

Eri Hiswara
Suzie Darmawati



Pengantar Sistem Proteksi Radiasi



Pengantar Sistem Proteksi Radiasi



Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

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



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International. 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/>

Eri Hiswara
Suzie Darmawati

Pengantar Sistem Proteksi Radiasi



Penerbit BRIN

buku ini tidak diperjualbelikan

© 2024 Eri Hiswara & Suzie Darmawati

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Pengantar Sistem Proteksi Radiasi/Eri Hiswara & Suzie Darmawati–Jakarta: Penerbit BRIN,
2024.

xxii hlm. + 208 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-6303-30-1(PDF)

- | | |
|------------|-------------|
| 1. Radiasi | 2. Proteksi |
| 3. Pajanan | 4. Etika |




539.2

Editor Akuisisi : Indah Susanti
Copy editor : I Made Dwi Setiadi
Proofreader : Emsa Ayudya Putri & Martinus Helmiawan
Penata isi : Utami Dwi Astuti
Desainer sampul : Utami Dwi Astuti

Edisi Pertama: Oktober 2024



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: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
PENGANTAR PENERBIT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
PRAKATA.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Ruang Lingkup dan Struktur.....	5
BAB II EFEK BIOLOGIS PAJANAN RADIASI	9
A. Efek Reaksi Jaringan.....	14
B. Efek Stokastik	31
C. Mekanisme Biologis Tindakan Radiasi Pada Dosis Rendah	42
BAB III PRINSIP PROTEKSI RADIASI.....	45
A. Justifikasi.....	46
B. Optimisasi Proteksi.....	49
C. Pembatasan Dosis.....	57
D. Hubungan Antar Komponen Sistem Proteksi Radiasi	58

BAB IV	ETIKA DALAM PROTEKSI RADIASI.....	59
	A. Dasar-Dasar Nilai Etika	63
	B. Nilai-Nilai Etika Inti	69
	C. Nilai-Nilai Prosedural	74
BAB V	DOSIMETRI PROTEKSI RADIASI	79
	A. Besaran fisis	80
	B. Besaran Proteksi.....	85
	C. Besaran Operasional	93
BAB VI	SITUASI PAJANAN RADIASI	103
	A. Situasi Pajanan Terencana	105
	B. Situasi Pajanan Darurat.....	109
	C. Situasi Pajanan Eksisting	113
BAB VII	KATEGORI PAJANAN RADIASI.....	121
	A. Pajanan Kerja	122
	B. Pajanan Publik.....	127
	C. Pajanan Medis	128
BAB VIII	KRITERIA PENDEKATAN DALAM PROTEKSI RADIASI	139
	A. Jenis Dosis yang Dikaji	140
	B. Pendekatan Terkait Sumber	141
	C. Pendekatan Terkait Individu	157
BAB IX	PROTEKSI RADIASI LINGKUNGAN.....	161
	A. Kerangka Umum Proteksi Radiasi Lingkungan	162
	B. Konsep dan Penggunaan Hewan dan Tanaman Acuan	171
	C. Integrasi Proteksi Manusia dengan dengan Proteksi Lingkungan.....	178
BAB X	PENUTUP	183
	DAFTAR SINGKATAN	185
	DAFTAR PUSTAKA	187
	TENTANG PENULIS	203
	INDEKS	205

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Efek Biologis Paparan Radiasi pada Jaringan Tubuh ...	10
Gambar 2.2	Efek Biologis Paparan Radiasi Berdasarkan Individu Penerima Radiasi	11
Gambar 2.3	Ilustrasi Efek Reaksi Jaringan.....	16
Gambar 2.4	Hubungan Dosis dengan Respons	27
Gambar 2.5	Ilustrasi Efek Stokastik.....	32
Gambar 3.1	Prosedur Optimisasi yang Umum Dilakukan.	51
Gambar 3.2	Analisis Biaya-manfaat	54
Gambar 3.3	Hubungan Antar Komponen Sistem Proteksi Radiasi	58
Gambar 4.1	Pertimbangan dalam Mengembangkan Sistem Proteksi Radiasi.....	60
Gambar 5.1	Spektrum Fluens Partikel dan Fluens Energi pada Suatu Pesawat Sinar-X	82
Gambar 5.2	Faktor Bobot Radiasi Neutron.....	88
Gambar 5.3	Tahapan dalam Penentuan Dosis Efektif.....	91
Gambar 5.4	Konsep Medan Radiasi untuk Besaran Operasional ...	94
Gambar 5.5	Hubungan antara Besaran Proteksi yang Diberikan pada ICRP Publikasi 103 dan Besaran Operasional yang Diberikan pada ICRU Laporan 39	95

Gambar 5.6	Hubungan antara Besaran Proteksi (ICRP, 2007) dan Besaran Operasional Terbaru yang Direkomendasikan ICRU (2020).....	99
Gambar 6.1	Unsur-Unsur Situasi Paparan.....	104
Gambar 6.2	Transisi dari Satu Situasi Paparan ke Situasi Paparan Lainnya.....	113
Gambar 6.3	Pembagian Paparan Radiasi Alam ke dalam Situasi Paparan Eksisting dan Situasi Paparan Terencana.....	115
Gambar 8.1	Nilai Batas Dosis Dibandingkan dengan Penghambat Dosis dan Tingkat Acuan untuk Proteksi Pekerja dan Publik	141
Gambar 9.1	DCRLs untuk tujuan Proteksi Lingkungan untuk Setiap Hewan dan Tanaman Acuan	170
Gambar 9.2	Tahapan dalam Menentukan Nilai Numerik untuk Proteksi Radiasi Manusia	179
Gambar 9.3	Tahapan dalam Menentukan Nilai Numerik untuk Proteksi Radiasi Lingkungan	180
Gambar 9.4	Pendekatan dalam Proteksi untuk Manusia dan Lingkungan dalam Kaitannya dengan Sstiap Situasi Paparan.....	181

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Ciri-ciri Efek Reaksi Jaringan dan Efek Stokastik	12
Tabel 2.2	Peluang Melahirkan Anak Sehat Setelah Menerima Dosis Radiasi Saat Pembuahan	17
Tabel 2.3	Efek Radiasi pada Kulit	20
Tabel 2.4	Perkembangan Rekomendasi Nilai Batas Dosis Lensa Mata yang Direkomendasikan ICRP	22
Tabel 2.5	Dosis Ambang untuk Sel Reproduksi Manusia	26
Tabel 2.6	Rentang Dosis Terjadinya Sindrom dan Kematian pada Manusia Setelah Menerima Dosis Sekujur Akut.	30
Tabel 2.7	Studi Efek Genetik ABCC-RERF pada Anak-anak Penyintas Bom Atom	36
Tabel 2.8	Koefisien Risiko Nominal (10^{-2} Sv^{-1}) untuk Efek Stokastik Setelah Penyinaran Radiasi Laju Dosis Rendah	41
Tabel 2.9	Kontribusi Relatif Organ terhadap Kerusakan Total untuk Seluruh Populasi	42
Tabel 4.1	Beberapa Instrumen Internasional dalam Nilai dan Norma yang Telah Diadopsi Indonesia	67
Tabel 5.1	Faktor Bobot Radiasi	87
Tabel 5.2	Faktor Bobot Jaringan	90
Tabel 5.3	Hubungan Besaran Proteksi dan Besaran Operasional Rekomendasi	100

Tabel 5.4	Fantom untuk Menghitung Koefisien Konversi dari Besaran Lapangan (Fluens, Kerma Udara) ke Besaran Proteksi dan Besaran Operasional Rekomendasi.....	100
Tabel 6.1	Rentang Peluang dalam Setahun untuk Memilih Nilai Penghambat Risiko.	108
Tabel 7.1	Contoh Penerimaan Dosis dalam Kaitan antara Kategori Pajanan Radiasi dengan Situasi Pajanan Radiasi.....	122
Tabel 7.2	Dosis Radiasi pada Penerbangan Paris–Beijing	126
Tabel 7.3	Probabilitas Mengandung Anak Sehat sebagai Fungsi Dosis Radiasi.....	131
Tabel 7.4	Risiko Kehamilan Spontan pada Populasi Umum	131
Tabel 7.5	Dosis Radiasi pada Orang Dewasa dari Pemeriksaan Pencitraan	133
Tabel 8.1	Jenis Dosis yang Dikaji dalam Sistem Proteksi Radiasi	140
Tabel 8.2	Tingkat Acuan untuk Situasi Pajanan Eksisting	144
Tabel 8.3	Rekomendasi tindakan untuk individu yang menerima pajanan radiasi kosmis dalam penerbangan	146
Tabel 8.4	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk CT-Scan.....	148
Tabel 8.5	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Radiografi Umum	148
Tabel 8.6	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Kedokteran Nuklir Diagnostik.....	150
Tabel 8.7	Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Fluoroskopi Intervensial.....	150
Tabel 8.8	Kerangka Pemilihan Penghambat Dosis dan Tingkat Acuan	152
Tabel 8.9	Nilai Penghambat Dosis untuk Kategori dan Situasi Pajanan Radiasi Tertentu	154
Tabel 8.10	Kriteria Proteksi dalam Kaitannya dengan Situasi Pajanan Radiasi.....	155
Tabel 8.11	Nilai Batas Dosis pada Situasi Pajanan Terencana	157
Tabel 9.1	Tanaman dan Hewan Acuan	166
Tabel 9.2	Karakteristik Populasi Dasar untuk Hewan dan Tanaman Acuan	167

Tabel 9.3	Dasar Penetapan Tingkat Acuan Tertimbang Turunan (DCRL) Untuk Hewan Dan Tanaman Acuan.	168
Tabel 9.4.	Koefisien Dosis (Dc) Untuk Biota Nonmanusia Terpajan Isotop Radioaktif Co.	176
Tabel 9.5	Ketersediaan Nilai Rasio Konsentrasi (Cr) untuk Beberapa unsur Radioaktif pada Sebagian Hewan dan Tanaman Acuan untuk Ekosistem Terrestrial.....	177

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.

Efek radiasi adalah salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam kegiatan ketenaganukliran. Sistem proteksi radiasi merupakan hal yang wajib dipahami bagi para pekerja, peneliti, maupun pemerhati bidang nuklir agar meminimalisir dari efek radiasi. Efek radiasi dapat berupa reaksi jaringan (yang dikenal pula sebagai efek deterministik) maupun stokastik. Upaya manusia untuk mencegah terjadinya berbagai efek yang berbahaya tersebut dilakukan dengan menerapkan tindakan proteksi radiasi.

Buku *Pengantar Sistem Proteksi Radiasi* ini menguraikan sistem proteksi radiasi yang menjadi dasar untuk penerapan proteksi radiasi praktis di lapangan. Walau praktisi proteksi radiasi di Indonesia cukup banyak, masih sangat sedikit informasi yang tersedia untuk menjelaskan sistem proteksi radiasi dari sisi teoretis secara komprehensif.

Dengan hadirnya buku ini, diharapkan bisa dijadikan referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan tentang sistem proteksi radiasi. Sementara itu, bagi kalangan intelektual, bisa dijadikan referensi untuk mengkaji secara ilmiah atau mengadakan penelitian-penelitian terhadap sistem proteksi radiasi. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

buku ini tidak diperjualbelikan

KATA PENGANTAR

Kegiatan ketenaganukliran di Indonesia dimulai dengan pembentukan Panitia Negara untuk penyelidikan radioaktivitet pada tahun 1954. Panitia Negara mempunyai tugas melakukan penyelidikan terhadap kemungkinan adanya jatuhnya radioaktif dari uji coba senjata nuklir di Samudra Pasifik.

Saat ini, tugas yang diberikan kepada Panitia Negara di atas dapat digolongkan sebagai bagian dari kegiatan proteksi radiasi. Dengan demikian, kegiatan proteksi radiasi di Indonesia dapat dikatakan juga telah dimulai sejak tahun 1954.

Secara historis, Panitia Negara ditingkatkan menjadi institusi resmi yang bernama Lembaga Tenaga Atom pada tahun 1958, kemudian pada tahun 1964 dikembangkan menjadi Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN). Pemisahan unsur pelaksana kegiatan dengan unsur pengawasan tenaga nuklir sesuai Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 menyebabkan BATAN sebagai unsur pelaksana kegiatan diubah menjadi Badan Tenaga Nuklir Nasional (dengan singkatan tetap BATAN). Karena perkembangan dinamis dari penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi (iptek) di Indonesia, BATAN diintegrasikan ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada tahun 2021.

Pada setiap tahap pengembangan organisasi di atas, unsur proteksi radiasi selalu menjadi salah satu prioritas pengembangan dengan dibentuknya unit kerja yang mempunyai tugas di bidang proteksi radiasi ini. Saat ini, tugas terkait proteksi radiasi di BRIN dilaksanakan oleh Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN) pada Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN).

Selain membawa manfaat yang sangat besar, penggunaan teknologi nuklir diketahui pula memiliki efek yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Untuk itu untuk setiap kegiatan yang memanfaatkan teknologi nuklir, seorang Petugas Proteksi Radiasi (PPR) harus selalu hadir untuk memastikan bahwa kegiatan dilakukan dengan aman dan selamat serta selalu memprioritaskan unsur proteksi radiasi.

Dengan meningkatnya pemanfaatan teknologi nuklir di berbagai bidang, seperti di bidang medis, industri, pertanian, dan penelitian, PPR di Indonesia juga makin bertambah. Karena itu, pengetahuan tentang proteksi radiasi diberikan kepada para calon PPR melalui pelatihan yang secara berkala dilaksanakan oleh suatu institusi pelatihan.

Namun, dengan singkatnya waktu pelatihan yang diberikan, pengetahuan proteksi radiasi yang diberikan kepada para calon PPR umumnya lebih kepada pengetahuan praktis. Padahal, pengetahuan praktis ini sebenarnya didasarkan pada suatu teori atau konsep proteksi radiasi yang terus berkembang seiring dengan bertambahnya pengetahuan manusia dalam iptek proteksi radiasi, terutama dalam mekanisme interaksi antara radiasi dengan sel dan jaringan pada dosis rendah radiasi.

Buku ini secara komprehensif menguraikan beberapa unsur dan komponen pembentuk iptek proteksi radiasi yang dikenal saat ini. Beberapa unsur tersebut jarang diketahui publik, seperti etika dalam proteksi radiasi, kriteria pendekatan, dan proteksi radiasi lingkungan. Yang terakhir merupakan unsur proteksi radiasi yang

saat ini menjadi yang paling banyak dibahas dan perkembangannya paling pesat.

Sebagai pimpinan di PRTKMMN BRIN, saya menyambut baik dan menyampaikan penghargaan atas upaya yang telah dilakukan oleh penulis untuk menyusun buku ini. Selain untuk memberikan tambahan pengetahuan teoretik kepada para PPR, kiranya buku ini juga dapat dimanfaatkan oleh para pemerhati dan praktisi keselamatan dan kesehatan kerja secara umum, dan para pekerja di bidang ketenaganukliran secara khusus, untuk dapat memahami setiap aspek dari iptek proteksi radiasi yang telah dikembangkan hingga saat ini.

Sebagai penutup, saya berharap agar buku ini dapat menjadi awal dari terbitnya berbagai buku yang lain yang terkait dengan iptek proteksi radiasi. Dengan bertambahnya buku sejenis diharapkan iptek proteksi radiasi dapat lebih berkembang di Indonesia, sekaligus dapat memberikan kontribusi yang signifikan untuk perkembangan iptek ini di dunia.

Jakarta, November 2023

Dr.Rer.Biol.Hum. Heru Prasetio, M.Si
Kepala Pusat Riset Teknologi Keselamatan,
Metrologi dan Mutu Nuklir BRIN

PRAKATA

Sistem proteksi radiasi dikembangkan oleh Komisi Internasional untuk Proteksi Radiasi (ICRP, *International Commission on Radiological Protection*) secara bertahap selama abad ke-20 dengan mengintegrasikan kemajuan dalam pengetahuan tentang efek radiasi, evolusi nilai etika dan sosial serta pengalaman dan umpan balik dari implementasi praktisnya. Sampai Perang Dunia Kedua, ICRP hanya berurusan dengan proteksi staf medis. Setelah perang, fokusnya adalah pada energi nuklir dan proteksi radiasi yang dikembangkan untuk melindungi pekerja di dalam instalasi nuklir dan masyarakat di luar. Perkembangan ini menghasilkan rezim proteksi radiasi yang koheren dan efektif berdasarkan konsep, prinsip dan norma yang solid (ICRP, 1991).

Kecelakaan nuklir Chernobyl yang terjadi pada tahun 1986 diikuti dengan meningkatnya kekhawatiran tentang keselamatan dan keamanan nuklir, termasuk radiasi. Serangan teroris pada 11 September 2011, kemudian menambah kekhawatiran tersebut dan mempertanyakan keefektifan Publikasi 60 ICRP (ICRP, 1991) dalam menghadapi dan menangani masalah keselamatan radiasi terkait kecelakaan dan keamanan, baik pada pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) maupun pada fasilitas radiasi dalam pemanfaatannya di berbagai bidang seperti kesehatan, industri, pertanian, peternakan, riset, dan pendidikan.

Sejak penerbitan publikasi 60-nya, ICRP telah mengembangkan rekomendasinya terkait beberapa isu proteksi radiasi seperti pengendalian pajanan radon-222, kriteria intervensi setelah kecelakaan, manajemen pajanan kerja dan kebijakan pembuangan limbah radioaktif. Selain itu, berkembang pula isu mengenai kesulitan menerapkan faktor risiko pada dosis rendah yang terdapat pada Publikasi 60. Dengan adanya berbagai perkembangan ini, dan juga isu masalah keselamatan dan keamanan secara tidak langsung, ketua ICRP saat itu mengundang masyarakat ilmiah untuk membahas rekomendasi baru untuk mengganti Publikasi 60 (Clarke, 1999).

Setelah melalui pembahas sekitar delapan tahun, ICRP kemudian mengeluarkan rekomendasi baru melalui Publikasi 103 yang diterbitkan pada tahun 2007 (ICRP, 2007). Meskipun sering dinyatakan sebagai pembaharuan sederhana, Publikasi 103 pada dasarnya merupakan evolusi yang cukup besar dari Publikasi 60. Dua evolusi utama dari sistem proteksi pada Publikasi 103 adalah dihilangkannya konsep “kegiatan” dan “intervensi” yang diganti dengan tiga jenis situasi pajanan, dan diperkenalkannya konsep tentang “perluanya mempertimbangkan pandangan dan kepedulian pemangku kepentingan pada saat melakukan optimisasi proteksi”.

Berbeda dengan berbagai tulisan dan bahkan peraturan yang menerjemahkan kata *exposure* menjadi ‘paparan’, buku ini menerjemahkannya menjadi ‘pajanan’. Pemilihan kata pajanan didasarkan dan dipahami dari pengertian penggunaan kata *exposure* itu sendiri dalam konteks proteksi radiasi, dan pengertian kata *pajanan* pada Kamus Besar Bahasa Indonesia edisi kelima versi daring (KBBI, t.t.1).

Di Indonesia, ilmu pengetahuan dan teknologi (iptek) proteksi radiasi berkembang sesuai dengan perkembangan iptek ketenaganukliran itu sendiri. Hal ini terutama terjadi karena sebagai iptek yang memiliki risiko kesehatan yang cukup besar, pengembangan iptek ketenaganukliran harus diawasi secara ketat dari sisi keselamatan, termasuk dari sisi proteksi radiasi.

Lauriston S. Taylor (1980), sebagai salah satu anggota pendiri ICRP, pernah menyatakan bahwa, “Proteksi radiasi bukan hanya

masalah ilmu pengetahuan. Proteksi radiasi merupakan masalah filosofi, moralitas dan, yang utama, kearifan yang tertinggi.” Karena itu, iptek proteksi radiasi akan terus berkembang sesuai dengan pencapaian iptek, evolusi nilai-nilai etika dalam masyarakat, dan juga pelajaran yang diperoleh dari pengalaman penerapan iptek proteksi radiasi itu sendiri.

Buku ini diharapkan dapat membantu para praktisi maupun pemerhati iptek proteksi radiasi dalam memahami isu sistem proteksi radiasi secara komprehensif. Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pihak yang telah memberikan usulan perbaikan untuk menyempurnakan kandungan isi buku ini. Penghargaan juga diberikan kepada Penerbit BRIN yang bersedia menerbitkan buku ini.

Akhirulkalim, penulis mengharapkan penerbitan buku ini mencapai tujuannya dan bermanfaat bagi semua pembaca.

Jakarta, November 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

Upaya perlindungan atau proteksi bagi pekerja dan masyarakat umum dari efek berbahaya radiasi pengion, selanjutnya hanya disebut sebagai radiasi, telah menjadi perhatian tenaga proteksi radiasi sejak awal abad ke-20 ketika efek berbahaya pertama kali teramati. Sejak saat itu, efek merugikan dari radiasi telah banyak dipelajari, dari sifat dasar efek radiasi pada sel, organ, dan organisme, hingga studi epidemiologis pada populasi yang besar yang telah terpajan oleh berbagai tingkat dosis radiasi.

A. Latar Belakang

Kasus pertama efek radiasi dalam bentuk pemerahan kulit dilaporkan terjadi pada Mr. Dally saat membantu Thomas A. Edison dalam mengembangkan lampu fluoresensi tidak lama setelah penemuan sinar-X oleh Roentgen pada tahun 1895 (Bedford & Dewey, 2002). Menyadari akan adanya bahaya bagi kesehatan dari pajanan radiasi berlebih, pada tahun 1928 Komite Proteksi Radium dan Sinar-X Internasional (IXRPC) mengeluarkan rekomendasi pertama pada tahun 1928 (IXRPC, 1929). Rekomendasi pertama ini menyatakan bahwa kerusakan pada jaringan superfisial, dan gangguan organ internal serta perubahan dalam darah, merupakan dua jenis efek yang dapat terjadi akibat penyinaran berlebih dari sinar-X dan radium. Untuk menghindarinya perlu dilakukan, antara lain pembatasan jam kerja, pengaturan di ruang penyinaran terkait besar ruangan, tebal bahan protektif setara timbal di sekeliling tabung sinar-X, pemakaian

sarung tangan protektif, posisi operator di belakang dinding protektif selama penyinaran, dan pelarangan operator untuk berada pada berkas langsung sinar-X.

Namun, rekomendasi proteksi radiasi yang pertama sebenarnya diberikan oleh seorang insinyur Amerika Serikat bernama Wolfram Fuchs pada tahun 1896, setahun setelah ditemukannya sinar-X oleh Roentgen (Clarke & Valentin, 2008). Rekomendasi ini menyatakan agar: (1) pajanan radiasi dilakukan sesingkat mungkin; (2) jangan berdiri pada jarak sekitar 30 cm dari tabung sinar-X; dan (3) kulit dilapis dengan Vaseline (*petroleum jelly*) serta buat lapisan tambahan pada area yang paling mungkin terpajan radiasi. Rekomendasi ini sama dengan tiga prinsip dasar proteksi radiasi saat ini, yaitu waktu, jarak dan pelindung radiasi.

Rekomendasi pertama terkait nilai batas dosis (NBD), yang saat itu masih diberi nama “Dosis Toleransi” dikeluarkan oleh ICRPC saat melakukan pertemuan pada tahun 1934. Saat itu, ICRPC menyatakan bahwa bukti yang ada saat ini nampaknya menunjukkan bahwa dengan kondisi kerja yang baik seseorang yang berada dalam kondisi kesehatan normal dapat mentoleransi pajanan sinar X sampai batas sekitar 0,2 roentgen internasional (r) per hari (ICRPC, 1934). Dengan penyinaran terus menerus selama tujuh jam dari satu hari kerja, angka ini sama dengan tingkat dosis 10^{-5} r per detik. Jika dibandingkan dengan NBD yang berlaku saat ini, angka tersebut sama dengan dosis efektif tahunan sebesar 500 mSv atau sama dengan 25 kali NBD.

Pada pertemuan tahun 1950 di London, ICRPC resmi berganti nama menjadi Komisi Internasional untuk Proteksi Radiologis (International Commission on Radiological Protection, ICRP), yang terus dipertahankan hingga kini. Istilah proteksi radiologis (*radiological protection*) digunakan karena pada awalnya, seperti yang akan diuraikan selanjutnya, sistem ini dimaksudkan hanya untuk proteksi staf medis. Dengan berjalannya waktu, sistem ini dikembangkan juga untuk proteksi pekerja dan masyarakat umum. Karena itu, istilah proteksi radiologis berkembang menjadi proteksi

radiasi (*radiation protection*). Secara esensi, proteksi radiasi dengan demikian memiliki makna yang sama dengan proteksi radiologis.

Pada pertemuan tahun 1950 tersebut ICRP mulai membagi tugasnya dengan membentuk enam subkomite yang menangani isu dosis yang diizinkan untuk radiasi eksternal, dosis yang diizinkan untuk radiasi internal, proteksi terhadap sinar-X yang dibangkitkan pada tegangan hingga 2 MV, proteksi terhadap sinar-X yang dibangkitkan pada tegangan di atas 2MV, dan sinar beta serta sinar gamma, proteksi terhadap partikel berat, termasuk neutron dan proton, serta pembuangan limbah radioaktif dan penanganan radioisotop.

Pertemuan tahun 1950 ini menghasilkan rekomendasi mengenai dosis maksimum yang diizinkan, yaitu 0,5 roentgen dalam satu minggu untuk pajanan sinar-X dan gamma sekujur (*whole body*), dan 1,5 roentgen dalam satu minggu untuk pajanan tangan dan lengan bawah (ICRP, 1951). Dalam pengertian saat ini, dosis maksimum tersebut setara dengan batas dosis tahunan 150 mSv untuk dosis efektif kerja.

Pada publikasi 26 yang terbit tahun 1977, ICRP untuk pertama kalinya mengkuantifikasi risiko efek stokastik (ICRP, 1977). Publikasi 26 ini juga mengusulkan konsep proteksi radiasi yang disebut sebagai sistem pembatasan dosis. Pada publikasi ini dinyatakan bahwa proteksi radiasi berkaitan dengan perlindungan individu, keturunan dan umat manusia secara keseluruhan, seraya tetap memungkinkan dilakukannya kegiatan yang dapat mengakibatkan terjadinya pajanan radiasi (ICRP, 1977). Selanjutnya, publikasi membuat pernyataan penting, meskipun tujuan utama dari proteksi radiasi adalah tercapai dan terpeliharanya kondisi yang aman untuk kegiatan yang melibatkan pajanan pada manusia, tingkat keselamatan yang diperlukan untuk melindungi semua individu manusia diperkirakan dapat melindungi spesies lain, walaupun tidak harus anggota individu dari spesies tersebut (ICRP, 1977). Oleh karena itu, ICRP yakin jika manusia telah cukup terlindungi makhluk hidup lain juga kemungkinan telah cukup terlindungi.

Sistem pembatasan dosis yang diperkenalkan pada publikasi 26 ICRP ini terdiri atas tiga prinsip proteksi, yaitu tidak ada kegiatan [yang melibatkan radiasi] yang boleh dilakukan kecuali jika menghasilkan manfaat yang positif, semua pajanan harus dijaga serendah mungkin dengan memperhitungkan faktor sosial ekonomi, dan dosis individu tidak boleh melampaui nilai batas yang direkomendasikan ICRP. Ketiga prinsip ini selanjutnya dikenal sebagai justifikasi, optimisasi, dan aplikasi nilai batas dosis.

Pada tahun 1991, ICRP menerbitkan publikasi 60 yang memperkenalkan konsep penghambat (*constraint*) dalam kaitannya dengan prinsip optimisasi (ICRP, 1991). Dalam prinsip proteksi radiasi, optimisasi merupakan proses yang dilakukan kaitannya dengan sumber radiasi. Sementara, nilai batas dosis berlaku untuk individu untuk memastikan proteksi dari semua sumber radiasi yang berada dalam pengawasan. Untuk memastikan agar prinsip optimisasi dapat dilaksanakan oleh seorang individu, konsep penghambat yang diberikan dalam satuan dosis tersebut diperkenalkan. Dengan demikian, penghambat adalah kriteria terkait individu, diterapkan pada satu sumber tunggal untuk memastikan bahwa individu yang paling terpapar tidak menerima risiko dari sumber tersebut.

Sejak publikasi 60 diterbitkan, serangkaian publikasi telah memberikan pedoman tambahan untuk mengendalikan pajanan dari sumber radiasi. Berbagai publikasi tersebut memberikan sekitar 30 pedoman yang berbeda untuk membatasi penerimaan dosis individu dari berbagai situasi dan keadaan. Selain itu, ICRP juga mulai mengembangkan pedoman kebijakan untuk memberikan proteksi bagi spesies nonmanusia dalam publikasi 91 (ICRP, 2003).

Dalam masa-masa ini berbagai konsep yang diperkenalkan ICRP, seperti perbedaan antara proteksi terkait sumber dengan proteksi terkait individu, dan nilai batas dosis, telah disalahpahami oleh banyak orang. Nilai batas dosis yang diberikan pada publikasi 60 sebenarnya hanya berlaku untuk kondisi tertentu, tetapi banyak dianggap sebagai nilai batas absolut. Pemberian nilai batas dosis yang lebih tinggi untuk keadaan darurat dan radon di dalam rumah juga sangat membingungkan sehingga ICRP mengklarifikasinya

dengan memberikan perbedaan antara praktik (kegiatan yang menambahkan dosis radiasi) dengan intervensi (kegiatan untuk mengurangi terjadinya dosis radiasi).

Seiring dengan bertambahnya pengetahuan mengenai proteksi radiasi, ICRP merevisi rekomendasinya pada tahun 2007 dengan diterbitkannya publikasi 103 (ICRP, 2007). Publikasi 103 ini merupakan revisi terakhir yang sampai buku ini diterbitkan tahun 2023 rekomendasinya masih tetap berlaku. Publikasi 103 menegaskan dan memperkuat pentingnya optimisasi proteksi radiasi, dan memperluas penerapan persyaratan ini untuk praktik (yang kini menjadi bagian dari situasi pajanan terencana) ke situasi lain, yaitu situasi pajanan darurat dan situasi pajanan eksisting. Publikasi 103 juga memasukkan klausul baru terkait proteksi lingkungan, dan yang terpenting adalah mengubah konsep sistem pembatasan dosis menjadi sistem proteksi radiasi.

B. Ruang Lingkup dan Struktur

Tujuan utama buku ini adalah memberikan informasi mengenai sistem proteksi radiasi yang diperkenalkan pertama kali melalui publikasi 26 ICRP tahun 1977 dan menjadi dasar dalam penyusunan berbagai peraturan terkait proteksi radiasi di seluruh dunia. Dengan informasi yang diberikan ini, masyarakat nuklir di Indonesia diharapkan dapat memahami secara lebih komprehensif mengenai konsep proteksi radiasi yang diaplikasikan ke seluruh kegiatan pemanfaatan ketenaganukliran.

Buku ini hanya membahas konsep sistem proteksi radiasi dan beberapa aspek yang terkait langsung dengan sistem tersebut. Buku tidak membahas aplikasi proteksi radiasi di berbagai bidang, seperti medik, industri, atau pertanian.

Proteksi radiasi adalah semua tindakan yang dilakukan untuk mengendalikan sumber radiasi dalam rangka memberikan perlindungan bagi makhluk hidup dan lingkungannya dari efek pajanan radiasi. Oleh karena itu, proteksi radiasi memiliki makna kegiatan sejak memahami efek kesehatan yang terjadi

akibat penerimaan dosis radiasi pada makhluk hidup, bagaimana memperkirakan dosis radiasi yang dapat menyebabkan terjadinya efek kesehatan tersebut, bagaimana melakukan tindakan pencegahan agar radiasi tersebut tidak masuk ke dalam tubuh, dan bagaimana memahami interaksi radiasi dengan lingkungan hidup.

Dalam Bab II, diberikan uraian mengenai efek biologis akibat penerimaan pajanan radiasi oleh makhluk hidup. Selain menjelaskan efek reaksi jaringan dan efek stokastik yang dapat dialami, juga menguraikan mekanisme biologis tindakan radiasi pada dosis rendah. Hal terakhir ini merupakan fenomena yang masih terus dikaji karena masih belum jelas efek apa yang terjadi saat radiasi dengan dosis rendah menyinari materi biologis.

Pada Bab III diuraikan konsep dosimetri yang berlaku untuk proteksi radiasi. Uraian berisi konsep besaran fisis yang menggambarkan hasil penyerapan energi radiasi pada suatu materi. Besaran proteksi yang diperlukan untuk mengkaji hubungan dosis radiasi dengan risiko kesehatan akibat penyerapan energi tersebut, dan besaran operasional yang nilai pengukurannya dianggap sama dengan dosis efektif dan dapat dipakai untuk melihat kepatuhan pada nilai batas dosis yang berlaku.

Bab IV merupakan bab yang menguraikan salah satu pondasi dasar dalam menyusun prinsip proteksi radiasi pada publikasi 103 ICRP yang terbit tahun 2007. Bab ini menguraikan konsep situasi pajanan radiasi yang terdiri atas situasi pajanan terencana, situasi pajanan darurat, dan situasi pajanan yang masih eksist. Konsep situasi pajanan radiasi merupakan pengembangan dari konsep sebelumnya yang terdiri atas kegiatan dan intervensi dan tercantum pada publikasi 60 ICRP tahun 1991.

Selanjutnya, Bab V dan Bab VI memberikan uraian mengenai kategori pajanan radiasi dan tingkat proteksi radiasi yang merupakan penajaman dari konsep sebelumnya yang diperkenalkan pada publikasi 60 ICRP tahun 1991. Kedua topik ini juga merupakan fondasi bagi pengembangan konsep prinsip proteksi radiasi pada publikasi 103 ICRP.

Bab VII memberikan uraian mengenai prinsip proteksi radiasi yang menjadi tema sentral dalam sistem proteksi radiasi yang dikembangkan ICRP pada publikasi 103 yang terbit tahun 2007. Prinsip proteksi radiasi terdiri atas justifikasi, optimisasi proteksi dan keselamatan, dan limitasi dosis. Prinsip proteksi radiasi ini merupakan pengembangan dari sistem limitasi dosis yang dikembangkan ICRP melalui publikasi 26 yang terbit tahun 1977.

Prinsip proteksi radiasi juga dibangun di atas landasan filosofis yang cukup kuat. Untuk itu, Bab VIII menguraikan konsep etika yang mendukung tidak saja prinsip proteksi radiasi, tetapi juga sistem proteksi radiasi secara keseluruhan. Selain itu, Bab VIII juga memberi uraian baik mengenai nilai-nilai etika universal, nilai-nilai etika inti pendukung prinsip proteksi radiasi, dan nilai-nilai prosedural yang mendukung aplikasi ketiga prinsip proteksi radiasi.

Bab IX merupakan mata rantai terakhir sistem proteksi radiasi bagi makhluk hidup yaitu sistem proteksi radiasi lingkungan. Konsep sistem proteksi radiasi lingkungan diperkenalkan secara singkat di bagian akhir publikasi 103 ICRP setelah sebelumnya ICRP mengusulkan adanya pendekatan yang sama dalam memberikan proteksi bagi manusia dan organisme nonmanusia pada publikasi 91 yang terbit tahun 2002.

Terakhir, Bab X memberikan rangkuman mengenai perbedaan antara ICRP Publikasi 26 dengan ICRP Publication 103 dari sisi teknis dan penyajiannya, dan juga perubahan keduanya dari sisi fundamental.

BAB II

EFEK BIOLOGIS PAJANAN RADIASI

Efek biologis yang diinduksi oleh pajanan radiasi merupakan dasar bagi pengembangan sistem proteksi radiologi. Dari efek radiasi yang teramati, manusia meneliti bagaimana cara untuk melakukan upaya agar efek radiasi tersebut dapat dihindari. Dalam perkembangan lebih lanjut, upaya tersebut berhasil disusun secara sistematis sehingga dikenal sebagai sistem proteksi radiologi. Sebagai bagian dari upaya pengembangan proteksi radiologi ini, manusia juga berhasil mengembangkan iptek pendukung, seperti metrologi radiasi, iptek yang menghitung dosis radiasi, dan aktivitas radionuklida, dan iptek radioekologi, iptek dalam upaya memahami interaksi radiasi dengan lingkungan hidup.

