jarak antara jari dan cairan radioaktif harus sejauh yang dapat diupayakan. Jarum yang telah digunakan untuk menyuntik pasien tidak boleh ditutup kembali. Alat penutup khusus harus digunakan untuk mencegah cedera akibat jarum.
- 10) Semua kontener yang digunakan untuk bahan radioaktif harus diberi label yang jelas dan mencantumkan nama radionuklida, bentuk kimia, dan aktivitasnya pada tanggal dan waktu tertentu. Nomor *batch* dan tanggal serta jam kedaluwarsa juga harus dicantumkan. Semua kontener harus disegel dan diberi penahan radiasi setiap saat. Kecuali jika aktivitasnya sangat rendah, kontener tidak boleh ditangani secara langsung, dan penjepit atau forsep untuk vial dan penahan radiasi jarum suntik harus digunakan. Rekaman persediaan, jumlah bahan radioaktif yang telah digunakan, dan pengelolaan limbah sementara di fasilitas harus disimpan dan dipelihara.
- 11) Jumlah bahan penahan radiasi yang dibutuhkan dapat diminimalkan dengan menempatkan bahan dekat dengan sumber radiasinya. Berbagai bahan dapat digunakan untuk tujuan ini, seperti timbal, tungsten, kaca timbal, dan komposit timbal. Penahan

radiasi yang mengandung akrilik biasanya lebih cocok untuk pemancar beta karena menurunkan jumlah bremsstrahlung yang dihasilkan. Timbal harus dilapis agar permukaannya bisa dibersihkan.

- 12) Semua kegiatan yang melibatkan gas radioaktif atau aerosol harus dilakukan di lemari asam atau perangkat berventilasi serupa untuk mencegah kontaminasi melalui udara. Ventilasi pembuangan harus ditempatkan jauh dari pemasukan udara.
- 13) Pengemasan dan kontener untuk bahan radioaktif harus diperiksa dari kemungkinan terkontaminasi pada saat dibuka.
- 14) Dokter spesialis kedokteran nuklir harus menerapkan tingkat panduan aktivitas maksimum radionuklida untuk pasien diagnostik seperti tercantum pada Tabel 3.8.
- 15) Pemberian radionuklida dan/atau radionuklida untuk penggunaan kedokteran nuklir diagnostik in vivo dan penggunaan kedokteran nuklir terapi pada pasien wanita hamil atau diperkirakan hamil harus dihindari, kecuali jika ada indikasi klinis yang kuat.
- 16) Pasien wanita yang menjalani terapi harus menunda kehamilan sampai jangka waktu tertentu sebagaimana tercantum pada Tabel 6.1.
- 17) Pasien wanita menyusui yang sedang menjalani diagnostik in vivo atau terapi harus menghentikan pemberian air susu ibu (ASI) dan perawatan pada bayi sebagaimana tercantum pada Tabel 6.2.
- 18) Pasien yang menjalani terapi radionuklida dan yang di tubuhnya masih terpasang sumber tertutup diizinkan untuk meninggalkan fasilitas kedokteran nuklir setelah aktivitas radionuklida pasien sedemikian rupa sehingga dosis radiasi yang diterima anggota masyarakat dan anggota keluarga dari pasien memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh otoritas yang berwenang. Tabel 6.3 memberikan nilai aktivitas radionuklida yang memberikan dosis sebesar 5 mSv dan 1 mSv.
- 19) Di Amerika Serikat, tingkat aktivitas dan laju dosis maksimum untuk pasien terapi yang boleh pulang diberikan pada Tabel 6.4.

Tabel 6.1 Rekomendasi untuk Menunda Kehamilan setelah Menjalani Terapi Radiofarmaka

Nuklida dan Bentuk	Penyakit	Semua aktivitas hingga ^a (MBq)	Penundaan Kehamilan (Bulan)
1	2	3	4
³² P fosfat	Polisitemia dan penyakit terkait	200	3
⁸⁹ Sr klorida	Metastase tulang	150	24
⁹⁰ Y koloid	Sendi rematik	400	0
⁹⁰ Y antibodi atau ⁹⁰ Y oktreatida	Kanker	4000	1
¹³¹ I iodida	Penyakit tiroid jinak	800	6–12
¹³¹ I iodida	Kanker tiroid	600	6–12
¹³¹ I MIBG ^b	Keganasan	7500	3
¹⁵³ Sm koloid	Metastase tulang	2600	1
¹⁶⁹ Er koloid	Sendi rematik	400	0

Ket.:

^a Pemberian aktivitas radiofarmaka yang lebih kecil dari yang ditunjukkan pada kolom 3 tidak berarti bahwa lama penundaan kehamilan yang ditunjukkan pada kolom 4 dapat dikurangi.

^b Metaiodobenzylguanidine

Sumber: IAEA (2018, 281)

Tabel 6.2 Rekomendasi Penghentian Air Susu Ibu (ASI) setelah Pemberian Radiofarmaka

Radiofarmaka	Penggunaan Klinik yang Paling Sering	Tipikal Aktivitas yang Diberikan (MBq)	Waktu Intensi Pembinaan ASI
¹¹ C bertanda	Pencitraan tumor, otak, atau miokardial	Setiap aktivitas	Tidak ada
¹³ N bertanda	Pencitraan miokardial	Setiap aktivitas	Tidak ada
¹⁵ O bertanda	Pengukuran aliran/perfusi	Setiap aktivitas	Tidak ada
¹⁸ F-FDG	Pencitraan tumor dan infeksi	400	4 jam ^a
⁵¹ Cr EDTA	GFR	2	Tidak ada

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Radiofarmaka	Penggunaan Klinik yang Paling Sering	Tipikal Aktivitas yang Diberikan (MBq)	Waktu Intेरupsi Pemberian ASI
⁶⁷ Ga-sitrat	Pencitraan tumor dan infeksi	200	> 3 minggu atau penghentian penuh
⁶⁸ Ga-DOTA terhubung peptida	Pencitraan tumor	100–200	4 jam ^a
^{99m} Tc-DMSA	Pencitraan kortikal ginjal	80–200	4 jam ^b
^{99m} Tc-DTPA	Pencitraan dan fungsi ginjal (GFR)	40–400	4 jam ^b
^{99m} Tc-ECD	Perfusi otak	800	4 jam ^b
^{99m} Tc-HMPAO	Perfusi otak	500	4 jam ^b
^{99m} Tc-MDP dan agen fosfat lainnya (mis. HDP dan DPD)	Pemindaian tulang	800	4 jam ^b
^{99m} Tc-MIBI	Perfusi miokardial, pemindaian paratiroid	250–700	4 jam ^b
^{99m} Tc-tetrofosmin	Perfusi miokardial	250–700	4 jam ^b
^{99m} Tc-SC	Pemindaian hati	200–400	4 jam ^b
^{99m} Tc-DTPA aerosol	Pencitraan dan fungsi ventilasi paru	50	4 jam ^b
^{99m} Tc karbon bertanda (Technegas)	Pencitraan ventilasi paru	40	4 jam ^b
^{99m} Tc-MAG3	Pencitraan dan fungsi ginjal dan saluran kemih	40–400	4 jam ^b
^{99m} Tc-perteknetat	Pemindaian tiroid, divertikulum Meckel	100–400	12 jam ^c
^{99m} Tc-MAA	Pencitraan perfusi paru	40–150	12 jam
^{99m} Tc-eksametazim WBC	Pencitraan infeksi	180–400	12 jam