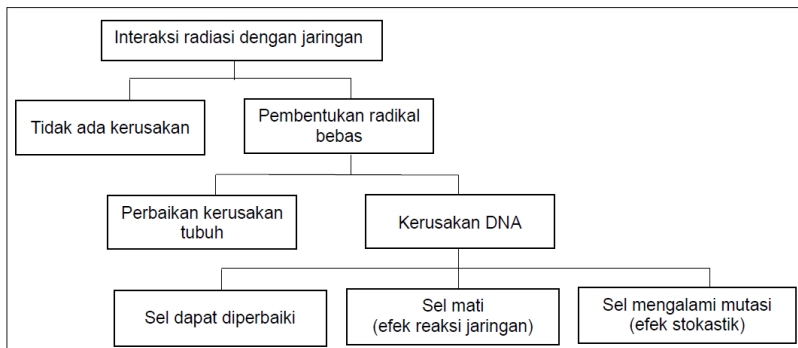
Efek biologis dimulai sejak adanya interaksi antara radiasi dengan atom dan molekul tubuh yang menyebabkan diserapnya energi radiasi dan pembentukan atom dan molekul tubuh yang terionisasi. Interaksi ini bersifat acak dan tidak memiliki atom atau molekul target yang spesifik. Karena air merupakan molekul tubuh yang paling umum, pasangan ion yang paling banyak terbentuk akibat pajanan radiasi adalah H_2O^+ dan e^- . Ion-ion ini kemudian bereaksi dengan molekul air lain untuk membentuk H_2O_2 dan beberapa radikal kimia bebas. Sebagian energi radiasi juga diserap

oleh ionisasi langsung pada molekul biologis, seperti protein, enzim, *deoxyribonucleic acid* (DNA), dan *ribonucleic acid* (RNA).

Rantai interaksi yang mengakibatkan kerusakan molekul biologis terjadi segera setelah radiasi diserap. Radikal kimia yang menyebabkan kerusakan tidak berada cukup lama untuk dapat bergerak di dalam tubuh sehingga kerusakan hanya terbatas pada sel awal yang menyerap energi radiasi. Dalam hal bahan radioaktif masuk ke dalam tubuh melalui kontaminasi internal, kerusakan paling parah terjadi pada bagian tubuh di mana bahan radioaktif tersebut mengendap cukup lama.

Tubuh manusia masih dapat menoleransi kerusakan dalam beberapa hari atau minggu setelah menerima pajanan radiasi. Namun, hal ini akan berubah saat terjadi kematian sel dalam jumlah yang cukup besar sehingga organ atau sistem tubuh mengalami perubahan fungsi atau bahkan gagal menjalankan fungsinya. Toleransi ini dimiliki oleh semua sel, termasuk oleh sel dan jaringan yang paling peka terhadap radiasi karena kerusakan subletal pada sel, bahkan kerusakan pada DNA secara probabilitas dapat diperbaiki.

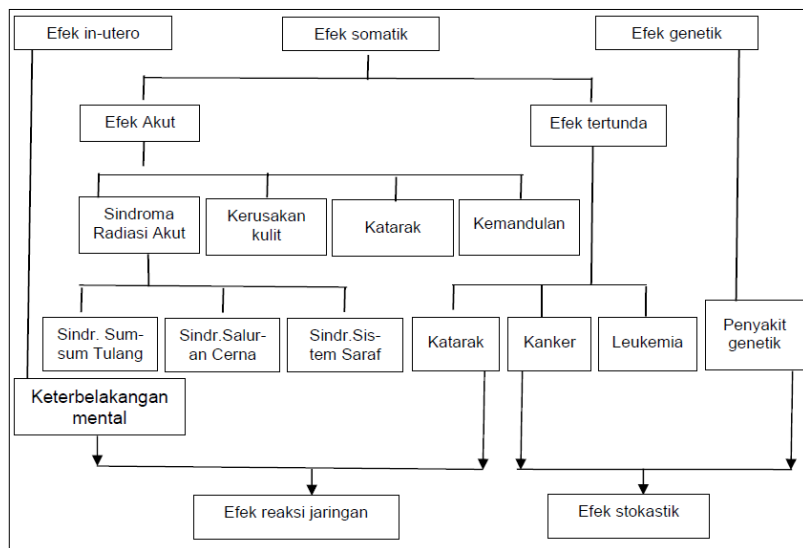
Gambar 2.1 memperlihatkan beberapa kemungkinan akibat setelah terjadinya interaksi radiasi dengan jaringan tubuh. Jika terjadi kerusakan DNA, masih ada kemungkinan sel dapat pulih kembali, atau terjadi kematian sel yang disebut sebagai efek reaksi jaringan atau kemungkinan ketiga terjadi mutasi sel yang disebut sebagai efek stokastik.



Gambar 2.1 Efek Biologis Pajanan Radiasi pada Jaringan Tubuh

Efek biologis pajanan radiasi dapat pula dibedakan atas efek somatik yaitu efek yang langsung dialami oleh individu yang menerima radiasi dan efek genetik yaitu efek yang diteruskan oleh individu yang menerima radiasi ke generasi berikutnya. Efek genetik terjadi jika organ tubuh yang menerima radiasi adalah organ reproduksi. Satu lagi jenis efek yang terkait adalah efek dalam kandungan (*in-utero effects*) yaitu efek yang terjadi pada bayi yang menerima radiasi saat masih berada dalam kandungan. Gambar 2.2 memperlihatkan efek biologis pajanan radiasi berdasarkan individu yang menerima pajanan radiasi.

Uraian mengenai ciri-ciri efek kesehatan yang berbahaya dari radiasi menjadi efek reaksi jaringan dan efek stokastik berdasarkan ciri-cirinya diberikan oleh UNSCEAR seperti terlihat pada Tabel 2.1 (UNSCEAR, 2015). Menurut UNSCEAR, walaupun



Sumber: Tatsuzaki (2013)

Gambar 2.2 Efek Biologis Pajanan Radiasi Berdasarkan Individu Penerima Radiasi

tidak sepenuhnya sesuai dari perspektif ilmiah murni, klasifikasi berdasar ciri-ciri ini dibuat karena UNSCEAR telah menggunakan istilah tersebut sebelumnya dan secara luas telah digunakan untuk keperluan proteksi kesehatan.

Seperti terlihat pada Tabel 2.1, UNSCEAR menggunakan istilah *radiation action* ‘tindakan radiasi’ yang memiliki pengertian berbeda dengan *health effects* ‘efek kesehatan’. Tindakan radiasi berarti semua modifikasi yang diinduksi dalam suatu organisme, dan efek kesehatan berarti gangguan kesehatan yang teramati dengan gejala yang dapat dikenali.

Tabel 2.1 Ciri-ciri Efek Reaksi Jaringan dan Efek Stokastik

Ciri	Efek reaksi jaringan	Efek stokastik
Tindakan radiasi awal dan dugaan mekanisme biologis.	Kematian akibat radiasi atau hilangnya fungsi banyak sel secara bersamaan di tingkat jaringan.	Tindakan radiasi pada sel tunggal. Sel dengan transformasi yang dipicu oleh radiasi harus bertahan hidup dan kemungkinan perlu menjalani transformasi lebih lanjut untuk mengarah pada kanker atau penyakit turunan.
Perwujudan	Efek kesehatan terjadi setelah pajanan akut di atas nilai dosis ambang. Tingkat keparahan efek kesehatan meningkat dengan dosis di atas nilai ambang.	Peluang, tetapi bukan keparahan, dari efek kesehatan terkait dengan dosis, kondisi pajanan dan karakteristik individu yang terpapar, khususnya, jenis kelamin individu yang terpajan dan usia saat terpajan. Selain itu, ada orang-orang yang secara genetik cenderung memiliki dampak kesehatan semacam itu.

buku ini tidak diperjualbelikan

Ciri	Efek reaksi jaringan	Efek stokastik
Contoh	Lesi kulit nonkanker (eritema, luka bakar, deskuamasi kering atau lembab); sindrom radiasi (<i>cutaneous</i> , haematopoietik, sistem cerna, dan sistem saraf pusat); epilasi; dampak pada kesuburan; kelainan bawaan; dan keterbelakangan mental setelah pajanan kandungan.	Kanker yang secara individual tidak dapat dibedakan dari kanker yang disebabkan oleh penyebab lain.
Bukti	Bukti kuat langsung dari respons pasien yang menjalani radioterapi dan individu yang telah menerima pajanan tinggi sebagai akibat dari kecelakaan radiologis. Hasil percobaan pada hewan	Bukti langsung terutama dari peningkatan signifikan secara statistik pada frekuensi terjadinya berbagai kanker dalam populasi yang terpajan dosis sedang atau tinggi. Ada keterbatasan statistik dan pengaruh perancu yang menghalangi pembuktian terjadinya efek kesehatan pada tingkat pajanan yang rendah. Efek kesehatan yang diwariskan ditunjukkan dalam penelitian pada hewan dengan dosis tinggi, tetapi tidak pada populasi manusia.

Ciri	Efek reaksi jaringan	Efek stokastik
Konsensus ilmiah	Tingkat konsensus yang tinggi tentang bagaimana radiasi menginduksi kerusakan jaringan; beberapa pemahaman tentang mekanisme perbaikan dengan berjalannya waktu. Debat ilmiah lebih banyak terkait dengan efek kesehatan yang tertunda.	Dicapai konsensus tentang peran mutasi DNA. Perkembangan kanker diyakini berlangsung secara bertahap. Beberapa faktor lain, seperti respons adaptif, dampak sistem kekebalan tubuh, ketidakstabilan genom, dan efek imbas samping, juga dapat memodifikasi perkembangan. Faktor-faktor ini mungkin tidak relevan pada dosis sedang/tinggi (karena mereka diintegrasikan ke dalam hubungan pajanan-respons yang dievaluasi dalam studi epidemiologis), tetapi peranannya pada dosis rendah dan sangat rendah menjadi subjek perdebatan ilmiah. Konsensus bahwa efek kesehatan yang diwariskan pada manusia cukup beralasan, tetapi pada frekuensi yang jauh lebih rendah dibanding induksi kanker pada populasi yang terpajan.

Sumber: UNSCEAR (2015)

A. Efek Reaksi Jaringan

Efek reaksi jaringan sebelumnya disebut sebagai efek deterministik. Efek deterministik adalah kerusakan pada populasi sel, ditandai dengan dosis ambang dan peningkatan keparahan reaksi dengan bertambahnya dosis (ICRP, 2007). Dalam beberapa kasus, efek dapat berubah akibat prosedur pasca pajanan, termasuk perubahan

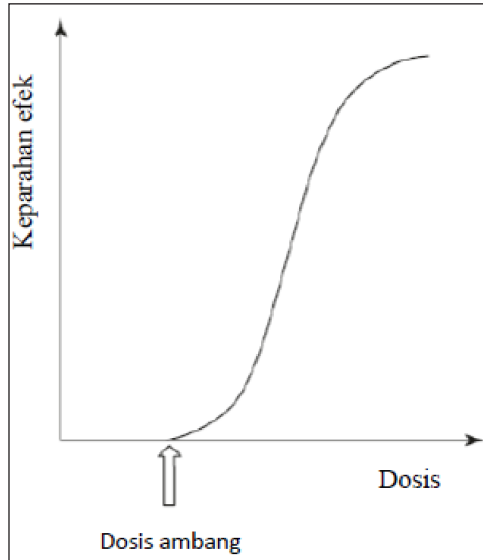
respons biologis. Kemungkinan adanya perubahan efek pasca pajanan ini menyebabkan istilah efek deterministik saat ini disebut sebagai efek reaksi jaringan. Namun, istilah efek deterministik tetap dapat dipakai karena sebagian besar efek tetap tidak berubah pascapajanan.

Istilah efek deterministik juga pada awalnya diberi nama efek nonstokastik (ICRP, 1977), di mana peluang dan keparahan suatu efek bergantung pada dosis radiasi dan muncul setelah dosis ambang dilampaui. Dalam perkembangan lebih lanjut, efek nonstokastik didefinisikan sebagai kerusakan yang diakibatkan oleh luka kolektif sejumlah besar sel dari jaringan yang menerima efek (ICRP, 1991). Diperkirakan bahwa jika tingkat keparahan bergantung pada jumlah atau proporsi sel yang rusak, ambang batas akan bergantung pada kepekaan metode untuk mendeteksi kerusakan. Diperkirakan pula bahwa waktu saat efek terdeteksi bergantung pada proses pembentukan luka, yang bervariasi dan bergantung pada sejauh mana kerusakan yang mendasarinya dapat diperbaiki atau berkembang dengan waktu setelah penyinaran.

Karena kematian sel akibat radiasi merupakan proses yang bersifat stokastik, istilah nonstokastik kemudian dipandang kurang tepat untuk luka yang diakibatkan oleh kematian sejumlah besar sel. Disadari pula bahwa meskipun perubahan sel awal bersifat acak, sejumlah besar sel yang terlibat dalam efek nonstokastik awal yang teramati secara klinis memberikan efek yang bersifat deterministik. Dengan demikian, pada ICRP publikasi 60 istilah nonstokastik diubah menjadi deterministik, menyiratkan bahwa penyebab efek ditentukan oleh kejadian yang terjadi sebelumnya (ICRP, 1991).

Efek reaksi jaringan terjadi akibat hilang atau rusaknya sel organ atau jaringan tubuh setelah menerima pajanan radiasi. Sebagian besar organ atau jaringan tubuh tidak terpengaruh oleh hilangnya beberapa sel; jika jumlah sel yang hilang cukup besar, ada terjadi bahaya yang dapat diamati dalam bentuk hilangnya fungsi organ atau jaringan tubuh tersebut. Di atas tingkat dosis tertentu, yang disebut sebagai dosis ambang, keparahan efeknya akan meningkat dengan bertambahnya jumlah dosis radiasi yang diterima. Gambar

2.3 memberikan ilustrasi mengenai efek reaksi jaringan, efek baru muncul setelah dosis ambang dilampaui, dan keparahannya akan naik dengan bertambahnya dosis.



Sumber: Moreels et al. (2020)

Gambar 2.3 Ilustrasi Efek Reaksi Jaringan

Ambang batas ini bervariasi dari satu efek ke efek lainnya. Efek reaksi jaringan dapat terjadi dalam beberapa jam atau beberapa hari setelah pajanan radiasi berlangsung, tetapi ada juga yang memerlukan waktu berbulan-bulan atau bertahun-tahun sebelum efek tersebut muncul. Beberapa efek reaksi jaringan yang penting akan diuraikan lebih lanjut berikut ini.

1. Keterbelakangan Mental

Sesuai dengan Gambar 2.2, keterbelakangan mental dapat terjadi pada bayi yang menerima radiasi saat masih dalam bentuk janin di dalam kandungan (efek *in-utero*). Selain kelainan tersebut, janin juga dapat mengalami kematian. Kematian atau kelainan janin

buku ini tidak diperjualbelikan

dapat disebabkan oleh dua faktor, yaitu dosis radiasi yang diterima dan tahap pengembangan di dalam kandungan saat terjadinya penyinaran.

Antara pembuahan dan kelahiran, janin melewati tiga tahap dasar perkembangan, yaitu pra-implantasi (hari ke-1 hingga ke-10), organogenesis (hari ke-11 hingga ke-42), dan tahap pertumbuhan (hari ke-43 hingga kelahiran). Efek utama radiasi pada janin adalah kematian neonatal, perubahan bentuk, keterlambatan pertumbuhan, cacat bawaan dan induksi kanker. Embrio pada tahap pra-implantasi sangat sensitif terhadap radiasi dan kerusakan radiasi akan menyebabkan kematian konsepsi dan keguguran spontan dini. Namun, embrio yang bertahan dan dapat melalui tahap ini akan berkembang dengan normal (Wondergem, 2014).

Tabel 2.2 Peluang Melahirkan Anak Sehat Setelah Menerima Dosis Radiasi Saat Pembuahan

Dosis pada Saat Pembuahan (mSv)	Peluang Melahirkan Anak Tanpa Kelainan (%)	Peluang Anak Tidak Akan Mengalami Kanker (%)	Peluang Anak Tidak Akan Memiliki Kelainan atau Kanker (%)
0	96	99,93	95,93
0,5	95,999	99,927	95,928
1	95,998	99,921	95,922
2,5	95,995	99,908	95,91
5	95,99	99,89	95,88
10	95,98	99,84	95,83

Sumber: Wagner dan Hayman (1982)

Data tentang efek iradiasi dalam kandungan (*in utero*) telah diperoleh dari keturunan penyintas bom atom dan anak-anak yang ibunya menerima penyinaran diagnostik dan terapi selama kehamilan. Pengecilan kepala (*mikrocephaly*) dan keterbelakangan mental dan pertumbuhan adalah efek utama yang terlihat. Namun

kelainan mata, alat kelamin, dan kerangka tubuh tidak banyak terjadi (ICRP, 2012).

Risiko penyinaran kandungan dapat dipelajari dengan melihat peluang melahirkan anak yang sehat setelah rahim menerima dosis radiasi saat pembuahan (Forshier, 2002). Pada Tabel 2.2, pajanan pada rahim sebesar 0,5 mSv, yang umumnya diterima oleh wanita yang bekerja di sektor radiologi, peluang melahirkan anak normal dapat berkurang dari 95,93% menjadi 95,928%. Selain itu, dosis pada rahim hingga 10 mSv sebenarnya tidak terlalu berpengaruh terhadap risiko yang terkait dengan kehamilan.

Pada penyinaran radioterapi, meskipun pengguguran kandungan oleh pasien jarang dapat dibenarkan, setiap kasus harus dianalisis secara individual dan risiko yang mungkin muncul harus dijelaskan kepada pasien. Semua upaya harus dilakukan untuk mengurangi penyinaran pada pasien dan terutama janin. Untuk penyinaran diagnostik, dengan melihat risiko yang relatif kecil, penundaan penyinaran yang sebelumnya telah diminta untuk tujuan klinis atau penjadwalan penyinaran di sekitar siklus menstruasi pasien untuk menghindari penyinaran pada janin biasanya tidak dibenarkan. Namun, sebelum penyinaran diagnostik yang melibatkan radiasi pengion, kepada semua pasien wanita subur harus ditanyakan apakah mereka tengah hamil. Jika diketahui bahwa pasien sedang hamil dan prosedur diagnostik alternatif tidak memenuhi kebutuhan, risiko dan manfaat penyinaran harus dibahas dengan pasien sebelum penyinaran tersebut dilakukan (Forshier, 2002).

2. Kerusakan Kulit

Mengingat kulit telah menjadi efek yang teramati mengalami kerusakan sejak awal penggunaan radiasi sehinggajaringan ini memiliki data yang paling lengkap terkait efek biologis dari pajanan radiasi. Selama tahun-tahun awal radiologi karena tabung sinar-X dioperasikan pada tegangan rendah, tidak diberi pelindung, dan waktu pajanan yang lama, banyak orang yang terlibat dalam

penggunaan sinar-X menderita peradangan, pemerahan (*erythema*), dan pengelupasan (*desquamation*) pada kulit mereka (Forshier, 2002). Seperti telah disinggung pada bagian awal Bab I, pemerahan kulit akibat sinar-X merupakan respons biologis pertama yang diamati pada tubuh manusia. Eritema atau pemerahan kulit akibat radiasi mirip dengan reaksi yang terlihat setelah menerima pajanan sinar matahari dalam waktu yang cukup lama.

Kulit terdiri atas lapisan luar epidermis yang relatif tipis, lapisan tengah dermis sebagai penghubung, dan lapisan lemak subkutan. Epidermis memperbarui diri dengan cepat, yaitu sekitar 15–30 hari. Dermis merupakan lapisan yang lebih tebal dan mengandung struktur aksesori, seperti folikel rambut, kelenjar keringat, kelenjar sekresi berminyak (*sebaceous*), ujung saraf, dan lain-lain (Wondergem, 2014). Semua lapisan kulit ini memiliki respons masing-masing terhadap penyinaran radiasi.

Jika epidermis terpajanan radiasi dengan dosis sedang, lapisan kulit ini bisa pulih dengan regenerasi, dan jika ada perubahan lebih lanjut, hal itu tidak cukup signifikan. Namun, jika terpajanan dosis tinggi, perubahan lanjut, seperti terhentinya pertumbuhan (*atrophy*), fibrosis, perubahan pigmentasi, borok (*ulceration*), kematian jaringan (*necrosis*), dan bahkan kanker dapat mungkin terjadi (Forshier, 2002).

Karena folikel rambut merupakan jaringan yang aktif tumbuh, struktur aksesori ini bersifat radiosensitif. Dosis sedang dapat menyebabkan kerontokan rambut sementara (*alopecia*), sementara dosis tinggi mungkin dapat menyebabkan kerontokan rambut permanen.

Kelenjar *sebaceous* dan keringat dianggap relatif tahan radiasi. Namun, pajanan dengan dosis tinggi dapat menyebabkan atrofi kelenjar dan fibrosis yang dapat mengakibatkan fungsi kelenjar akan minimal atau bahkan berhenti.

Tabel 2.3 Efek Radiasi pada Kulit

Efek	Perkiraan Dosis Ambang (Gy)	Waktu Kemunculan
Eritema transien dini	2	2-24 jam
Reaksi eritema utama	6	≈1,5 minggu
Kerontokan sementara	3	≈3 minggu
Kerontokan permanen	7	≈3 minggu
Pengelupasan kering	14	≈4-6 minggu
Pengelupasan lembab	18	≈4 minggu
Borok sekunder	24	>6 minggu
Eritema lanjut	15	8-10 minggu
Nekrosis dermal iskemik	18	>10 minggu
Atrofi dermal (fase awal)	10	>52 minggu
Telangiectasia	10	>52 minggu
Nekrosis dermal (fase lanjut)	>15?	>52 minggu

Sumber: ICRP (2012)

Tabel 2.3 memperlihatkan ringkasan perkiraan dosis ambang dan waktu kemunculan efek radiasi pada kulit (ICRP, 2012). Dewasa ini, kerusakan kulit seperti yang diberikan pada Tabel 2.3 dapat dihindari dengan, misalnya, pada pemeriksaan diagnostik dan fluoroskopi dengan penggunaan layar penguat, alat pembatas berkas, dan mematuhi pedoman proteksi radiasi (Wondergem, 2014).

3. Katarak

Lensa mata adalah struktur bikonveks, vaskular, tidak berwarna dan hampir sepenuhnya transparan. Lensa tidak memiliki asupan darah atau isolasi neuron, dan sepenuhnya bergantung pada cairan jernih yang mengisi ruang di depan bola mata (*aqueous humor*) untuk metabolisme dan pembuangan kotoran mata yang masuk.

Anatominya unik, dengan lapisan sel epitel tunggal pada permukaan anterior yang menghadap ke kornea. Lensa mata sepenuhnya terbungkus oleh membran dasar yang disebut kapsul mata (Kleiman, 2012).

Katarak adalah kekeruhan lensa mata yang menyebabkan terhalangnya cahaya mencapai retina. Bergantung pada lokasi anatomi, katarak memiliki tiga bentuk utama di mata, yaitu kortikal, nuklir, dan posterior sub *capsular* (PSC). Kortikal mengacu pada korteks lensa, yang merupakan tepi luar (*peripheral*) lensa, nuklir mengacu pada bagian tengah lensa, sedangkan PSC mengacu pada membran yang terletak di bawah kapsul di permukaan belakang lensa. Jenis katarak terkait usia yang paling umum adalah katarak nuklir, yang disebabkan terutama oleh pengerasan dan penguningan lensa seiring dengan berjalannya waktu.

Pembentukan katarak yang disebabkan oleh radiasi disebut kataraktogenesis radiasi, dan umumnya terjadi pada posterior sub-*capsular*, meski kadang bisa juga terjadi akibat kekeruhan kortikal (IAEA, n.d.1). Kerusakan dimulai ketika pajanan radiasi yang masuk memengaruhi sel pembelahan germinatif dari epitel lensa anterior. Sel-sel yang menyimpang bergerak menuju kutub posterior, menciptakan PSC terkait radiasi. Karena sifat avaskular dari lensa, sel-sel yang rusak tidak dapat dihilangkan, dan akumulasinya dengan waktu membentuk katarak.

Sampai sekitar tahun 2011, perubahan PSC pada lensa dipandang sebagai temuan yang konsisten setelah terjadinya pajanan radiasi dosis tinggi. Hal ini menyebabkan katarak diyakini sebagai berkembang secara deterministik dan karena itu membutuhkan dosis ambang dan merusak banyak sel. Hal ini pula yang dipercaya ICRP sehingga sampai tahun 2007 masih merekomendasikan dosis ambang untuk kekeruhan terdeteksi pada nilai 2 Gy untuk pajanan akut dan 5 Gy untuk pajanan kronis yang terpecah atau terbagi-bagi (ICRP, 2007).

Namun, beberapa penelitian yang dikutip oleh Ainsbury et al. (2016) menunjukkan bahwa dosis akut 1 Gy dapat menyebabkan pembentukan katarak. Temuan ini membuat ICRP meninjau ulang

rekomendasinya, kemudian mengusulkan ambang nominal 0,5 Gy untuk induksi katarak terlepas dari laju dosis radiasi yang diterima (ICRP, 2012). Penurunan nilai dosis ambang ini membawa Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) untuk mengurangi nilai batas dosis lensa mata untuk pekerja dari 150 mSv per tahun menjadi 20 mSv per tahun (IAEA, n.d.1). Tabel 2.4 memperlihatkan perkembangan rekomendasi nilai batas dosis yang diberikan oleh ICRP (Hamada & Sato, 2016).

Tabel 2.4 Perkembangan Rekomendasi Nilai Batas Dosis Lensa Mata yang Direkomendasikan ICRP

Istilah	Tahun Publikasi	Nilai yang Direkomendasikan	
		Pekerja	Masyarakat Umum
Dosis maksimum yang diizinkan	1954 ^a	3 mSv/minggu	0,3 mSv/minggu
	1956 ^a	3 mSv/minggu atau	0,3 mSv/minggu, atau
		30 mSv/13 minggu	3 mSv/13 minggu
	1958 (ICRP 1) ^a	50 mSv/tahun atau 600 mSv hingga usia 30 (usia<18)	5 mSv/tahun ^b , atau
		30 mSv/13 minggu atau	15 mSv/tahun ^c
		50 (usia-18) mSv (usia≥18)	
1964 (ICRP 6) ^a	40 mSv/13 minggu, atau	5 mSv/tahun ^d atau 15	
	150 mSv/tahun	mSv/tahun ^c	
1966 (ICRP 9) ^a	150 mSv/tahun	N. A.	

Istilah	Tahun Publikasi	Nilai yang Direkomendasikan	
		Pekerja	Masyarakat Umum
Nilai batas dosis	1966 (ICRP 9) ^a	N. A.	15 mSv/tahun
	1977 (ICRP 26)	300 mSv/tahun	50 mSv/tahun
	1980 (Brighton Statement)	150 mSv/tahun	50 mSv/tahun
	1990 (ICRP 60)	150 mSv/tahun	15 mSv/tahun
	2011 (Seoul Statement)	100 mSv/5 tahun, ≤50 mSv/tahun	15 mSv/tahun

Catatan:^a Aslinya direkomendasikan dalam satuan rem, tetapi dikonversi menjadi dosis dalam mSv.

^b Untuk masyarakat umum yang tinggal di sekitar daerah kerja radiasi.

^c Untuk orang dewasa yang bekerja tidak dengan radiasi di sekitar daerah kerja radiasi atau kadang-kadang memasuki daerah kerja radiasi.

^d Untuk masyarakat secara umum.

Sumber: Hamada dan Sato (2016)

Pengurangan dosis ambang dan nilai batas dosis ini masih menjadi bahan perdebatan secara internasional. Sementara IAEA sepakat dengan ICRP, Asosiasi Proteksi Radiasi Internasional (IRPA) dan Masyarakat Proteksi Radiologis (SRP) Inggris masih mempertanyakan mengenai kecukupan data yang digunakan untuk mendukung pengurangan nilai batas dosis tersebut (Broughton et al., 2015).

Lebih jauh, data baru menunjukkan bahwa katarak dapat terbentuk secara stokastik, tanpa dosis ambang dan berpotensi sebagai respons terhadap kerusakan sel tunggal (Seals et al., 2016). Selain itu, sebagian besar pajanan akibat pekerjaan dapat diklasifikasikan sebagai kronis atau berlarut-larut, sementara sebagian besar studi yang dikutip oleh ICRP untuk mendukung pengurangan dosis ambang, terutama dari penyintas dari bom atom, adalah dari pajanan akut (Thome et al., 2018).

Dosis ambang juga dapat dikaji secara matematik dengan perhitungan berdasarkan kemungkinan maksimum dari model hubungan dosis-respons. Semua dosis ambang hanya dapat ditemukan pada penyintas bom atom atau likuidator Chernobyl yang menerima pajanan akut atau jangka pendek (Broughton et.al., 2015). Sebaliknya, tidak ada dosis ambang yang telah dihitung berdasar pajanan kerja. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada data yang cukup untuk mendukung perhitungan nilai dosis ambang untuk pajanan kronis.

Karena itu, sementara beberapa penelitian memang mengonfirmasi ada beberapa risiko katarak berkembang di antara pekerja radiasi yang menerima dosis radiasi di lensa mata mereka, banyak data lain menunjukkan bahwa katarak tidak benar-benar sesuai dengan definisi efek deterministik, atau efek reaksi jaringan. Hal ini kemudian menjadi dasar untuk berpendapat bahwa katarak yang dipicu oleh radiasi ternyata lebih bersifat stokastik daripada deterministik.

4. Kemandulan

Organ reproduksi manusia, gonad, terdiri atas testis pada pria, yang menghasilkan spermatozoa, sedangkan ovarium pada wanita yang menghasilkan ovum. Proses spermatogonia pria berkembang menjadi spermatozoa dewasa disebut sebagai spermatogenesis dan dimulai pada masa pubertas. Perkembangan awal dimulai dengan sel-sel induk spermatogonial, yang berkembang biak pertama kali menjadi spermatogonia, kemudian membelah menjadi spermatosit. Spermatosit selanjutnya menjalani meiosis untuk menjadi spermatid haploid. Tanpa pembelahan sel lebih lanjut, spermatid berkembang menjadi spermatozoa. Keseluruhan proses ini memakan waktu sekitar 74 hari pada manusia (Forshier, 2002).

Pada wanita, proses di mana oosit primer berkembang menjadi ova (sel telur) disebut sebagai oogenesis dan dimulai dari masa pubertas dan berakhir dengan menopause. Berbeda dengan spermatogenesis, di mana spermatozoa baru diproduksi sepanjang waktu, wanita hanya dapat menghasilkan jumlah sel telur yang ter-

batas karena setelah tahap janin, oosit tidak lagi membelah. Saat lahir, jumlah oosit tetap ada dan jumlah mereka berkurang terus seiring bertambahnya usia (Forshier, 2002).

Efek utama radiasi pada gonad pria adalah kerusakan dan pengurangan jumlah spermatogonia, yang berakibat penipisan sperma dewasa, suatu proses yang disebut penipisan maturasi (Forshier, 2002). Setelah penyinaran testis terjadi periode variasi kesuburan yang disebabkan oleh radioresisten dari sperma dewasa. Bergantung pada jumlah dosis radiasi yang diterima, periode kesuburan ini diikuti oleh kemandulan sementara atau permanen. Penyebab kemandulan adalah hilangnya spermatogonia yang belum matang yang membelah dan mengganti sperma dewasa yang hilang dari testis (Forshier, 2002).

Selain kemungkinan mandul, bahaya lain dari penyinaran testis adalah kelainan kromosom yang dapat diteruskan ke generasi mendatang. Periode subur yang terjadi pascapajanan tidak menghilangkan kemungkinan terjadinya kerusakan kromosom pada spermatozoa fungsional.

Pada wanita, setelah dosis radiasi moderat ke ovarium, ada periode awal kesuburan. Hal ini disebabkan oleh adanya folikel matang yang cukup tahan yang dapat melepaskan sel telur. Masa subur digantikan oleh kemandulan sementara atau permanen. Kemandulan ini berasal dari ovum yang menerima kerusakan pada folikel antara radiosensitif, yang membatasi pematangan dan pelepasannya (Forshier, 2002).

ICRP telah merekomendasikan dosis ambang untuk sel reproduksi manusia sejak tahun 1984 (ICRP, 1984), dan sampai buku ini disusun pada tahun 2023 nilainya masih tetap sama. Tabel 2.5 memperlihatkan dosis ambang untuk sel reproduksi manusia ini (ICRP, 2012). Pada pria ada kecenderungan dosis ambang batas lebih sedikit untuk pajanan yang difraksinasi/berlarut-larut dibandingkan dengan pajanan tunggal (efek pembalikan fraksinasi). Manipulasi hormonal dari pemulihan spermatogenik telah diteliti pada manusia, tetapi dengan sedikit perbaikan konklusif. Untuk wanita perlu dicatat bahwa sensitivitas meningkat dengan bertambahnya usia

karena penurunan ukuran kumpulan oosit dengan bertambahnya usia (ICRP, 2012).

Tabel 2.5 Dosis Ambang untuk Sel Reproduksi Manusia

	Efek		
	Kemandulan Sementara	Kemandulan Permanen	
Organ/jaringan	Testis	Testis	Ovarium
Waktu untuk efek berkembang	3–9 minggu	3 minggu	<1 minggu
Pajanan akut (Gy)	~0,1	~6	~3
Sangat terbagi (fraksi 2 Gy) atau setara pajanan berlarut (Gy)	-	<6	6,0
Laju dosis (kronis) tahunan selama bertahun-tahun (Gy/tahun)	0,4	2,0	>0,2

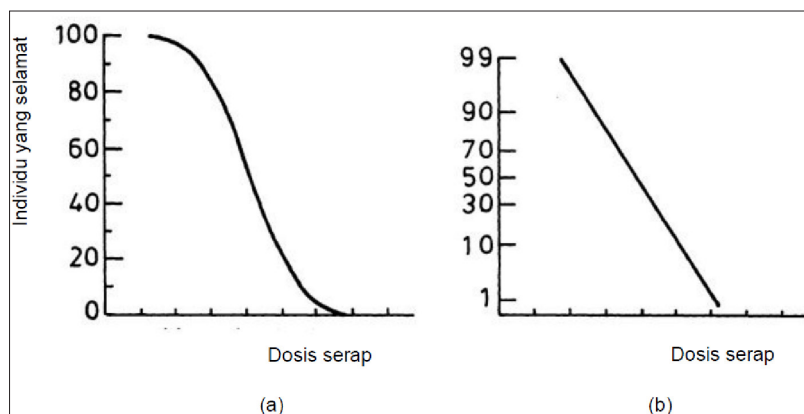
Sumber: ICRP (2012)

5. Sindrom Radiasi Akut

Setelah suatu organisme menerima dosis radiasi sekujur (*whole body*) yang akut, organisme tersebut akan menunjukkan tanda-tanda, gejala, dan temuan klinis tertentu. Istilah sindroma digunakan untuk menunjukkan hubungan tanda dan gejala dengan jenis trauma atau proses penyakit tertentu (Forshier, 2002). Istilah sindroma radiasi akut digunakan untuk menunjukkan sindroma yang timbul akibat pajanan radiasi tunggal kecelakaan dengan dosis tinggi dalam waktu yang singkat (CDC, t.t.).

Konsekuensi utama dari pajanan radiasi akut adalah pemendekan dari rentang hidup organisme (Forshier, 2002). Pemendekan rentang hidup ini bergantung pada dosis. Karena masa hidup suatu organisme berkurang dengan sangat cepat, setelah penerimaan radiasi sekujur dengan dosis menengah hingga tinggi, pajanan sekujur dalam rentang dosis ini dipandang sebagai pajanan yang mematikan atau fatal.

Kematian umumnya merupakan akibat dari berkurangnya jumlah sel dengan sangat cepat dalam satu atau lebih sistem organ vital dalam tubuh. Gambar 2.4 memperlihatkan hubungan dosis-respons untuk individu yang selamat akibat pajanan akut (ICRP, 1991). Gambar 2.4 (a) memperlihatkan plot dengan sumbu linier-linier untuk peluang kerusakan akibat penerimaan dosis radiasi akan berbentuk sigmoid, sementara Gambar 2.4 (b) memperlihatkan plot dengan probabilitas-linier akan berbentuk linier.