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Radiofarmaka	Penggunaan Klinik yang Paling Sering	Tipikal Aktivitas yang Diberikan (MBq)	Waktu Intensi Pembe-rian ASI
^{99m} Tc bertanda RBC	Ventrikulografi radio-nuklida	800	12 jam
^{99m} Tc-me-brofenin/ disofenin dan turunan IDA lainnya	Pencitraan dan fungsi hepatobiliari	300	4 jam ^b
^{99m} Tc partikel nanokordial albumin ma-nusia	Simpul sentinel Pemindaian hati	5–120 120–200	4 jam ^b 4 jam ^b
¹¹¹ In-oktre-otida	Tumor neroendokrin (sintigrafi reseptor somatostatin)	120–200	60 jam (2,5 hari)
¹²³ I-MIBG	Pencitraan neroblas-toma	400	> 3 minggu atau penghentian penuh ^d
¹²³ I-Nal	Pencitraan dan fungsi tiroid	20	> 3 minggu atau penghentian penuh ^d
¹²³ I-ioflupane (FP-CIT)	Nerotransmisi dopa-minergik (DI) pada gangguan pergerakan	150–250	>3 minggu atau penghentian penuh ^d
¹²³ I-hippurate	Pencitraan dan fungsi ginjal dan saluran kemih	20–40	12 jam ^e
¹³¹ I-Nal	Diagnostik dan terapi penyakit tiroid jinak dan ganas	Setiap aktivitas	Penghentian penuh ^f
¹³¹ I-MIBG	Pencitraan dan terapi tumor adrenal	Setiap aktivitas	>3 minggu atau penghentian penuh
²⁰¹ Tl-klorida	Perfusi miokardial	100	96 jam (4 hari)

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Ket.:

DMSA	: <i>dimercaptosuccinic acid</i>	ECD	: <i>ethyl cysteinate dimer</i>
DTPA	: <i>diethylenetriaminepentaacetic acid</i>	DPD	: <i>dicarboxypropane diphosphonate</i>
EDTA	: <i>ethylene diamine tetraacetic acid</i>	HDP	: <i>hydroxymethane diphosphonate</i>
GFR	: <i>glomerular filtration rate</i>	FDG	: <i>fluorodeoxyglucose</i>
HMPAO	: <i>hexamethylpropyleneamine oxime</i>	IDA	: <i>iminodiacetic acid</i>
MAA	: <i>macroaggregate of albumin</i>	MAG3	: <i>mercaptoacetyltriglycine</i>
MDP	: <i>methylene diphosphonate</i>	MIBG	: <i>metaiodobenzylguanidine</i>
MIBI	: <i>methoxyisobutylisonitrite</i>	RBC	: <i>red blood cells</i>
WBC	: <i>white blood cells</i>	SC	: <i>sulphur colloid</i>

- a Waktu interupsi 4 jam di mana satu kali makan harus habis dengan mempertimbangkan pajanan internal dari ASI dan pajanan eksternal bayi dari ibu.
- b Waktu interupsi 4 jam di mana satu kali makan harus habis dengan memperhitungkan, baik pajanan internal dari ASI dalam situasi yang tidak biasa ketika perteknetat bebas tidak dapat diabaikan dan pajanan eksternal bayi dari ibu.
- c Aktivitas ^{99m}Tc -perteknetat lebih tinggi dari 400 MBq memerlukan waktu interupsi 24 jam.
- d Waktu interupsi yang direkomendasikan minimal tiga minggu untuk semua zat bertanda ^{123}I (kecuali *iodohippurate*) adalah karena risiko adanya pengotor isotop yodium lainnya (^{124}I atau ^{125}I).
- e Waktu interupsi 12 jam hanya menyangkut pasien dengan fungsi ginjal normal.
- f Pasien harus menghentikan menyusui 6 minggu sebelum pemberian radioiodin untuk meminimalkan dosis radiasi ke payudara.

Sumber: IAEA (2018, 283–285)

Tabel 6.3 Aktivitas (dalam MBq) untuk mengizinkan pasien pulang bergantung pada dosis eksternal pada orang lain (dosis efektif dalam mSv).

Radionuklida	Waktu Paro	MBq untuk 5 mSv	MBq untuk 1 mSv
^{111}Ag	7,45 hari	19000	3800
^{198}Au	65 jam	3500	690
^{51}Cr	28 hari	4800	960
^{64}Cu	13 jam	8400	1700
^{67}Cu	61 jam	14000	2900
^{67}Ga	78 jam	8700	1700
^{123}I	13 jam	6000	1200
^{125}I	60 hari	250	50
^{131}I	8 hari	1200	240

Radionuklida	Waktu Paro	MBq untuk 5 mSv	MBq untuk 1 mSv
¹¹¹ In	67 jam	2400	470
¹⁸⁶ Re	90 jam	28000	5700
¹⁸⁸ Re	17 jam	29000	5800
⁴⁷ Sc	80 jam	11000	2300
⁷⁵ Sc	119,8 hari	89	18
¹⁵³ Sm	47 jam	26000	5200
^{117m} Sn	13,61 hari	1100	210
^{99m} Tc	6 jam	28000	5600
²⁰¹ Tl	74 jam	16000	3100
¹⁶⁹ Yb	32 hari	370	73

Sumber: IAEA (2009, 50)

Tabel 6.4 Tingkat Aktivitas dan Laju Dosis yang di Bawahnya Pasien Diizinkan Pulang

Radionuklida	Aktivitas (GBq)	Laju Dosis pada Jarak 1 m (mSv/jam)
¹⁹⁸ Au	3,5	0,21
⁶⁷ Ga	8,7	0,18
¹²³ I	6,0	0,26
¹³¹ I	1,2	0,07
¹¹¹ In	2,4	0,2
¹⁸⁶ Re	28	0,15
¹⁸⁸ Re	29	0,20
¹⁵³ Sm	5–26	0,06–0,3
^{99m} Tc	28	0,58
²⁰¹ Tl	16	0,19
¹⁶⁹ Yb	0,37	0,02

Sumber: IAEA (2009, 51)

E. Pedoman Khusus Proteksi dan Keselamatan Radiasi

Mengingat setiap prosedur penatalaksanaan pada fasilitas kedokteran nuklir berbeda satu sama lain, diperlukan suatu pedoman khusus proteksi dan keselamatan radiasi untuk masing-masing prosedur tersebut. Pedoman khusus proteksi dan keselamatan radiasi untuk

setiap prosedur penatalaksanaan kedokteran nuklir yang diuraikan di bawah ini diberikan oleh IAEA (2018).

1. Terapi Radiofarmaka

Pedoman khusus proteksi dan keselamatan radiasi pada terapi radiofarmaka adalah sebagai berikut.

- 1) Radiofarmaka umumnya diberikan secara oral atau dengan suntikan intravena (sistemik), suntikan intra-arterial (lokoregional), instilasi ke dalam sendi tertutup (intra-artikular/radiosinoviorthesis), dan rongga tubuh (intrakavitari).
- 2) Jarum suntik berperisai radiasi harus digunakan selama pemberian radiofarmaka secara intravena atau intra-arterial untuk memastikan dosis ekstremitas selalu berada di bawah penghambat dosis. Bahan atau bantalan penyerap harus ditempatkan di bawah tempat suntikan atau infus. PPR di fasilitas harus dikonsultasikan untuk menentukan kebutuhan peralatan pelindung lainnya (seperti penutup sepatu dan bantalan pijakan) untuk terapi radiofarmaka tertentu.
- 3) Untuk pemberian intravena atau intra-arterial dengan suntikan bolus, jika laju dosis diinginkan, jarum suntik harus ditempatkan di dalam suatu perisai radiasi (biasanya perisai plastik untuk radionuklida pemancar beta untuk meminimalkan bremsstrahlung atau perisai dengan bahan dengan nomor atom tinggi untuk radionuklida pemancar foton), dengan jendela transparan agar bahan dalam jarum suntik dapat terlihat.
- 4) Untuk pemberian intravena dengan tetesan atau infus, kontener yang berisi bahan radioaktif harus ditempatkan dalam perisai radiasi yang sesuai. Untuk foton energi tinggi, ketebalan Pb yang signifikan atau bahan dengan nomor atom tinggi lainnya mungkin diperlukan.
- 5) Untuk pemberian radiofarmaka terapi secara oral, bahan radioaktif harus ditempatkan dalam kontener yang berperisai dan tahan tumpah. Kemungkinan terjadinya cairan yang memercik atau kapsul jatuh perlu diperhatikan. Alat dengan gagang yang

Buku ini tidak diperjualbelikan.

panjang harus digunakan saat menangani bahan radioaktif yang tidak diberi perisai radiasi.

- 6) Pasien rawat inap untuk terapi dengan radiofarmaka harus ditangani oleh staf (dokter, perawat, staf kebersihan, dan juga staf malam) yang telah terlatih dalam proteksi dan keselamatan radiasi. Pelatihan harus mencakup juga situasi di mana ada risiko kontaminasi yang signifikan dari urin, feses, atau muntahan. Perawat bangsal juga harus diberitahu bahwa pasien dapat menimbulkan bahaya radioaktif.
- 7) Aturan setempat mengenai jenis keperawatan yang dapat dilakukan sesuai dengan tingkat bahaya radiasi perlu ditetapkan. Perawatan non-esensial umumnya bisa ditunda sambil menunggu pengurangan aktivitas radioaktif melalui peluruhan dan ekskresi. Analisis darah dan urin harus dilakukan sebelum terapi dilakukan. Prosedur untuk menangani barang yang berpotensi terkontaminasi (misalnya seprai, pakaian, handuk, alat makan, atau pispot) juga perlu disusun.
- 8) Ruang perawatan yang ditempati pasien penerima radiofarmaka harus ditetapkan sebagai daerah pengendalian dan tanda radiasi harus dipasang di pintu masuk. Akses masuk dibatasi hanya untuk staf yang relevan dan pakaian pelindung, seperti lab jas, sarung tangan, dan pelindung sepatu harus tersedia di pintu masuk ruangan. Staf perawat harus memahami implikasi dari prosedur untuk daerah pengendalian, waktu dan tanggal pemberian radiofarmaka, dan instruksi lain yang relevan bagi pendamping pasien.
- 9) Saat meninggalkan ruang kerja atau ruang perawatan pasien, staf medis harus melepas setiap pakaian pelindung dan mencuci tangannya.
- 10) Pasien yang menjalani terapi radiofarmaka harus menggunakan toilet khusus. Langkah-langkah untuk meminimalkan kontaminasi harus diterapkan (seperti meletakkan kertas penyerap beralas plastik di lantai dan instruksi untuk duduk saat menggunakan toilet dan menyiramnya paling sedikit dua kali).

- 11) Alat-alat kesehatan sedapat mungkin dibungkus untuk mencegah kontaminasi. Stetoskop, misalnya, dapat dibungkus dengan sarung tangan. Alat pengukur tekanan darah dan termometer harus tetap berada di dalam ruangan sampai pasien dipulangkan dan kemudian diperiksa terhadap kemungkinan adanya kontaminasi sebelum digunakan seperti semula.
- 12) Staf ruangan harus mengetahui prosedur perawatan dan riwayat medis pasien yang relevan. Jika kondisi medis pasien memburuk sehingga diperlukan perawatan intensif, saran dari PPR harus segera diminta. Sementara perawatan medis mendesak merupakan prioritas dan tidak boleh ditunda, staf medis perlu pula dibatasi waktunya untuk berada di dekat pasien.

2. Fasilitas PET

Untuk fasilitas PET, upaya proteksi dan keselamatan radiasi yang bersifat khusus adalah sebagai berikut.

- 1) Pekerja yang melakukan pencitraan PET dapat menerima dosis tahunan yang relatif lebih tinggi dibandingkan pekerja kedokteran nuklir lainnya. Kontribusi utama dosis pekerja berasal dari penanganan pasien. Radiofarmasi PET di fasilitas yang melakukan sintesis radiofarmaka dan penyiapan dosis dapat menerima dosis yang signifikan di tangan dan tubuhnya, bahkan jika *hot cell* berperisai digunakan untuk menurunkan tingkat dosis radiasi tersebut. Oleh karena itu, aturan dan prosedur setempat untuk fasilitas PET harus cukup ketat untuk meminimalkan dosis pada pekerja saat menangani radiofarmaka dan pasien yang mengandung radiofarmaka.
- 2) Radiofarmaka harus disimpan dan dipindahkan di dalam kontener Pb atau tungsten yang didesain khusus untuk membatasi tingkat radiasi eksternal dari radionuklida yang digunakan untuk PET. Perisai plastik tambahan di dalam perisai jarum suntik Pb atau tungsten akan menyerap positron sebelum mengenai tungsten sehingga dapat meminimalkan produksi bremsstrahlung yang tidak diinginkan. Penggunaan penjepit untuk menangani

Buku ini tidak diperjualbelikan.

vial radiofarmaka tanpa perisai akan mengurangi dosis pada tangan. Saat ini sudah ada sistem otomatis untuk memasukkan radiofarmaka secara aman dan cepat ke dalam jarum suntik sehingga meminimalkan gerakan operator.

3. Terapi Kanker Tiroid dengan Radionuklida ^{131}I

Dalam hal terapi kanker tiroid dengan radionuklida ^{131}I , upaya proteksi dan keselamatan radiasi yang khusus adalah sebagai berikut.

- 1) Pasien yang menjalani terapi kanker tiroid dengan radionuklida ^{131}I perlu diisolasi dan dirawat di rumah sakit karena pasien dapat mengalami pusing dan muntah setelah pemberian radionuklida dalam jumlah besar dan situasi ini dapat ditangani dengan lebih baik di fasilitas kedokteran nuklir di rumah sakit.
- 2) Staf perawat bangsal dapat menerima pajanan kerja dan karena itu perlu dilengkapi dengan pemantau radiasi perorangan yang harus dipakai setiap kali bekerja.
- 3) Staf perawat yang tengah hamil tidak boleh merawat pasien.
- 4) Makanan pasien harus disajikan dalam nampan, piring, dan alat makan lain yang bersifat sekali pakai.
- 5) Tugas-tugas keperawatan dalam jarak 2 m dari pasien harus dilakukan secara cepat dan efisien untuk mengurangi waktu pajanan.
- 6) Gaun dan sarung tangan penahan radiasi harus dipakai pada semua prosedur yang bersinggungan langsung dengan pasien atau pada saat menangani pendorong ranjang, kantong kateter, dan botol urin.
- 7) Ruang perawatan dan kamar mandi harus dipantau oleh PPR setelah pasien dikeluarkan. Setelah dinyatakan bersih dari radioaktif, kepala bangsal dapat melakukan pembersihan menyeluruh terhadap ruangan.
- 8) Akses pengunjung ke pasien terapi dibatasi tidak lebih dari 15–30 menit setiap harinya. Pengunjung harus berada pada jarak 2 m dari pasien. Wanita hamil dan anak-anak tidak diperbolehkan berkunjung.

- 9) Untuk pasien yang sudah diizinkan pulang, sebelum meninggalkan fasilitas kedokteran nuklir harus mandi yang bersih dan cuci tangan dengan hati-hati.
- 10) Untuk pasien yang sudah pulang, selama dua minggu, jika terapi yang pertama kali, atau satu minggu, jika bukan yang pertama, beberapa pedoman berikut perlu diikuti.
 - a) Lanjutkan tindakan bersih-bersih tubuh. Mandi dan cuci tangan setiap hari, terutama sebelum menyiapkan makanan dan setelah menggunakan toilet.
 - b) Hindari kontak langsung dengan wanita hamil dan anak-anak. Jangan tidur di ranjang yang sama dengan remaja atau anak-anak.
 - c) Hindari kontak berkepanjangan dengan orang lain. Jangan pergi jauh dengan kendaraan umum atau menonton bioskop atau tempat-tempat umum lainnya.
 - d) Jaga kebersihan toilet dan bilas dua kali setelah pemakaian. Pasien pria harus duduk saat membuang air kecil.
 - e) Hindari bertukar pelembab tubuh, berciuman, atau berhubungan badan. Jangan berbagi minuman, sikat gigi, dan lain-lain dengan orang lain.
- 11) Pasien yang sudah pulang pada prinsipnya sudah boleh kembali bekerja seperti biasa, tetapi jika harus bekerja cukup dekat dengan orang dewasa yang lain, harus menunggu dua atau tiga hari terlebih dahulu dan jika bekerja dengan bayi atau anak kecil, harus menunggu selama satu minggu setelah kepulangan dari fasilitas kedokteran nuklir.