Keterangan: (a) ordinat linier, (b) ordinat peluang

Sumber: ICRP (1991)

Gambar 2.4 Hubungan Dosis dengan Respons

Karena adanya variasi dalam waktu hidup sekelompok individu yang terpajan dengan dosis sekejor yang sama, hubungan individu yang selamat dari seluruh populasi dengan jumlah penerimaan dosis yang sama dinyatakan sebagai dosis yang akan membunuh persentase tertentu dari populasi tersebut. Misalnya, dosis mematikan yang diperlukan untuk membunuh 50% populasi dalam waktu 30 hari dinyatakan sebagai $LD_{50/30}$ (Forshier, 2002). Pada Gambar 2.4, LD_{50} diberikan sebagai titik tengah dari kurva.

Karena manusia sering bertahan setelah melewati waktu 30 hari, $LD_{50/60}$ atau dosis mematikan yang diperlukan untuk membunuh

50% populasi dalam 60 hari, lebih sering digunakan. Nilai $LD_{50/60}$ untuk manusia adalah sekitar 3–5 Gy (ICRP, 2007), yang terjadi akibat kerusakan pada sumsum tulang, dan dengan asumsi tidak ada intervensi tindakan medik yang dilakukan selama waktu 60 hari tersebut.

Sindrom radiasi akut (SRA) dicirikan oleh empat fase berbeda, yaitu fase prodromal, fase laten, fase manifestasi kelainan, dan fase pemulihan atau kematian. Selama periode prodromal, pasien akan mengalami kehilangan nafsu makan, mual, muntah, kelelahan, dan diare. Setelah dosis yang sangat tinggi, gejala tambahan, seperti demam, lesu, gangguan pernapasan, dan hipereksitabilitas dapat terjadi. Namun, semua gejala ini biasanya hilang dalam 1 atau 2 hari, dan disusul dengan fase laten. Dalam fase laten ini, tidak ada gejala yang muncul, dan lamanya bervariasi sesuai dengan dosis radiasi yang diterima. Pada pajanan tingkat tinggi fase laten dapat berlangsung hanya selama beberapa jam, sementara pada pajanan tingkat rendah dapat berlangsung hingga tiga minggu.

Fase manifestasi kelainan kemudian menyusul, yang ditandai dengan infeksi, ketidakseimbangan elektrolit, diare, perdarahan, kolaps kardiovaskular, dan kadang-kadang ketidaksadaran yang berlangsung singkat. Sistem organ yang terkena dan juga keparahannya sesuai dengan dosis radiasi yang diterima. Dari fase ini pasien akan mengalami fase terakhir, yaitu fase pemulihan atau kematian.

Pada fase pemulihan atau kematian pasien dapat kembali pulih atau mengalami kematian. Pemulihan dapat terjadi sekitar 5 hingga 10 minggu setelah pajanan dengan penyembuhan cedera berjalan secara lambat dan kembalinya parameter hematologikal normal juga berlangsung secara perlahan-lahan. Efek jangka panjang tidak terlihat selama periode ini, tetapi bertahun-tahun kemudian diduga untuk muncul.

Selain dilihat dari fase kejadian, SRA juga dapat dikategorikan berdasar tingkat kerusakan. Dalam beberapa hal kategorisasi ini sebenarnya bersifat subyektif karena sindroma dapat terjadi secara

bersamaan. Penetapan pasien dalam salah satu kategori akan berguna bagi dokter dalam menetapkan tindakan yang perlu diambil sampai pemulihan kondisi pasien tercapai. Kategori yang diberikan adalah sindrom sumsum tulang, sindrom sistem cerna dan sindrom sistem saraf (CDC, t.t.).

a. Sindrom Sumsum Tulang

Sindrom sumsum tulang (kadang-kadang disebut sebagai sindroma hematopoietik) biasanya akan terjadi dengan dosis antara 0,7 dan 10 Gy, meskipun gejala ringan dapat terjadi serendah 0,3 Gy. Tingkat kelangsungan hidup pasien dengan sindrom ini menurun dengan meningkatnya dosis. Penyebab utama kematian adalah kerusakan sumsum tulang, yang mengakibatkan infeksi dan pendarahan.

b. Sindrom Saluran Cerna

Sindrom saluran cerna biasanya akan terjadi dengan dosis lebih besar, mulai dari 10 Gy, meskipun beberapa gejala dapat terjadi mulai dari 6 Gy. Kelangsungan hidup sangat tidak mungkin terjadi dengan sindrom ini. Perubahan yang merusak tidak dapat diperbaiki pada saluran cerna dan sumsum tulang biasanya menyebabkan infeksi, dehidrasi, dan ketidakseimbangan elektrolit. Kematian biasanya terjadi dalam 2 minggu.

c. Sindrom Sistem Saraf

Sindrom sistem saraf (sindrom kardiovaskuler) biasanya akan terjadi dengan dosis lebih besar mulai dari 50 Gy meskipun beberapa gejala dapat terjadi mulai dari 20 Gy. Kematian dapat terjadi dalam 3 hari, kemungkinan disebabkan oleh terjadinya kegagalan dalam sistem peredaran darah serta peningkatan tekanan dalam ruang kranial sebagai akibat peningkatan kadar cairan yang disebabkan oleh edema, vaskulitis, dan meningitis.

Berdasarkan ICRP (2007), jika sebagian sumsum tulang dan sebagian besar usus terhindar dari kerusakan, disebabkan oleh penyinaran berlangsung tidak homogen, pada dosis akut di atas 10 Gy ke paru-paru dapat menyebabkan peradangan akut (pneumonitis)

yang menyebabkan kematian. Jika ginjal juga menerima penyinaran, kerusakan pada organ ini juga dapat terjadi pada kisaran dosis yang sama. Tabel 2.6 memberikan rentang dosis untuk terjadinya sindroma dan kematian setelah menerima dosis sekujur akut.

Tabel 2.6 Rentang Dosis Terjadinya Sindrom dan Kematian pada Manusia Setelah Menerima Dosis Sekujur Akut.

Dosis Serap Sekujur (Gy)	Efek Utama Penyebab Kematian	Waktu Kematian Setelah Paparan (Hari)
3– 5	Kerusakan pada sumsum tulang (LD _{50/60})	30-60
5–15	Kerusakan pada saluran cerna	7-20
5–15	Kerusakan pada paru dan ginjal	60-150
>15	Kerusakan pada sistem saraf	<5, bergantung dosis

Sumber: ICRP (2007).

6. Gangguan peredaran darah

Penyakit atau gangguan peredaran darah adalah gangguan atau kondisi yang memengaruhi sistem peredaran darah yang dapat terjadi karena masalah pada jantung, pembuluh darah, atau darah itu sendiri (Topdoctors, t.t.). Gejala gangguan peredaran darah, meliputi nyeri dada (termasuk sesak, tertekan atau tidak nyaman), sesak napas, nyeri, mati rasa, rasa lemah di kaki atau tangan, rasa dingin, dan, bisul yang tidak kunjung sembuh.

Menurut Hendry (2015), penyakit peredaran darah telah diakui sebagai salah satu penyakit nonkanker penting yang disebabkan oleh radiasi, dan beberapa publikasi yang membahas epidemiologi, hubungan dosis-respons, dan mekanisme potensial dari penyakit

ini telah diterbitkan. Dosis ambang sebesar 0,5 Gy telah diusulkan untuk penyakit peredaran darah akibat radiasi, setelah pajanan akut atau kronis (ICRP, 2012). Namun, meta-analisis yang lebih baru dari studi populasi dosis rendah menunjukkan bahwa jika insidensi dosis diasumsikan linier, risiko positif yang serupa dengan induksi kanker dapat dijumpai pada beberapa jenis penyakit peredaran darah setelah dosis <0,5 Gy atau <10m Gy per hari (Hendry, 2015).

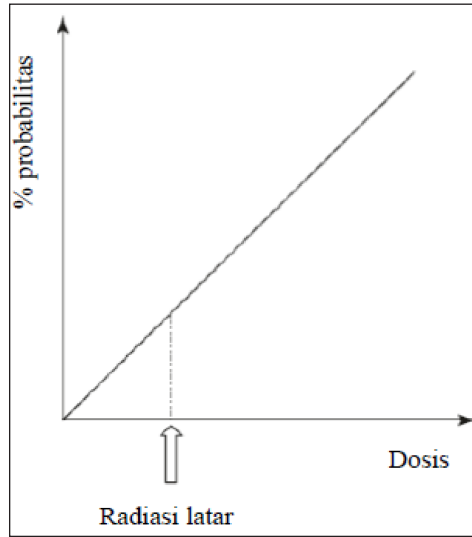
B. Efek Stokastik

Berbeda dengan efek reaksi jaringan yang akan muncul setelah dosis ambangnya dilampaui, efek stokastik merupakan efek yang probabilistik. Dengan kata lain, probabilitas atau peluang terjadinya efek, dan bukan keparahannya, merupakan fungsi dosis. Makin besar dosis radiasi yang diterima, makin besar peluang terjadinya efek stokastik.

Efek ini tidak memiliki dosis ambang, dan efek yang paling umum adalah leukemia, penyakit genetik dan kanker. Ilustrasi untuk efek stokastik diberikan pada Gambar 2.5.

1. Leukemia

Leukemia adalah kanker darah yang disebabkan oleh meningkatnya jumlah sel darah putih dalam tubuh manusia. Sel-sel darah putih jumlahnya meningkat itu bukan sel yang baik, atau abnormal karena merusak sel-sel darah merah dan trombosit yang dibutuhkan tubuh agar tetap sehat.



Sumber: Moreels et al. (2020)

Gambar 2.5 Ilustrasi Efek Stokastik

Secara umum leukemia dapat bersifat akut atau kronis. Pada leukemia akut, sel-sel darah abnormal tidak pernah menjadi dewasa sehingga tidak dapat menjalankan fungsi normalnya. Sedang, pada leukemia kronis di antara sel dewasa yang dapat menjalankan fungsi normalnya terselip beberapa sel yang tidak pernah menjadi dewasa (JSI Center, t.t.).

Leukemia dapat timbul pada salah satu dari dua jenis utama sel darah putih. Jika leukemia memengaruhi sel-sel limfoid (pada jaringan getah bening), leukemia ini disebut leukemia limfositik, sedangkan jika sel mieloid (pada sumsum tulang) yang terpengaruh, penyakit ini disebut leukemia mieloid atau leukemia *myelogenous*.

Jenis leukemia yang paling umum sebagai berikut (JSI Center, t.t.).

- 1) Leukemia limfositik akut (ALL, *acute lymphocytic leukemia*), yaitu jenis leukemia paling umum terjadi pada anak kecil. Penyakit ini

juga menyerang orang dewasa, terutama mereka yang berusia 65 tahun ke atas.

- 2) Leukemia mieloid akut (AML, *acute myeloid leukemia*), yaitu jenis leukemia yang terjadi pada orang dewasa dan anak-anak. Jenis leukemia ini kadang-kadang disebut juga leukemia nonlimfositik akut (ANLL, *acute nonlymphocytic leukemia*).
- 3) Leukemia limfositik kronis (CLL, *chronic lymphocytic leukemia*), yaitu jenis leukemia yang paling sering menyerang orang dewasa di atas usia 55 tahun. Kadang-kadang terjadi pada orang dewasa yang lebih muda, tetapi hampir tidak pernah memengaruhi anak-anak.
- 4) Leukemia mieloid kronis (CML, *chronic myeloid leukemia*), yaitu leukemia yang terjadi terutama pada orang dewasa. Sejumlah kecil anak-anak juga dapat menderita penyakit ini.

Usia pada saat menerima radiasi memengaruhi kejadian leukemia (Forshier, 2002). Insiden leukemia akibat radiasi berkurang dengan bertambahnya usia, bersifat linier, dan memiliki periode laten 4 hingga 7 tahun dengan periode risiko 15 hingga 20 tahun.

Namun, UNSCEAR yang telah mengkaji berbagai literatur mengenai leukemia berpandangan bahwa perbedaan antara berbagai jenis leukemia berdasar risiko akibat radiasinya tidak cukup jelas dalam arti masih sulit membedakan jenis leukemia mana yang sangat terkait dengan radiasi (UNSCEAR, 2018). Pada leukemia myelositik, puncak kejadian sudah terjadi pada usia satu tahun dan pada leukemia bayi, dominasi ALL tidak sejelas pada leukemia pada usia yang lebih tua.

Kecelakaan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) Chernobyl di Ukraina pada tahun 1987 dilaporkan telah menyebabkan peningkatan kejadian leukemia di antara para pekerja pembersihnya (*liquidator*) (Ivanov et al., 2003). Selain itu, dilaporkan pula bahwa secara keseluruhan, 16% dari kasus leukemia (15% dari nonCLL, 18% dari CLL) pada liquidator dapat dikaitkan dengan pajanan radiasi, dan pasca kecelakaan dijumpai bahwa pajanan dosis rendah dan laju dosis rendah pada pekerja liquidator tersebut meningkatkan

risiko leukemia yang secara statistik konsisten dengan perkiraan untuk para penyintas bom atom di Jepang (Zablotska et al., 2013). Peningkatan risiko leukemia ini juga dinyatakan hanya dialami oleh pekerja liquidator, dan tidak dijumpai pada populasi lain (Howe, 2017).

Namun, pandangan lain menyatakan bahwa risiko leukemia pada pekerja liquidator ditaksir terlalu tinggi (Jargin, 2014). Hal ini didasarkan pada pernyataan UNSCEAR bahwa potensi karsinogenik dari pajanan akut radiasi rendah-LET umumnya dianggap lebih tinggi daripada pajanan yang berlarut-larut atau difraksinasi. Artinya, jika dosis tertentu diberikan pada tingkat yang lebih rendah atau dipecah menjadi banyak fraksi, sistem biologis memiliki waktu untuk memperbaiki kerusakan sehingga total kerusakan akan berkurang.

Pandangan menarik diberikan mengenai kemungkinan adanya dosis ambang untuk leukemia akibat radiasi pada dosis sekitar 500 mSv (Cuttler, 2018). Pandangan ini didasarkan pada laporan UNSCEAR pertama tahun 1958 yang menyiratkan kemungkinan adanya dosis ambang tersebut, namun diabaikan oleh berbagai studi mengenai leukemia akibat radiasi hingga saat ini.

2. Penyakit Genetik

Penemuan Muller tahun 1927 tentang efek mutagenik dari sinar-X pada lalat buah (*Drosophila*) dan oleh Stadler tahun 1928 tentang efek yang sama pada jelai dan jagung, dan pengembangan selanjutnya dari temuan ini ke jenis radiasi pengion yang lain (dan juga untuk ultraviolet) dan organisme lain, memastikan bahwa efek radiasi dapat menyebabkan kerusakan genetik (NRC, 2006).

Namun, kekhawatiran yang luas dan serius atas kemungkinan efek genetik yang merugikan pada manusia akibat penerimaan dosis tingkat rendah pertama kali muncul setelah ledakan bom atom di Hiroshima dan Nagasaki dalam Perang Dunia II. Sejak saat itu, studi pada penyintas bom atom dilakukan untuk melihat kemungkinan kaitan penerimaan dosis radiasi tingkat rendah dengan kerusakan dan penyakit yang dapat terjadi.

Studi pertama kali dilakukan oleh *The Atomic Bomb Casualty Commission* (ABCC) pada bulan Februari 1948. Studi genetik pertama ini dirancang untuk menilai frekuensi cacat lahir pada anak-anak yang lahir dari orang tua yang terpajan radiasi dari bom. Cacat lahir yang dipelajari meliputi malformasi, lahir mati, dan kematian perinatal. Temuan studi awal ini menyatakan tidak ada peningkatan cacat lahir yang terjadi, yang membantu meredakan isu saat itu mengenai adanya efek genetik akibat radiasi pada anak-anak yang terlahir dari orang tua penyintas korban bom (Nakamura, 2006).

Studi berikutnya dilakukan dengan skala yang lebih besar yang dilakukan oleh Radiation Effects Research Foundation (RERF), yang merupakan institusi penerus dari ABCC. Studi lanjutan ini mempelajari beberapa parameter tambahan, seperti aberasi kromosom, perubahan protein plasma dan eritrosit serta studi epidemiologi tentang kematian (dari setiap penyebab) dan kejadian kanker (yang sampai saat ini masih terus berlanjut). Studi ini juga memberikan kesimpulan tidak ada kenaikan efek genetik yang ditemukan (NRC, 2006).

Tabel 2.7 memperlihatkan beberapa studi efek genetik yang dilakukan oleh ABCC dan RERF sejak akhir tahun 1940-an hingga saat ini pada anak-anak penyintas bom atom (RERF, 2020). Studi yang masih berjalan meliputi kematian menyusul cohort F1 (generasi pertama penyintas bom), program pemeriksaan klinis F1, dan berbagai studi molekuler DNA dari sel penyintas dan anak-anaknya.

3. Kanker Akibat Radiasi

Kanker yang diduga akibat radiasi pertama kali dilaporkan terjadi di kulit pada tahun 1902 (Shah et al., 2012). Pada 1911, bahkan ada laporan leukemia yang timbul pada pekerja radiasi. Pemahaman manusia tentang karsinogenesis radiasi mulai berkembang pesat sejak Perang Dunia Kedua setelah dilakukannya pemodelan dan percobaan dengan hewan, dan juga dengan adanya bukti epidemiologis penting yang muncul dari *Life Span Study* (LSS) pada kohort (*cohort*) penyintas Bom Atom Jepang.

Tabel 2.7 Studi Efek Genetik ABCC-RERF pada Anak-anak Penyintas Bom Atom

Studi	Ukuran Populasi
Cacat lahir (lahir mati, malformasi, dll.)	77.000
Bobot	72.000
Rasio gender	141.000
Aberasi kromosom	16.000
Elektroforesis protein	24.000
Kematian, kejadian kanker (masih berjalan)	77.000
Program pemeriksaan klinis	12.000
Studi DNA (masih berjalan)	1.000 keluarga (1.500 keturunan)

Sumber: RERF (2020)

Kohort pada LSS ini sangat penting untuk memahami dan memperkirakan risiko kanker dari radiasi pengion karena beberapa hal (Shah et al., 2012): (a) besarnya populasi yang dipelajari (sekitar 100 ribu penyintas); (b) lamanya studi (lebih dari 60 tahun); (c) banyaknya populasi yang terpajan (pria dan wanita dari semua kelompok usia); (d) pemilihan populasi tidak berdasarkan status kanker; (e) bervariasinya dosis yang diterima, mulai dari dosis rendah yang relevan dengan radiasi medik diagnostik hingga dosis yang jauh lebih besar, bahkan mematikan; (f) individu menerima pajanan sejujur dan bukan pajanan yang sengaja diberikan pada organ individu sehingga risiko untuk sebagian besar kanker padat / leukemia dapat diperkirakan.

Perkembangan kanker dalam jaringan adalah proses multistep yang cukup kompleks yang dapat dibagi menjadi empat fase: inisiasi neoplastik, promosi neoplastik, konversi dan progresi (Wodergem, 2014). Pembagian ini sebenarnya merupakan penyederhanaan dari keseluruhan proses, tetapi memberikan dasar yang cukup untuk mengidentifikasi perubahan molekuler dan seluler spesifik yang terlibat dalam proses tersebut.

Inisiasi neoplastik meliputi kerusakan sel yang tidak dapat dibalikkan, walaupun tidak terekspresikan segera, dapat memberikan potensi bagi sel untuk berkembang menjadi kanker. Proses inisiasi ini terbukti dihasilkan dari kerusakan DNA yang menyebabkan mutasi gen dalam sel target tunggal pada jaringan. Kerusakan terbesar kemungkinan bertepatan dengan kerusakan pada pemutusan untai ganda DNA (*DNA double strand break*). Meskipun, proporsi kerusakan untai ganda dapat diperbaiki, perbaikan sepenuhnya dan kembali seperti semula, bahkan pada dosis rendah, tidak dapat diharapkan.

Promosi neoplastik dapat dilihat sebagai suatu proses di mana sel-sel yang diinisiasi menerima rangsangan pertumbuhan abnormal dan mulai berkembang biak secara semi-independen. Konversi sel-sel praneoplastik ini menjadi sepenuhnya ganas adalah tahapan utama dari proses perkembangan neoplastik. Dewasa ini, perubahan tersebut diyakini didorong oleh mutasi gen lebih lanjut yang terakumulasi dalam populasi sel praneoplastik yang berkembang.

Setelah potensi keganasan telah terbentuk sepenuhnya, progresi penyakit selanjutnya akan bergantung pada perubahan sel lebih lanjut yang memungkinkan invasi jaringan normal di sekitarnya, sirkulasi sel-sel neoplastik dalam darah dan sistem limfatik, dan pembentukan metastasis (pertumbuhan tumor sekunder) di bagian lain dari tubuh. Proses invasif inilah yang terutama memberikan efek fatal pada sebagian besar tumor manusia.

4. Periode Laten

Selang waktu antara terjadinya pajanan radiasi dengan munculnya kanker dikenal sebagai periode laten, yang panjangnya bervariasi sesuai usia dan jenis tumornya. Leukemia memiliki periode laten minimum sekitar 2 tahun setelah pajanan, meski kebanyakan kasus terjadi dalam 15 tahun pertama setelah penyinaran dan menurun setelahnya (Wondergem, 2014). Tumor padat, seperti pada saluran cerna, hati, dan paru-paru memiliki periode laten yang lebih panjang, mulai dari 10 hingga 60 tahun atau bahkan lebih.

5. Hubungan Dosis-respons

ICRP menggunakan model linier nonambang (LNT, *linear nonthreshold*) sebagai dasar dalam mengembangkan sistem proteksi radiasi. Berdasar teori ini, risiko kanker terkait radiasi sebanding dengan dosis pada tingkat dosis rendah dan menengah (sekitar 200 mGy atau kurang) dan juga pada tingkat laju dosis rendah dan menengah (kurang dari 6 mGy/jam, dirata-ratakan dalam beberapa jam pertama) (ICRP, 2005b). Walau model ini tidak diterima secara universal sebagai kebenaran biologis, model ini dianggap sebagai jalan tengah untuk membuat kebijakan publik dalam menghindari risiko dari pajanan yang tidak perlu karena tingkat risiko pada pajanan dosis sangat rendah tidak diketahui,

Asumsi utama yang dibuat pada model LNT adalah bahwa karsinogenesis radiasi pada dosis rendah sangat terbatas, dan hal ini disebabkan oleh *one-track action* 'aksi satu lintasan', dalam arti satu atau lebih pemutusan untai ganda DNA disebabkan oleh jalur elektron tunggal, dan dosis sebanding dengan jumlah lintasan tersebut

Risiko kanker karena gerakan satu lintasan, dengan demikian, sebanding dengan dosis, dan dengan jumlah dosis berapa pun, sekecil apa pun, dapat menyebabkan kanker. Alasan utama untuk diambilnya asumsi gerakan satu lintasan adalah (Shah et al., 2012):

- 1) bukti epidemiologis dari studi pajanan radiasi dalam kandungan telah menunjukkan bahwa dosis 6 mGy terkait dengan peningkatan risiko kanker;
- 2) tinjauan menyeluruh pada tahun 1997 menyimpulkan bahwa penyinaran janin dalam kandungan dengan dosis organ 10 mGy sinar-X diagnostik menghasilkan kenaikan risiko kanker anak;
- 3) pada dosis 10 mGy satu inti sel biasanya disinari dengan 10 lintasan elektron atau lebih sedikit, bergantung pada rincian sel dan radiasi LET rendah. Lintasan biasanya terpisah jauh dalam ruang ($>1 \mu\text{m}$) dan dalam waktu ($>1 \text{mdetik}$). Atas dasar biofisik sulit untuk membayangkan bagaimana dua jejak elektron independen yang jauh dalam ruang dan waktu dapat bekerja

sama untuk meningkatkan atau mengurangi risiko kanker. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dilihat dari semua kemungkinan peristiwa terbatasnya kejadian pada 10 mGy adalah karena aksi satu lintasan;

- 4) jika aksi satu lintasan dapat menyebabkan kanker, akibatnya adalah pengurangan dosis radiasi hingga sepuluh kali akan mengurangi jumlah lintasan elektron hingga sepuluh kali pula, oleh sebab itu, mengurangi peluang inisiasi kanker oleh faktor yang sama; dan
- 5) model linier tanpa dosis ambang dengan demikian menjadi model yang paling tepat dengan tidak adanya bukti kuat yang dapat membantahnya.

6. Model Risiko

Untuk mengevaluasi efek kesehatan dari radiasi pada populasi atau pekerja yang terpajan, insidensi atau frekuensi efek tertentu dipelajari baik pada kelompok terpajan maupun kelompok tak terpajan (sebagai kontrol). Kedua kelompok memiliki karakteristik usia yang sama, keseimbangan jenis kelamin yang sama, dan lain-lain (Wondergem, 2014).

Perkiraan risiko yang diperoleh dari studi ini umumnya disajikan sebagai risiko relatif (RR, *relative risk*), risiko relatif berlebih (ERR, *excess relative risk*) atau risiko absolut berlebih (EAR, *excess absolute risk*) per unit dosis radiasi. RR adalah rasio dari kedua frekuensi efek tertentu (yaitu jumlah kasus kanker) pada kelompok yang terpajan (R_r) dan frekuensi efek yang sama (R_o) pada kelompok tak terpajan ($RR = R_r / R_o$). ERR adalah RR dikurang 1 ($ERR = RR - 1$). EAR adalah perbedaan masing-masing antara frekuensi teramati pada kelompok yang terpajan dan tak terpajan ($EAR = R_r - R_o$).

Untuk menilai risiko kanker akibat radiasi pada manusia digunakan dua model proyeksi yang berbeda, yaitu (ICRP, 2005b)

- 1) model risiko aditif (absolut), yang mendalilkan bahwa setelah periode laten, risiko kanker akan meningkat secara independen dari penyebab alami selama beberapa tahun, untuk kemudian

kembali ke tingkat alaminya. Variasi risiko dapat terjadi karena perbedaan jenis kelamin, usia, dan jaringan saat terpajan;

- 2) model risiko relatif (multiplikatif), yang menyatakan bahwa setelah periode laten, peningkatan atau kelebihan risiko diberikan oleh suatu faktor konstan yang berlaku pada insidensi kanker alami yang bergantung pada usia pada populasi. Karena insidensi kanker alami meningkat pada usia tua, model ini akan memprediksi lebih banyak kanker akibat radiasi pada orang tua.

7. Risiko Kanker

Radiasi sebenarnya hanya salah satu dari beberapa faktor risiko pemicu berkembangnya kanker di dalam tubuh manusia. Secara umum, lingkungan merupakan faktor risiko yang terbesar (90–95%), selebihnya (5–10%) merupakan faktor genetik. Faktor lingkungan yang dapat menyebabkan kanker, antara lain infeksi dan virus (15–20%), diet dan obesitas (30–35%), tembakau (25–30%), kurang aktivitas fisik, stress dan pencemar lingkungan lain seperti bahan kimia (Becker & Kaul, 2005).

Risiko (*risk*) dapat didefinisikan sebagai kombinasi peluang terjadinya bahaya (*harm*) dan tingkat keparahan dari bahaya tersebut. Bahaya sendiri dapat berupa cedera fisik atau kerusakan kesehatan.

Dalam hal kanker akibat radiasi, pada tingkat dosis atau laju dosis tinggi, ICRP memperkirakan bahwa dosis 1 Sv yang diterima oleh suatu populasi akan mengakibatkan kematian kanker akibat radiasi sekitar 10% manusia pada populasi tersebut (ICRP, 2007). Dengan kata lain, risiko rata-rata pada setiap individu dari dosis 1 Sv adalah 1 dalam 10, atau 0,1.

Namun, dosis radiasi yang diterima manusia umumnya berasal dari dosis atau laju dosis rendah sehingga perlu diketahui risiko dari dosis atau laju dosis rendah tersebut. Ekstrapolasi risiko dari dosis tinggi ke dosis rendah sangat sulit dan mengandung ketidakpastian yang tinggi sehingga dilakukan pendekatan konservatif dengan membuat ekstrapolasi linier dari dosis tinggi ke dosis rendah. Karena dosis 1 Sv mengandung risiko kematian kanker 10%, risiko dosis 1 mSv akan seribu kali lebih rendah atau 0,01%.

Namun, dari perhitungan teoritik dan percobaan hewan, ICRP menyimpulkan bahwa peluang risiko tersebut lebih tinggi sekitar 2 sampai 10 kali. Oleh karena itu, untuk kepentingan proteksi, ICRP menetapkan faktor keefektifan dosis dan laju dosis *dose and dose rate effectiveness factor* (DDREF) sebesar 2 (ICRP, 1991). Dengan kata lain, risiko kematian kanker akibat radiasi dapat diperkirakan dengan menggunakan koefisien risiko 0,05 per sievert, atau dapat ditulis sebagai $5 \times 10^{-2} / \text{Sv}$.

Dari definisi risiko tersebut diketahui bahwa risiko adalah hasil perkalian peluang terjadinya bahaya, atau untuk kanker radiasi adalah koefisien risiko (Sv^{-1}), dengan tingkat keparahan bahaya, atau dosis (Sv). Dengan dosis 10 mSv (0,01 Sv), misalnya, risiko kematian kanker akibat radiasi akan menjadi ($0,01 \text{ Sv} \times 5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1} =$) 5×10^{-4} .

Tabel 2.8 memberikan nilai koefisien risiko nominal yang diberikan oleh ICRP 103 untuk seluruh populasi (yang berarti termasuk anak-anak) dan untuk orang dewasa. Nilai koefisien risiko ini dihitung dengan data yang sebenarnya masih memiliki ketidakpastian yang tinggi mengingat tidak adanya data yang meyakinkan dalam hubungan dosis-respons pada dosis atau laju dosis rendah.

Dalam situasi di mana pajanan tidak seragam ke sekujur tubuh, kontribusi relatif pada masing-masing organ perlu diketahui untuk memperkirakan kerusakan yang terjadi. Tabel 2.9 memberikan data kontribusi relatif tiap organ terhadap kerusakan total pada seluruh populasi (Martin et al., 2012). Kolom kedua pada Tabel 2.9 memberikan peluang kanker fatal pada setiap organ untuk dosis tara 1 Sv pada setiap organ tersebut, dan kolom ketiga menunjukkan kontribusi relatif setiap organ pada kerusakan total, dengan memperhitungkan faktor DDREF.

Tabel 2.8 Koefisien Risiko Nominal (10^{-2} Sv^{-1}) untuk Efek Stokastik Setelah Penyinaran Radiasi Laju Dosis Rendah

Populasi Terpajan	Kanker	Efek Herediter	Total
Seluruh populasi	5,5	0,2	5,7
Orang dewasa	4,1	0,1	4,2

Sumber: ICRP (2007)

buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 2.9 Kontribusi Relatif Organ terhadap Kerusakan Total untuk Seluruh Populasi

Organ atau Jaringan	Peluang Kanker Fatal, 10^{-4} Sv^{-1}	Kontribusi Relatif pada Kerusakan Total
Kandung kemih	12,0	0,029
Sumsum tulang	28,0	0,107
Permukaan tukang	3,2	0,009
Payudara	33,0	0,139
Usus besar	31,3	0,083
Hati	28,9	0,046
Paru-paru	101,5	0,157
Kerongkongan (<i>oesophagus</i>)	14,0	0,023
Ovarium	6,0	0,017
Kulit	2,0	0,007
Lambung	65,5	0,118
Tiroid	2,2	0,022
Organ padat lainnya	70,5	0,198
Gonad	-	0,044
Total	398	100

Sumber: Martin et al. (2012)

C. Mekanisme Biologis Tindakan Radiasi Pada Dosis Rendah

Efek biologis dari pajanan radiasi merupakan objek studi yang terus berkembang. Bahkan, pada dosis dan laju dosis radiasi tingkat rendah, mekanisme biologis tindakan radiasi pada tubuh yang terjadi masih belum dapat dikonfirmasi. Dengan perjalanan waktu, beberapa mekanisme biologis tersebut mulai dapat dipelajari, meskipun ketidakpastian dalam mekanisme tersebut masih cukup besar. Beberapa mekanisme biologis tindakan radiasi yang telah mulai dipelajari adalah ketidakstabilan genomik, efek imbas-samping

(*bystander effects*) dan efek abskopal (*abscopal effects*), dan respons adaptif.

1. Ketidakstabilan Genomik

Ketidakstabilan genomik adalah karakteristik sebagian besar sel kanker yang berupa peningkatan perubahan genom selama pembelahan sel (Yao & Dai, 2014). Ketidakstabilan genomik ini adalah penyebab penuaan, yang mengarah pada mutasi genetik dan peningkatan risiko kanker (Møller, 2005).

Frekuensi tinggi kerusakan DNA akibat faktor eksternal dapat menjadi salah satu sumber ketidakstabilan genomik karena kerusakan DNA dapat menyebabkan sintesis translesi yang tidak akurat sehingga terjadi kesalahan dalam perbaikan DNA tersebut, dan berakibat terjadinya mutasi. Sumber lain dari ketidakstabilan genomik kemungkinan adalah pengurangan epigenetik atau mutasi dalam ekspresi gen perbaikan DNA. Karena kerusakan DNA endogen frekuensinya sering terjadi, lebih dari 60.000 kali sehari dalam genom sel manusia, setiap perbaikan DNA yang berkurang kemungkinan merupakan sumber penting dari ketidakstabilan genomik ini.

2. Efek Imbas-Samping dan Efek Abskopal

Efek imbas-samping (*bystander effects*) adalah efek yang teramati pada sel yang tidak disinari yang berada di sekeliling atau tidak jauh dari sel yang disinari secara langsung (UNSCEAR, 2012). Pada tingkat jaringan, efek radiasi pada jaringan yang berada cukup jauh dari jaringan tersinar disebut sebagai efek abskopal.

Pengertian *bystander effects* ini agak berbeda dengan pengertian dalam kehidupan sehari-hari. Contoh pengertian umum dari *bystander effects* adalah sebagai berikut: ketika seseorang membutuhkan bantuan, orang-orang di sekitarnya yang melihat akan berpendapat pasti ada yang membantu. Sayangnya, semua orang berpikiran sama dan akhirnya tak seorang pun yang datang membantu (Wahyuni, 2015).

Respons sel yang tidak disinari dapat meliputi perubahan proses translasi, ekspresi gen, proliferasi sel, apoptosis, dan kematian sel. Perubahan ini dikonfirmasi oleh hasil beberapa studi in-vivo. Faktor-faktor penting paling umum yang memengaruhi efek imbas-samping akibat radiasi termasuk radikal bebas, faktor sistem imun, perubahan ekspresi beberapa gen yang terlibat dalam jalur peradangan dan faktor epigenetik (Najafi et al., 2014).

3. Respons Adaptif

Respons adaptif mengandung arti bahwa dosis radiasi yang relatif kecil yang mengalami “pengkondisian” akan meningkatkan daya tahan terhadap radiasi ketika sel disinari dengan dosis yang lebih tinggi beberapa jam kemudian (Dimova et al., 2008). Dengan demikian, respons adaptif terhadap radiasi menyatakan kemampuan dosis radiasi tingkat rendah untuk menginduksi perubahan seluler yang mengubah sedikit tingkat kerusakan akibat radiasi yang terjadi berikutnya.

Dari berbagai publikasi diketahui bahwa ketidakstabilan genomik, efek imbas-samping, dan respons adaptif saling berkaitan, bahkan berbagi beberapa jalur mekanistik yang sama. Namun, dampak fenomena ini pada perkiraan risiko masih menjadi bahan pembahasan. Pembahasan yang signifikan adalah mengenai variabilitas melekat dan reproduksibilitas inheren dari semua fenomena ini. Oleh karena itu, walau telah diperoleh beberapa kemajuan dalam memahami fenomena ini, data yang ada masih belum cukup untuk dapat menjadi pemahaman yang kuat untuk diterapkan pada penilaian risiko radiasi pada dosis tingkat rendah (Dimova et al., 2008).

BAB III

PRINSIP PROTEKSI RADIASI

Prinsip proteksi radiasi diperkenalkan pertama kali oleh ICRP pada publikasi 26 yang terbit tahun 1977 (ICRP, 1977). Istilah yang digunakan saat itu adalah sistem pembatasan dosis, yang terdiri atas:

- 1) tidak ada praktik atau kegiatan yang boleh dilakukan kecuali jika menghasilkan manfaat bersih yang positif;
- 2) semua pajanan harus dijaga serendah mungkin dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial; dan
- 3) dosis individu tidak boleh melebihi batas yang direkomendasikan untuk suatu keadaan tertentu oleh ICRP.