4. Thyrotoksikosis

Secara khusus, prosedur thyrotoksikosis memerlukan upaya proteksi dan keselamatan radiasi sebagai berikut.

- 1) Thyrotoksikosis adalah penatalaksanaan penyakit tiroid *benign*—hyperthyroidism (penyakit Graves) dan gondok multinodular toksik dengan aktivitas ^{131}I yang diberikan berada dalam rentang

- 0,3 hingga 1 GBq. Lebih dari 60% aktivitas yang diberikan akan diambil oleh kelenjar tiroid dan mengendap cukup lama di tubuh.
- 2) Penatalaksanaan dengan ^{131}I untuk thyrotoksikosis biasanya tidak memerlukan pasien agar rawat inap. Meskipun aktivitas yang diberikan ke pasien lebih sedikit dari jumlah yang diberikan untuk kanker tiroid, ambilan dan pengendapannya di tubuh jauh lebih lama. Tindakan pencegahan yang diperlukan akan lebih lama dibanding dengan setelah penatalaksanaan untuk kanker tiroid.
 - 3) Dua minggu setelah pasien menjalani penyinaran, beberapa pedoman berikut perlu diikuti.
 - a) Kebersihan diri merupakan hal yang utama. Mandi setiap hari. Cuci tangan dengan hati-hati, terutama sebelum menyiapkan makanan dan setelah menggunakan toilet.
 - b) Hindari kontak langsung dengan wanita hamil dan anak-anak. Jangan tidur di ranjang yang sama dengan remaja atau anak-anak.
 - c) Hindari kontak berkepanjangan dengan orang lain. Jangan pergi jauh dengan kendaraan umum atau menonton bioskop atau tempat-tempat umum lainnya.
 - d) Jaga kebersihan toilet dan bilas dua kali setelah pemakaian. Pasien pria harus duduk saat membuang air kecil.
 - e) Hindari bertukar pelembab tubuh, berciuman, atau berhubungan badan. Jangan berbagi minuman, sikat gigi, dan lain-lain dengan orang lain.
 - 4) Pasien yang sudah pulang pada prinsipnya sudah boleh kembali bekerja seperti biasa, tetapi jika harus bekerja cukup dekat dengan orang dewasa yang lain, harus menunggu 2 atau 3 hari terlebih dahulu dan jika bekerja dengan bayi atau anak kecil, harus menunggu selama satu minggu.

5. Terapi dengan Radionuklida ^{90}Y

Upaya proteksi dan keselamatan radiasi yang khusus dilakukan pada terapi dengan radionuklida ^{90}Y adalah sebagai berikut.

- 1) Radionuklida ^{90}Y dipasok sebagai koloid yang disuntikkan ke dalam sendi yang sakit dan akan terus berada di dalamnya sampai meluruh. Penempatan jarum yang akurat pada ruang sendi sangat penting untuk menghindari nekrosis jaringan. Prosedur harus dilakukan oleh dokter yang berpengalaman. Pedoman fluoroskopik diperlukan pada kasus-kasus yang sulit.
- 2) Ginjal tidak mengeluarkan radioaktivitas ^{90}Y . Paparan radiasi di dekat sendi yang sakit juga sangat rendah dan bahaya radiasi boleh dikatakan dapat diabaikan sehingga pasien tidak memerlukan ruang khusus.
- 3) Pasien harus beristirahat di ranjang dengan sendi yang sakit dibebat selama 48 jam. Selama pembebatan, sendi ini tidak perlu dicuci.
- 4) Pasien dianjurkan untuk dapat mencuci dirinya sendiri sebisa mungkin dengan air di panci (*pan*) yang ditempatkan di ranjang. Perawat harus menyelesaikan pencucian badan pasien dan mengganti seprai jika kotor.
- 5) Cuci panci, bedpan, dan lain-lain seperti biasa karena tidak ada kontaminasi radioaktif di barang-barang tersebut.
- 6) Jangan berdiri terlalu dekat dengan sendi yang sakit kecuali kalau perlu.
- 7) Beri tahu ahli reumatik jika tempat yang disuntik meradang atau sakit.

6. Terapi dengan Radionuklida ^{89}Sr

Pada terapi dengan radionuklida ^{90}Sr , upaya proteksi dan keselamatan radiasi yang khusus adalah sebagai berikut.

- 1) Radionuklida ^{89}Sr kadang-kadang digunakan untuk meringankan sakit yang diderita pasien kanker prostat dan telah menyebar ke tulang. Setelah penyuntikan intravena, ^{89}Sr akan berkumpul di metastase tulang dan juga dikeluarkan melalui urin. Paparan radiasi bagi staf yang berada di dekat pasien sangat rendah sehingga tidak diperlukan pemantauan radiasi. Bahaya utama berasal dari kontaminasi dari urin.

- 2) Akomodasi kamar khusus tidak diperlukan, tetapi lantai kamar harus terbuat dari bahan anti serap, mulus, dan dapat dicuci, sedapat mungkin lembaran vinil.
- 3) Perawat yang menangani pasien yang menjalani terapi dengan radionuklida ^{89}Sr harus melakukan beberapa tindakan sebagai berikut.
 - a) Pasien harus diberitahu untuk menghindari kontaminasi kulit, toilet, dan kamar mandi dengan urin radioaktif.
 - b) Gunakan jas lab dan sarung tangan pada saat menangani botol urin, nampan, dan lain-lain.
 - c) Jika pasien merasa tidak nyaman pada minggu pertama setelah penyuntikan ^{89}Sr , beri tahu staf fasilitas kedokteran nuklir karena kateter urin mungkin akan diperlukan.
 - d) Masukkan kain kotor ke dalam kantong plastik untuk dipantau PPR sebelum dikirim ke tempat cuci.
 - e) Jika pasien muntah atau merasa tidak enak, ikuti prosedur penanganan yang diberikan PPR.

F. Penanggulangan Kedaruratan

Fasilitas kedokteran nuklir yang memiliki beberapa jenis pelayanan dan peralatan memungkinkan terjadinya kecelakaan terkait sumber radioaktif atau perangkat mesin yang digunakan. Selain itu, pelayanan kedokteran nuklir yang banyak menggunakan sumber radioaktif dalam bentuk cair memiliki potensi terjadinya tumpahan. Untuk hal ini maka telah disusun beberapa metode penanggulangan kedaruratan yang dapat dikerjakan apabila kecelakaan terjadi.

1. Sumber Radiasi Hilang

Fasilitas kedokteran nuklir harus memiliki dan selalu memutakhirkan rekaman mengenai sumber radiasi atau radiofarmaka yang ada sehingga dengan segera dapat diketahui sumber radiasi mana yang hilang, jenis dan aktivitasnya, kapan dan di mana lokasi terakhir sumber radiasi tersebut, dan siapa yang menggunakannya. Catatan yang rapi juga perlu disusun mengenai kapan diterimanya sumber

radiasi yang dipesan, tepat waktu, ataupun tertunda. Namun, jika sumber radiasi tetap hilang, tindakan berikut harus terdapat pada rencana kedaruratan.

- 1) Laporkan dan cari bantuan dari PPR.
- 2) Lakukan pencarian di sekitar lokasi terakhir yang diketahui.
- 3) Cek dan pastikan keamanan dan pengendalian sumber radiasi yang lain jika diduga terjadi pencurian di fasilitas.
- 4) Cek semua kemungkinan yang dapat terjadi.
- 5) Jika tidak ditemukan, hubungi pemasok dan informasikan hal ini sehingga mereka dapat merunut pengiriman dan menemukan di mana bahan radioaktif ini berada.
- 6) Jika tetap tidak ditemukan, laporkan hilangnya sumber radiasi ini sesuai dengan ketentuan ke BAPETEN.

2. Kerusakan Generator Radionuklida

Generator radionuklida, seperti generator untuk ^{68}Ga , ^{82}Rb , dan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ mengandung radioaktif dalam jumlah yang cukup besar. Jika generator radionuklida rusak, tindakan berikut perlu diambil.

- 1) Kosongkan lokasi sekitar generator dengan segera dan lakukan tindakan untuk mencegah masuknya seseorang ke lokasi.
- 2) Beri tahu PPR yang harus memastikan apakah ada tumpahan radioaktif dan melaksanakan atau mengawasi tindakan dekontaminasi dan pemantauan.
- 3) Catat insiden atau kecelakaan ini dan buat laporan sesuai dengan ketentuan BAPETEN.

3. Tumpahan Radioaktif dalam Jumlah Rendah

Jika terjadi tumpahan radioaktif dalam jumlah yang rendah, misalnya sejumlah kecil radiofarmaka nontoksik yang mudah dihilangkan, seperti ^{18}F atau $^{99\text{m}}\text{Tc}$ sampai 10 MBq, tindakan berikut perlu dilakukan.

- 1) Gunakan pakaian pelindung dan sarung tangan sekali pakai.
- 2) Serap dengan cepat tumpahan dengan bantalan penyerap untuk menjaganya tidak menyebar lebih jauh.

- 3) Lepaskan bantalan dari tumpahan dan buang.
- 4) Usap dengan tisu atau kertas penyerap dari pinggir daerah yang terkontaminasi ke arah tengah.
- 5) Pantau tisu atau kertas penyerap untuk melihat aktivitas yang masih ada, misalnya dengan monitor kontaminasi atau lakukan uji usap.
- 6) Lanjutkan siklus pembersihan dan pemantauan sampai pengukuran menunjukkan bahwa tumpahan telah hilang dan upayakan agar volume limbah kontaminasi sekecil mungkin. Dalam beberapa hal, untuk sekitar 200 radionuklida berumur pendek, akan lebih mudah untuk menutup daerah dan mencegah akses ke daerah terkontaminasi dalam beberapa waktu hingga mekanisme peluruhan membuat aktivitas sisa menjadi sangat rendah.
- 7) Gunakan kantong plastik untuk menyimpan barang-barang yang terkontaminasi. Tas dan kertas penyerap yang sesuai harus tersedia.
- 8) Jika proses dekontaminasi tidak berhasil, hubungi PPR.
- 9) Pantau semua orang yang berada di ruang kerja saat tumpahan terjadi dari kemungkinan adanya kontaminasi, terutama pantau sepatu jika tumpahan terjadi di lantai.

4. Tumpahan Radioaktif dalam Jumlah Besar

Jika terjadi tumpahan radioaktif dalam jumlah besar, tindakan berikut perlu dilakukan.

- 1) Lempar bantalan penyerap ke tumpahan untuk mencegah tersebarnya kontaminasi lebih lanjut.
- 2) Keluarkan dengan segera orang-orang yang tidak terlibat dengan tumpahan dari area tumpahan.
- 3) Beri tahu PPR dengan segera dan lakukan upaya pembersihan sesuai arahnya.
- 4) Pantau tingkat kontaminasi semua orang yang terlibat dalam tumpahan pada saat meninggalkan ruangan.
- 5) Jika perlu, lakukan bioassay tiroid pada semua orang yang terlibat.

- 6) Jika ada pakaian yang terkontaminasi, buka dan masukkan ke dalam kantong plastik yang diberi tanda “RADIOAKTIF”.
- 7) Jika terjadi kontaminasi pada kulit, cuci segera bagian kulit yang terkontaminasi tersebut.
- 8) Jika terjadi kontaminasi pada mata, bilas mata dengan air dalam jumlah besar.
- 9) Jika kontaminasi berhasil dikungkung, prosedur untuk membersihkan tumpahan kecil dapat dilakukan, dan kantong limbah yang berisi barang terkontaminasi diberi tanda dan disimpan dengan aman.
- 10) Batasi masuk ke daerah yang terkontaminasi hingga sampai dekontaminasi selesai dan daerah dinyatakan oleh telah bersih PPR.

5. Penanggulangan Medis Pasien yang Menjalani Terapi Radiofarmaka

Pasien yang telah menerima bahan radioaktif yang cukup besar (misalnya sekitar beberapa GBq radionuklida ^{131}I) untuk terapi radiofarmaka ada kemungkinan mengalami strok atau serangan jantung. Dalam kasus seperti ini, laju dosis di sekitar pasien cukup tinggi dan staf medis yang menanganinya dapat menerima dosis yang cukup signifikan. Namun, penerimaan dosis oleh staf medis ini dapat dibenarkan karena sedang melakukan prosedur penyelamatan nyawa.

Meskipun demikian, tetap diperlukan langkah-langkah untuk meminimalkan dosis tersebut. Semua anggota tim medis harus memakai sarung tangan pelindung kedap air. Staf medis ini juga harus diberi tahu dan dilatih untuk menangani pasien semacam ini dan latihan harus dilakukan secara berkala.

6. Kebutuhan Segera Pasien (Termasuk Pembedahan)

Pertimbangan proteksi radiasi tidak boleh mencegah atau menunda tindakan penyelamatan nyawa jika pembedahan pasien diperlukan

pada pasien yang telah diberi radiofarmaka. Tindakan berikut perlu dilakukan dalam hal ini.

- 1) Beri tahu staf ruang operasi.
- 2) Modifikasi prosedur operasi di bawah pengawasan PPR untuk meminimalkan pajanan dan penyebaran kontaminasi.
- 3) Perlengkapan penahan radiasi dapat digunakan sepanjang tidak mengganggu operasi pembedahan.
- 4) Rotasi personel akan diperlukan jika prosedur pembedahan memakan waktu yang cukup lama.
- 5) PPR harus memantau semua orang yang terlibat dalam operasi pembedahan ini.
- 6) Ukur dosis radiasi yang diterima semua staf yang terlibat dalam prosedur.

7. Kebakaran

Latihan keadaan darurat pada rumah sakit harus memperhatikan dengan cermat evakuasi yang aman bagi pasien, pengunjung, dan pekerja. Jika ada petugas pemadam kebakaran, mereka harus diinformasikan mengenai adanya bahan radioaktif. Tidak ada seorang pun yang diizinkan memasuki kembali gedung sampai pengecekan kontaminasi selesai dilakukan.



PENUTUP



Penggunaan radiasi dalam bidang medis telah menghasilkan banyak perbaikan dan penyempurnaan dalam diagnosis dan terapi penyakit. Manfaat bagi pasien sangat besar dan telah banyak diketahui. Meski risiko kanker individu terkait dosis radiasi cukup rendah, pajanan medis secara keseluruhan menjadi isu kesehatan masyarakat karena makin luasnya penggunaan radiasi di bidang medis ini.

Komite Ilmiah PBB untuk Efek Radiasi Atom (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) dalam laporannya ke Sidang Majelis Umum PBB tahun 2008 menyatakan bahwa dalam waktu 20 tahun sejak 1988 hingga 2008 telah terjadi peningkatan pemeriksaan radiologi diagnostik lebih dari dua kalinya, dengan jumlah pemeriksaan pada tahun 2008 mencapai hampir 10 juta pemeriksaan setiap harinya. Dalam hal radioterapi, laporan yang sama memperkirakan bahwa pada periode 1997–2007 aplikasi globalnya meningkat menjadi 5,1 juta penyinaran dari 4,7 juta penyinaran pada kurun waktu 1991–1996. Sekitar 4,7 juta pasien

mendapat perlakuan radioterapi eksternal, sedangkan 0,4 juta mendapat penyinaran brakiterapi.