Ketiga prinsip tersebut kemudian dikenal sebagai justifikasi, optimisasi *as low as reasonably achievable* (ALARA), dan aplikasi nilai batas dosis.

ICRP tetap mempertahankan ketiga prinsip proteksi radiasi ini pada publikasi 103 (ICRP, 2007). Prinsip justifikasi dan prinsip optimisasi proteksi merupakan pendekatan proteksi radiasi yang terkait sumber dan berlaku untuk ketiga situasi pajanan, sementara prinsip pembatasan dosis merupakan pendekatan proteksi radiasi terkait individu dan hanya berlaku untuk situasi pajanan terencana. Uraian lebih lanjut mengenai pendekatan proteksi terkait sumber dan terkait individu diberikan pada Bab 8.

A. Justifikasi

Prinsip justifikasi menyatakan bahwa setiap keputusan yang mengubah situasi pajanan radiasi harus memberikan manfaat yang lebih besar dibanding kerugian yang ditimbulkannya. Hal ini berarti bahwa dengan mengajukan sumber radiasi baru dengan mengurangi pajanan yang ada, atau dengan mengurangi risiko pajanan potensial, manfaat individu atau masyarakat harus diperoleh untuk mengimbangi kerugian yang ditimbulkannya.

Justifikasi yang melibatkan radiasi sebelum menjadi kegiatan rutin yang menggunakan radiasi harus menunjukkan manfaat ekonomi, sosial, atau lainnya yang lebih besar dibanding dengan gangguan kesehatan yang mungkin ditimbulkannya. Bergantung pada jenis kegiatan, proses justifikasi ini dapat menjadi sangat kompleks dan melibatkan pertimbangan faktor sosial dan ekonomi yang cukup beragam, selain pertimbangan kerugian dosisnya. Konsekuensi yang harus dipertimbangkan tidak terbatas pada yang terkait dengan radiasi, tetapi juga risiko lain serta biaya dan manfaat dari kegiatan tersebut.

1. Aplikasi Prinsip Justifikasi

Penerapan prinsip justifikasi dalam situasi yang melibatkan pajanan kerja dan pajanan publik dapat dilakukan dengan dua pendekatan yang berbeda dan bergantung pada apakah sumber radiasi dapat dikendalikan secara langsung atau tidak. Pendekatan pertama digunakan saat pertama kali memulai kegiatan baru, upaya proteksi radiasi dapat direncanakan sebelumnya dan tindakan yang diperlukan dapat dilakukan pada sumber radiasinya. Penerapan prinsip justifikasi untuk situasi ini mensyaratkan tidak ada situasi pajanan terencana yang dimulai kecuali hal itu menghasilkan manfaat bersih bagi individu yang atau publik yang terpajan untuk mengimbangi kerugian radiasi yang ditimbulkannya. Proses justifikasi perlu dikaji ulang saat informasi atau teknologi baru tersedia.

Pendekatan kedua digunakan di mana pajanan dapat dikendalikan terutama oleh tindakan untuk memodifikasi jalur pajanan

dan bukan dengan bertindak langsung pada sumber radiasinya. Contoh utama adalah situasi pajanan eksisting dan situasi pajanan darurat. Dalam kedua situasi pajanan ini, prinsip justifikasi diterapkan dalam membuat keputusan, apakah akan mengambil tindakan untuk membiarkan pajanan terus berlanjut atau menghentikannya. Setiap keputusan yang diambil untuk mengurangi dosis, yang selalu memiliki kerugian, harus dibenarkan dalam arti bahwa kegiatan harus lebih banyak memberikan manfaat daripada kerugian.

Dalam kedua pendekatan tersebut, tanggung jawab untuk menilai justifikasi dari suatu kegiatan biasanya berada pada badan pengawas radiasi nasional untuk memastikan manfaat keseluruhan bagi publik secara luas dan tidak hanya bagi individu. Untuk itu, badan pengawas membutuhkan masukan dari pemangku kepentingan lainnya melalui konsultasi publik sehingga keputusan terkait justifikasi sepenuhnya berdasar berbagai pertimbangan dan informasi yang akurat. Dalam konteks ini, pertimbangan proteksi radiasi hanya akan menjadi salah satu masukan untuk proses pengambilan keputusan yang lebih luas.

2. Justifikasi pada Pajanan Medis

Pajanan medis pasien membutuhkan pendekatan yang berbeda dan lebih rinci untuk proses justifikasi. Penggunaan radiasi untuk tujuan medis harus dibenarkan seperti pada situasi pajanan terencana lainnya, meskipun justifikasi itu biasanya dilakukan oleh profesional medis dan bukan oleh badan pengawas atau otoritas pemerintah lainnya.

Tujuan utama dari pajanan medis adalah untuk memberikan manfaat yang lebih besar dibanding bahayanya bagi pasien, dengan tetap memperhitungkan kerugian radiasi dari pajanan pada staf radiologis dan individu lain. Tanggung jawab untuk justifikasi penggunaan suatu prosedur tertentu berada pada praktisi medis yang relevan.

Prinsip justifikasi untuk pajanan medis dilakukan dalam tiga tingkatan sebagai berikut (ICRP, 2007).

- 1) Pada tingkat pertama, penggunaan radiasi dalam medis secara umum telah diterima dapat memberikan manfaat yang lebih

besar kepada pasien daripada membahayakannya. Pada tingkat ini manfaat penggunaan radiasi dalam medis tidak perlu dipertanyakan lagi.

- 2) Pada tingkat kedua, prosedur khusus dengan tujuan tertentu ditetapkan dan dibenarkan (misalnya, radiografi dada untuk pasien yang menunjukkan gejala yang spesifik, atau untuk sekelompok individu yang memiliki risiko pada suatu kondisi tertentu). Tujuan dari justifikasi tingkat kedua ini adalah untuk menilai apakah prosedur radiologis akan meningkatkan ketelitian diagnosis atau pengobatan, atau akan memberikan informasi yang diperlukan mengenai individu yang terpajan.
- 3) Pada tingkat ketiga, penerapan prosedur untuk satu individu pasien harus dibenarkan, dalam arti aplikasi radiasi tertentu harus lebih memberi manfaat dibanding bahayanya bagi si pasien tersebut. Oleh karena itu, semua pajanan medis pada satu individu harus dibenarkan sebelumnya, dengan mempertimbangkan tujuan khusus pajanan dan karakteristik individu yang terlibat.

3. Pajanan yang Tidak Dibenarkan

Beberapa pajanan tidak dapat dibenarkan tanpa perlu dianalisis lebih lanjut, kecuali jika ada keadaan yang luar biasa. Jenis pajanan tersebut sebagai berikut (ICRP, 2007; IAEA, 2014).

- 1) Kegiatan yang mengakibatkan peningkatan aktivitas dengan penambahan zat radioaktif yang disengaja atau dengan aktivasi, dalam makanan, pakan, minuman, kosmetik atau komoditas atau produk lain yang dimaksudkan untuk dikonsumsi atau diterapkan pada, seseorang, kecuali kegiatan yang melibatkan pajanan medis.
- 2) Kegiatan yang melibatkan penggunaan radiasi atau zat radioaktif dalam komoditas atau produk konsumen, seperti mainan dan perhiasan atau perhiasan pribadi, yang mengakibatkan peningkatan aktivitas, dengan penambahan zat radioaktif yang disengaja atau dengan aktivasi.

- 3) Pencitraan manusia menggunakan radiasi yang dilakukan sebagai bentuk seni atau untuk tujuan publisitas.
- 4) Pencitraan manusia yang menggunakan radiasi untuk tujuan deteksi pencurian.
- 5) Pencitraan manusia menggunakan radiasi yang dilakukan untuk tujuan seleksi pegawai, kepentingan hukum atau asuransi kesehatan, dan dilakukan tanpa ada indikasi klinik, kecuali jika pemerintah atau badan pengawas memutuskan dapat mempertimbangkan pencitraan manusia tersebut yang harus dilakukan dengan syarat-syarat tertentu
- 6) Pencitraan manusia yang menggunakan radiasi untuk mendeteksi objek tersembunyi untuk tujuan anti penyelundupan, kecuali jika pemerintah atau badan pengawas memutuskan dapat mempertimbangkan pencitraan manusia tersebut yang harus dilakukan dengan syarat-syarat tertentu
- 7) Skrining medis dengan pajanan radiasi pada kelompok populasi tanpa gejala, kecuali keuntungan yang diterima oleh individu yang diberi pajanan atau untuk populasi secara keseluruhan dapat mengkompensasi biaya ekonomi dan sosial yang harus dibayar, termasuk kerugian radiasi. Dalam hal ini, perlu dipertimbangkan pula potensi prosedur skrining untuk mendeteksi penyakit, pengobatan yang efektif untuk kasus yang terdeteksi, dan keuntungan bagi komunitas dalam pengendalian penyakit tertentu.

B. Optimisasi Proteksi

Prinsip optimisasi proteksi menyatakan bahwa kemungkinan terjadinya pajanan, jumlah orang yang menerima pajanan, dan besar dosis radiasi individual yang diterima harus diupayakan serendah mungkin dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial. Hal ini berarti bahwa tingkat proteksi harus yang terbaik pada kondisi yang ada, sambil memaksimalkan manfaat dibanding dengan kerugian yang timbul. Untuk menghindari hasil yang tidak adil dari prosedur optimisasi ini, perlu diberikan batasan pada dosis

atau risiko untuk individu dari suatu sumber tertentu (yang disebut sebagai penghambat dosis atau risiko, dan tingkat acuan). Uraian lebih lanjut mengenai penghambat dosis dan tingkat acuan diberikan pada Bab VIII.

Ungkapan 'harus diupayakan serendah mungkin' yang dinyatakan di atas dalam bahasa Inggris ditulis sebagai *as low as reasonably achievable*, atau disingkat ALARA. Dari kenyataan ini, prinsip optimisasi proteksi seringkali disebut juga sebagai ALARA.

1. Proses Optimisasi

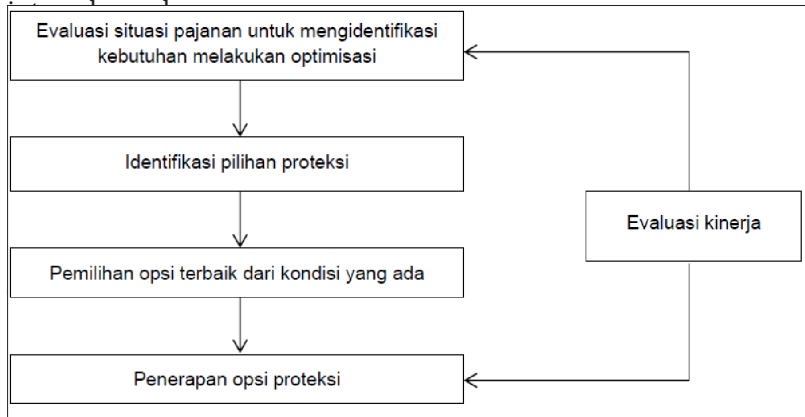
Optimisasi merupakan bagian penting, bahkan barangkali yang paling penting, dari sistem proteksi radiasi karena tingkat proteksi yang diharapkan tidak dapat diperoleh hanya dengan mengandalkan nilai batas dosis. Nilai batas dosis merupakan batas bawah pita sebelum dosis dan risiko radiasi tidak dapat diterima. Dosis yang tepat berada di bawah nilai batas karena hanya dapat diterima jika tidak ada yang dapat dilakukan untuk menguranginya. Namun, dalam banyak hal, tindakan proteksi dapat dilakukan untuk mengurangi dosis semacam itu dan tindakan pengurangan tersebut masuk ke dalam ranah optimisasi proteksi.

Patut diingat bahwa optimisasi proteksi bukan minimisasi dosis. Tindakan proteksi yang optimal merupakan hasil dari evaluasi yang menyeimbangkan dengan cermat kerugian akibat pajanan dengan sumber daya yang tersedia untuk proteksi individu. Oleh karena itu, pilihan terbaik tidak berarti yang menghasilkan dosis terendah.

Selain pengurangan besarnya pajanan individu, pengurangan jumlah individu yang terpajan juga harus dipertimbangkan. Dosis efektif kolektif telah menjadi parameter kunci untuk optimisasi proteksi pekerja pada suatu populasi. Perbandingan pilihan proteksi untuk tujuan optimisasi harus melibatkan pertimbangan yang cermat mengenai karakteristik distribusi pajanan individu dalam populasi yang terpajan.

Namun, untuk populasi yang besar dengan geografi yang luas atau periode waktu yang panjang, penentuan dosis efektif kolektif harus dilakukan secara hati-hati. Berbagai parameter, seperti kapan

pajanan diterima, di mana dan siapa yang menerima pajanan, membuat terbentuknya beberapa kelompok populasi dengan karakteristik yang homogen dalam perhitungan dosis efektif. Untuk itu, perhitungan dosis efektif kolektif sering dipisah-pisah sesuai dengan karakteristik kelompok populasi, bukan dihitung secara



Sumber: ICRP (2006)

Gambar 3.1 Prosedur Optimisasi yang Umum Dilakukan.

Tahapan lain yang lebih teknis untuk melakukan analisis terhadap proses optimisasi secara sistematis. Tahapan semacam ini bukan hanya dilakukan dalam proses optimisasi, namun sebenarnya merupakan bagian dari manajemen yang efektif. Seperti terlihat pada Gambar 3.1, prosedur optimisasi merupakan kegiatan yang bersifat “berputar” (ICRP, 2006).

Evaluasi harus direncanakan dan dilaksanakan secara berkala. Kinerja masa lalu, analisis kecenderungan penerimaan dosis (atau data lain), hasil audit internal, tinjauan sejawat (*peer review*), laporan insiden, dan pelajaran yang diperoleh dari pengalaman operasi merupakan parameter yang perlu dipertimbangkan dalam proses optimisasi. Ketika opsi yang dipilih diterapkan, evaluasi bisa saja menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh berbeda dari yang diharapkan. Dalam keadaan seperti ini, siklus evaluasi menjadi diperlukan. Metode yang digunakan untuk menilai apakah opsi

buku ini tidak diperjualbelikan

proteksi yang diterapkan telah cukup memadai juga mungkin dapat berubah seiring berlalunya waktu.

2. Penerapan Optimisasi pada Pengoperasian dan Peraturan

Dalam sistem proteksi radiasi, baik pemegang izin maupun badan pengawas memiliki tanggung jawab untuk menerapkan prinsip optimisasi. Pemegang izin wajib membuat rancangan, organisasi, dan cara penerapan dari proses optimisasi, sementara badan pengawas mempromosikan dan memerlukan optimisasi sebagai cara untuk mencapai tingkat proteksi tertentu sebagai syarat pemberian izin. Badan pengawas juga dapat memeriksa keefektifan optimisasi proteksi selama operasi fasilitas.

Salah satu faktor pendukung keberhasilan penerapan proses optimisasi adalah budaya keselamatan, baik pemegang izin maupun badan pengawas juga mempunyai peranan yang penting dalam memastikan pengembangan dan pemeliharaan penerapan budaya keselamatan yang efektif. Secara khusus, badan pengawas harus mendorong pemegang izin untuk mengembangkan budaya keselamatan dalam organisasinya. Sudah tentu, badan pengawas juga harus mengembangkan dan memelihara budaya keselamatan di dalam organisasinya.

Secara lebih spesifik, Pemegang izin harus mengembangkan dan menyediakan kebijakan internal, prioritas, aturan, prosedur, dan program jaminan mutu untuk memastikan adanya budaya keselamatan yang kuat di semua tingkatan manajemen dan staf. Dalam kaitan ini, tujuan dari manajemen operasi adalah untuk mencegah kecelakaan, mengelola kemungkinan peluang adanya paparan potensial, dan mempertahankan paparan pekerja dan publik serendah mungkin dengan mempertimbangkan faktor sosial dan ekonomi.

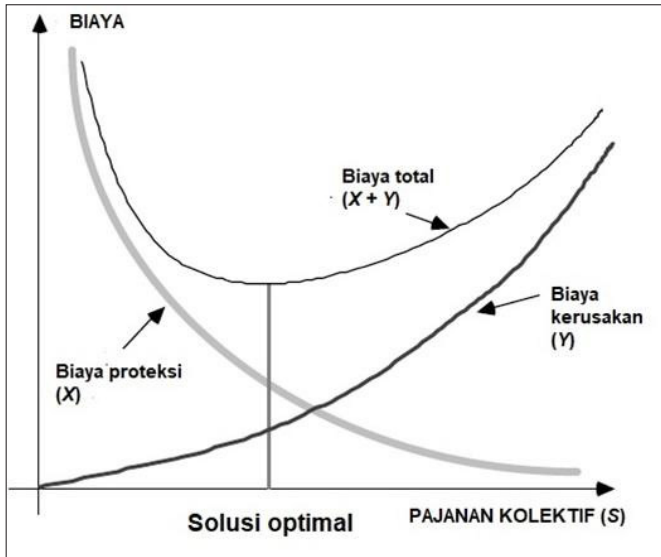
3. Teknik Bantuan Keputusan

Salah satu komponen dari prosedur optimisasi yang diberikan pada Gambar 3.1 adalah pemilihan opsi terbaik dari kondisi yang ada. Teknik bantuan keputusan biasanya digunakan untuk mengkuantifikasi dan membandingkan opsi proteksi dalam pemilihan opsi terbaik untuk prosedur optimisasi. Sejak tahun 1973, ICRP telah menggunakan analisis biaya-manfaat untuk menyeimbangkan biaya kerusakan radiasi dengan biaya untuk melakukan tindakan proteksi (ICRP, 1973).

Dengan makin berkembangnya prinsip optimisasi proteksi, beberapa teknik bantuan keputusan yang lain juga mulai digunakan. Selain teknik analisis biaya-manfaat, beberapa teknik tersebut adalah analisis biaya-manfaat diperluas dan analisis utilitas multi-atribut. Hasil dari aplikasi teknik bantuan keputusan yang bersifat kuantitatif disebut sebagai penyelesaian analitik. Namun, untuk memperoleh rekomendasi yang optimal, penyelesaian analitik harus dikombinasikan dengan kajian kinerja secara kualitatif dengan memperhatikan faktor proteksi radiasi lainnya. Hasil dari kombinasi ini kemudian dijadikan masukan dalam proses pengambilan keputusan akhir (IAEA, 2002).

a. Analisis Biaya-manfaat

Fokus dari teknik ini adalah pada menggabungkan nilai moneter dari biaya dan manfaat yang terkait opsi dengan tujuan mengidentifikasi opsi yang memiliki biaya total minimum. Analisis biaya-manfaat yang sederhana dilakukan dengan mengubah dosis kolektif menjadi nilai moneter menggunakan nilai acuan untuk dosis kolektif, yang umumnya dilambangkan sebagai nilai alfa (α).



Sumber: ICRP (2006)

Gambar 3.2 Analisis Biaya-manfaat

Seperti terlihat pada Gambar 3.2, biaya proteksi X ditambahkan dengan biaya kerusakan $Y (= \alpha S)$ untuk memperoleh biaya total $X + Y$. Parameter yang ditentukan secara eksternal untuk memperoleh angka-angka tersebut adalah nilai dosis kolektif, α . Biaya total untuk setiap opsi mewakili gambaran prestasi dan penyelesaian analitik sesuai dengan opsi yang meminimalkan biaya total.

Hal yang cukup sulit dalam analisis biaya-manfaat adalah penetapan nilai moneter dari pajanan kolektif, S , atau man-sievert. Salah satu metode yang umum dipakai adalah menggunakan pendekatan kapital manusia, nilai moneter dari satu tahun kehidupan yang hilang diberikan oleh agregat ekonomi, biasanya produk domestik bruto tahunan per penduduk. Contoh perhitungan nilai moneter dari dosis kolektif, man-sievert, menggunakan pendekatan kapital manusia adalah sebagai berikut (IAEA, 2002):

- 1) Kehilangan harapan hidup rata-rata dari efek kesehatan akibat radiasi (kanker fatal dan efek keturunan): 16 tahun.

- 2) Produk domestik bruto per kepala per tahun: US\$22,400.
- 3) Nilai moneter efek kesehatan akibat radiasi: US\$22,400 x 16 = US\$358,400.
- 4) Probabilitas terjadinya efek kesehatan akibat radiasi pada pekerja: $5,6 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$.
- 5) Nilai moneter dosis kolektif: US\$358,400 x $5,6 \times 10^{-2} = \text{US\$20,000 man-sievert}^{-1}$.

b. Analisis Biaya-manfaat Diperluas

Teknik analisis biaya-manfaat yang diuraikan sebelumnya terbatas hanya pada perbandingan kuantitatif antara biaya proteksi dan biaya dosis kolektif. Kerangka kerja analisis biaya-manfaat ini pada prinsipnya dapat diperluas dengan mencakup distribusi dosis individu.

Salah satu faktor proteksi radiasi yang dianggap relevan adalah apakah dosis individu tinggi atau rendah. Hal ini berdampak pada perbedaan antara dosis kolektif yang timbul dari populasi tinggi, tetapi besar dosis individu rendah dan dosis kolektif yang sama yang diterima oleh populasi lebih sedikit, tetapi dosis individu lebih tinggi.

Metode untuk memasukkan penilaian ini adalah dengan memodifikasi nilai yang ditetapkan ke dosis kolektif dengan menambahkan nilai tambahan distribusi dosis individu pada biaya kerusakan. Komponen baru dari biaya kerusakan ini dinyatakan dalam istilah beta (β). Nilai kerusakan Y dengan demikian dapat didefinisikan sebagai $Y = \alpha S + \beta S$.

Dimasukkannya nilai distribusi dosis individu yang menyebabkan peningkatan biaya kerusakan Y mengubah total biaya untuk setiap opsi. Namun, faktor relevan lainnya tetap masih dihilangkan dari analisis kuantitatif dan perlu dimasukkan pada analisis kualitatif.

c. Analisis Utilitas Multi-atribut

Selain analisis biaya-manfaat terdapat juga teknik lain yang berbeda dalam cara menangani faktor-faktor yang terlibat. Teknik ini dikenal sebagai analisis utilitas multi-atribut. Inti dari teknik ini adalah

menggunakan skema penilaian (*scoring scheme*) yang disebut fungsi utilitas untuk faktor-faktor yang relevan. Dalam teknik ini, dinyatakan bahwa jika dua opsi menghasilkan penilaian atau utilitas yang sama, keduanya tidak akan dipilih. Salah satu opsi akan dipilih jika menghasilkan skor yang lebih tinggi dibanding dengan opsi yang lain.

Teknik ini dapat diilustrasikan demikian: jika ingin membeli mobil, penilaian diberikan untuk beberapa faktor, seperti harga, biaya pemeliharaan, dan efisiensi dalam hal konsumsi bahan bakar. Dengan analisis biaya-manfaat, pemilihan opsi mobil yang dipilih cukup mudah jika kendalanya hanya banyaknya dana yang dimiliki. Namun, jika ada faktor lain yang ingin diperhitungkan, seperti kecepatan maksimum yang dapat dicapai, warna mobil, dan mutu sistem suara, analisis biaya-manfaat akan sulit digunakan.

Dengan banyaknya faktor yang diperhitungkan, untuk setiap pilihan mobil masing-masing faktor selanjutnya perlu diberi nilai atau skor sesuai dengan pandangan personal kita tentang faktor-faktor tersebut. Pandangan ini sudah tentu dipengaruhi oleh kriteria yang kita tetapkan, misalnya ada yang lebih menekankan pentingnya keekonomisan bahan bakar atau akselerasinya, sementara orang lain lebih mementingkan warna atau mutu sistem suara. Keputusan terakhir dengan demikian bergantung pada penilaian masing-masing orang.

Dalam menerapkan analisis utilitas multi-atribut pada prinsip optimisasi perlu ditentukan faktor-faktor proteksi radiasi dan konsekuensi dari setiap opsi proteksi dalam kaitannya dengan faktor-faktor tersebut. Selanjutnya, untuk setiap faktor perlu ditentukan fungsi utilitas yang memberikan kebutuhan relatif dari keluaran untuk masing-masing faktor. Hasil terbaik atau konsekuensi kerusakan radiasi yang terendah untuk setiap faktor umumnya diberi skor utilitas 1 dan konsekuensi kerusakan radiasi terburuk diberi skor utilitas 0.

Teknik analisis utilitas multi-atribut juga dapat digunakan untuk memasukkan faktor-faktor yang biasanya tidak dianggap dapat diukur dengan menetapkan fungsi utilitas ke berbagai nilai

faktor. Misalnya, jika ada opsi yang mengharuskan tersedianya pakaian pelindung, faktor pakaian pelindung ini akan memudahkan pelaksanaan kerja. Skor utilitas maksimum 1 jelas diberikan pada opsi yang melibatkan pakaian pelindung, dan skor utilitas minimum 0 untuk opsi yang sulit untuk dikerjakan.

C. Pembatasan Dosis

Prinsip pembatasan dosis menyatakan bahwa dosis total pada setiap individu dari sumber yang memiliki izin pada situasi pajanan terencana kecuali pajanan medis pasien tidak boleh melebihi nilai batas dosis yang berlaku. Dengan demikian, nilai batas dosis (NBD) hanya berlaku untuk situasi pajanan terencana dan tidak berlaku untuk pajanan medis pasien. Angka nominal untuk nilai batas dosis diberikan pada Bab VIII.

NBD tidak berlaku untuk situasi pajanan darurat di mana individu yang secara sadar terpajan radiasi terlibat dalam tindakan sukarela untuk penyelamatan nyawa, atau berusaha mencegah terjadinya situasi bencana. Untuk relawan yang sadar terpajan dan melakukan tindakan penyelamatan mendesak, pembatasan dosis normal dapat dilonggarkan. Namun, responden yang melakukan tindakan pemulihan dan restorasi di fase selanjutnya dari situasi pajanan darurat harus dianggap sebagai pekerja yang terpajan di tempat kerja dan harus diberikan proteksi sesuai dengan standar proteksi radiasi pekerja normal dan pajanan yang diterima tidak boleh melebihi nilai batas dosis pekerja

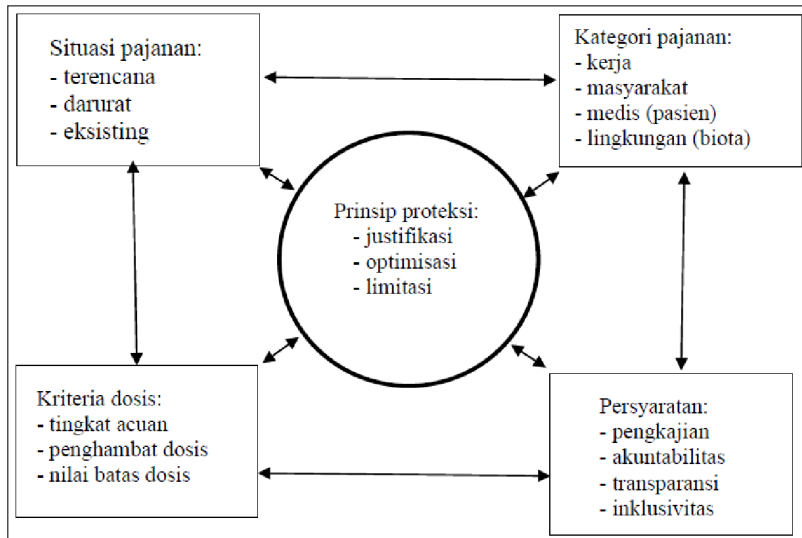
Pekerja wanita yang sedang hamil atau menyusui dilarang untuk terlibat sebagai perespons awal untuk penyelamatan nyawa atau tindakan mendesak lainnya. Secara khusus, pekerja wanita dengan kondisi tersebut harus menerima tindakan proteksi yang spesifik, yaitu tidak boleh terlibat langsung dalam pekerjaan yang memungkinkan diterimanya dosis radiasi dalam jumlah yang cukup besar.

Untuk individu masyarakat umum yang sadar akan bahaya radiasi dan terlibat dalam upaya memberi kenyamanan pada pasien

yang baru keluar dari rumah sakit, setelah menerima penyinaran terapi dengan radiofarmaka, nilai batas dosis untuk individu tersebut tidak harus sesuai dengan NBD untuk publik.

D. Hubungan Antar Komponen Sistem Proteksi Radiasi

Prinsip proteksi radiasi merupakan komponen utama dari sistem proteksi radiasi. Seperti terlihat pada Gambar 3.3, sistem proteksi radiasi merupakan suatu sistem yang saling terkait antara prinsip proteksi radiasi, situasi pajanan radiasi, kategori pajanan radiasi, kriteria dosis dan nilai prosedural (Lecomte, 2016). Situasi pajanan radiasi, kategori pajanan, dan kriteria dosis masing-masing akan diuraikan lebih lanjut pada Bab VI, VIII dan VIII. Sementara itu, nilai-nilai prosedural akan menjadi bagian dari uraian Bab IV mengenai etika dalam proteksi radiasi.



Sumber: Lecomte (2016)

Gambar 3.3 Hubungan Antar Komponen Sistem Proteksi Radiasi

BAB IV

ETIKA DALAM PROTEKSI RADIASI

Proteksi radiasi bukanlah ilmu dasar, tetapi salah satu ilmu terapan yang mencoba merekonstruksi pemahaman tentang alam raya, membawanya ke arah yang lebih baik sejauh yang dapat dipikirkan manusia. Tujuan proteksi radiasi secara luas adalah untuk menentukan batas-batas di mana kegiatan manusia yang memanfaatkan sumber radiasi dan bahan nuklir, kegiatan yang memiliki potensi bahaya kesehatan bagi tubuhnya, dapat dilakukan dengan aman dan selamat. Upaya proteksi radiasi ini sudah tentu membutuhkan prinsip-prinsip yang kuat sebagai kerangka dasarnya, dengan demikian juga membutuhkan atau melibatkan pertimbangan etika dalam penyusunannya.

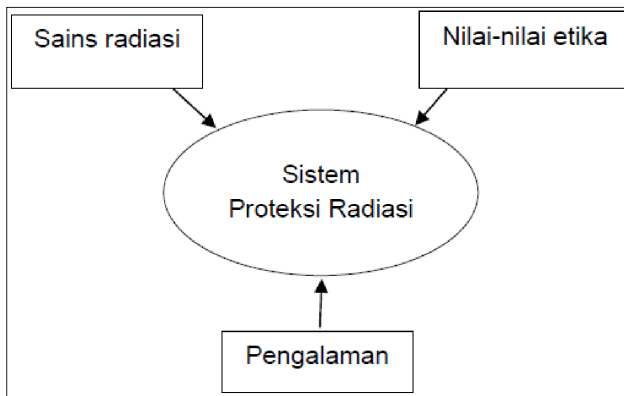
Prinsip etika pada dasarnya harus bersifat universal dalam arti bahwa ketika suatu prinsip dipandang sebagai benar secara etika, mereka yang menerima prinsip tersebut berkomitmen untuk menerapkannya dalam semua keadaan yang relevan. Tahap lebih lanjut dalam proses universalisasi adalah menerapkan prinsip tersebut terlepas dari beragamnya individu dari sisi kualitas fisik dan mental, sumber daya atau status sosial, termasuk bagi individu yang akan lahir kemudian.

Karena prinsip proteksi radiasi dimaksudkan untuk diterapkan pada semua orang dan publik, prinsip ini harus cukup fleksibel

untuk diadopsi di negara-negara dengan kondisi agama, politik, sosial dan ekonomi yang beragam. Prinsip proteksi radiasi juga harus cukup komprehensif untuk diterapkan pada semua kegiatan yang melibatkan pajanan radiasi, meski pun peluang terjadinya pajanan tersebut cukup rendah rendah. Prinsip proteksi radiasi juga harus dapat mencakup situasi pajanan eksisting maupun yang akan datang.

Dengan semua kebutuhan tersebut, prinsip proteksi radiasi jelas tidak dapat diturunkan dari suatu nilai yang dimiliki oleh warisan budaya atau agama tertentu, tetapi harus dibangun di atas nilai-nilai yang bersifat universal.

Seperti diilustrasikan pada Gambar 4.1, sistem proteksi radiasi yang ada saat ini didasarkan pada tiga pilar utama, yaitu sains radiasi yang merupakan gabungan pengetahuan dari berbagai disiplin ilmu, nilai-nilai etika, dan pengalaman yang terkumpul dari kegiatan sehari-hari para praktisi proteksi radiasi (Lochart, 2012). Tantangan dalam menyusun sistem proteksi radiasi ini menjadi makin berat mengingat makin kompleksnya sains radiasi itu sendiri, makin beragamnya situasi pajanan yang diperhitungkan, dan meningkatnya keterlibatan para pemangku kepentingan dalam isu-isu yang berkaitan dengan risiko bagi alam, teknologi dan publik umum, serta menjaga koherensi sistem dengan landasan etikanya (Cho, 2017).



Sumber: Lochart (2012)

Gambar 4.1 Pertimbangan dalam Mengembangkan Sistem Proteksi Radiasi

Secara internasional, ICRP merupakan organisasi independen yang berkomitmen memajukan iptek proteksi radiasi dengan memberikan rekomendasi dan pedoman mengenai semua aspek proteksi terhadap radiasi pengion. Meskipun tidak secara eksplisit dinyatakan, prinsip etika telah digunakan oleh ICRP secara bertahap dalam mengembangkan prinsip proteksi radiasi hingga seperti yang dikenal saat ini.

Secara singkat, prinsip etika yang digunakan ICRP pada awal tahun 1920an adalah “jangan lakukan hal yang berbahaya”, yang diikuti dengan prinsip bahwa “segala upaya harus dilakukan untuk mengurangi pajanan dari semua jenis radiasi pengion ke tingkat yang serendah mungkin” pada awal tahun 1950-an. Selama tahun 1950-an ini juga telah mulai dipahami adanya efek stokastik, yang membawa konsekuensi tidak ada lagi tingkat aman absolut dari pajanan sehingga menghindari bahaya dengan menjaga pajanan serendah mungkin tidak lagi cukup. Selain itu, upaya yang perlu dilakukan bergeser dari menghindari bahaya menjadi mengelola peluang terjadinya bahaya.

Pada akhir tahun 1970-an ICRP mulai memperluas pengertian proteksi tidak lagi hanya untuk manusia, tetapi juga untuk lingkungan. Namun, pernyataan yang diberikan masih sebatas bahwa:

“Jika manusia telah diberi proteksi maka makhluk hidup yang lain juga telah mendapat proteksi yang cukup (ICRP, 1977)”

Pada tahun 1990 pernyataan ini diperkuat dengan menyatakan bahwa:

”Standar pengendalian lingkungan yang diperlukan untuk melindungi manusia hingga tingkat yang diinginkan saat ini akan memastikan bahwa spesies lain tidak akan menerima bahaya [dari radiasi yang tidak dikehendaki (ICRP, 1991).”

Pertimbangan nilai etika mulai digunakan secara lebih sistematis saat ICRP membahas proteksi lingkungan dengan memperkenalkan kerangka ICRP untuk menilai dampak radiasi pengion pada spesies nonmanusia. Kerangka pemikiran mencakup refleksi eksplisit dari nilai-nilai etika mengenai bagaimana

lingkungan dinilai dengan pendekatan antroposentrik, biosentrik, dan ekosentrik. Prinsip-prinsip yang disepakati secara internasional mengenai proteksi lingkungan, yaitu pembangunan berkelanjutan, konservasi, pelestarian, pemeliharaan keanekaragaman hayati, keadilan lingkungan, dan martabat manusia juga menjadi bahan pertimbangan. Selain itu, publikasi juga membahas prinsip-prinsip prosedural dan strategi operasional, termasuk di antaranya, prinsip kehati-hatian (*precautionary*), persetujuan setelah penjelasan (*informed consent*) dan keterlibatan pemangku kepentingan (*stakeholder engagement*).

Pada publikasi 103 yang saat ini berlaku (ICRP, 2007), ICRP memperkenalkan konsep sistem pajanan eksisting dan sistem pajanan darurat, yang berbeda dengan sistem pajanan terencana¹. Sistem pajanan ini merupakan pengembangan dari sistem sebelumnya yang hanya terdiri atas kegiatan dan intervensi (ICRP, 1991). Sedangkan, prinsip proteksi radiasi yang menjadi landasan bagi penetapan sistem proteksi radiasi:

- 1) justifikasi, yang menyatakan bahwa setiap keputusan yang mengubah situasi pajanan harus memberikan manfaat yang lebih besar dari bahaya yang ditimbulkan;
- 2) optimisasi proteksi, yang menetapkan bahwa semua pajanan harus dijaga serendah mungkin, dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial; dan
- 3) limitasi dosis individu, yang menyatakan bahwa pajanan individu pada situasi pajanan terencana tidak boleh melebihi nilai batas dosis yang direkomendasikan ICRP.