Untuk aplikasi pada kedokteran nuklir, UNSCEAR juga menyatakan telah terjadi peningkatan baik untuk kepentingan pemeriksaan diagnostik maupun terapi. Untuk kedokteran nuklir diagnostik, frekuensi pemeriksaan tahunan naik dari 0,9 per 1.000 populasi pada tahun 1970–1979 menjadi 1,1 per 1.000 populasi pada tahun 1997–2007 dan untuk kedokteran nuklir terapeutik juga meningkat dari 0,036 per 1.000 populasi pada 1991–1996 menjadi 0,043 per 1.000 populasi pada 1997–2007.

Dalam hal pajanan radiasi, dosis efektif kolektif tahunan rata-rata yang diterima pekerja radiasi medis pada tahun 1995–1999 diperkirakan sekitar 3.335 man-Sv, naik tujuh kali lipat dari tahun 1990–1994 yang hanya sekitar 470 man-Sv. Namun, berdasar kajian yang tengah dilakukan UNSCEAR dalam beberapa tahun terakhir ini, dosis efektif kolektif pekerja radiasi medis menunjukkan kecenderungan menurun sejak tahun 2010-an meski pekerja radiasi medis yang penerimaan dosisnya dipantau makin banyak jumlahnya.

Penurunan dosis efektif kolektif di atas diyakini sebagai akibat dari penggunaan teknologi medis radiasi yang baru dan peralatan medis yang lebih aman. Walau demikian, penggunaan teknologi baru yang tidak tepat atau tidak terampil dapat menyebabkan bahaya kesehatan bagi pasien dan pekerja. Sejalan dengan hal ini, penerapan praktis proteksi dan keselamatan radiasi di rumah sakit harus terus dilaksanakan dengan baik dan penuh disiplin oleh seluruh pekerja radiasi agar bahaya radiasi tersebut dapat dihindari.



DAFTAR PUSTAKA



- Arrow-Tech. (t.t.). *Direct-reading dosimeter - W138, 0-200mR with sapphire window*. Diakses pada 26 April, 2022, dari <http://www.dosimeter.com/direct-reading-dosimeters/direct-reading-dosimeter-w138-0-200mr-with-sapphire-window/>
- Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA). (2008). *Radiation protection in radiotherapy* (Radiation Protection Series Publication No. 14.3).
- Balley, D. L., Humm, J. L., Todd-Pokropek, A., & van Aswegen, A. (2014). *Nuclear medicine physics: A handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency.
- Burchfield, L. A. (2009). *Radiation safety: Protection and management for homeland security and emergency response*. John Wiley & Sons, Inc.
- Cember, H., & Johnson, T. E. (2009). *Introduction to health physics* (4th Ed.). McGraw Hill Medical.
- Dance, D. R., Christofides, S., Maidment, A. D. A., McLean, I. D., & Ng, K. H. (2014). *Diagnostic radiology physics: A handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency.

- International Atomic Energy Agency. (t.t.). Radiation detection & measurements - 1 [Salindia PowerPoint]. Diakses pada 25 April, 2022, dari <https://slidetodoc.com/radiation-detection-measurements-1-iaea-international-atomic-energy/>
- International Atomic Energy Agency. (2006). *Nuclear medicine resources manual*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1198_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2009). *Release of patients after radionuclide therapy* (Safety Reports Series No. 63). https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/pub1417_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards* (IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3). https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2015). *Staffing in radiotherapy: An activity based approach* (IAEA Human Health Reports No. 13).
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation* (IAEA Safety Standards Series No. SSG-46). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1775_web.pdf
- International Commission on Radiological Protection. (1991). 1990 recommendations of the international commission on radiological protection (ICRP Publication 60). *Annals of the ICRP*, 21(1–3).
- International Commission on Radiological Protection. (2007). The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection (ICRP Publication 103). *Annals of the ICRP*, 37(2–4).
- International Commission on Radiological Protection. (2012). ICRP statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissue and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context (ICRP Publication 118). *Annals of the ICRP*, 41(1–2).
- International Commission on Radiological Protection. (2018). Occupational radiological protection in interventional procedures (ICRP Publication 139). *Annals of the ICRP*, 47(2).

- International Commission on Radiation Units and Measurements. (2020). Operational quantities for external radiation exposure (ICRU Report 95). *Journal of the ICRU*, 20(1). <https://doi.org/10.1177/1473669120966224>
- IRSN. (t.t.). *RPL dosimeters* [Foto]. Diakses pada 26 April, 2022, dari https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/RPL_Dosimeters.htm
- Jadiyappa, S. (2018). Radioisotope: Applications, Effects, and Occupational Protection. Dalam R. O. Abdel Rahman dan Hosam El-Din M. Saleh (Ed.), *Principles and applications in nuclear engineering – Radiation effects, thermal hydraulics, radionuclide migration in the environment* (19–47). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/65990>
- Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1211/K/V/2021 tentang Penetapan Nilai Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia (*Indonesian Diagnostic Reference Level*) untuk Modalitas Sinar-X CT Scan dan Radiografi Umum. (2021).
- Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3426/K/XI/2022 tentang Penetapan Nilai Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia (*Indonesian Diagnostic Reference Level*) untuk Pemeriksaan Pasien dengan Kedokteran Nuklir Diagnostik dan Pesawat Sinar-X Fluoroskopi Intervensional. (2022).
- Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3426/K/ XI/2022 tentang Penetapan Nilai Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia (*Indonesian Diagnostic Reference Level*) untuk Pemeriksaan Pasien dengan Kedokteran Nuklir Diagnostik dan Pesawat Sinar-X Fluoroskopi Intervensional. (2022).
- Kim, D.S., Murayama, K., Nurtazin, Y., Koguchi, Y., Kenzhin, Y., Kawamura, H. (2019). Intercomparison exercise at Harshaw 6600, DVG-02TM, and D-Shuttle dosimeters for the individual monitoring of ionizing radiation. *Journal of Radiation Protection and Research*. 44(2), 79–88. <https://doi.org/10.14407/jrpr.2019.44.2.79>
- Levine, R. and Krenning, E.P. (2017). Clinical history of the theranostic radionuclide approach to neuroendocrine tumors and other types of cancer: Historical review based on an interview of Eric P. Krenning by Rachel Levine. *Journal of Nuclear Medicine*. 58 (Supplement 2), 3S–9S. <https://doi.org/10.2967/jnumed.116.186502>

- Marin, J.F.G., Nunes, R.F., Coutinho, A.M., Zaniboni, E.C., Costa, L.B., Barbosa, F.G., Queiroz, M.A., Cerri, G.G., Buchpiguel, C.A. (2020). Theranostics in nuclear medicine: Emerging and re-emerging integrated imaging and therapies in the era of precision oncology. *RadioGraphics*. 40, 1715–1740. <https://doi.org/10.1148/rg.2020200021>
- Martin, A., Harbison, S., Beach, K., Cole, P. (2012). *An Introduction to Radiation Protection*. (6th Ed.). Hodder Arnold.
- Ministry of Health Malaysia. *Comparison between OSL, RPL and TLD*. Diakses 17 Oktober 2022 dari <http://www.myhealth.gov.my/en/95483/>
- Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (PerBAPETEN) Nomor 4 Tahun 2020 tentang Keselamatan Radiasi Pada Penggunaan Pesawat Sinar-X dalam Radiologi Diagnostik dan Intervensional. (2020). <https://jdih.bapeten.go.id/unggah/dokumen/peraturan/1028-full.pdf>
- Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Perka BAPETEN) Nomor 3 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Radioterapi. (2013). <https://jdih.bapeten.go.id/unggah/dokumen/peraturan/228-full.pdf>
- Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. (2013). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/unduh?id=229&type=full>
- Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi dalam Kedokteran Nuklir. (2012). <https://jdih.bapeten.go.id/unggah/dokumen/peraturan/211-full.pdf>
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia (Permenkes) Nomor 24 Tahun 2020 tentang Pelayanan Radiologi Klinik. (2020). <https://peraturan.go.id/common/dokumen/bn/2020/bn1058-2020.pdf>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PP) Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif. (2007). <https://jdih.esdm.go.id/storage/document/PP%20No.%2033%20Thn%202007.pdf>
- Perspective Instruments. (t.t.). *ALOKA electronic pocket dosimeters – MyDose EPD*. Diakses pada 26 April, 2022, dari https://www.perspectiveinstruments.co.uk/html/mydose_epd.html