Dua prinsip pertama berlaku untuk semua situasi pajanan (terencana, darurat, dan eksisting ada), sementara prinsip ketiga hanya berlaku untuk situasi pajanan terencana. Hal terakhir disebabkan karena dosis individu tidak dapat dikendalikan baik pada situasi pajanan darurat mau pun situasi pajanan eksisting.

¹ Ketiga situasi pajanan diuraikan lebih lanjut pada Bab VI.

Pada Bab IV ini akan diuraikan secara lebih perinci mengenai etika teoretis dan terapan yang digunakan untuk menganalisis peranan prinsip etika dalam berbagai publikasi ICRP, dilanjutkan dengan penjelasan mengenai nilai-nilai etika inti yang membentuk sistem, termasuk berbagai perspektif global etika, etika biomedis yang menjadi model dalam penyusunan nilai-nilai etika inti ini dan nilai etika inti dalam pandangan agama dan budaya. Sedangkan, pada bagian terakhir akan diuraikan nilai-nilai prosedural yang mendasari persyaratan untuk penerapan praktis dari sistem.

A. Dasar-Dasar Nilai Etika

Etika, juga disebut filsafat moral, adalah disiplin filsafat yang membahas tentang apa yang baik dan buruk secara moral, dan juga apa yang benar dan salah secara moral (Britannica, t.t.1). Istilah ini juga berlaku untuk setiap sistem atau teori nilai-nilai atau prinsip moral. Kata moral sendiri kadang-kadang digunakan untuk menggambarkan nilai-nilai dan norma-norma berdasarkan budaya dan agama.

Ada tiga tingkatan utama teori etika yang sering disebut dalam pembahasan proteksi radiasi, yaitu metaetika (membahas makna umum gagasan, seperti *kebajikan*, *baik*, atau *benar*), etika normatif (membahas bagaimana seseorang harus bertindak dan nilai serta norma apa yang harus diikuti), dan etika terapan (membahas isu-isu spesifik, misalnya dalam kedokteran atau teknik, berdasarkan pada teori atau prinsip etika) (ICRP, 2018).

Dalam etika normatif, tiga teori utama dapat digunakan untuk membahas sistem proteksi radiasi. Ketiga teori tersebut: etika kebajikan (membahas kehidupan yang luhur berdasar konsep tentang sifat manusia); etika deontologik (membahas seperangkat kewajiban atau aturan untuk masyarakat manusia); dan etika konsekuensialis (membahas preferensi tindakan tertentu berdasarkan hasil jerih payahnya).

1. Teori Etika

Teori etika merupakan upaya untuk memberikan uraian yang jelas dan terpadu mengenai apa kewajiban etika manusia. Dengan kata lain, teori etika berupaya untuk menceritakan satu cerita tentang apa yang wajib dilakukan manusia, tanpa mengacu langsung pada contoh spesifik. Secara umum, teori etika meliputi etika kebaikan (*virtue ethics*), etika konsekuensialis (*consequentialist ethics*), dan etika deontologis (*deontological ethics*).

a. Etika Kebajikan

Filsuf Yunani kuno, Plato (427-347 SM) dan Aristoteles (384-322 SM) merupakan dua orang yang memperkenalkan teori etika kebajikan (*virtue ethics*). Dasar alasannya adalah sifat moral atau karakteristik manusia, bukan pada aturan atau kewajiban. Sesuatu yang baik adalah hal yang dilakukan oleh orang yang baik atau berbudi luhur. Jika seseorang memikirkan efek radiasi deterministik misalnya, pemikiran ini dapat dikaitkan dengan sifat manusia yang cenderung menghindari bahaya.

Secara lebih umum, prinsip justifikasi proteksi radiasi dapat dipahami sebagai pernyataan pemikiran yang sama karena hal ini terkait dengan sifat manusia yang tidak hanya ingin menghindari bahaya tetapi juga mau berbuat baik. Dengan kata lain, merupakan motivasi yang tepat jika manusia mengikuti sifat moralnya sehingga tindakan yang tepat dapat dilakukan (Hansson, 2007).

b. Etika Konsekuensialis

Konsekuensialis (*consequentialist*) adalah teori etika yang menilai apakah sesuatu itu benar atau tidak dilihat dari akibatnya (McCombs School of Business, t.t.). Hampir semua orang setuju bahwa berbohong itu salah. Namun, jika berbohong akan membantu menyelamatkan jiwa, misalnya, konsekuensialis akan mengatakan bahwa berbohong dapat dibenarkan.

Dua contoh konsekuensialisme adalah utilitarianisme dan hedonisme (McCombs School of Business, t.t.). Utilitarianisme menilai konsekuensi dengan standar “kebaikan terbaik untuk jumlah

terbesar”. Hedonisme, di sisi lain, mengatakan sesuatu itu “baik” jika konsekuensinya menghasilkan kesenangan atau menghindari rasa sakit. Filsuf Inggris Jeremy Bentham (1748–1832) dan John Stuart Mill (1806–1873) merupakan pendukung utama dari etika utilitarianisme.

Prinsip optimisasi proteksi sering dikaitkan dengan pendekatan utilitarian karena berupaya menjaga pajanan radiasi ‘serendah mungkin yang dapat dicapai, dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial’ (ICRP, 2018). Namun, etika konsekuensial tidak selalu berusaha memaksimalkan keuntungan kolektif, tetapi kadang-kadang digunakan juga untuk menyeimbangkan risiko dan manfaat bagi individu.

c. Etika Deontologis

Deontologi (*deontological*) adalah teori etika yang menggunakan aturan untuk membedakan yang benar dari yang salah. Dalam etika deontologis, suatu tindakan dianggap baik secara moral karena beberapa karakteristik dari tindakan itu sendiri, bukan karena hasil dari tindakan itu baik. Etika deontologis berpandangan bahwa setidaknya beberapa tindakan secara moral wajib dilakukan, terlepas dari konsekuensinya bagi kesejahteraan manusia (Britannica, t.t.2).

Deontologi sering dikaitkan dengan filsuf Immanuel Kant (1724-1804), yang berpendapat bahwa manusia memiliki sifat rasional dan memiliki kapasitas pengaturan diri yang disebut otonomi (ICRP, 2018). Niat baik akan menuntun manusia untuk melakukan tindakan yang baik pula. Kant menegaskan bahwa seseorang seharusnya tidak memperlakukan manusia hanya sebagai sarana untuk mencapai tujuan, tetapi sebagai tujuan itu sendiri. Hal ini berarti bahwa manusia tidak boleh mengorbankan individu untuk mencapai kebahagiaan terbesar dari sekelompok manusia dengan jumlah terbanyak. Pada saat yang sama, hal ini berarti pula bahwa manusia harus menghormati pilihan bebas setiap individu.

Deontologi sering dipandang sangat bertentangan dengan konsekuensialisme. Hal ini karena dalam menekankan niat untuk

bertindak sesuai dengan tugas kita, deontologi percaya konsekuensi dari suatu tindakan tidak memiliki relevansi etika sama sekali.

Kekakuan dan pengabaianya terhadap konsekuensi mengakibatkan banyak orang tidak dapat menerima etika deontologi. Berbohong, misalnya, berdasar deontologi merupakan tindakan yang tidak etis. Namun, bagaimana jika seseorang menanyakan lokasi teman kita, sementara kita tahu orang tersebut akan membunuh teman kita? Bagi banyak orang, tetap tidak akan berbohong dalam situasi seperti ini jelas merupakan suatu tindakan yang salah.

Dalam kaitannya dengan prinsip proteksi radiasi, pembatasan dosis individu dapat dikaitkan langsung dengan etika deontologis. Hal ini khususnya berlaku pada pemikiran bahwa individu perlu dilindungi secara adil, dan karena itu batas (*limit*) harus ditetapkan untuk menghindari dikorbankannya satu orang demi kepentingan orang lain.

2. Perspektif Global Etika

Nilai-nilai etika yang diuraikan pada subbab 1 yang menjadi dasar dalam pengembangan prinsip proteksi radiasi merupakan produk pemikiran di Eropa. Dengan latar belakang ini, pertanyaan yang muncul kemudian adalah apakah prinsip proteksi radiasi tersebut dapat diterima secara global? Patut disimak bahwa saat ini 59,73% penduduk dunia berada di Asia, 17,92% di Afrika, 9,37% di Eropa, 8,28% di Amerika Latin dan Karibia, 4,7% di Amerika Utara, dan 0,56% di Oseania (Statista, t.t.).

Pertanyaan tersebut dapat dijawab dengan kenyataan bahwa lebih dari 70 tahun terakhir ini pendekatan global terhadap isu nilai dan norma telah menjadi umum. Tonggak pertama dalam perkembangan ini adalah Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia (*Universal Declaration of Human Rights*) yang diadopsi oleh Majelis Umum Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) pada sidang ketiga tanggal 10 Desember 1948. Di Indonesia, butir-butir dari Deklarasi universal hak asasi manusia (HAM) ini diakomodasi dalam Undang-Undang Nomor 39 Tahun 1999 tentang Hak Asasi Manusia.

Pada tahun-tahun berikutnya, berbagai instrumen terkait etika makin banyak yang diadopsi secara internasional. Beberapa instrumen internasional yang telah diadopsi di Indonesia diberikan pada Tabel 4. Pada tabel tersebut, juga memperlihatkan tindak lanjut Indonesia terkait masing-masing instrumen baik dalam bentuk ratifikasi maupun adopsi ke dalam UU.

Perlu dicatat bahwa beberapa negara di dunia masih belum meratifikasi semua deklarasi tentang hak asasi manusia tersebut. Beberapa negara yang telah meratifikasinya juga masih ada yang masih memilih isu mana yang akan diterapkan dan isu mana yang tidak. Karena itu, untuk memberikan kepastian bahwa semua deklarasi dapat diterapkan secara penuh, masih perlu dicari nilai dan norma yang bisa diterima secara universal dan relevan dengan bidang subyek tertentu. Proteksi radiasi merupakan salah satu dari bidang subyek tertentu tersebut.

Tabel 4.1 Beberapa Instrumen Internasional dalam Nilai dan Norma yang Telah Diadopsi Indonesia

Tahun	Instrumen Internasional	Tindak Lanjut
1948	Deklarasi Universal Hak Asasi manusia (<i>Universal Declaration of Human Rights</i>)	Diakomodasi dalam UU No. 39 Tahun 1999 tentang Hak Asasi Manusia
1959	Deklarasi Hak Asasi Anak (<i>Declaration of the Rights of the Child</i>)	Diakomodasi dalam UU No. 11 tahun 2012 tentang
1966	Kovenan Internasional Hak Sipil dan Politik (<i>International Covenant on Civil and Political Rights</i>)	Ratifikasi dengan UU No. 12 tahun 2005

Tahun	Instrumen Internasional	Tindak Lanjut
1966	Kovenan Internasional Hak-Hak Ekonomi, Sosial dan Budaya (<i>International Covenant on Economic, Social, and Cultural Rights</i>)	Ratifikasi dengan UU No. 11 tahun 2005
1972	Deklarasi tentang Lingkungan Hidup Manusia (<i>Declaration on Human Environment</i>)	Diakomodasi dalam UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
1992	Deklarasi tentang Lingkungan dan Pembangunan (<i>Declaration on Environment and Development</i> [UNESCO])	Diakomodasi dalam UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
1997	Deklarasi Universal tentang Genom Manusia dan Hak Asasi Manusia (<i>Universal Declaration on the Human Genome and Human Rights</i>)	Diakomodasi dalam UU No. 39 Tahun 1999 tentang Hak Asasi Manusia
2005	Deklarasi Universal tentang Bioetika dan Hak Asasi Manusia (<i>Universal Declaration on Bioethics and Human Rights</i>)	Diakomodasi dengan pembentukan Komisi Bioetika Nasional (KBN) pada tahun 2004

3. Prinsip Etika Biomedis

Penelitian biomedis adalah bidang ilmu yang sangat luas yang melibatkan penyelidikan proses biologis dan penyebab penyakit melalui eksperimen, pengamatan, kerja laboratorium, analisis, dan pengujian yang cermat (CBRA, t.t.). Para ilmuwan memperluas basis pengetahuan ini untuk menemukan cara mencegah terjadinya penyakit dan mengembangkan produk, obat, dan prosedur yang

bermanfaat untuk mengobati dan menyembuhkan penyakit dan kondisi yang menyebabkan penyakit dan kematian pada manusia, hewan peliharaan dan ternak, serta satwa liar.

Penelitian biomedis membutuhkan masukan dan partisipasi banyak individu dari sains fisik dan biologis, dengan berbagai latar belakang dan keterampilan. Karena subyek penelitian sering melibatkan manusia untuk melihat efektivitas atau efisiensi suatu obat baru, misalnya, penelitian biomedis memerlukan persetujuan dari subyek sebelum dilibatkan dalam penelitian tersebut. Dari kebutuhan ini, berkembang falsafah moral dalam penelitian biomedis, yang juga disebut sebagai etika biomedis.

Prinsip etika biomedis yang paling banyak digunakan adalah prinsip yang dikembangkan oleh Beauchamp dan Childress (2001). Nilai-nilai prinsip yang dikembangkan pada etika biomedis ini meliputi penghormatan pada otonomi (*autonomy*), nonkejahatan (*non-maleficence*), kebaikan (*beneficence*) dan keadilan (*justice*). Beauchamp dan Childress mengklaim bahwa keempat prinsip etika biomedis ini setara, tidak ada satu yang lebih penting dari yang lain. Keduanya juga menyatakan bahwa prinsip etika ini berakar pada moralitas umum, yang tidak terkait dengan budaya atau individual karena berada di luar pemahaman keduanya (*transcendental*) (Beauchamp dan Childress, 2001).

B. Nilai-Nilai Etika Inti

Ketika Kelompok Kerja ICRP untuk membahas dasar etika sistem proteksi radiasi dibentuk tahun 2012, mereka menggunakan prinsip etika biomedis yang dikembangkan Beauchamp dan Childress sebagai acuan awal. Setelah melalui berbagai pembahasan, kelompok kerja memutuskan untuk mengembangkan prinsip etika yang hampir sama namun sedikit berbeda (Zölzer, 2016). Dalam prinsip yang dikembangkan kelompok kerja ini, prinsip penghormatan pada otonomi diganti dengan prinsip martabat manusia yang bersifat lebih menyeluruh, nonkejahatan dan kebaikan menjadi dua aspek dari satu konsep prinsip, prinsip kehati-hatian (*prudence*) ditambah, dan prinsip keadilan menjadi satu-satunya prinsip yang tidak berubah.

1. Kebaikan dan nonkejahatan

Kebaikan (*beneficence*) berarti mempromosikan atau berbuat baik, sedangkan nonkejahatan (*non-maleficence*) berarti menghindari tindakan yang berbahaya. Jangan memberi rokok pada orang yang sedang berusaha untuk berhenti merokok, misalnya, merupakan tindakan nonkejahatan.

Kebaikan dan nonkejahatan merupakan dua etika yang saling terkait dan memiliki sejarah panjang dalam filsafat moral, yang berasal dari Sumpah Hipokrates, menuntut agar seorang dokter berbuat baik dan/atau tidak membahayakan (ICRP, 2018).

Dengan mengembangkan prinsip proteksi radiasi, ICRP berusaha untuk melindungi manusia dari dampak radiasi yang berbahaya. Secara langsung, ICRP berkontribusi untuk melayani kepentingan terbaik individu dan secara tidak langsung kualitas kehidupan sosial. Dalam penerapannya, hal ini dicapai dengan memastikan bahwa efek deterministik dapat dihindari dan efek stokastik dapat dikurangi sejauh yang dapat dicapai dengan mempertimbangkan situasi dan kondisi yang ada. nonkejahatan terkait erat dengan pencegahan, yang bertujuan membatasi risiko dengan menghilangkan atau mengurangi kemungkinan bahaya sehingga meningkatkan kesejahteraan.

Kebaikan dan nonkejahatan merupakan nilai-nilai yang ada pada hampir semua agama di dunia. Pada Agama Hindu dan Budha dikenal adanya konsep ahimsa, yang berarti kebaikan dan nonkejahatan untuk semua makhluk hidup. Baik Taurat maupun Injil mengungkapkan pemikiran yang sama dengan cara yang berbeda dengan mendesak semua orang untuk mencintai sesamamu seperti mencintai dirimu sendiri. Di Agama Islam, Al-Qur'an Surat An-Nisa ayat 85 menegaskan bahwa "Barangsiapa memberi pertolongan dengan pertolongan yang baik, niscaya dia akan memperoleh bagian dari (pahala)nya. Dan barangsiapa memberi pertolongan dengan pertolongan yang buruk, niscaya dia akan memikul bagian dari (dosa)nya."

2. Kehati-hatian

Kehati-hatian (*prudence*) adalah kemampuan untuk membuat pilihan tindakan yang penuh pertimbangan dan hati-hati tanpa memiliki pengetahuan penuh tentang lingkup dan konsekuensi dari tindakannya. Kehati-hatian juga berarti kemampuan untuk memilih dan bertindak berdasarkan apa yang ada dalam kekuasaan atau kekuatan kita untuk dilakukan dan tidak dilakukan.

ICRP publikasi 103 (ICRP, 2007), secara eksplisit menggunakan istilah kehati-hatian saat menguraikan berbagai jenis efek pajanan radiasi yang menjadi pertimbangan dalam penyusunan sistem proteksi radiasi.

- 1) Efek deterministik: merupakan suatu tindakan yang hati-hati untuk mempertimbangkan ketidakpastian dalam perkiraan saat ini mengenai dosis ambang pada efek deterministik. Oleh karena itu, dosis tahunan yang meningkat dan mendekati 100 mSv akan hampir selalu dapat membenarkan dilakukannya tindakan protektif.
- 2) Efek stokastik secara umum: pada dosis radiasi di bawah sekitar 100 mSv dalam setahun, ICRP mengasumsikan peningkatan insidensi efek stokastik terjadi dengan probabilitas rendah dan sebanding dengan peningkatan dosis radiasi. ICRP menganggap bahwa model LNT tetap menjadi dasar yang hati-hati untuk menetapkan tindakan proteksi radiasi pada dosis rendah dan laju dosis rendah.
- 3) Efek herediter secara khusus: tidak ada bukti langsung bahwa pajanan radiasi yang diterima orang tua menyebabkan penyakit herediter berlebih pada keturunan. Namun, ICRP menilai bahwa ada bukti kuat bahwa radiasi menyebabkan efek herediter pada hewan percobaan. Dengan demikian, ICRP dengan hati-hati terus memasukkan risiko efek herediter dalam sistem proteksi radiasinya.

Seperti nilai kebaikan dan nonkejahatan, nilai kehati-hatian juga diajarkan dalam berbagai agama dan budaya yang ada. Pepatah Cina mengatakan, "Berhati-hati di saat awal, bertindak dengan

waspada merupakan kunci menuju keberhasilan”. Di dalam agama Islam, dikisahkan ada seseorang yang menanyakan kepada Nabi Muhammad SAW mengenai apakah ia harus mengikat untanya lalu tawakal (berserah diri sepenuhnya) kepada Allah Swt. atau melepaskan unta tersebut sambil bertawakal kepada Allah Swt. Nabi menjawab, “Ikatlah dahulu untamu itu kemudian baru engkau bertawakal (HR. At-Tirmidzi No. 2517, Hasan).”

3. Keadilan

Keadilan (*justice*) memiliki pengertian yang sangat beragam. Menurut Websters Dictionary 1828 (t.t.), keadilan merupakan kebajikan untuk memberikan kepada setiap orang apa yang menjadi haknya, jujur dalam hubungan manusia satu sama lain, tidak memihak, wajar, dan pemberian ganjaran yang setimpal. Secara singkat, keadilan intinya adalah sifat, perbuatan, perlakuan yang adil, yang tidak berat sebelah, atau tidak memihak (KBBI, t.t.2).

Nilai keadilan muncul pada publikasi 26 ICRP (ICRP, 1977) berupa gagasan untuk membatasi pajanan individu untuk memperbaiki kemungkinan perbedaan dalam distribusi dosis individu karena radiasi yang diterima populasi terpajan. Pada publikasi 60 (ICRP, 1991), istilah ketidakadilan digunakan untuk pertama kali oleh ICRP saat menyatakan bahwa ketika manfaat dan kerugian tidak memiliki distribusi yang sama pada populasi, disitu pasti ada beberapa ketidakadilan. Ketidakadilan dapat dihindarkan dengan memberikan perhatian pada proteksi individu.

Proteksi individu dilakukan untuk mengurangi ketidakadilan dalam distribusi pajanan radiasi, di mana satu individu mungkin dapat menerima dosis radiasi lebih tinggi dari yang lain. Untuk ini pembatasan pajanan individu dilakukan melalui penggunaan konsep ‘penghambat dosis’ (*dose constraint*) yang berlaku pada situasi pajanan terencana, ‘tingkat acuan’ (*reference levels*) pada situasi pajanan eksisting dan situasi pajanan darurat, dan ‘tingkat acuan tertimbang turunan’ (DCRL, *derived consideration reference level*) pada proteksi fauna dan flora. Semua konsep ini merupakan bagian dari prinsip optimisasi proteksi yang harus digunakan dan dipilih

sesuai dengan keadaan yang ada oleh mereka yang bertanggung jawab pada proteksi radiasi.

Selain itu, proteksi radiasi juga dimaksudkan untuk memastikan bahwa nilai pajanan tidak melebihi nilai yang risikonya dianggap tidak dapat ditoleransi. Kepastian diperoleh dengan penerapan nilai batas dosis (NBD) yang direkomendasikan untuk proteksi pekerja dan publik dalam situasi pajanan terencana. Seperti halnya penghambat dosis dan tingkat acuan, NBD adalah alat untuk membatasi pajanan individu untuk memastikan keadilan dalam distribusi risiko di seluruh kelompok individu yang terpajan.

Nilai keadilan ini juga dikenal dalam ajaran agama yang ada di dunia. Di agama Budha, Dhammapada 256 menyatakan bahwa, "Ia yang memutuskan segala sesuatu dengan tergesa-gesa, tidak dapat dikatakan sebagai orang yang adil. Orang bijaksana hendaknya memeriksa dengan teliti mana yang benar dan mana yang salah." Di agama Islam, Surah An Nahl ayat 90 menyatakan, "Sesungguhnya Allah menyuruh kamu berlaku adil dan berbuat kebijakan, memberi kepada kaum kerabat, dan Allah melarang dari perbuatan keji, kemungkaran dan permusuhan. Dia memberi pengajaran kepada kalian agar kalian dapat mengambil pelajaran."

4. Martabat

Martabat (*dignity*) dapat diartikan sebagai kualitas seseorang yang membuatnya pantas untuk dihormati, terkadang ditunjukkan dalam perilaku atau penampilan (Cambridge Dictionary, t.t.1). Dalam kaitan ini, setiap individu berhak untuk dihormati tanpa syarat, berapapun usia, jenis kelamin, kesehatan, kondisi sosial, asal etnis, dan agama.

Penghormatan terhadap martabat manusia diberikan dalam proteksi radiasi dalam bentuk persetujuan setelah penjelasan, yang mengacu pada etika biomedis, yaitu bahwa manusia memiliki hak untuk menerima risiko secara sukarela, sebagaimana juga memiliki hak menolak untuk menerima. Konsep persetujuan setelah penjelasan dan hak untuk tahu ini diterapkan pada Publikasi 84 yang

menguraikan proteksi radiasi dalam kehamilan dan radiasi medis (ICRP, 2000).

Kesepakatan luas bahwa semua manusia memiliki martabat yang sama tercermin dalam Deklarasi Menuju Etika Global dari Parlemen Agama-Agama Dunia pada tahun 1993. Sesuai dengan uraian Küng dan Kuschel yang dikutip Zölzer (2016), dalam deklarasi dinyatakan bahwa setiap manusia tanpa membedakan usia, jenis kelamin, ras, warna kulit, kemampuan fisik atau mental, bahasa, agama, politik pandangan, atau asal-usul kebangsaan atau sosial memiliki martabat yang tidak dapat dicabut dan tidak tersentuh, dan oleh karena itu, setiap orang, baik individu maupun negara, harus menghormati martabat ini dan melindunginya.

C. Nilai-Nilai Prosedural

Empat nilai etika inti memberi dasar bagi pengembangan sistem proteksi radiasi saat ini, meski hubungannya dengan tiga prinsip proteksi radiasi cukup kompleks. Prinsip justifikasi dapat dipahami sebagai merujuk pada kebaikan/non-kejahatan, atau barangkali lebih tepat penyeimbangan antara berbuat baik dan menghindari bahaya. Namun, untuk prinsip optimisasi dan limitasi dosis, beberapa nilai etika inti saling mendukung dan bagaimana mereka berinteraksi dalam sistem proteksi radiasi saat ini perlu dipertimbangkan lebih perinci.

Selanjutnya, penerapan prinsip proteksi radiasi memiliki beberapa persyaratan atau nilai tersendiri terkait dengan aspek prosedural. Tiga dari nilai-nilai prosedural yang penting karena berlaku untuk tiga situasi pajanan radiasi adalah akuntabilitas, transparansi, dan inklusivitas. Secara etika, nilai-nilai prosedural ini masing-masing mengacu pada etika tanggung jawab, keadilan prosedural, dan martabat manusia (Cho, 2016).

1. Akuntabilitas

Akuntabilitas (*accountability*) dapat didefinisikan sebagai nilai prosedural untuk bertanggung jawab atas tindakan yang dilakukan

dan mampu memberikan alasan yang memuaskan mengapa tindakan tersebut dilakukan (Cambridge Dictionary, t.t.2). Dalam tata kelola administrasi, hal ini berarti kewajiban individu atau organisasi untuk melaporkan kegiatan mereka, memikul tanggung jawab, dan siap untuk bertanggung jawab atas konsekuensinya jika diperlukan.

Konsep akuntabilitas muncul secara eksplisit pada publikasi 60 ICRP (ICRP, 1991), dan ditegaskan kembali pada publikasi 103 (ICRP, 2007) saat membahas implementasi rekomendasi dalam kaitannya dengan tugas organisasi.

“Pada semua organisasi, tanggung jawab dan kewenangan terkait didelegasikan sampai taraf tertentu bergantung pada kerumitan pekerjaan yang dilakukan, ... ‘Harus ada garis pertanggung-jawaban yang jelas yang mengarah ke puncak masing-masing organisasi, ...badan pengawas harus bertanggung jawab atas saran yang mereka berikan dan setiap persyaratan yang mereka tetapkan(ICRP, 2007).”

ICRP juga telah menyinggung akuntabilitas generasi saat ini terhadap generasi mendatang, seperti yang dinyatakan pada publikasi 122 (ICRP, 2013).

“... kewajiban generasi saat ini terhadap generasi mendatang sangat kompleks, melibatkan, misalnya, tidak hanya masalah keselamatan dan proteksi namun juga alih pengetahuan dan sumber daya. Karena ketidakpastian teknis dan ilmiah, dan perkembangan masyarakat dalam jangka panjang, secara umum diakui bahwa generasi saat ini tidak dapat memastikan bahwa tindakan yang melibatkan masyarakat akan dilakukan di masa depan, tetapi sarana untuk generasi mendatang. untuk mengatasi masalah tersebut perlu disediakan sejak saat ini (ICRP, 2013).”

2. Transparansi

Transparansi (*transparency*) dapat diartikan sebagai bersikap terbuka mengenai keputusan dan kegiatan yang dapat memengaruhi orang lain, dan mengkomunikasikan hal tersebut dengan cara yang jelas, akurat, tepat waktu, jujur dan lengkap (Zölzer, 2020). Transparansi

tidak hanya berarti komunikasi atau konsultasi, tetapi juga berkaitan dengan aksesibilitas informasi tentang kegiatan, pembahasan, dan keputusan yang diambil, serta kejelasan, kepraktisan, dan kejujuran dalam meneruskan informasi tersebut (ICRP, 2018).

Dalam proteksi radiasi, transparansi bergantung pada kategori pajanan dan jenis situasi pajanannya. Di bidang medis, misalnya, transparansi diterapkan sesuai dengan modalitas peralatan yang dimiliki dan prosedur yang dikerjakan, dan bisa dalam bentuk pelatihan untuk pekerja dan persetujuan setelah penjelasan (*informed consent*) bagi pasien. Transparansi juga bisa berbentuk hak untuk tahu bagi masyarakat yang akan menjalani penapisan untuk tujuan keamanan (*security screening*) (ICRP, 2018).

Dukungan bagi transparansi juga datang dari sudut pandang budaya dan agama. Mahatma Gandhi, seorang tokoh dari India dan penganut agama Hindu yang taat menyatakan dalam *The Diary of Mahadev Desai* bahwa, "...adalah salah dan tidak bermoral untuk berusaha menghindari konsekuensi dari tindakan seseorang (Desai, 1953)", sementara agama Budhha mengajarkan lewat Dhammapada 50 bahwa "janganlah memperhatikan kesalahan dan hal-hal yang telah atau belum dikerjakan oleh orang lain. Namun, perhatikanlah apa yang telah dikerjakan dan apa yang belum dikerjakan oleh diri sendiri"

Secara tidak langsung, Konfusius dalam *Analects* 15:20 mengungkapkan hal yang sama bahwa, "Orang yang mulia prihatin dengan jenis reputasi yang akan dia miliki setelah dia meninggal," dan agama kristen dalam Roma 14:12 menyatakan bahwa "Demikianlah setiap orang di antara kita akan memberi pertanggung jawaban tentang dirinya sendiri kepada Tuhan." Sedangkan, dalam agama Islam diriwayatkan bahwa Nabi Muhammad SAW pernah bersabda bahwa, "Tiap-tiap kamu adalah pemimpin, dan akan dimintai pertanggungjawaban atas kepemimpinannya (HR Bukhari dan Muslim)."

Berdasarkan pengalaman, akuntabilitas dan transparansi dapat saling memperkuat. Bersama-sama keduanya memungkinkan para pemangku kepentingan untuk mengetahui informasi terkini yang

diperlukan untuk membuat keputusan berdasarkan informasi, dan juga untuk berpartisipasi dalam proses pengambilan keputusan.

3. Inklusivitas

Inklusivitas (*inclusiveness*) dapat diartikan sebagai kualitas untuk melibatkan beberapa jenis manusia dan memperlakukannya secara sama dan adil (Cambridge Dictionary, t.t.3). Inklusivitas juga biasa disebut dengan menggunakan ungkapan ‘partisipasi pemangku kepentingan,’ yang merupakan cara nilai diterapkan dalam keseharian. Partisipasi pemangku kepentingan, juga disebut sebagai ‘keterlibatan pemangku kepentingan’ yang berarti ‘melibatkan semua pihak yang terkait dalam proses pengambilan suatu keputusan.

Partisipasi pemangku kepentingan pertama kali diperkenalkan oleh ICRP dalam publikasi 82, yang antara lain menyatakan bahwa, “banyak situasi pajanan berkepanjangan yang menjadi bagian dalam habitat manusia, dan ICRP mengantisipasi bahwa proses pengambilan keputusan akan melibatkan partisipasi pemangku kepentingan yang relevan daripada hanya dilakukan oleh spesialis proteksi radiasi (ICRP, 1999).” Proses ini sudah tentu akan melibatkan banyak pertimbangan lain dan tidak hanya sekedar pertimbangan dari sisi proteksi radiasi. Saat ini proses pengambilan keputusan dengan melibatkan para pemangku kepentingan untuk mempertimbangkan pandangan dan kepeduliannya telah menjadi persyaratan dalam penerapan prinsip optimisasi proteksi sejak diterbitkannya publikasi 103 (ICRP, 2007).

Partisipasi para pemangku kepentingan dalam proses pengambilan keputusan terkait proteksi radiasi adalah cara yang efektif untuk memperhitungkan kepedulian dan harapan mereka, termasuk juga pengetahuan mereka tentang isu yang terkait. Partisipasi semacam ini juga merupakan cara bagi para profesional dan pemangku kepentingan untuk lebih memahami apa yang mungkin terjadi pada situasi pajanan radiasi. Pada gilirannya, keterlibatan ini memungkinkan ditemuinya cara untuk melakukan tindakan proteksi yang lebih efektif, berkelanjutan, dan adil yang mempromosikan pemberdayaan dan otonomi para pemangku kepentingan.

Para ahli proteksi radiasi dan pihak yang berwenang bertanggung jawab untuk memastikan dukungan yang adil kepada semua kelompok orang yang terpajan radiasi. Keadilan dalam hal ini mengacu pada nilai-nilai inti keadilan dan martabat. Persyaratan untuk diperlakukan secara adil merupakan kondisi utama bagi mereka yang ingin mengadakan dialog dengan para ahli dan pihak berwenang dengan tujuan untuk mempromosikan keselamatan dan kesejahteraan. Dialog ini memungkinkan semua pihak untuk lebih memahami situasi yang dapat terjadi dan membantu memberdayakan individu untuk membuat keputusan berdasar informasi yang valid.

Butir-butir ajaran agama yang mendukung nilai inklusivitas juga dapat mudah dijumpai. Pada agama Hindu, misalnya, Reg Veda antara lain menyatakan, “Bertemu bersama, berbicara bersama, biarkan pikiranmu selaras.” Di dalam agama Islam, Al-Qur’an surah At-Taubah ayat 119 menyatakan “Wahai orang-orang beriman, bertakwalah kepada Allah, dan hendaklah kamu bersama dengan orang-orang benar.”

BAB V

DOSIMETRI PROTEKSI RADIASI

Radiasi pada dasarnya adalah energi yang berasal dari suatu sumber dan bergerak melintasi ruang. Radiasi dapat berbentuk gelombang elektromagnetik, juga bisa dalam bentuk partikel. Jika menumbuk suatu materi, sebagian atau seluruh energi tersebut dapat mengendap pada materi yang ditumbuknya. Cabang ilmu yang secara kuantitatif mempelajari pengendapan energi pada materi ini disebut sebagai dosimetri.

Konsep dosimetri dan definisi jumlah dosis untuk digunakan dalam proteksi radiasi dari sumber radiasi eksternal dikembangkan oleh Komisi Internasional untuk Proteksi Radiologis (ICRP, *International Commission on Radiological Protection*) dan Komisi Internasional untuk Satuan dan Pengukuran Radiasi (ICRU, *International Commission on Radiation Units and Measurements*). Dosimetri proteksi radiasi sangat penting untuk mengetahui jumlah dosis radiasi yang diterima oleh seorang pekerja radiasi selama melakukan tugasnya, mengetahui jumlah dosis radiasi yang terlepas ke lingkungan dari operasi normal ataupun kecelakaan dari pengoperasian suatu fasilitas radiasi atau nuklir, dan juga mengetahui jumlah dosis radiasi yang akan digunakan untuk keperluan terapi untuk perawatan kanker.

Tiga jenis besaran yang relevan dalam dosimetri proteksi radiasi dari sumber radiasi eksternal, yaitu besaran fisis, besaran proteksi, dan besaran operasional. Bab ini secara khusus akan menguraikan ketiga jenis besaran tersebut sesuai dengan uraian yang diberikan oleh publikasi ICRP atau laporan ICRU yang terkait.

A. Besaran fisis

Besaran fisis merupakan besaran yang menggambarkan sifat penyerapan energi pada suatu materi. Besaran fisis ini didefinisikan pada setiap titik dari suatu lapangan radiasi (jumlah lapangan), dan satuan yang relevan diperoleh langsung dengan standar primer. Tiga besaran fisis untuk dosimetri proteksi radiasi yang didefinisikan oleh ICRU, yaitu fluens (*fluence*), kerma, dan dosis serap (ICRU, 1998).

1. Fluens

Secara umum, fluens merupakan fluks dari partikel radiasi (misalnya, foton, elektron, proton, ion berat, atau neutron), atau energi yang terintegrasi selama periode waktu tertentu. Oleh karena itu, fluens dapat dibedakan atas fluens partikel dan fluens energi.

Fluens partikel didefinisikan sebagai total jumlah partikel radiasi yang memotong satu satuan luas dalam selang waktu tertentu, sedangkan fluens energi adalah energi yang diberikan per satuan luas.

Jika dN adalah jumlah partikel yang datang pada bidang dengan luas penampang dA , fluens partikel (Φ) diberikan sebagai (Seuntjens et al., 2005):

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (5.1)$$

Satuan fluens partikel adalah m^{-2} . Bidang dengan luas penampang dA dipandang sebagai tegak lurus terhadap arah setiap partikel sehingga fluens partikel tidak bergantung pada

sudut datang radiasi.

Fluens energi (Ψ) adalah hasil bagi dE dengan dA , di mana dE adalah energi radian yang datang pada suatu bola dengan bidang dengan luas penampang dA , atau

$$=dE/dA \quad (5.2)$$

Satuan fluens energi adalah J/m^2 .

Hubungan fluens partikel dengan fluens energi dapat diberikan sebagai:

$$=dN/dA \quad E=E \quad (5.3)$$

dengan E adalah energi partikel dan dN menyatakan jumlah partikel dengan energi E .

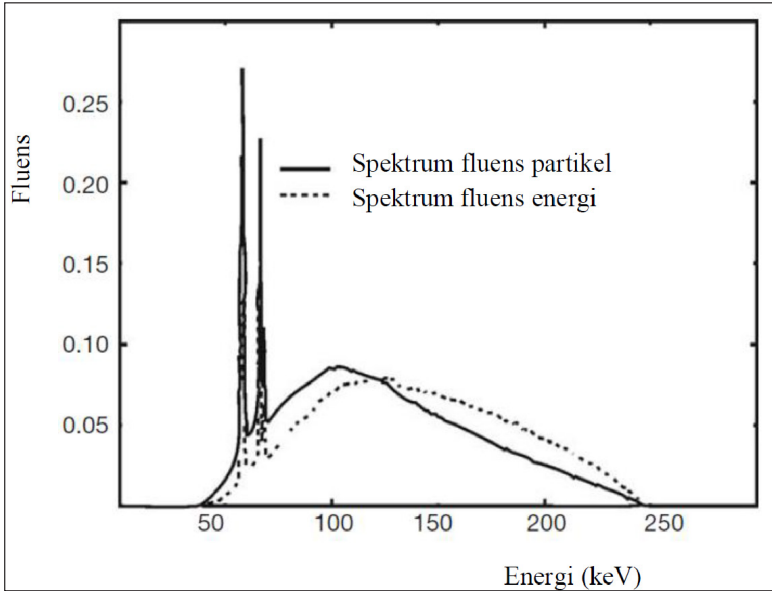
Karena hampir semua foton atau berkas partikel bersifat polienergetik, kedua konsep tersebut perlu diterapkan pada berkas polienergetik ini. Konsep spektrum fluens partikel dan spektrum fluens energi masing-masing menggantikan fluens partikel dan fluens energi sehingga:

$${}_E(E) \equiv \frac{d}{dE} (E) \quad (5.4)$$

dan

$${}_E(E) \equiv \frac{d}{dE} (E) = \frac{d}{dE} (E)E \quad (5.5)$$

dengan dan masing-masing adalah notasi singkat untuk spektrum fluens partikel dan diferensial spektrum fluens energi pada energi E . Gambar 5.1 memperlihatkan spektrum fluens partikel dan fluens energi pada pesawat sinar-X orthovoltage dengan nilai kVp 250 kV dan filter tambahan 1 mm AL dan 1,8 mm Cu (bahan target: W, filter inheren 2 mm Be).



Sumber: Seuntjens et al. (2005)

Gambar 5.1 Spektrum Ffluens Partikel dan Fluens Energi pada Suatu Pesawat Sinar-X

Pada perhitungan dosimetrik, fluens seringkali dinyatakan dalam panjang lintasan partikel. Oleh karena itu, fluens partikel juga dapat diberikan sebagai (ICRU, 1998):

$$=dl/dV \quad (5.6)$$

dengan dl adalah jumlah panjang lintasan partikel pada volume dV .

Untuk medan radiasi yang tidak berubah selama jangka waktu tertentu, t , dan mengandung partikel dengan kecepatan v , fluens partikel diberikan sebagai (ICRU, 1998):

$$\Phi = nvt \quad (5.7)$$

dengan n adalah jumlah partikel volumik.

2. Kerma

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

Dalam proses ini, dapat dijelaskan bahwa energi foton diberikan ke suatu materi melalui proses dua tahap. Pada tahap pertama radiasi foton mengalihkan energinya sebagai energi kinetik ke partikel bermuatan sekunder (elektron) melalui berbagai interaksi foton (efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan). Pada tahap kedua, partikel bermuatan mengalihkan energi kinetiknya dalam bentuk elektron dan positron ke materi melalui proses eksitasi dan ionisasi (Seuntjens et al., 2005).

Kerma merupakan proses tahap pertama dan secara matematis diberikan sebagai:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (5.8)$$

dengan adalah jumlah energi kinetik dari semua partikel bermuatan yang dialihkan oleh partikel tak bermuatan pada bahan dengan massa dm .

Pada sistem satuan internasional (SI), satuan kerma adalah joule/kilogram (J/kg), dengan nama khusus gray (Gy). Dengan kata lain, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

3. Cema

Cema adalah singkatan untuk *converted energy per unit mass*. Besaran ini berlaku untuk radiasi pengion langsung seperti elektron dan proton (Seuntjens et al., 2005). Cema merupakan hasil bagi dengan dm , di mana adalah energi yang hilang oleh partikel bermuatan,

kecuali elektron sekunder, dalam tumbukan di massa dm suatu materi.

$$C = \frac{dE_c}{dm} \quad (5.9)$$

Satuan cema adalah joule per kilogram (J/kg), dengan nama khusus gray (Gy). Dalam perkembangannya, besaran cema ini jarang atau bahkan sama sekali tidak dipakai karena memiliki karakteristik yang sama dengan satuan dosis serap.

4. Dosis Serap

Dosis serap (*absorbed dose*) adalah besaran dosimetrik dasar yang berlaku baik untuk radiasi pengion langsung maupun tak langsung. Untuk radiasi pengion tak langsung, dosis serap merupakan proses tahap kedua dari proses pengalihan energi foton ke suatu materi, setelah pada proses pertama (yaitu, kerma) radiasi pengion tak langsung mengalihkan energinya sebagai energi kinetik ke partikel bermuatan sekunder. Pada proses tahap kedua, partikel bermuatan sekunder ini mengalihkan beberapa energi kinetiknya ke media (yang menghasilkan dosis serap), dan kehilangan sebagian energinya dalam bentuk bremsstrahlung atau annihilasi (Seuntjens, et al., 2005).

Dosis serap didefinisikan sebagai energi rata-rata yang diserap bahan per satuan massa materi tersebut. Secara matematik, dosis serap D dapat dituliskan sebagai:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (5.10)$$

dengan d adalah energi rata-rata yang diberikan ke materi yang mempunyai masa dm .

Besaran dosis serap ditentukan pada suatu titik pada organ atau jaringan tubuh. Satuan dosis serap dalam SI adalah joule per kilogram (J/kg), dengan nama khusus gray (Gy). Satuan lama untuk dosis serap adalah rad. Satu rad adalah energi rata-rata sebesar 100 erg yang diberikan ke bahan dengan massa 1gram (g) sehingga 1 rad

= 100 erg/g. Karena 1 J = 10⁷ erg, hubungan Gy dengan rad dengan demikian adalah

$$1 \text{ Gy} = \frac{10^7 \text{ erg}}{10^3 \text{ g}} = \frac{10^4 \text{ erg}}{\text{g}} = \frac{10^4 \text{ erg/g}}{10^2 \frac{\text{erg/g}}{\text{rad}}} = 100 \text{ rad} \quad (5.11).$$

Ketiga besaran fisis di atas ini tidak digunakan secara langsung untuk tujuan limitasi dosis karena dua alasan, yaitu karena radiasi yang berbeda (misal foton, elektron, neutron, proton) menyebabkan efek biologis yang berbeda pada tingkat dosis yang sama, dan organ atau jaringan yang berbeda memiliki radiosensitivitas (kepekaan terhadap radiasi) yang berbeda. Karena alasan ini, besaran proteksi diperkenalkan untuk tujuan pembatasan dosis.

B. Besaran Proteksi

Besaran proteksi diperkenalkan oleh ICRP (1991) sebagai dasar untuk membangun konsep pembatasan dosis. Besaran ini mempertimbangkan baik efektivitas biologis yang berbeda untuk radiasi yang berbeda dengan memasukkan faktor bobot radiasi, dan sensitivitas radiasi pada organ atau jaringan yang berbeda dengan memperkenalkan faktor bobot jaringan, .

Dengan demikian, besaran proteksi merupakan besaran yang digunakan untuk mengkaji hubungan antara dosis radiasi dengan risiko kesehatan akibat penyerapan energi dalam bentuk radiasi. Besaran proteksi terdiri atas dosis ekuivalen dan dosis efektif.

1. Dosis Ekuivalen

Seperti telah diuraikan sebelumnya, konsep dosis serap digunakan untuk memperkirakan penyerapan energi pada suatu materi. Untuk materi organ atau jaringan, penyerapan energi tersebut secara spesifik disebut sebagai dosis serap rata-rata, atau . Untuk dosis rendah diasumsikan bahwa nilai berkorelasi dengan efek stokastik radiasi pada organ atau jaringan tersebut (ICRP, 2007).

Penggunaan dosis serap rata-rata sebagai indikator peluang terjadinya efek stokastik bergantung pada kelinieran hubungan

dosis-tanggapan. Hubungan ini tidak linier untuk efek deterministik sehingga dosis serap, tidak sertamerta 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 (*equivalent dose*), H_T .

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (5.12)$$

dengan $H_{T,R}$ adalah dosis serap yang dirata-ratakan pada organ atau jaringan T akibat radiasi R, dan w_R adalah faktor bobot radiasi untuk jenis radiasi R.

Jika medan radiasi terdiri atas berbagai radiasi dengan berbagai nilai, dosis ekuivalen total menjadi (ICRP, 2007):

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (5.13).$$

Satuan dosis ekuivalen adalah joule per kilogram (J/kg), meski pun lebih dikenal dengan nama khususnya, yaitu sievert (Sv).

Dalam hal faktor bobot radiasi, ICRP menyatakan bahwa faktor bobot berlaku untuk radiasi yang memiliki kemampuan transfer energi yang tinggi, atau biasa disebut sebagai radiasi dengan *linear energy transfer* (LET) tinggi (ICRP, 2007). LET adalah jumlah rata-rata energi radiasi yang mengendap per satuan panjang (dengan satuan yang umum keV/ μm), sedangkan LET tinggi dimiliki oleh radiasi partikel, seperti alfa, ion berat atau neutron, yang merupakan radiasi dengan kerapatan yang tinggi.

Tabel 5.1 memberikan nilai faktor bobot radiasi yang diberikan oleh ICRP pertama kali pada publikasi 60 (ICRP, 1991) dan revisinya

pada publikasi 103 (ICRP, 2007). Seperti terlihat, faktor bobot partikel alfa, ion berat atau neutron memiliki nilai yang cukup tinggi, sementara foton, elektron dan muon memiliki faktor bobot sama dengan satu karena ketiganya merupakan radiasi dengan LET rendah. Tabel 5.1 juga memperlihatkan bahwa nilai untuk proton mengalami penurunan dari 5 (tahun 1991) menjadi 2 (tahun 2007), dan pion bermuatan ditambahkan dan diberi nilai 2. Perubahan ini merupakan hasil evaluasi dari perkembangan pengetahuan yang terjadi sejak tahun 1991.

Tabel 5.1 Faktor Bobot Radiasi

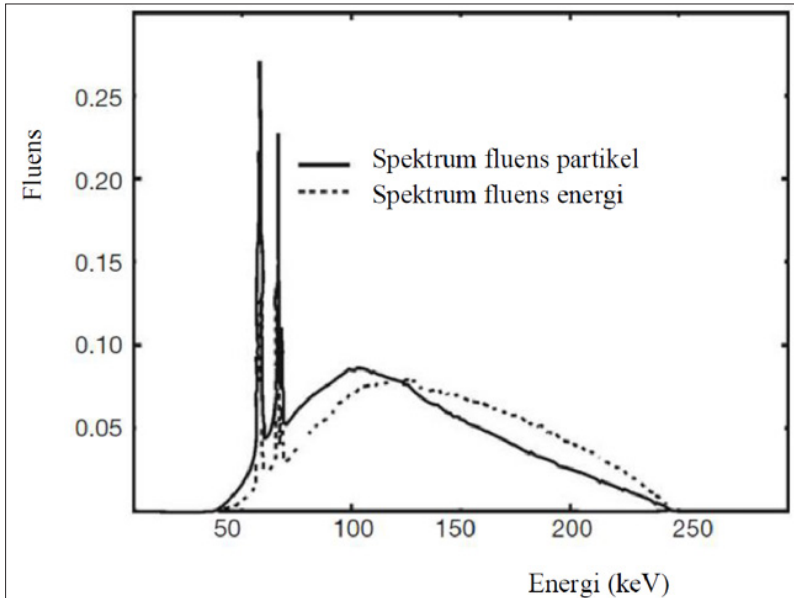
Jenis Radiasi	ICRP 60 (1991)	ICRP 103 (2007)
Foton	1	1
Elektron, muon	1	1
Proton, pion bermuatan	5	2
Alfa, fragmen fisi, ion berat	20	20
Neutron	*)	Fungsi energi neutron **)

Keterangan: *) <10 keV: 5, 10 keV-100 keV: 10, >100 keV-2 MeV: 20, >2 MeV-20 MeV: 10, >20 MeV: 5

**) Lihat Gambar 5.2

Sumber: ICRP (1991); ICRP (2007)

Untuk neutron, faktor bobot radiasi yang tadinya diberikan dalam nilai numerik diubah menjadi grafik faktor bobot sebagai fungsi seperti diperlihatkan pada Gambar 5.2.



Sumber: ICRP (2007)

Gambar 5.2 Faktor Bobot Radiasi Neutron

ICRP juga menyatakan bahwa faktor bobot radiasi dengan LET tinggi diturunkan untuk efek stokastik pada dosis rendah. Oleh karena itu, penggunaan satuan khusus Sv untuk dosis ekuivalen sebenarnya menyiratkan bahwa dosis ekuivalen merupakan besaran antara untuk menghitung dosis efektif yang hanya berlaku untuk efek stokastik lanjut (kanker dan kerusakan bawaan), dan tidak berlaku untuk efek reaksi jaringan langsung.

2. Dosis Efektif

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

penjumlahan dosis ekuivalen di jaringan atau organ, dan masing-masing dikalikan dengan faktor bobot jaringan yang sesuai. Secara matematis, dosis efektif didefinisikan sebagai (ICRP, 2007):

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (5.14)$$

dengan E adalah dosis ekuivalen pada organ atau jaringan T, dan w_T adalah faktor bobot untuk jaringan T. Satuan dosis efektif adalah joule per kilogram (J/kg), meskipun lebih dikenal dengan nama khususnya, yaitu sievert (Sv).

Dosis efektif adalah konsep atau konstruksi matematik yang digunakan dalam proteksi radiasi sebagai dasar untuk menghitung nilai batas dosis tahunan untuk pekerja dan anggota masyarakat dari pajanan radiasi dan masukan radionuklida. Dosis efektif juga digunakan untuk membandingkan dosis radiasi dari pajanan kerja yang diterima dengan nilai batas dosis tahunan. Oleh karena itu, dosis efektif bukanlah dosis radiasi yang sebenarnya yang diterima seseorang, tetapi merupakan jumlah dosis radiasi yang terhitung yang mewakili perkiraan risiko stokastik yang berlaku untuk model perwakilan (*representative model*) (OECD, 2016). Selain itu, ICRP juga menegaskan bahwa dosis efektif dihitung untuk Orang Acuan, dan bukan untuk sekedar seorang individu (ICRP, 2007).

Nilai faktor bobot jaringan dipilih untuk mewakili kontribusi organ dan jaringan individu terhadap keseluruhan kerugian radiasi akibat efek stokastik. Faktor bobot jaringan ditentukan dengan dasar studi epidemiologi tentang induksi kanker pada populasi yang terpajan dan penilaian risiko untuk efek yang dapat diwariskan (ICRP, 2007).

Tabel 5.2 memberikan nilai faktor bobot jaringan yang diberikan oleh ICRP pertama kali pada publikasi 60 (1991) dan revisinya pada publikasi 103 (ICRP, 2007). Seperti terlihat, terjadi perubahan yang cukup signifikan pada beberapa nilai faktor bobot jaringan antara yang diberikan terakhir dengan yang diberikan sebelumnya. Berdasar data mutakhir risiko induksi kanker dan penyakit hereditas, dua jaringan baru (otak dan kelenjar ludah) dimasukkan. Nilai untuk gonad

yang berkurang dari 0,20 menjadi 0,08 menandakan berkurangnya secara signifikan risiko untuk penyakit hereditas. Namun, nilai untuk payudara bertambah dari 0,05 menjadi 0,12 karena adanya temuan baru dari studi epidemiologis dan lebih difokuskannya insidensi kanker pada perhitungan kerusakan. Sedangkan, jumlah jaringan sisa juga bertambah untuk menghindari penyimpangan minor dini dari penambahan dosis efektif.

Nilai masing-masing faktor bobot jaringan mewakili nilai rata-rata (*mean*) untuk manusia yang dirata-ratakan (*averaged*) untuk kedua jenis kelamin dan semua usia sehingga tidak berhubungan dengan karakteristik individu tertentu.

Dalam praktiknya, besaran dosis efektif tidak dapat diukur langsung. Perhitungan dosis efektif dilakukan secara bertahap, dengan menggunakan fantom komputasional dan data fisiologi manusia acuan pria dan wanita.

Gambar 5.3 memperlihatkan tahapan dalam penentuan dosis efektif ini (ICRP, 2007). Seperti terlihat, dosis serap dari masukan radionuklida atau paparan eksternal diubah menjadi dosis ekuivalen pria dan wanita. Dalam perhitungannya digunakan fantom komputasional pria acuan dan wanita acuan dewasa yang merupakan pencitra tomografik medik dan tersusun atas volume pixels (*voxels*) tiga dimensi, dan juga faktor bobot radiasi untuk masing-masing jenis radiasi yang diterima.

Tabel 5.2 Faktor Bobot Jaringan

Jaringan atau Organ	ICRP 60 (1991)	ICRP 103 (2007)
Gonad	0,20	0,08
Sumsum tulang (merah), kolon, paru-paru, lambung	0,12	0,12
Payudara	0,05	0,12
Bladder, esofagus, hati, thyroid	0,05	0,04
Permukaan tulang, kulit	0,01	0,01

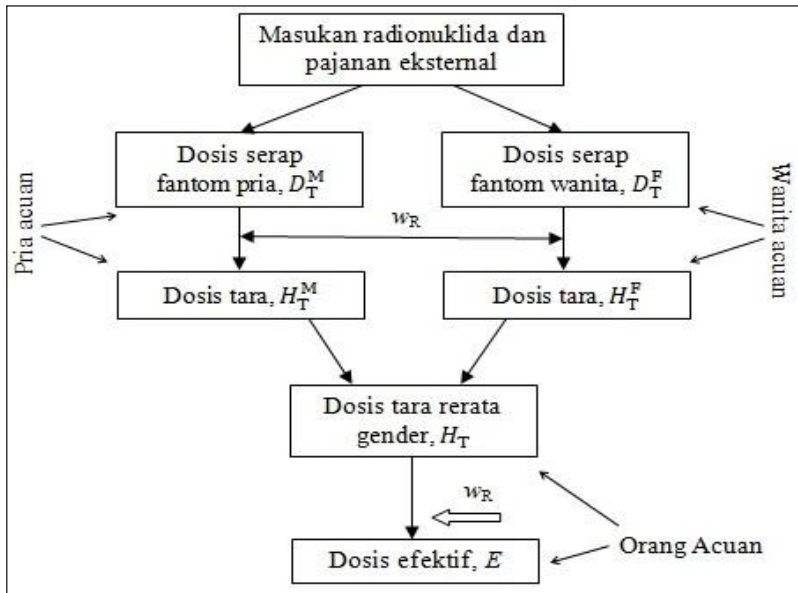
Jaringan atau Organ	ICRP 60 (1991)	ICRP 103 (2007)
Otak, kelenjar ludah	-	0,01
Jaringan sisa *)	0,05	0,12
Total	1,00	1,00

*) Jaringan sisa:

ICRP 60: adrenalin, otak, usus besar, usus kecil, ginjal, otot, pankreas, limpa, *thymus*, *uterus*

ICRP 103: adrenalin, ekstratoraksik, *gall bladder*, jantung, ginjal, *lymph nodes*, otot, mukosa oral, prostat (laki), usus kecil, limpa, *thymus*, uterus/serviks (pr.)

Sumber: ICRP (1991); ICRP (2007)



Sumber: ICRP (2007)

Gambar 5.3 Tahapan dalam Penentuan Dosis Eefektif

Selanjutnya, untuk tujuan proteksi radiologis, dosis efektif yang dihitung hanya memiliki satu nilai untuk kedua jenis kelamin. Dalam hal ini, digunakan konsep orang acuan yang dosis ekuivalennya merupakan rata-rata dosis ekuivalen pria dan wanita. Dosis efektif

kemudian diperoleh dengan mengalikan dosis ekuivalen orang acuan dengan faktor bobot jaringan yang merupakan nilai yang dirata-ratakan untuk semua usia dan kedua jenis kelamin.

3. Penggunaan Dosis Efektif

Dari metode perhitungan dosis ekuivalen dan dosis efektif, tampak bahwa kedua jenis dosis ini tidak spesifik individu, tetapi berhubungan dengan orang acuan, dengan pekerja acuan dan anggota masyarakat acuan dari berbagai usia (Harrison et al., 2016). Penggunaan utama dari besaran dosis efektif pada proteksi radiasi adalah untuk mengkaji dosis prospektif pada perencanaan dan optimisasi proteksi, dan untuk mengkaji dosis retrospektif dalam menunjukkan kepatuhan pada nilai batas dosis, atau untuk membandingkannya dengan pembatas dosis atau tingkat acuan (Paquet et al., 2016).

Dengan pemahaman seperti ini, dosis efektif digunakan untuk tujuan pengawasan di seluruh dunia. Dalam aplikasi praktis proteksi radiasi, dosis efektif digunakan untuk mengelola risiko efek stokastik pada pekerja dan masyarakat umum. Perhitungan dosis efektif, dan juga koefisien konversi yang terkait untuk pajanan eksternal dan internal, harus didasarkan pada dosis serap, faktor bobot yang berlaku, dan nilai acuan yang relevan terkait organ atau jaringan yang bersangkutan

Namun, dosis efektif bukan besaran yang tepat untuk digunakan dalam studi epidemiologi risiko radiasi dan hal yang sama berlaku juga untuk dosis ekuivalen. Analisis epidemiologis memerlukan perkiraan dosis serap pada jaringan dan organ dengan sejauh mungkin memperhitungkan sepenuhnya keadaan pajanan dan karakteristik individu yang terpajan dalam populasi penelitian. Demikian pula, yang diperlukan untuk menghitung probabilitas penyebab kanker pada individu yang terpajan adalah dosis serap organ dan jaringan, bukan dosis efektif (OECD, 2016).

C. Besaran Operasional

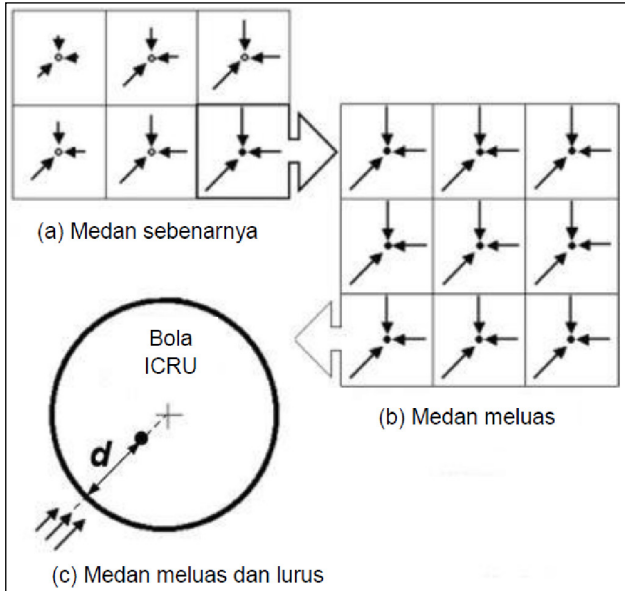
Besaran operasional adalah besaran yang digunakan untuk tujuan praktis pada pemantauan dan penyelidikan situasi yang melibatkan pajanan radiasi eksternal. Besaran operasional diperlukan untuk memperkirakan dosis ekuivalen dan dosis efektif karena kedua besaran proteksi ini tidak dapat diukur langsung.

Berbeda dengan besaran proteksi yang didefinisikan oleh ICRP (ICRP, 1977; 2007), besaran operasional disusun oleh ICRU (Harrison & Streffer, 2007). Besaran operasional ini terdiri atas besaran untuk tujuan pemantauan daerah kerja dan pemantauan individual. Untuk pemantauan daerah kerja digunakan konsep medan radiasi meluas dan lurus (ICRP, 2007). Medan radiasi meluas adalah medan radiasi di mana fluks dan distribusi sudut dan energinya memiliki harga yang sama di seluruh volume pengukuran, seperti di medan sebenarnya pada titik acuan, sedangkan medan radiasi meluas dan lurus adalah medan radiasi di mana fluks dan distribusi energinya sama seperti medan meluas, tetapi fluks tersebut satu arah. Gambar 5.4 memperlihatkan konsep kedua medan radiasi ini (ICRU, 1985).

Besaran operasional untuk tujuan pemantauan daerah kerja terdiri atas:

1) Dosis ekuivalen ambien, $H^*(d)$:

Dosis ekuivalen ambien, $H^*(10)$, pada suatu titik di medan radiasi, adalah dosis ekuivalen yang dihasilkan oleh medan radiasi lurus dan meluas pada bola ICRU di kedalaman 10 mm pada radius yang berlawanan dengan arah medan lurus. Bola ICRU adalah bola hipotesis yang terbuat dari bahan setara jaringan (diameter 30 cm) dengan kerapatan 1 g cm^{-3} dan komposisi 76,2% oksigen, 11,1% karbon, 10,1% hidrogen dan 2,6% nitrogen.



Sumber: ICRU (1985)

Gambar 5.4 Konsep Medan Radiasi untuk Besaran Operasional

Besaran ini berlaku pemantauan daerah kerja dan untuk radiasi dengan daya tembus kuat seperti gamma dan neutron. Besaran ini juga telah memadai dalam memenuhi tujuan untuk memperkirakan pemenuhan nilai batas dosis yang berlaku.

2) Dosis ekuivalen berarah, $H'(d, \Omega)$:

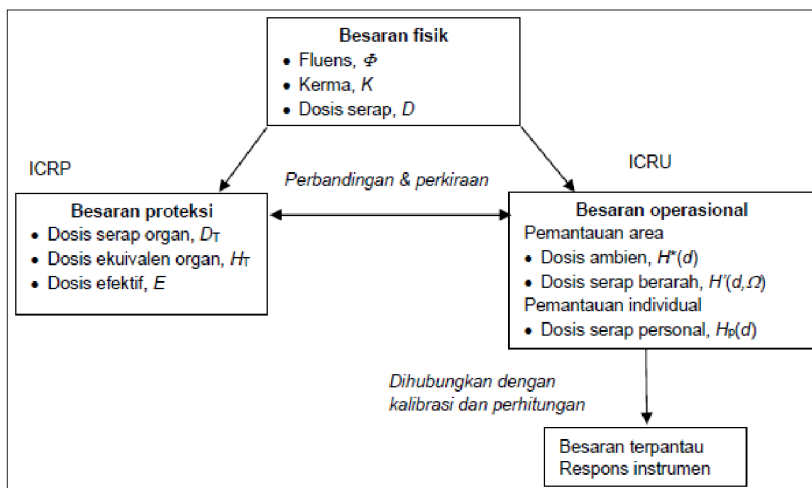
Dosis ekuivalen berarah, $H'(d, \Omega)$, pada suatu titik di medan radiasi, adalah dosis ekuivalen yang dihasilkan oleh medan meluas pada bola ICRU di kedalaman d pada arah Ω .

Besaran ini juga digunakan pada pemantauan daerah kerja, namun 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 $H'(0,07, \Omega)$.

Besaran operasional untuk pemantauan individual diberikan sebagai dosis ekuivalen individual, $H_p(d)$. 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, juga 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 $H_p(3)$.

Berdasar uraian tersebut, hubungan antara besaran proteksi dan besaran operasional terlihat pada Gambar 5.4 (ICRU, 2020).



Sumber: ICRU (2020).

Gambar 5.5 Hubungan antara Besaran Proteksi yang Diberikan pada ICRP Publikasi 103 dan Besaran Operasional yang Diberikan pada ICRU Laporan 39

Publikasi 116 ICRP (2010) yang diterbitkan bersama dengan ICRU memberikan koefisien konversi dari fluens dan kerma udara ke besaran proteksi untuk berbagai jenis partikel dan energi. Perhitungan yang diberikan pada publikasi tersebut menerapkan pemutakhiran terbaru terhadap besaran proteksi seperti yang

diberikan pada publikasi 103 ICRP (2007), juga memperkenalkan penggunaan model komputasi acuan untuk pria dan wanita dewasa, seperti yang diberikan pada publikasi 110 ICRP (2009).

Namun, beberapa tahun kemudian setelah penerbitan publikasi 116 ICRP muncul kebutuhan untuk juga mempertimbangkan partikel energi yang sangat tinggi dan sangat rendah yang tidak diakomodasi pada besaran operasional yang ada. Selain itu, besaran operasional yang ada juga diketahui memiliki beberapa ketidakkonsistenan dan keterbatasan sebagai berikut (Endo, 2016).

- 1) Definisi besaran operasional didasarkan pada dosis ekuivalen pada jaringan 4-elemen ICRU. Jaringan ini memiliki kepadatan 1 g cm^{-3} , komposisi massa 76,2% oksigen, 11,1% karbon, 10,1% hidrogen, dan 2,6% nitrogen. Masalah timbul karena jaringan seperti ini tidak dapat dibuat, selain ada pula masalah dengan beberapa aspek metrologi yang ketat.
- 2) Dosis ekuivalen didefinisikan sebagai hasil perkalian Q dengan D pada suatu titik di jaringan. Definisi yang khusus ini tidak pernah dapat diwujudkan secara eksperimental dan hanya dapat dihitung berdasarkan pengetahuan mengenai medan radiasi partikel bermuatan sekunder di titik pengamatan. Q adalah faktor kualitas pada suatu titik tertentu (ICRP, 1977), yang kemudian diubah menjadi w_R , atau faktor bobot radiasi (ICRP, 1991).
- 3) Nilai koefisien konversi untuk besaran operasional yang diberikan dalam beberapa publikasi ICRP dan ICRU dihitung dalam beberapa kasus dihitung menggunakan metode aproksimasi kerma untuk energi di mana aproksimasi ini tidak sesuai.
- 4) Jenis partikel dan rentang energi medan radiasi yang digunakan pada diagnosis medik, terapi, dan riset ilmiah telah diperluas. Pada publikasi 60 ICRP (1991), misalnya, dimasukkan sumber radiasi alami, dengan awak pesawat sebagai salah satu kelompok pekerja yang paling banyak terpajan. Demikian pula, adanya kebutuhan untuk menghitung dosis akibat pajanan pada medan radiasi di ketinggian pada penerbangan karena adanya komponen besar partikel berenergi tinggi dari radiasi kosmik. Meskipun kebutuhan ini dipenuhi pada publikasi 116 ICRP (2010) dengan

memperluas koefisien konversi dari besaran proteksi hingga 10 GeV, kenyatannya pada medan energi yang lebih tinggi besaran operasional tidak memberikan perkiraan besaran proteksi yang tepat, dan dosis efektif diperkirakan lebih rendah.

- 5) Berdasarkan studi epidemiologi terbaru, ICRP (ICRP, 2012) telah merekomendasikan untuk menurunkan nilai batas dosis ekuivalen untuk lensa mata. Untuk itu pemodelan lensa mata untuk mengkaji dosis radiasi yang diterima organ ini dalam besaran operasional $H_p(3)$ harus lebih baik.

Dalam rangka memenuhi kebutuhan perluasan rentang jenis radiasi dan energi untuk seluruh besaran operasional, seraya mempertahankan aproksimasi besaran proteksi yang tepat, ICRU bersama dengan ICRP telah melakukan definisi ulang terhadap besaran operasional, juga terhadap koefisien konversi yang terkait (ICRU, 2020). Definisi ulang menggunakan model perhitungan untuk besaran proteksi dan operasional, fantom, dan faktor bobot yang sama sehingga memastikan koherensi besaran dan aproksimasi yang tidak jauh dalam memperkirakan nilai numerik untuk jenis, energi dan arah datang yang spesifik. Seperti sebelumnya, koefisien konversi untuk foton juga dapat didefinisikan dalam kerma udara dan bukan fluens.

Definisi ulang dari besaran operasional sebagai berikut (ICRU, 2020).

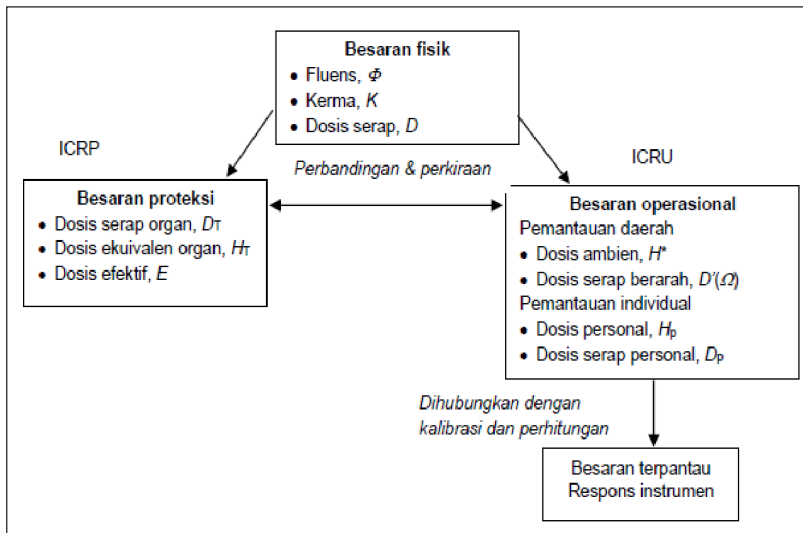
- 1) Dosis ambien, H^* , pada suatu titik di medan radiasi adalah hasil kali fluens partikel pada titik tersebut, Φ , dengan faktor konversi, h^* , yang menghubungkan fluens partikel dengan nilai maksimum dosis efektif, E_{maks} , untuk berbagai kondisi penyinaran. Satuan dosis ambien adalah $J\ kg^{-1}$, dengan nama khusus sievert (Sv).
- 2) Laju dosis ambien, \dot{H}^* , adalah hasil bagi dH^* dengan dt , dengan dH^* adalah kenaikan dosis ambien pada selang waktu dt . Satuan laju dosis ambien adalah $J\ kg^{-1}\ s^{-1}$, dengan nama khusus sievert s^{-1} (Sv s^{-1}).
- 3) Dosis serap berarah pada lensa mata, $D'_{lens}(\Omega)$, pada suatu titik di medan radiasi dengan arah datang khusus, Ω adalah hasil

kali fluens partikel pada titik tersebut, $\Phi(\Omega)$, dengan koefisien konversi, $d'_{\text{lens}}(\Omega)$, menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis serap pada lensa mata. Satuan dosis serap berarah pada lensa mata adalah J kg^{-1} , dengan nama khusus gray (Gy).