- Suntharalingam, N., Podgorsak, E.B. & Tölli, H. (2005). Brachytherapy: Physical and clinical aspects. Dalam Podgorsak, E. B. (Ed.), *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1196_web.pdf
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. (1997). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/undang-undang-republik-indonesia-nomor-10-tahun-1997-tentang-ketenaganukliran>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2010). *Sources and effects of ionizing radiation* (UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol. I). United Nations. http://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2008_Annex-A-CORR.pdf
- Vom, J., & Williams, I. (2017). Justification of radiographic examinations: What are the key issues? *Journal of Medical Radiation Sciences*, 64(3), 212–219. doi: 10.1002/jmrs.211



DAFTAR SINGKATAN



BAPETEN	: Badan Pengawas Tenaga Nuklir
Bq	: Becquerel
Ci	: Curie
CT	: <i>Computerized tomography</i>
DRL	: <i>Diagnostic reference level</i>
EPD	: <i>Electronic personal dosimeter</i>
GM	: Geiger-Müller
Gy	: Gray
HDR	: <i>High dose rate</i>
HVL	: <i>Half value layer</i>
IAEA	: International Atomic Energy Agency
ICRU	: International Commission on Radiation Units and Measurements
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
Kerma	: <i>Kinetic energy released per unit mass</i>
LDR	: <i>Low dose rate</i>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

LINAC	: <i>Linear accelerator</i>
MRI	: <i>Magnetic resonance imaging</i>
NBD	: Nilai batas dosis
OSL	: <i>Optically stimulated luminescence</i>
PET	: <i>Positron emission tomography</i>
PLTN	: Pembangkit listrik tenaga nuklir
PPR	: Petugas proteksi radiasi
QFE	: <i>Quartz fiber electrometer</i>
RPL	: <i>Radiophoto luminescence</i>
SPECT	: <i>Single photon emission computerized tomography</i>
SRA	: Sindrom radiasi akut
Sv	: Sievert
TLD	: <i>Thermoluminescence dosimeter</i>
TVL	: <i>Tenth value layer</i>
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USG	: Ultrasonografi



INDEKS



- afterloading, 89, 100, 101, 108
akselerator linier, 1, 89, 97
aplikator, 99, 100, 101, 102, 107
atom, 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
12, 19, 28, 48, 81, 127
- BAPETEN, 36, 51, 52, 53, 54,
57, 58, 73, 74, 90, 91, 92,
93, 94, 95, 97, 98, 112, 113,
114, 115, 116, 118, 135, 147
- becquerel, 12
Bohr, 6
brakiterapi, 88, 89, 90, 92, 93,
94, 95, 96, 98, 99, 100, 101,
102, 106, 107, 140
bremsstrahlung, 10, 121, 127,
129
- budaya keselamatan, 62, 63, 68
contamination meter, 108
curie, 12
- daerah pengendalian, 53, 54,
120, 128
daerah supervisi, 53, 54
dekontaminasi, 54, 112, 135,
136, 137
dosimeter film, 19, 56
dosimeter perorangan, 15, 19,
20, 22, 23, 56, 118
dosimeter termoluminesensi, 20
dosimetris, 88, 93
dosis ambien, 43, 45
dosis efektif, 36, 37, 39, 41, 43,
125, 140

dosis ekuivalen, 37, 39, 40, 41, 42, 81
 dosis perorangan, 45, 68, 94, 117
 dosis serap, 38, 39, 40, 43, 45, 46, 83
 dosis serap organ, 39

efek Compton, 38
 efek deterministik, 24, 27, 34, 37, 39
 efek fotolistrik, 38
 efek stokastik, 2, 27, 28, 34, 37, 39, 41
 eksitasi, 7, 10, 12, 14, 38
 elektron, 6, 7, 9, 10, 12, 20, 38, 89, 112
 EPD, 23, 147

faktor bobot jaringan, 41
 faktor bobot radiasi, 39, 40, 41
 fantom, 44, 45
 fibrosis, 26
 fisikawan medis, 67, 71, 88, 91, 93, 99, 100, 101, 102, 106, 107, 111, 114, 115
 fluens, 37, 38, 43, 45

gas radon, 14
 gonad, 26, 73, 74

IAEA, 20, 31, 32, 52, 77, 84, 89, 95, 97, 98, 118, 122, 125, 126, 127, 147, 154

ICRP, 24, 25, 31, 32, 33, 34, 39, 40, 41, 44, 45, 80, 147, 154
 ICRU, 42, 43, 44, 45, 147
 implant, 89, 90, 102, 103
 ingesi, 13, 50
 inhalasi, 13, 26, 50
 International Atomic Energy Agency, 20, 31, 145
 International Commission on Radiation Units and Measurements, 42, 44, 147
 International Commission on Radiological Protection, 24, 39, 147
 ionisasi, 7, 14, 38

janin, 26, 27, 70, 76

kedokteran nuklir, 3, 13, 35, 51, 58, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 126, 127, 129, 130, 131, 134, 140
 koefisien konversi, 43, 44, 45
 kolimator, 103
 kontaminasi, 3, 15, 18, 22, 50, 53, 54, 55, 96, 103, 108, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 128, 129, 133, 134, 136, 137, 138
 kriteria kesesuaian, 35

neutron, 1, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 38, 40, 42, 97, 98

nukleon, 6, 9, 12
 organ reproduksi, 26

 pajanan kerja, 33, 34, 36, 54, 55, 130
 pajanan medis, 33, 34, 35, 58, 69, 139
 pajanan publik, 33
 pajanan radiasi, 24, 25, 26, 32, 33, 34, 36, 55, 57, 77, 87, 93, 94, 102, 103, 104, 106, 109, 113, 114, 116, 140
 pedoman rujukan, 35
 pembangkit listrik tenaga nuklir, 1
 pemegang izin, 33, 51, 52, 53, 55, 58, 68, 71, 72, 73, 91, 92, 94, 104, 113, 114
 penahan radiasi, 46, 47, 48, 49, 96, 120, 130, 138
 pencacah GM, 16, 17, 18
 perawat, 67, 71, 77, 80, 88, 94, 102, 111, 116, 128, 130
 pneumonitis, 25, 26
 positron, 12, 38, 110, 111, 129
 produksi pasangan, 38
 proteksi radiasi eksternal, 3, 41, 45, 47
 proteksi radiasi internal, 3
 proton, 6, 7, 8, 9, 11, 12

 quartz fiber electrometer, 22

 radiasi alfa, 11, 12, 47, 48
 radiasi beta, 10, 11, 12, 17, 47
 radiasi gamma, 11, 12, 47, 48
 radioaktivitas, 3, 5, 50, 55, 133
 radiofarmasi, 111, 115
 radiologi diagnostik, 35, 52, 58, 65, 66, 70, 71, 74, 75, 104, 112, 139
 radionuklida, 9, 12, 13, 98, 99, 103, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 124, 127, 129, 130, 132, 133, 134, 135, 136, 137
 radioterapi, 3, 13, 51, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 112, 139, 140

 sinar-X karakteristik, 10
 situasi pajanan darurat, 32, 58, 105
 situasi pajanan eksisting, 32
 situasi pajanan radiasi, 32
 situasi pajanan terencana, 32, 34, 58, 105
 sumber radiasi, 1, 3, 13, 19, 32, 33, 34, 46, 47, 50, 65, 75, 77, 89, 106, 134, 135
 surveimeter, 15, 16, 17, 18, 94, 101, 108, 117, 118

 teleterapi, 88, 89, 95, 97, 103, 106, 107

tenaga kesehatan, 69, 88, 90, 96,
109, 119
tenaga medis, 76, 88, 90, 96,
101, 107, 109, 119
thyrotoksikosis, 131, 132
tiroid, 26, 41, 73, 74, 79, 80, 81,
109, 112, 122, 123, 124,
130, 131, 132, 136
uji kesesuaian, 52, 75
United Nations Scientific
Committee on the Effects
of Atomic Radiation, 14,
139, 148, 155
waktu pajanan, 46, 130