- 4) Laju dosis serap berarah pada lensa mata, $D'_{\text{lens}}(\Omega)$ adalah hasil bagi $dD'_{\text{lens}}(\Omega)$ dengan dt , dengan $dD'_{\text{lens}}(\Omega)$ adalah kenaikan dosis serap berarah di lensa mata pada selang waktu dt . Satuan laju dosis serap berarah pada lensa mata adalah $\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, dengan nama khusus gray s^{-1} (Gy s^{-1}).
- 5) Dosis serap berarah pada kulit lokal, $D'_{\text{kulit lokal},i}(\Omega)$, pada suatu titik di medan radiasi dengan arah datang khusus, Ω , adalah hasil kali fluens partikel pada titik tersebut, $\Phi(\Omega)$, dengan koefisien konversi, $d'_{\text{kulit lokal}}(\Omega)$, menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis serap pada kulit lokal. Satuan dosis serap berarah pada kulit lokal adalah J kg^{-1} , dengan nama khusus gray (Gy).
- 6) Laju dosis serap berarah pada kulit lokal, $D'_{\text{kulit lokal}}(\Omega)$, adalah hasil bagi $dD'_{\text{kulit lokal}}(\Omega)$ dengan dt , dengan $dD'_{\text{kulit lokal}}(\Omega)$ adalah kenaikan dosis serap berarah di kulit lokal pada selang waktu dt . Satuan laju dosis serap berarah pada kulit lokal adalah $\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, dengan nama khusus gray s^{-1} (Gy s^{-1}).
- 7) Dosis personal, H_p , pada pada suatu titik di medan radiasi adalah hasil kali fluens partikel yang datang pada titik tersebut, Φ , dengan faktor konversi, h_p , yang menghubungkan fluens partikel dengan nilai maksimum dosis efektif, E . Satuan dosis personal adalah J kg^{-1} , dengan nama khusus sievert (Sv).
- 8) Dosis serap personal pada lensa mata, $D'_{\text{p lens}}$, pada suatu titik di kepala atau tubuh adalah hasil kali fluens partikel yang datang pada titik tersebut, Φ , dengan koefisien konversi, $d'_{\text{p lens}}$, menghubungkan fluens partikel dengan nilai dosis serap pada lensa mata. Satuan dosis serap personal pada lensa mata adalah J kg^{-1} , dengan nama khusus gray (Gy).
- 9) Dosis serap personal pada kulit lokal, $D'_{\text{p,kulit lokal}}$, adalah hasil kali fluens partikel yang datang pada tubuh atau ekstremitas, Φ , dengan koefisien konversi, $d'_{\text{p,kulit lokal}}$, menghubungkan fluens

partikel dengan nilai dosis serap pada kulit lokal. Satuan dosis serap personal pada kulit lokal adalah $J\text{ kg}^{-1}$, dengan nama khusus gray (Gy).

Dengan definisi baru untuk besaran operasional ini, hubungan antara besaran proteksi dengan besaran operasional menjadi seperti yang diberikan pada Gambar 5.6. Hubungan besaran proteksi dan besaran operasional yang baru juga dapat diberikan seperti yang terlihat pada Tabel 5.3, dengan jenis fantom yang digunakan untuk perhitungan diberikan pada Tabel 5.4.



Sumber: ICRU (2020)

Gambar 5.6 Hubungan antara Besaran Proteksi (ICRP, 2007) dan Besaran Operasional Terbaru yang Direkomendasikan ICRU (2020)

Tabel 5.3 Hubungan Besaran Proteksi dan Besaran Operasional Rekomendasi

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

Sumber: ICRU (2020)

Tabel 5.4 Fantom untuk Menghitung Koefisien Konversi dari Besaran Lapangan (Fluens, Kerma Udara) ke Besaran Proteksi dan Besaran Operasional Rekomendasi

	Sekujur	Lensa Mata	Kulit Lokal
Besaran proteksi	Fantom acuan dewasa ICRP/ICRU sekujur (ICRP, 2009)	Model mata yang melekat pada fantom sekujur (Behrens & Dietze, 2011)	Fantom jaringan kulit 100 mm x 100 mm x 100 mm

	Sekujur	Lensa Mata	Kulit Lokal
Besaran operasional:			
Pemantauan area	Fantom acuan dewasa ICRP/ICRU sekujur	Model mata yang melekat pada fantom sekujur	Fantom slab: jaringan ICRU 300 mm x 300 mm x 148 mm, permukaan depannya dilapis dengan kulit 2 mm
Pemantauan individual	Fantom acuan dewasa ICRP/ICRU sekujur	Model mata yang melekat pada fantom sekujur	Fantom slab: Jaringan ICRU 300 mm x 300 mm x 148 mm yang dilapis dengan kulit 3 mm Fantom pilar: Jaringan ICRU \varnothing 69 mm x 300 mm, permukaan silindris dilapis dengan kulit 2 mm Fantom batang (<i>rod</i>) Jaringan ICRU \varnothing 15 mm x 300 mm, permukaan silindris dilapis dengan jaringan kulit 2 mm

Sumber: ICRU (2020)

Selanjutnya, koefisien konversi yang direkomendasikan dari fluens ke besaran operasional untuk dosis ambien, dosis personal, dosis serap berarah dan personal pada lensa mata, dosis serap berarah dan personal pada kulit lokal, besaran operasional untuk foton dengan energi hingga 50 MeV pada medan dengan kesetimbangan partikel dan kerma udara secara lengkap diberikan pada Laporan 95 ICRU (2020).

Koefisien konversi dari besaran dosimetrik ke besaran operasional dihitung dengan perangkat lunak kode transpor radiasi Monte Carlo, yang terdiri atas PHITS (*particle and heavy ion transport code system*), FLUKA, MCNP (*Monte Carlo N-Particle*), dan EGSnrc (ICRU, 2020). Dalam beberapa kode transpor radiasi ini, fantom, dan karakteristik medan radiasi (energi partikel dan sudut datang) dapat ditentukan dengan tepat. Dosis serap dihitung pada beberapa titik tertentu dari fantom dan diberi pembobotan sesuai dengan faktor bobot radiasi dan faktor bobot jaringan yang sesuai.

Umumnya, besaran fisis yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah fluens, tetapi koefisien konversi dari kerma udara juga diberikan untuk energi foton hingga 50 MeV. Fantom yang digunakan disinari dalam ruang hampa dengan berkas paralel yang seragam, dan dalam beberapa hal juga dengan medan rotasional dan isotropik.

BAB VI

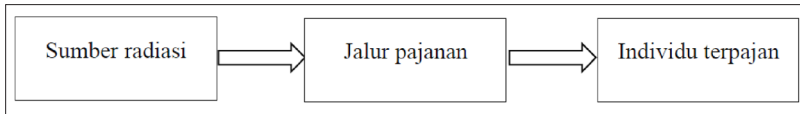
SITUASI PAJANAN RADIASI

Untuk kepentingan proteksi radiasi, proses yang menyebabkan terjadinya pajanan pada manusia akibat sumber radiasi, baik sumber alam maupun sumber buatan, dipandang sebagai “jaringan kejadian dan situasi” (ICRP, 1991). Setiap bagian dari jaringan dimulai dari suatu sumber radiasi. Radiasi atau bahan radioaktif kemudian bergerak melalui jalur lingkungan atau jalur lain menuju ke pajanan individu. Pajanan individu tersebut selanjutnya menjadi dosis individu.

Agar tidak terjadi pajanan individu, proteksi dapat dicapai dengan melakukan tindakan pada sumbernya, atau pada titik-titik di jalur pajanan, atau dengan memodifikasi lokasi atau karakteristik individu terpajan (ICRP, 2007). Untuk memudahkan pengambilan tindakan, jalur lingkungan akan meliputi pula hubungan antara sumber pajanan dan dosis yang diterima individu. Titik pengambilan tindakan memiliki efek yang penting pada sistem proteksi.

Dengan demikian, sistem proteksi radiasi berlaku pada suatu sistem pajanan, yang merupakan suatu rangkaian yang diawali dari sumber radiasi, jalur pajanan dan individu terpajan. Gambar 6.1 memperlihatkan unsur-unsur yang membentuk situasi pajanan tersebut.

Dengan pemahaman proteksi seperti uraian sebelumnya, tindakan yang dilakukan terhadap sumber radiasi, seperti menggunakan perisai radiasi, menjadi hal yang diutamakan. Sumber radiasi dapat diamankan untuk mencegah akses, dan langkah-langkah selanjutnya dapat diambil untuk menghindari agar bahan radioaktif tidak berpindah ke tempat lain atau digunakan untuk suatu tindakan yang melawan hukum.



Sumber: Cool (2015)

Gambar 6.1 Unsur-Unsur Situasi Pajanan.

Setelah melakukan tindakan proteksi pada sumber, tindakan pengendalian selanjutnya dilakukan pada jalur pajanannya ke individu. Tindakan ini bisa memerlukan waktu yang cukup lama, misalnya untuk pemrosesan limbah dari reaktor nuklir untuk menghilangkan bahan radioaktif sebelum dilepaskan ke lingkungan. Secara umum, waktu yang diperlukan di jalur pajanan bergantung pada jenis sumber, keadaan, lokasi, dan lama kehadiran individu di sekitarnya. Kombinasi sumber dan jalur pajanan menentukan besar pajanan yang diterima individu.

Untuk mengendalikan pajanan secara praktis, jaringan kejadian dan situasi yang menyebabkan terjadinya pajanan dibedakan oleh ICRP pada tahun 1991 menjadi praktik dan intervensi (ICRP, 1991). Praktik merupakan tindakan manusia yang menimbulkan atau memperbesar terjadinya pajanan dengan melakukan kegiatan yang menggunakan sumber radiasi, membuat jalur pajanan baru, atau memodifikasi jalur pajanan dari sumber yang ada ke individu. Sedangkan, intervensi adalah tindakan manusia yang dilakukan untuk mengurangi pajanan dengan memengaruhi bentuk jaringan yang ada. Tindakan intervensi dapat berupa menghilangkan sumber radiasi yang ada, memodifikasi jalur atau mengurangi

jumlah individu yang terpajan. Kedua tindakan ini dikenal sebagai pendekatan berbasis proses.

Pada tahun 2007 ICRP mengubah pendekatan berbasis proses menjadi pendekatan berbasis karakteristik situasi pajanan (ICRP, 2007). Situasi pajanan yang diperkenalkan adalah situasi pajanan terencana, darurat, dan eksisting.

A. Situasi Pajanan Terencana

Situasi pajanan terencana adalah situasi di mana tindakan proteksi radiasi dapat direncanakan sebelumnya, sebelum pajanan terjadi, dan besar serta luasnya pajanan dapat diperkirakan (ICRP, 2007). Dengan kata lain, situasi pajanan ini terbentuk sebagai akibat dari penggunaan sumber radiasi dan pengoperasiannya yang dilakukan dengan sengaja.

Dalam situasi pajanan terencana, penggunaan sumber radiasi untuk tujuan tertentu merupakan keputusan yang sengaja dibuat. Saat pengambilan keputusan ini semua aspek yang relevan dengan proteksi radiasi harus dipertimbangkan. Aspek-aspek ini mencakup, misalnya, desain, konstruksi, operasi, pajanan normal, dekomisioning, pengelolaan limbah, dan rehabilitasi lahan dan instalasi yang selesai digunakan, serta memperhitungkan pula pajanan potensial yang mungkin terjadi. Di bidang medis, situasi pajanan terencana mempertimbangkan pula pajanan medis pasien, dan pajanan yang diterima pendamping/ pemberi kenyamanan pada pasien.

1. Pajanan Kerja

Pajanan kerja dalam situasi pajanan terencana dikendalikan oleh prinsip optimisasi proteksi dengan konsep penghambat dosisnya dan prinsip limitasi dosis dengan penggunaan nilai batas dosis (ICRP, 2007). Penghambat dosis harus ditentukan pada tahap disain dari situasi pajanan terencana dan diterapkan saat pengoperasian fasilitas atau instalasi, sedangkan nilai batas dosis adalah nilai dosis efektif atau dosis ekuivalen pada individu dalam situasi pajanan

terencana yang tidak boleh dilampaui. Uraian lebih lanjut mengenai penghambat dosis dan nilai batas dosis dapat dilihat pada Bab 8.

Pada sebagian besar jenis pekerjaan dalam situasi pajanan terencana yang operasinya dikelola dengan baik, tingkat dosis individu yang mungkin diterima telah dapat diperkirakan. Informasi ini dapat digunakan untuk menetapkan penghambat dosis untuk jenis pekerjaan tersebut. Jenis pekerjaan yang seperti itu, misalnya radiografi industri, operasi rutin pembangkit listrik tenaga nuklir, atau pekerjaan di instalasi medis. Selain itu, ada pula jenis pekerjaan yang lebih spesifik sehingga penghambat dosis juga harus ditetapkan secara khusus.

Penghambat dosis di situasi pajanan terencana umumnya ditetapkan pada tingkat operasional. Saat menentukan penghambat dosis, perancang harus menentukan sumber yang terkait dengan penghambat dosis tersebut agar tidak timbul kekeliruan dengan sumber lain yang dapat menyinari pekerja dalam waktu yang bersamaan. Penghambat dosis terkait sumber untuk pajanan kerja pada situasi pajanan terencana harus ditetapkan untuk memastikan bahwa nilai batas dosis tidak dilampaui.

Pengalaman yang diperoleh dalam mengelola pekerja yang terpajan radiasi akan memberikan pilihan nilai penghambat dosis untuk pajanan kerja. Karena hal ini, banyak organisasi besar yang memiliki infrastruktur proteksi radiasi yang mapan akan menetapkan sendiri nilai penghambat dosis untuk pajanan kerja di organisasinya. Organisasi yang kecil dengan pengalaman yang lebih sedikit kemungkinan memerlukan pedoman lebih lanjut dari ahli atau badan pengawas dalam menetapkan nilai penghambat dosis bagi organisasinya.

Pada situasi pajanan terencana, setiap pekerja radiasi harus melakukan tindakan proteksi radiasi yang sesuai. Prinsip umum proteksi radiasi bagi pekerja radiasi meliputi pengendalian pajanan kerja normal dan potensial, pengendalian pajanan kerja saat terjadi kecelakaan dan kedaruratan, pengendalian pajanan kerja dari sumber alami, pemantauan dosis pekerja dan daerah kerja, dan manajemen pekerja yang menerima dosis radiasi berlebih (ICRP, 1997a).

Isu lain dalam pajanan kerja pada situasi pajanan terencana ini adalah proteksi bagi pekerja taktetap (*itinerant*) karena ada potensi tanggung jawab bersama antara beberapa pemegang izin pemanfaatan tenaga nuklir, atau juga beberapa otoritas yang berwenang. Pekerja semacam ini biasanya berada sebagai kontraktor pemeliharaan pada suatu fasilitas nuklir dan radiografi industri, tetapi bukan staf operator. Prosedur untuk melakukan tindakan proteksi bagi pekerja taktetap ini telah diberikan pada beberapa publikasi IAEA yang relevan (IAEA, 2015a; IAEA, 2018).

2. Pajanan Publik

Seperti halnya pajanan kerja, pajanan publik dalam situasi pajanan terencana dikendalikan oleh prinsip optimisasi proteksi dengan konsep penghambat dosisnya, dan prinsip limitasi dosis dengan penggunaan nilai batas dosis. Penghambat dosis untuk publik pada situasi pajanan terencana nilainya harus lebih rendah dari NBD untuk publik, biasanya ditetapkan oleh otoritas pengawas.

Untuk memastikan bahwa peningkatan dosis tahunan dari kegiatan yang berlanjut tidak menyebabkan dilampauinya nilai batas dosis di masa depan, dosis terikat dapat digunakan untuk mengendalikannya. Dosis terikat adalah dosis total yang akan dihasilkan dari suatu kejadian pada suatu waktu tertentu, seperti kegiatan terencana satu tahun yang menyebabkan terjadinya pelepasan radioaktif.

ICRP telah memberikan pedoman tentang beberapa nilai penghambat dosis yang dapat digunakan dalam kaitannya dengan pajanan publik. Untuk pengendalian pajanan publik dari pembuangan limbah radioaktif, ICRP merekomendasikan nilai penghambat dosis sebesar 0,3 mSv per tahun (ICRP, 1997b). Sedangkan, untuk pengendalian pelepasan radionuklida berumur panjang ke lingkungan, penghambat dosis yang direkomendasikan adalah 0,1 mSv per tahun (ICRP, 1999).

3. Paparan Potensial

Tingkat paparan yang terjadi pada situasi paparan terencana umumnya sudah dapat diperkirakan. Namun, jika terjadi penyimpangan dari prosedur yang telah ditetapkan, paparan tinggi mungkin dapat saja muncul. Paparan semacam ini juga dapat muncul jika terjadi kecelakaan dalam bentuk kehilangan kendali atas sumber radiasi atau ada tindakan jahat dari seseorang. Paparan yang tidak diharapkan ini disebut sebagai paparan potensial,

Paparan potensial harus dipertimbangkan pada tahap perencanaan sebelum dilakukannya kegiatan yang termasuk dalam situasi paparan terencana. Perhitungan yang tepat mengenai peluang terjadinya paparan potensial harus dilakukan selama penerapan prinsip-prinsip justifikasi dan optimisasi proteksi.

Tabel 6.1 Rentang Peluang dalam Setahun untuk Memilih Nilai Penghambat Risiko.

Dampak	Rentang Peluang
Urutan kejadian diperlakukan sebagai paparan normal	$10^{-1} - 10^{-2}$
Urutan kejadian yang hanya mengarah ke efek stokastik, tetapi di atas batas dosis	$10^{-2} - 10^{-5}$
Urutan kejadian yang mengarah ke dosis yang beberapa efeknya bersifat deterministik	$10^{-5} - 10^{-6}$
Urutan kejadian yang mengarah ke dosis di mana kematian mungkin terjadi	$<10^{-6}$

Sumber: ICRP (1993)

Jika untuk membatasi dosis yang diterima dalam optimisasi proteksi digunakan penghambat dosis, untuk membatasi dosis pada paparan potensial digunakan konsep penghambat risiko (*risk constraint*). Penghambat risiko adalah nilai terkait sumber yang memberikan nilai proteksi dasar untuk individu yang paling berisiko dari sumber.

Untuk penilaian pajanan potensial, penghambat risiko yang terkait dengan sumber harus memiliki nilai yang setara dengan risiko kesehatan yang diperkirakan oleh penghambat dosis untuk sumber yang sama. Tabel 6.1 memperlihatkan rentang peluang dalam setahun untuk memilih nilai penghambat risiko yang sesuai dengan dampak yang mungkin ditimbulkan (ICRP, 1993). Angka-angka yang tertera pada Tabel 6.1 dimaksudkan untuk menggambarkan jenis penghambat yang dapat diberlakukan berdasar pengalaman terdahulu, dengan memperhitungkan manfaat yang diperoleh saat itu. Angka-angka pada Tabel 6.1 juga dapat diberlakukan sebagai nilai penghambat risiko tentatif jika tidak ada pengalaman operasi, tetapi dapat direvisi begitu pengalaman diperoleh, dan dalam hal seperti ini nilai penghambat risiko dapat dianggap sebagai batas atas (ICRP, 1993). Patut diketahui bahwa nilai penghambat ini merujuk pada pajanan potensial individu, dan bukan pajanan potensial populasi secara keseluruhan.

B. Situasi Pajanan Darurat

Situasi pajanan darurat adalah situasi tak terduga yang dapat terjadi selama operasi dari situasi terencana, atau dari tindakan jahat, atau dari situasi tak terduga lainnya, dan memerlukan tindakan segera untuk menghindari atau mengurangi konsekuensi yang tidak diinginkan (ICRP, 2007). Situasi pajanan darurat ditandai dengan kebutuhan untuk mengelola situasi kembali ke normal, atau setidaknya situasi yang stabil dan dapat diterima. Situasi pajanan darurat memiliki satu atau lebih ciri khas berikut.

- 1) Ketidakpastian yang besar mengenai pajanan yang terjadi dan pajanan di masa mendatang.
- 2) Perubahan yang cepat dari tingkat pajanan eksisting.
- 3) Memiliki potensi pajanan yang sangat tinggi (yang berpotensi menyebabkan efek deterministik parah).
- 4) Kehilangan kendali atas sumber pajanan. dan
- 5) Terjadinya lepasan radioaktif ke lingkungan.

Masing-masing ciri tersebut dapat terus mendominasi cara bagaimana respons dikelola untuk jangka waktu yang lama (bisa berbulan-bulan atau bahkan bertahun-tahun), walaupun beberapa jenis kecelakaan memiliki jangka waktu yang cukup singkat (hitungan hari atau bahkan hitungan jam) (ICRP, 2009a).

Situasi pajanan darurat dapat disebabkan oleh berbagai jenis pemicu dan lokasi awal. Keadaan darurat dapat terjadi, misalnya, di lokasi nuklir, fasilitas medis menggunakan bahan radioaktif, lahan industri yang menggunakan atau membuat sumber radioaktif, atau mengolah bahan yang mengandung bahan radioaktif yang terjadi secara alami, *naturally occurring radioactive material* (NORM), atau selama pengangkutan bahan radioaktif yang akan digunakan untuk tujuan industri, medis, atau pembangkitan energi. Untuk berbagai situasi pajanan darurat ini strategi proteksinya dapat dibuat dan dikembangkan karena jenis dan jumlah bahan radioaktif yang terlibat dalam kecelakaan tersebut telah diketahui dan terdaftar pada otoritas pengawas.

Hal yang berbeda jika kecelakaan terjadi karena perbuatan jahat, misalnya melalui penyebaran bahan radioaktif di tempat umum, atau muncul tak terduga sebagai "sumber yatim" (sumber radiasi yang tidak memiliki izin). Penyusunan strategi proteksi yang rinci sudah tentu tidak dapat dilakukan untuk kecelakaan semacam ini karena baik jenis, jumlah maupun lokasi kejadiannya tidak pernah dapat diketahui sebelumnya. Namun, strategi proteksi yang bersifat generik dapat disusun dengan memasukkan unsur fleksibilitas di dalamnya. ICRP telah memberikan panduan untuk menyusun strategi proteksi semacam ini (ICRP, 2005a).

1. Pengaturan untuk Situasi Pajanan Darurat

Setiap kegiatan atau fasilitas harus membuat strategi proteksi untuk menangani kecelakaan radiasi atau nuklir dalam bentuk program kesiapsiagaan dan tanggap darurat radiasi yang sesuai untuk kegiatan atau fasilitasnya. Strategi proteksi untuk kecelakaan radiasi karena perbuatan jahat, umumnya dibuat oleh otoritas nasional yang

bertanggung jawab atas penanggulangan bencana dengan dibantu oleh otoritas nasional dalam pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir.

Tidak kalah penting adalah penetapan tanggung jawab berbagai lembaga atau organisasi yang terlibat dalam penanganan kecelakaan tersebut, metode untuk komunikasi antar organisasi selama melakukan tindakan tanggapan, dan kerangka kerja untuk pengambilan suatu keputusan. Otoritas nasional penanggulangan bencana harus menjadi pemimpin dalam operasi tanggap darurat kecelakaan radiasi yang bersikap nasional, dibantu oleh otoritas nasional lain yang memiliki kewenangan dalam hal pengawasan dan pemanfaatan radiasi atau nuklir.

Strategi proteksi untuk situasi pajanan darurat dapat dibedakan atas rencana kesiapsiagaan, rencana tindakan awal tanggap darurat medis, rencana tanggap darurat di lokasi kejadian, dan selanjutnya untuk tanggap darurat medis dilaksanakan di suatu fasilitas medis. Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) telah secara ekstensif menyusun berbagai publikasi dalam bentuk standar dan pedoman teknis untuk membantu dalam menyusun rencana kesiapsiagaan dan tanggap darurat ini (IAEA, t.t.2), dan juga telah menyusun berbagai materi pelatihan dengan dasar publikasi-publikasi tersebut (IAEA, t.t.3).

2. Transisi Menuju Rehabilitasi

Tindakan yang dilakukan dalam rangka tanggap darurat kecelakaan radiasi secara umum dapat dibedakan atas tiga fase, yaitu fase awal berupa penyelamatan, fase menengah dalam bentuk pemulihan, dan fase jangka panjang dalam bentuk restorasi (ICRP, 2005a). Pada fase awal, tindakan prioritas adalah penyelamatan jiwa dengan mengevakuasi manusia, sedangkan fase menengah dilakukan untuk menstabilkan lokasi kejadian dan memastikan bahwa semua bahaya langsung telah dihilangkan atau dikurangi serendah-rendahnya. Sementara itu, pada fase jangka panjang dilakukan restorasi bertahap lokasi kejadian menjadi operasi normal.

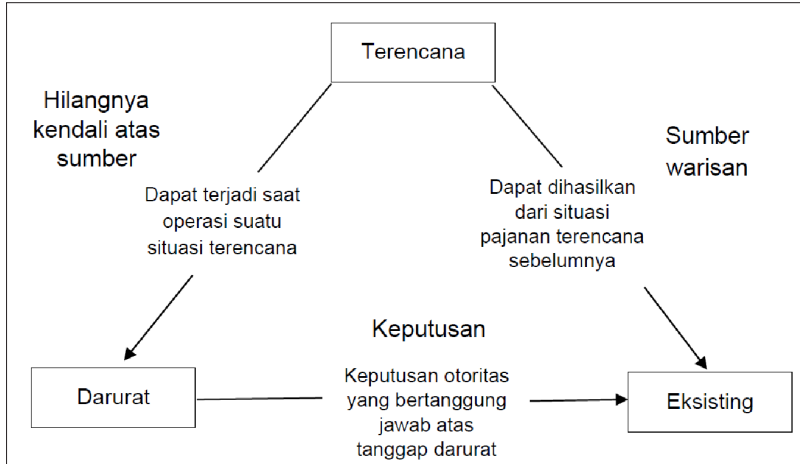
Dalam fase jangka panjang, terjadi restorasi bertahap pada lokasi kejadian menuju ke situasi operasi normal. Dalam fase ini,

tim atau manajemen tanggap darurat yang melaksanakan fase penyelamatan dan pemulihan akan menyerahkan tanggung jawab pengendalian lokasi kejadian ke otoritas yang bertanggung jawab untuk menentukan tujuan restorasi dan proses yang digunakan untuk melenyapkan semua bahaya yang tersisa ke situasi yang disepakati bersama. Otoritas terakhir selanjutnya akan mengelola lokasi kejadian sebagai situasi pajanan eksisting.

Transisi dari situasi pajanan darurat ke situasi pajanan eksisting dapat terjadi kapan saja selama situasi pajanan darurat, meskipun secara umum tidak terjadi saat tindakan segera tengah dilakukan. Selain itu, pada lokasi kejadian yang luas, transisi ini dapat terjadi tidak bersamaan dalam arti ada beberapa area yang masih dikelola sebagai situasi pajanan darurat sementara yang lain telah dikelola sebagai situasi pajanan eksisting.

Pemindahan tanggung jawab kepada pengelolaan harus dilakukan secara terkoordinasi dan sepenuhnya transparan, dan harus dipahami oleh semua pihak yang terlibat. Perencanaan transisi dari situasi pajanan darurat ke situasi pajanan eksisting juga harus dilakukan sebagai bagian dari kesiapsiagaan darurat secara keseluruhan, dan harus melibatkan pemangku kepentingan yang relevan.

Gambar 6.2 memperlihatkan proses pengambilan keputusan untuk transisi dari satu situasi pajanan ke situasi pajanan yang lain (Lochard, 2012). Seperti terlihat, situasi pajanan terencana dapat berubah menjadi situasi pajanan darurat dalam hal hilangnya kendali atas sumber yang penggunaannya direncanakan, situasi pajanan terencana berubah menjadi situasi pajanan eksisting jika sumber radiasi yang penggunaannya telah direncanakan sebelumnya, tetapi kemudian tidak dilakukan upaya proteksi sebagaimana mestinya, sementara situasi pajanan darurat berubah menjadi situasi pajanan eksisting jika lokasi kejadian kemudian dikelola dalam jangka panjang.



Sumber: Lochard (2012)

Gambar 6.2 Transisi dari Satu Situasi Pajanan ke Situasi Pajanan Lainnya

C. Situasi Pajanan Eksisting

Situasi pajanan eksisting adalah situasi pajanan dari sumber radiasi yang sudah ada ketika keputusan untuk mengendalikannya dibuat. Sumber radiasi yang termasuk dalam situasi pajanan eksisting umumnya sumber alami, seperti radiasi kosmik dalam penerbangan, radon, atau bahan radioaktif yang terjadi secara alami, *naturally occurring radioactive material* (NORM). Sumber buatan seperti area yang terkontaminasi dari kegiatan di masa lalu dan area yang terkontaminasi setelah kecelakaan nuklir juga dapat digolongkan sebagai situasi pajanan eksisting (ICRP, 2007).

Pada situasi pajanan eksisting, proteksi bagi individu yang terpajan hanya dapat diterapkan dengan tindakan yang diambil di tingkat jalur pajanan. Dalam kenyataannya, kemungkinan untuk memodifikasi jalur pajanan sangat terbatas, dan pengendalian hanya efektif dalam mengubah perilaku individu yang terpajan.

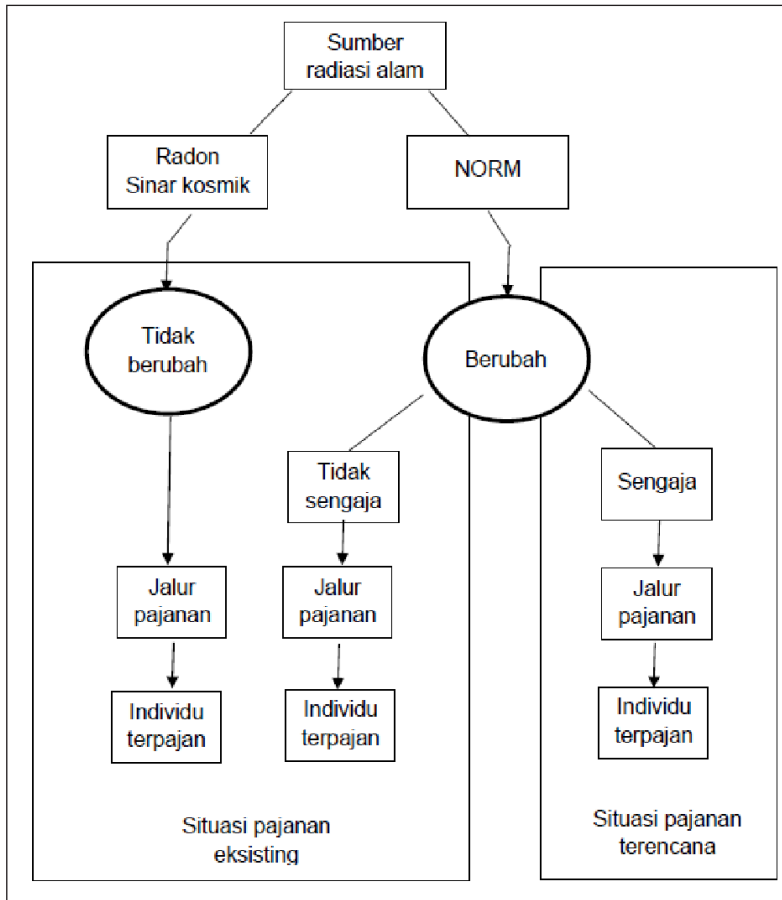
Gambar 6.3 memperlihatkan bagaimana sumber radiasi alam bisa tergolong menjadi situasi pajanan eksisting atau situasi pajanan terencana (Lochard, 2012). Baik sinar kosmik maupun radon tidak

dapat diintervensi oleh manusia sehingga tingkat pajanannya yang dari sumber tidak berubah sampai tiba di jalur pajanan. Sebaliknya, tingkat pajanan NORM bisa tetap rendah jika masih dalam bahan alam mentah, dan bisa meningkat akibat kegiatan atau intervensi manusia terhadap bahan mentah tersebut. Akibatnya, kegiatan yang dengan sengaja dilakukan manusia terhadap bahan alam yang mengandung NORM tersebut menjadikannya digolongkan sebagai situasi pajanan terencana. Sementara, NORM yang masih terikat pada bahan mentah tetap digolongkan dalam atau sebagai situasi pajanan eksisting.

1. Radon di perumahan dan daerah kerja

Isotop radioaktif radon yang berbahaya terdiri atas radon-222 (^{222}Rn) - yang tetap disebut radon, dan radon-220 (^{220}Rn) - yang disebut sebagai thoron. ^{222}Rn adalah produk peluruhan radioaktif ^{238}U , yang hadir di kerak bumi dalam berbagai konsentrasi. ^{222}Rn memiliki waktu paruh 3,82 hari dan merupakan produk peluruhan langsung dari ^{226}Ra . Sementara, ^{220}Rn adalah produk peluruhan ^{232}Th yang memiliki waktu paruh 55 detik dan merupakan produk peluruhan langsung ^{224}Ra . Dengan mempertimbangkan waktu paruhnya, thoron tidak dapat bergerak terlalu jauh dari sumbernya sehingga tingkat bahayanya jauh lebih rendah dari tingkat bahaya radon.

Selama peluruhan radioaktif, produk-produk radioaktif alam yang dihasilkan umumnya tetap berada di batuan di mana atom meluruh. Jika produk peluruhannya berbentuk gas, seperti radon, atom-atomnya akan mampu bergerak. Jika produk peluruhan terbentuk di dalam ruang berpori pada patahan atau retakan batu, radon dapat bergerak dari titik pembentukannya dan keluar ke atmosfer.



Sumber: Lochard (2012)

Gambar 6.3 Pembagian Pajanan Radiasi Alam ke dalam Situasi Pajanan Eksisting dan Situasi Pajanan Terencana

Radon dalam ruang pori bergerak terutama oleh adanya difusi dengan laju gerak bergantung pada porositas dan permeabilitas tanah, atau oleh konveksi, bergantung pada adanya retakan dan patahan.

buku ini tidak diperjualbelikan

Pergerakan radon terlarut melalui air tanah adalah mekanisme perpindahan lainnya yang cukup signifikan.

Di tempat kerja di mana pajanan radon yang diterima pekerja tidak dianggap sebagai pajanan kerja, pekerja diperlakukan dengan cara yang sama seperti anggota masyarakat untuk tujuan proteksi radiasi. Namun, jika tempat kerja tidak dapat diakses oleh publik (atau akses publik sangat terbatas), beberapa ketentuan khusus atau pelengkap dapat diterapkan dalam proses optimisasi. Ketentuan tersebut, antara lain (ICRP, 2014b)

- 1) protokol pengukuran khusus (misal, pengukuran saat dan di area para pekerja berada);
- 2) penggunaan khusus tingkat acuan turunan sesuai dengan parameter pajanan aktual, seperti waktu hunian atau faktor keseimbangan, dengan tetap menerapkan nilai 10 mSv per tahun sebagai tingkat acuan dosis;
- 3) pengaturan kondisi kerja (misal, dengan membatasi waktu hunian di beberapa tempat); dan
- 4) persyaratan terkait penerapan pengukuran, komunikasi hasil, penyimpanan catatan rekaman, dan kepatuhan dengan tingkat acuan.

Sedangkan, di tempat kerja di mana pajanan radon pada pekerja dianggap sebagai pajanan kerja, manajemen operasi dan badan pengawas perlu menentukan persyaratan yang harus dipenuhi oleh pekerja. Selain kepatuhan terhadap nilai batas dosis 20 mSv per tahun, persyaratan yang secara umum berlaku untuk pajanan radon adalah (ICRP, 2014b):

- 1) menetapkan tingkat acuan yang sesuai, dinyatakan sebagai dosis efektif, konsentrasi radon, atau konsentrasi energi alfa potensial, dengan mempertimbangkan waktu hunian;
- 2) penentuan daerah kerja yang digunakan, meskipun klasifikasi daerah pengendalian atau daerah supervisi tidak terlalu cocok digunakan di sini, penentuan daerah di mana pajanan kerja dapat terjadi tetap penting dilakukan untuk mengendalikan akses ke daerah kerja tersebut;

- 3) informasi, instruksi, dan pelatihan pekerja yang memadai;
- 4) penggunaan peralatan proteksi perorangan pada beberapa kasus tertentu;
- 5) pemantauan pajanan perorangan, pemantauan kolektif, atau, disimpulkan dari pemantauan daerah kerja jika pemantauan perorangan tidak dapat dilakukan;
- 6) rekaman pajanan;
- 7) penyediaan pengawasan kesehatan bagi pekerja;
- 8) promosi budaya proteksi radiasi; dan
- 9) kepatuhan dengan tingkat acuan.

2. NORM

Bahan radioaktif yang terjadi secara alami, *naturally occurring radioactive material* (NORM) dapat dijumpai di mana-mana dan dikandung oleh hampir semua bahan di bumi. Kegiatan manusia memiliki potensi untuk meningkatkan atau mengurangi pajanan radiasi dari NORM. Sumber utama NORM tidak dapat atau hanya sebagian yang dapat dikendalikan. Namun, sumber dapat dimodifikasi secara tidak sengaja atau sengaja (Lecomte, 2015).