TENTANG PENULIS



Eri Hiswara menyelesaikan pendidikan formal SD Negeri Batutulis I/Pagi Jakarta tahun 1970, SMP Negeri 5 Jakarta tahun 1973, SMA Negeri 7 Jakarta tahun 1976, S-1 pada jurusan Fisika di Universitas Indonesia Jakarta tahun 1982, dan S-2 pada bidang studi *Radiation and Environmental Protection* di University of Surrey, Guildford, Inggris tahun 1990. Setelah menamatkan S-1 yang bersangkutan bekerja di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan menjadi peneliti sejak tahun 1984 dengan jabatan Asisten Peneliti Madya. Jabatan tertinggi Peneliti Ahli Utama dicapai pada tahun 2001. Pada tahun 2003–2007 sempat menjadi Atase Ilmu Pengetahuan di KBRI/PTRI Wina. Setelah menyelesaikan tugas di KBRI/PTRI Wina, penulis kembali ke BATAN dan meneruskan tugas sebagai peneliti dan memperoleh jabatan Profesor Riset pada tahun 2008.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Penulis mendapat pengetahuan tambahan melalui berbagai pelatihan teknis yang diikuti, antara lain *Interregional Training Course on Dosimetry* di IRD/CNEN (Brazil, 1984), *Regional Training Course on Dosimetric Assessment of Internal Contamination* di ANSTO Sydney dan ARL Melbourne (Australia, 1992), *Scientist Exchange Program* selama tiga bulan di JAERI (Jepang, 1993), *Regional Workshop on Off-Site Planning and Countermeasures for Radiological Emergencies* di EMA Melbourne dan ANSTO Sydney (Australia, 1994), *Interregional Training Course on Planning, Preparedness and Response for Radiological Emergencies* di ANL Argonne (AS, 1997), *Regional (RCA) Training Workshop on Current ICRP Recommendations and IAEA Standards* di BARC (India, 1999), dan *IAEA/RCA Training Workshop on Occupational Radiation Protection and Safety* di JAERI dan JNC (Jepang, 2002).

Berbagai kegiatan ilmiah internasional juga pernah diikuti oleh penulis antara lain *International Conference on Radiation and Society: Comprehending Radiation Risk* di Paris, Perancis (1994), *Regional Cooperation Workshop on Nuclear and Radiation Safety* di Daejon, Republik Korea (1995), *International Seminar on Advancements in the Implementation of New Basic Safety Standards—Experience in Applying the 1990 Recommendations of the ICRP* di Wina, Austria (1995), *Consultants Meeting on Regional Cooperation in Nuclear and Radiation Safety* di Daejon, Republik Korea (1996), *Expert Meeting on External Dosimetry Intercomparison* di Mumbai, India (1997), *International Conference on the Radiological Situation at the Atolls of Mururoa and Fangataufa* di Wina, Austria (1998), *IAEA/RCA Project Formulation Meeting on Harmonization of Radiation Protection* di Dhaka, Bangladesh (2002), *5th Meeting of Forum for Nuclear Cooperation in Asia* di Hanoi, Vietnam (2004), *International Conference on Nuclear Security: Global Directions for the Future* di London, Inggris (2005), *International Ministerial Conference 'Nuclear Power for the 21st Century'* di Paris, Prancis (2005), *International Symposium on Minimisation of Highly Enriched Uranium (HEU) in the Civilian Nuclear Sector* di Oslo, Norwegia (2006), *International Conference*

on Lessons Learned from Decommissioning of Nuclear Facilities and the Safe Termination of Nuclear Activities di Athena, Yunani (2006), *Technical Meeting on Long-Term Recording of Patient Doses in Diagnostic and Interventional Procedures* di Wina, Austria (2010), *International Symposium on Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry (IDOS)* di Wina, Austria (2010), *Regional Meeting on Status of Occupational Radiation Protection in Asia dan the Pacific Region* di Kathmandu, Nepal (2014), *International Experts' Meeting on Assessment and Prognosis in Response to a Nuclear or Radiological Emergency* di Wina, Austria (2015), *Technical Meeting on Patient Dose Monitoring and the Use of Diagnostic Reference Levels for the Optimization of Protection in Medical Imaging* di Wina, Austria (2016), dan Sidang Tahunan United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) ke 61, 62, 63, dan 64 di Wina, Austria (2014, 2015, 2016, dan 2017).

Selama bertugas di BATAN yang bersangkutan juga terlibat sebagai anggota pada Tim Studi Tapak dan Studi Kelayakan (STSK) PLTN BATAN (1994–1996), anggota Tim Teknis AMDAL BATAN (1994–2002), anggota Redaksi Buletin BATAN (1995–2002), Anggota Dewan Redaksi Majalah BATAN (1998–2003), anggota Dewan Redaksi Majalah Atom Indonesia (1998–2003), anggota Komisi Pembina Tenaga Peneliti PSPKR BATAN, anggota Panitia Penilai Jabatan Peneliti BATAN (1999–2002 dan 2010–2013), anggota Komisi Pembina Tenaga Fungsional (KPTF) PTKMR BATAN, dan beberapa kali menjadi ketua dan anggota tim editor pertemuan ilmiah di BATAN. Setelah BATAN dilebur ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada tahun 2021, yang bersangkutan menjadi peneliti di BRIN pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir.

Selain aktif sebagai peneliti, saat ini ia juga menjadi staf pengajar luar biasa pada Program Pendidikan Dokter Spesialis Radiologi di FKUI untuk mata ajar Fisika dan Proteksi Radiasi dan di Sekolah Tinggi Intelijen Negara (STIN) untuk mata ajar Nuklir Biologi Kimia (Nubika), dengan kekhususan pada Keselamatan dan Keamanan Nuklir dan Radiasi. Eri Hiswara adalah anggota Perhimpunan Peri-

set Indonesia (PPI), Perkumpulan Ahli Proteksi Radiasi Indonesia (APRI), dan Health Physics Society (HPS) yang berkedudukan di Amerika Serikat.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Buku Pintar

Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Rumah Sakit

Buku yang merupakan edisi kedua ini memberikan panduan praktis upaya proteksi dan keselamatan radiasi untuk kalangan medis agar pemanfaatan radiasi di bidang medis berjalan dengan aman dan selamat. Panduan diberikan untuk aplikasi radiasi di bidang medis, yaitu radiodiagnostik, onkologi radiasi, dan kedokteran nuklir.

Buku ini diharapkan dapat dimanfaatkan baik bagi pemegang izin pemanfaatan tenaga nuklir di bidang medis, petugas proteksi radiasi di bidang medis, dan juga segenap pihak yang tugasnya bersinggungan dengan pemanfaatan radiasi di bidang medis.

Selamat membaca!

Buku ini tidak diperjualbelikan.



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

DOI 10.55981/brin.579



e-ISBN 978-623-8052-55-4



9 786238 105255 4