Pajanan NORM terjadi sebagai akibat dari proses industri atau kegiatan manusia pada bahan alam. Kegiatan kegiatan tersebut dapat meningkatkan baik pajanan kerja maupun pajanan publik. Jenis industri NORM, antara lain

- 1) industri pertambangan dan pengolahan mineral;
- 2) produksi batubara, minyak, dan gas bumi;
- 3) beberapa industri produksi logam (thorium, niobium, zircon, titanium, dll.);
- 4) industri fosfat dan produksi bahan bangunan; dan
- 5) pengolahan air.

Industri NORM biasanya mengolah berbagai bahan mentah dan konsentrasi aktivitas, menghasilkan berbagai produk dan limbah. Industri NORM bisa menjadi penting atau tidak, bergantung pada konsentrasi aktivitas pada bahan mentah yang diproses, metode proses yang digunakan, penggunaan produk akhir, penggunaan

kembali dan daur ulang residu, dan pembuangan limbahnya. Paparan dapat terjadi selama berbagai tahap produksi atau dari penggunaan produk, residu, dan limbah. Dalam banyak hal, keberadaan bahan radioaktif dalam proses dan produk ini tidak atau kurang disadari.

Konsentrasi radioaktif dapat meningkat pada produk, produk samping, atau limbah yang dihasilkan industri NORM. Secara umum, paparan dari industri ini merupakan dosis rendah yang diterima oleh banyak orang, dan karenanya dosis populasi yang dihasilkan bisa lebih besar daripada yang berasal dari radionuklida yang diproduksi secara buatan.

Jalur utama paparan untuk NORM adalah

- 1) Paparan eksternal (sebagian besar disebabkan oleh radiasi gama, tetapi terkadang paparan radiasi beta pada lensa mata dan kulit perlu dipertimbangkan).
- 2) Paparan internal dari debu inhalasi dan, pada tingkat yang jauh lebih rendah, menelan debu radioaktif.

Pengendalian paparan individu pada industri NORM umumnya tidak diperlukan. Namun hal ini tidak berarti bahwa proteksi tidak diwajibkan, tetapi pengendalian dosis dilakukan di tempat kerja dengan memperhatikan kondisi kerjanya. Karena sulit untuk menentukan kriteria yang berlaku pada semua situasi dan kondisi kerja, pendekatan proteksi bertahap disarankan untuk dilakukan (ICRP, 2019).

Dalam praktiknya, pendekatan bertahap dapat diwujudkan melalui pemilihan tingkat acuan dosis yang sesuai, pemilihan persyaratan (yaitu, tindakan protektif yang sesuai), dan penerapan persyaratan tersebut secara terpadu. Penerapan praktis dari pendekatan ini juga akan membantu menentukan apakah pekerja harus dianggap terkena radiasi atau tidak.

Pendekatan bertahap juga dapat berfungsi sebagai dasar untuk menciptakan kesepakatan bersama mengenai aspek radiasi dari berbagai proses eksisting dan cara menanganinya secara efisien, antara badan pengawas dan pemangku kepentingan lainnya, seperti

operator, pekerja dan serikat pekerja, serta tenaga kesehatan, keselamatan, dan lingkungan.

Selain terpajan radiasi, pekerja di industri yang melibatkan NORM juga terpajan bahaya dari kontaminan lainnya (ICRP, 2019). Risiko radiasi umumnya bukan bahaya yang dominan, bahkan seringkali diabaikan. Dalam konteks ini, upaya proteksi radiasi atau budaya yang mendukungnya menjadi sesuatu yang tidak disadari. Namun, industri penghasil NORM umumnya telah memiliki pengalaman dan keahlian dalam manajemen kesehatan dan keselamatan kerja (K3), dan upaya proteksi radiasi dapat digabung ke dalam manajemen K3 tersebut. Lebih jauh, tindakan yang biasa dilakukan untuk mengurangi bahaya pada tempat kerja, seperti debu di udara, juga akan membatasi pajanan radiasi. Dengan demikian, pendekatan terpadu untuk proteksi pekerja dapat dilakukan.

buku ini tidak diperjualbelikan

BAB VII

KATEGORI PAJANAN RADIASI

Pada awal diperkenalkannya konsep proteksi radiasi pada tahun 1950-an, konsep digunakan hanya untuk mengatasi keadaan atau situasi yang saat ini disebut sebagai situasi pajanan terencana. Dengan berkembangnya pemahaman mengenai pentingnya situasi pajanan yang lain, sistem proteksi radiasi kemudian diperluas menjadi didasarkan pada tiga jenis kategori pajanan, yaitu pajanan kerja, pajanan publik, dan pajanan medis.

Seperti diperlihatkan pada Gambar 3.3, kategori pajanan berkaitan erat dengan situasi pajanan. Tabel 7.1 memperlihatkan contoh jenis pekerjaan atau pekerja yang menerima dosis radiasi dalam matriks situasi pajanan radiasi dengan kategori pajanan radiasi. Seperti terlihat, pajanan medis yang merupakan dosis radiasi yang diterima pasien hanya berlaku untuk situasi pajanan terencana. Jika terjadi kecelakaan pada aplikasi radiasi di bidang medis, pasien dikategorikan sebagai menerima pajanan publik pada situasi pajanan darurat.

Tabel 7.1 Contoh Penerimaan Dosis dalam Kaitan antara Kategori Pajanan Radiasi dengan Situasi Pajanan Radiasi

Situasi Pajanan	Pajanan Kerja	Pajanan Publik	Pajanan Medis
Situasi pajanan terencana	Bekerja di rumah sakit, tambang uranium, atau PLTN	Mengunjungi rumah sakit, tinggal di sekitar PLTN	Menerima penyinaran sinar-X, pemindaian CT, atau radioterapi
Situasi pajanan darurat	Respons kecelakaan segera	Diterima saat terjadi kecelakaan	-
Situasi pajanan eksisting	Awak pesawat atau astronot menerima radiasi kosmis	Radon di dalam rumah	-

Sumber: ICRP (t.t.)

A. Pajanan Kerja

Pajanan kerja atau sebenarnya lebih tepat pajanan kerja radiasi adalah semua pajanan radiasi yang diterima pekerja yang terjadi sebagai akibat dari pekerjaan mereka. Definisi konvensional mengenai pajanan kerja dari bahan yang berbahaya sebenarnya meliputi semua pajanan yang ada di tempat kerja, apapun jenis sumbernya. Namun, karena sifat radiasi yang menyebar, penerapan langsung dari definisi ini pada radiasi akan berarti bahwa semua pekerja harus mendapat tindakan proteksi radiasi.

Untuk mempersempit pengertian tersebut, ICRP membatasi penggunaan istilah pajanan kerja hanya untuk pajanan radiasi yang terjadi di tempat kerja sebagai akibat dari situasi yang dapat dianggap sebagai tanggung jawab manajemen operasi suatu fasilitas. Dengan demikian, pajanan kerja tidak diterima oleh semua pekerja di suatu tempat kerja yang memanfaatkan radiasi, tetapi diterima hanya oleh mereka yang langsung bekerja dengan sumber radiasi tersebut (ICRP, 2007).

Pemegang izin memiliki tanggung jawab utama untuk melindungi pekerja. Namun, beberapa pihak lain bisa mendapat tanggung jawab khusus dari pemegang izin untuk melakukan tindakan proteksi radiasi bagi pekerja. Jika pekerja terlibat dalam pekerjaan yang menggunakan sumber radiasi yang tidak berada di bawah kendali pemegang izin, penanggung jawab proteksi radiasi di tempat kerja tersebut harus bekerja sama dengan pemegang izin dalam pertukaran informasi mengenai jenis pekerjaan dan cara melakukan proteksi radiasi bagi si pekerja.

1. Pengendalian Paparan Kerja

Pekerja radiasi didefinisikan oleh IAEA sebagai setiap orang yang bekerja, secara penuh, paruh waktu atau sementara, untuk seorang pemegang izin dan telah memahami hak dan kewajibannya terkait dengan proteksi radiasi kerja (IAEA, 2022), sementara Badan Pengawas Tenaga Nuklir di Indonesia (BAPETEN) menyatakannya sebagai setiap orang yang bekerja di instalasi nuklir atau instalasi radiasi pengion yang diperkirakan menerima dosis tahunan melebihi dosis untuk masyarakat umum (Perka BAPETEN, 2013).

Salah satu fungsi penting dari pemegang izin adalah mempertahankan kendali atas sumber radiasi dan memberikan proteksi kepada pekerja yang menerima paparan radiasi. Untuk mencapai hal ini, daerah kerja dapat dibedakan atau diklasifikasikan atas daerah pengendalian dan daerah supervisi (IAEA, 2014). Daerah pengendalian merupakan suatu daerah yang memerlukan tindakan proteksi dan keselamatan spesifik untuk mengendalikan paparan atau mencegah penyebaran kontaminasi dalam kondisi kerja normal, juga untuk mencegah atau membatasi meluasnya paparan potensial. Sedangkan, daerah supervisi adalah suatu daerah yang kondisi kerjanya selalu dikaji namun tidak memerlukan tindakan proteksi dan keselamatan yang spesifik.

Pekerja radiasi di daerah pengendalian harus mendapat informasi yang penuh mengenai cara dan proses kegiatan yang diadakan di tempat kerjanya, mendapat pelatihan yang cukup dalam melakukan pekerjaannya, termasuk dalam menghadapi keadaan

bahaya, dan menerima. serta harus menjalankan pelayanan proteksi yang tepat untuk melindungi kesehatannya dari efek berbahaya radiasi. Pekerja radiasi di daerah supervisi. Sementara itu, juga mendapat dan harus menjalankan tindakan pelayanan proteksi yang relatif lebih sederhana, meski tetap harus mendapat pelatihan yang cukup untuk dapat melakukan pekerjaannya dengan baik.

2. Paparan Pekerja Hamil dan Menyusui

Sebagai seorang pekerja radiasi, wanita wajib diberikan tindakan proteksi atau pengendalian radiasi yang sama dengan yang diberikan pada pria. Namun, jika seorang wanita telah menyatakan dirinya hamil, pengendalian tambahan harus diberikan untuk melindungi embrio/janin. Metode proteksi di tempat kerja bagi wanita yang sedang hamil adalah mirip dengan yang diberikan untuk anggota masyarakat. Kondisi kerja wanita hamil, setelah kehamilannya diumumkan, harus sedemikian rupa untuk memastikan bahwa dosis tambahan untuk embrio/janin tidak akan melebihi sekitar 1 mSv selama sisa masa kehamilan (ICRP, 2007).

Berikut ini beberapa rekomendasi untuk wanita pekerja radiasi yang tengah hamil dan masih terus bekerja (ICRP, 2000):

- 1) Membatasi dosis pada konseptus tidak berarti bahwa wanita hamil harus menghindari bekerja dengan radiasi atau bahan radioaktif sepenuhnya, atau bahwa mereka harus dicegah memasuki atau bekerja di daerah radiasi yang ditentukan. Namun, pemberi kerja harus secara hati-hati meninjau kondisi paparan wanita hamil. Secara khusus, kondisi kerja mereka harus sedemikian rupa sehingga kemungkinan terjadinya penerimaan dosis radiasi yang tinggi dan/atau masuknya radionuklida tidak signifikan.
- 2) Ketika seorang pekerja radiasi medis diketahui hamil, terdapat tiga pilihan yang dapat dipertimbangkan di fasilitas radiasi medis yakni
 - a) tidak ada perubahan tugas kerja yang diberikan;
 - b) berpindah ke area lain yang paparan radiasinya mungkin lebih rendah; atau

- c) beralih ke pekerjaan yang tidak bersentuhan dengan radiasi. Tidak ada pilihan yang tepat untuk semua situasi, bahkan di negara tertentu mungkin ada peraturan khusus yang lain. Untuk ini, atasan harus membahasnya bersama dengan pekerja hamil yang bersangkutan. Pekerja harus diberi tahu tentang potensi risiko, kebijakan lokal, dan batas dosis yang direkomendasikan.
- 3) Perubahan ke posisi di mana tidak ada pajanan radiasi terkadang diminta oleh pekerja hamil yang menyadari bahwa risikonya mungkin kecil, tetapi tidak ingin menerima peningkatan risiko. Atasan juga dapat mengatur hal ini untuk menghindari kesulitan di masa depan jika pekerja melahirkan seorang anak dengan kelainan bawaan spontan (yang terjadi dengan rata-rata 3 dari setiap 100 kelahiran).
 - 4) Mengubah ke posisi yang mungkin memiliki pajanan ambien lebih rendah juga memungkinkan. Dalam radiologi diagnostik, pemindahan teknis bisa dari fluoroskopi ke pemindaian CT atau area lain di mana radiasi hambur lebih sedikit ke pekerja. Di kedokteran nuklir, teknisi hamil dapat dibatasi waktunya dalam bekerja dengan radiofarmaka atau larutan radioiodine. Dalam radioterapi dengan sumber tertutup, teknisi atau perawat hamil mungkin dapat dilarang untuk terlibat dalam brakiterapi manual.
 - 5) Pertimbangan etika dilibatkan dalam dua alternatif di atas karena pekerja lain harus menanggung pajanan radiasi tambahan karena rekan kerja hamil.
 - 6) Dalam beberapa situasi pekerja ingin terus melakukan pekerjaan yang sama, atau atasan mungkin bergantung pada pekerja untuk melanjutkan pekerjaan yang sama guna mempertahankan tingkat perawatan pasien yang biasanya diberikan oleh unit kerja. Dari sisi proteksi radiasi, hal ini dapat dipahami asalkan dosis janin dapat diperkirakan secara akurat dan berada dalam batas yang direkomendasikan, yaitu dosis janin 1 mGy setelah kehamilan diumumkan. Untuk ini, lingkungan kerja juga perlu dievaluasi untuk memberikan jaminan bahwa kecelakaan dosis tinggi tidak akan terjadi.

- 7) Nilai batas dosis untuk dosis janin dan tidak secara langsung sebanding dengan dosis yang diukur dengan dosimeter personal. Sebuah dosimeter personal yang dipakai mungkin saja memberikan estimasi dosis janin berlebih hingga 10 atau lebih. Jika dosimeter dipakai di luar apron timbal, dosis yang diukur mungkin sekitar 100 kali lebih tinggi dari dosis janin.
- 8) Terakhir, faktor selain pajanan radiasi harus dipertimbangkan dalam mengevaluasi kegiatan pekerja hamil. Dalam prosedur kerja medis, sering ada persyaratan untuk mengangkat pasien dan untuk membungkuk atau menunduk. Persyaratan semacam ini perlu dievaluasi apakah masih dapat diterima untuk dikerjakan oleh pekerja hamil tanpa mengganggu kehamilannya.

3. Pajanan Awak Pesawat Terbang

Dalam kehidupan ini bumi setiap saat dihujani oleh partikel yang berasal dari luar angkasa dan matahari. Atmosfer dan medan geomagnetik bumi memberikan perlindungan yang cukup sehingga pajanan di permukaan tanah tidak menjadi persoalan, tetapi pajanan radiasi kosmis meningkat seiring dengan ketinggian. Situasi pajanan radiasi eksisting ini dialami oleh jutaan orang yang bepergian dengan pesawat terbang dan oleh para awak pesawat terbang tersebut.

Tabel 7.2 Dosis Radiasi pada Penerbangan Paris–Beijing

Penerbangan	Tanggal	H*(10) (μSv) Terukur	H*(10) (μSv) Terhitung
Paris-Beijing	25–26 Desember 2013	48,6	48,6
Paris-Beijing	7–8 Januari 2014	49,6	50

Sumber: Desmaris (2016)

Namun, ICRP berpandangan bahwa pajanan dari radiasi kosmis merupakan bagian dari pajanan kerja pada pengoperasian pesawat terbang komersial dan pesawat ruang angkasa (ICRP, 2007). Tabel 7.2 memberikan gambaran mengenai dosis radiasi yang diterima pada suatu rute penerbangan dari Paris ke Beijing (Desmaris, 2016).

Pada Publikasi 75 yang terbit tahun 1997, ICRP mengklarifikasi rekomendasinya dengan menyatakan bahwa penetapan sebagai pajanan kerja hanya diberikan kepada awak pesawat, dan penumpang dinyatakan sebagai menerima pajanan publik (ICRP, 1997a). Sejak saat itu hingga kini ICRP menyatakan bahwa satu-satunya tindakan regulasi praktis dalam mengendalikan pajanan individu adalah melalui pengaturan waktu terbang dan pemilihan rute penerbangan.

B. Pajanan Publik

Pajanan publik adalah pajanan yang diterima publik dari sumber radiasi pada situasi pajanan terencana, situasi pajanan darurat dan situasi pajanan eksisting, selain dari pajanan kerja dan pajanan medis. Oleh karena itu, rentang sumber radiasi pada pajanan publik akan sangat besar. Komponen pajanan publik dari sumber alami merupakan yang terbesar, tetapi tidak berarti mengabaikan atau mengurangi perhatian kepada sumber buatan manusia yang lebih kecil dan mudah dikendalikan. Patut dicatat bahwa pajanan pada embrio dan janin pekerja hamil dipandang dan diatur sebagai pajanan publik.

Untuk tujuan proteksi radiasi publik, pada tahun 1977 ICRP menggunakan konsep kelompok kritis untuk mencirikan individu yang menerima dosis yang mewakili individu paling terpajan pada populasi (ICRP, 1977). Pembatasan dosis telah diterapkan pada dosis rata-rata pada kelompok kritis ini.

Namun, dalam perkembangannya kata “kritis” dianggap memiliki konotasi adanya krisis, dan kata “kelompok” juga membingungkan karena sebenarnya dosis yang dikaji adalah yang diterima individu. Untuk itu ICRP kemudian menggunakan istilah ‘orang perwakilan’ (*representative person*) untuk tujuan proteksi radiasi publik (ICRP, 2006).

Orang perwakilan bersifat hipotetis, tetapi kebiasaannya sehari-hari (seperti konsumsi bahan pangan, laju napas, lokasi, penggunaan sumber daya lokal) yang digunakan untuk mencirikan orang perwakilan merupakan kebiasaan khas dari sejumlah kecil individu yang mewakili mereka yang paling banyak menerima pajanan

dan bukan kebiasaan ekstrem dari satu anggota populasi (ICRP, 2007). Pengecualian dapat diberikan pada beberapa kebiasaan yang ekstrem atau tidak biasa, tetapi kebiasaan ini tidak boleh mengatur karakteristik dari orang perwakilan.

C. Pajanan Medis

Pajanan medis adalah pajanan yang diterima oleh pasien untuk tujuan diagnosis medis atau gigi yang mereka jalani (pajanan diagnostik) atau perawatan medis (pajanan terapi), termasuk pajanan yang diterima oleh pendamping pasien, dan yang diterima oleh relawan yang akan menerima pajanan sebagai bagian dari program penelitian biomedis.

Beberapa karakteristik dari pajanan medis memerlukan pendekatan proteksi radiasi yang berbeda dibanding pendekatan untuk situasi pajanan terencana yang lain. Dalam bidang medis, pajanan sengaja diberikan dan untuk keuntungan pasien secara langsung. Dalam radioterapi, misalnya, efek biologis dari radiasi dosis tinggi, yaitu pembunuhan sel digunakan untuk keuntungan pasien dalam mengobati kanker dan penyakit lainnya. Oleh karena itu, penerapan sistem proteksi radiasi pada penggunaan medis radiasi memerlukan pedoman terpisah.

1. Dosis Efektif Pada Pajanan Medis

Penggunaan utama dosis efektif adalah sebagai cara untuk menunjukkan kepatuhan terhadap nilai batas dosis. Dalam pengertian ini, dosis efektif digunakan untuk tujuan pengawasan di seluruh dunia. Dosis efektif juga digunakan untuk membatasi terjadinya efek stokastik (kanker dan efek yang dapat diwariskan) dan tidak berlaku untuk pengkajian kemungkinan reaksi jaringan. Pada rentang dosis di bawah nilai batas dosis efektif tahunan reaksi jaringan tidak akan terjadi (ICRP, 2007).

Namun, ICRP pada tahun 1987 telah menyatakan bahwa dosis efektif juga dapat digunakan sebagai ukuran dosis untuk pasien kedokteran nuklir yang mengakumulasi radionuklida di

berbagai organ tubuhnya, juga dapat digunakan untuk memfasilitasi perbandingan antara beberapa jenis penyelidikan radiologis medis (ICRP, 1987). Sejak itu, aplikasi besaran dosis efektif pada bidang medis telah dibahas secara luas (Harrison & Lopez, 2015; Martin, 2020).

Penerapan dosis efektif untuk pajanan medis agak berbeda dari penerapannya untuk pajanan kerja dan pajanan publik. Dalam pajanan kerja dan pajanan publik, dosis efektif digunakan untuk mengukur risiko dalam optimisasi proteksi dibawah penghambat dosis atau tingkat acuan. Sedangkan untuk pajanan medis, pajanan yang diberikan telah direncanakan, batas daerah tubuh yang akan disinari telah ditentukan, simulasi dilakukan untuk mengevaluasi dosis yang akan diterima organ tertentu, meskipun hal terakhir dilakukan dengan fantom anatomis acuan dan tidak langsung pada pasien (Martin, 2020).

Dengan demikian, distribusi dosis pada pajanan medis lebih banyak diketahui dibandingkan pada pajanan kerja. Namun, hal ini menimbulkan kesan bahwa dosis pasien diketahui lebih pasti dibandingkan dengan yang sebenarnya dan menyebabkan dilupakannya berbagai penaksiran atau pendekatan yang digunakan dalam menghitung dosis efektif tersebut (McCullough et al., 2010). Hal terakhir ini tidak dipertimbangkan dalam dosis efektif pada pajanan kerja atau publik.

Dosis efektif digunakan dalam kedokteran untuk membandingkan dosis dari prosedur medis yang berbeda, menginformasikan penilaian tentang justifikasi, dan menetapkan kendala bagi perawat dan sukarelawan dalam penelitian medis. Di mana dosis dari teknik yang sama dibandingkan, jumlah terukur lebih disukai. Dosis efektif umumnya akan digunakan pada dosis di bawah 100 mSv, tetapi penggunaannya pada dosis akut dalam kisaran hingga kira-kira 1 Sv adalah masuk akal, mengingat kemungkinan terjadinya reaksi jaringan, terutama dari distribusi dosis yang tidak seragam. Mengingat ketidakpastian yang terkait dengan proyeksi risiko terhadap dosis rendah atau laju dosis rendah, dosis efektif dapat dianggap sebagai indikator perkiraan risiko yang mungkin terjadi,

mengingat bahwa risiko kanker seumur hidup bervariasi dengan usia saat terpapar, jenis kelamin, dan kelompok populasi. Ditekankan bahwa penggunaan dosis efektif dengan cara ini bukanlah pengganti analisis risiko spesifik untuk jenis kanker individu dengan menggunakan dosis organ/jaringan. (ICRP, 2021).

2. Paparan Pasien Hamil

Sebelum dilakukan pemeriksaan dengan sinar-X, perlu diketahui pasti apakah seorang pasien wanita tengah hamil atau tidak. Kelayakan dan kinerja paparan medis selama kehamilan membutuhkan pertimbangan khusus mengingat kepekaan terhadap radiasi dari embrio/janin yang berkembang. Tabel 7.3 memberikan probabilitas untuk tidak memiliki anak dengan malformasi/kelainan bentuk dan kanker, serta bagaimana probabilitas tersebut dipengaruhi oleh radiasi (ICRP, 2000).

Tindakan yang bisa diberikan kepada wanita hamil adalah memberikan penyuluhan mengenai risiko bagi embrio/janin dari paparan radiasi. Penyuluhan dapat dilakukan setelah dilakukan upaya untuk memperkirakan dosis konseptus dari prosedur dan membandingkan risiko radiasi dengan risiko kehamilan lainnya.

Penyuluhan harus meliputi pembahasan mengenai risiko yang ada selama kehamilan, juga potensi risiko pada populasi yang tidak terpajan. Wanita yang masuk dalam populasi tak terpajan adalah mereka yang bukan pekerja radiasi, tetapi tetap menerima paparan radiasi dari sumber radiasi alam yang sekitar 0,75-1 mSv selama masa kehamilan (Dauer et al., 2015). Tabel 7.4 memperlihatkan risiko kehamilan spontan pada populasi umum.

Pasien hamil memiliki hak untuk mengetahui besar dan jenis potensi efek radiasi yang mungkin timbul dari paparan di dalam rahim. Jika pemeriksaan radiologi diagnostik secara medis diperlukan, risiko bagi seorang ibu untuk tidak melakukan pemeriksaan hampir selalu lebih besar dibanding risiko potensi bahaya bagi embrio/janin. Namun, beberapa prosedur dan beberapa radiofarmaka yang digunakan dalam kedokteran nuklir (misalnya, radioyodida) dapat meningkatkan risiko radiasi bagi embrio/janin.

Tabel 7.3 Probabilitas Mengandung Anak Sehat sebagai Fungsi Dosis Radiasi

Dosis Serap pada Janin, mGy, di Atas Radiasi Latar	Probabilitas Anak Tidak Mengalami Malformasi, %	Probabilitas Anak Tidak Mengidap Kanker (Usia 0-19 tahun), %
0	97	99,7
0,5	97	99,7
1,0	97	99,7
2,5	97	99,7
5	97	99,7
10	97	99,6
50	97	99,4
100	(mendekati 97)	99,1

Sumber: ICRP (2000)

Tabel 7.4 Risiko Kehamilan Spontan pada Populasi Umum

Jenis Risiko	Risiko Spontan*
Risiko gagal hamil awal (sebelum periode mens ~ 1 dalam 3 pertama)	
Risiko keguguran spontan pada wanita yang diketa- hui hamil	~ 1 dalam 7
Risiko malformasi bawaan	~ 1 dalam 33
Risiko cacat mental parah	~ 1 dalam 200
Risiko leukemia anak per tahun	~ 1 dalam 25.000
Risiko penyakit genetik awal atau akhir	~ 1 dalam 10
Prematuritas	~ 1 dalam 25
Retardasi pertumbuhan	~ 1 dalam 33
Lahir mati	~ 1 dalam 50-250
Infertilitas	~ 1 dalam 15 pasangan

Sumber: Dauer et al. (2015)

Sebelum menjalani terapi radiasi atau pemeriksaan intervensional abdomen, seorang pasien wanita perlu memastikan bahwa dirinya hamil atau tidak. Pada pasien hamil, kanker yang jauh dari panggul biasanya dapat dirawat dengan terapi radiasi. Namun, hal ini memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan penyinarannya. Dosis radiasi yang diterima oleh embrio/janin, termasuk komponen hamburan dari radiasi tersebut, harus dapat diperkirakan. Kanker pada panggul jarang dapat dirawat dengan radiasi terapi selama kehamilan tanpa konsekuensi parah atau mematikan bagi embrio/janin.

Penghentian kehamilan karena pajanan radiasi adalah keputusan individu yang dipengaruhi oleh banyak faktor. Dosis serap di bawah 100 mGy pada embrio/janin tidak boleh digunakan sebagai alasan untuk menghentikan kehamilan (ICRP, 2000). Pada dosis embrio/janin di atas tingkat ini, pasien hamil harus memperoleh informasi yang memadai untuk dapat membuat keputusan berdasarkan keadaan individu, termasuk besarnya perkiraan dosis embrio/janin dan konsekuensi risiko bahaya yang serius bagi embrio/janin yang berkembang dan risiko kanker di kemudian hari.

3. Pelacakan Dosis Pasien

Berdasarkan UNSCEAR, pajanan medis merupakan sumber pajanan radiasi buatan terbesar yang diterima manusia, dan terus tumbuh dengan laju yang cukup tinggi (UNSCEAR, 2010). Kontribusi terbesar berasal dari aplikasinya pada CT (*Computed Tomography*) dan tindakan intervensi yang memberikan dosis radiasi cukup tinggi. Makin pesatnya penggunaan CT dan tindakan intervensi, membuat kumulatif dosis pasien menjadi makin besar. Tabel 7.5 memperlihatkan tipikal dosis radiasi yang diterima pasien dewasa dari beberapa jenis pemeriksaan, termasuk pemeriksaan CT (ACR, t.t.).

Tabel 7.5 Dosis Radiasi pada Orang Dewasa dari Pemeriksaan Pencitraan

	Prosedur	Perkiraan Dosis Efektif (mSv)	Waktu Setara untuk Paparan Radiasi Latar
Daerah perut	CT – Perut dan panggul	7,7	2,6 tahun
	CT – Perut dan panggul, pengulangan dengan dan tanpa bahan kontras	15,4	5,1 tahun
	CT - kolonografi	6	2 tahun
	<i>Intravenous pyelogram (IVP)</i>	3	1 tahun
	Barium enema (sinar-X saluran cerna bawah)	6	2 tahun
	Studi saluran cerna atas dengan barium	6	2 tahun
Tulang	<i>Lumbar spine</i>	1,4	6 bulan
	Ekatremitas (tangan, kaki, dll.)	<0,001	<3 bulan
Sistem saraf pusat	CT – otak	1,6	7 bulan
	CT – otak, pengulangan dengan dan tanpa bahan kontras	3,2	13 bulan
	CT – kepala dan leher	1,2	5 bulan
	CT – Tulang belakang (<i>spine</i>)	8,8	3 tahun
Dada	CT – dada	6,1	2 tahun
	CT – skrining kanker tulang	1,5	6 bulan
	Sinar-X dada	0,1	10 hari
Gigi	Sinar-X gigi	0,005	1 hari
	Sinar-X panoramik	0,025	3 hari
	CT berkas kerucut (CBCT)	0,18	22 hari
Jantung	Angiografi CT koroner (CTA)	8,7	3 tahun
	CT jantung untuk skoring kalsium	1,7	6 bulan
	Angiografi CT non kardiak (CTA)	5,1	<2 tahun
Pencitraan pria	Densitometry (DEXA)	0,001	3 jam

	Prosedur	Perkiraan Dosis Efektif (mSv)	Waktu Setara untuk Paparan Radiasi Latar
Kedokteran nuklir	Protokol sekujur tomografi pancaran positron – CT (PET/CT)	22,7	3,3 tahun
Pencitraan wanita	Densitometry tulang (DEXA)	0,001	3 jam
	Skrining mammografi digital	0,21	26 hari
	3-D mammogram (skrining tomosintesis payudara digital)	0,27	33 hari

Sumber: ACR (t.t.)

Meningkatnya dosis radiasi yang diterima pasien membawa kekhawatiran akan meningkatnya potensi efek kesehatan yang tidak diinginkan pada pasien. Keadaan ini memunculkan gagasan untuk perlunya melakukan pelacakan dosis yang diterima pasien (Rehani, 2009). Pelacakan prosedur pada pasien individu akan berguna bagi proteksi pasien yang bersangkutan karena memberikan informasi klinik yang dapat menghindari pengulangan pemeriksaan yang sama yang tidak perlu. Menghindari pengulangan pemeriksaan dapat memberikan 100% pengurangan dosis bahkan jika dosis dari pemeriksaan sebelumnya tidak diperhitungkan.

Sistem pelacakan dosis pasien dilakukan dengan kartu pintar (*smart card*) yang berisi mikroprosesor yang biasa digunakan untuk proses elektronik, seperti kartu ATM. Kartu tersebut, yang diberi nama SmartRadTrack, akan memberi akses pada data yang tersimpan di suatu *server* tertentu. *Server* tersebut saat ini adalah *server* PACS (*Picture Archiving and Communication Systems*), dengan di masa depan diperkirakan adalah repositori atau registri dosis dalam *eHealth* yang tidak dapat menghilangkan identitas pasien (Rehani, 2017). Jika seorang pasien setuju untuk memiliki catatan *eHealth*, yang bersangkutan berarti menyetujui penyedia layanan kesehatan mengakses dan mengunggah dokumen klinis dirinya dalam *eHealth* tersebut.

Rehani dan Berris (2014) telah memberikan daftar butir-butir parameter untuk penerapan pelacakan paparan pasien. Butir-butir

parameter tersebut diberikan untuk berbagai tingkatan, seperti praktik, multipraktik, nasional, dan internasional. Pada tingkat praktik dibutuhkan ID pasien dan PACS yang menghubungkan semua sistem pencitraan radiologis dari semua vendor dalam praktik dengan kemampuan untuk menampilkan semua pemeriksaan pasien ketika ID pasien dimasukkan. Pada tingkat multipraktik, rumah sakit yang terhubung dengan PACS harus menggunakan ID pasien yang sama dengan konektivitas lengkap termasuk laporan dosis yang lengkap dan terstruktur. Pelaksanaan di tingkat nasional merupakan perluasan dari tingkat kabupaten/kota dan provinsi ke tingkat nasional. Begitu juga tingkat internasional merupakan perluasan dari tingkat nasional, meskipun dalam hal ini kendali akses menjadi lebih rumit karena jaringan yang digunakan akan sangat besar.

4. Rencana Aksi Internasional Proteksi Pasien

Dengan makin meningkatnya perhatian pada proteksi pasien pada pajanan medis, IAEA bekerja sama dengan pemerintah Spanyol dan beberapa organisasi internasional menyelenggarakan *International Conference on the Radiological Protection of Patients in Diagnostic and Interventional Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy* di Malaga, Spanyol, pada bulan Maret 2001. Pada konferensi internasional ini telah disusun Rencana Aksi Internasional untuk Proteksi Radiasi Pasien, yang kemudian diterapkan oleh IAEA bersama-sama dengan organisasi internasional dan organisasi profesi terkait lainnya dalam bentuk pembuatan situs tentang proteksi radiasi pasien, penyusunan bahan pelatihan yang terstruktur, berbagai projek nasional dan regional penerbitan sejumlah publikasi dan dokumen pedoman yang terkait (Rehani et al., 2011).

Untuk mengkaji dampak dari Rencana Aksi Internasional untuk Proteksi Radiasi Pasien, IAEA bekerja sama dengan pemerintah Jerman dan WHO menyelenggarakan *International Conference on Radiation Protection in Medicine: Setting the Scene for the Next Decade* di Bonn, Jerman, pada bulan Desember 2012. Dalam Konferensi Internasional ini telah disepakati suatu 'Seruan Bertindak dari Bonn'

(*Bonn Call for Action*) yang terdiri atas sepuluh butir poin berikut (IAEA, 2015b).

- 1) Meningkatkan penerapan prinsip justifikasi.
- 2) Meningkatkan penerapan prinsip optimisasi proteksi dan keselamatan.
- 3) Memperkuat peranan pabrikan dalam memberikan kontribusi bagi rezim keselamatan secara keseluruhan.
- 4) Memperkuat pendidikan dan pelatihan proteksi radiasi bagi tenaga kesehatan.
- 5) Membentuk dan mempromosikan agenda riset strategis untuk proteksi radiasi di bidang medis.
- 6) Memperluas ketersediaan informasi global tentang pajanan medis dan pajanan kerja di bidang medis.
- 7) Meningkatkan pencegahan insidensi dan kecelakaan radiasi medis.
- 8) Memperkuat budaya keselamatan radiasi dalam perawatan kesehatan.
- 9) Memupuk dialog tentang manfaat dan risiko radiasi.
- 10) Memperkuat penerapan persyaratan keselamatan secara global.

Beberapa organisasi internasional telah melakukan berbagai kegiatan untuk menerapkan Seruan Bertindak dari Bonn ini (IAEA, t.t.4). Di bawah *Traktat o Euratom*, Komisi Eropa telah menerbitkan beberapa publikasi terkait proteksi radiasi pasien di bidang pendidikan dan pelatihan, pedoman rujukan untuk pencitraan, tingkat acuan diagnostik, serta pencegahan insiden dan kecelakaan pada radiasi medis. Organisasi Internasional untuk Fisika Medis (IOMP) telah menggunakan Hari Internasional Fisika Medis dan situs webnya untuk mempromosikan “seruan” dan kegiatan yang terkait dengan sepuluh “seruan”, Masyarakat Internasional Radiologi (International society of Radiology?ISR) telah memberikan informasi mengenai “Seruan Bertindak” pada publikasi *Quality News* yang diterbitkannya, dan Komite Ilmiah PBB untuk Efek Radiasi Atom (United Nations

Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation/UNSCEAR) telah mengumpulkan data terkini terkait pajanan medis dari seluruh dunia melalui survei yang dikirim ke seluruh negara di dunia.

buku ini tidak diperjualbelikan

BAB VIII

KRITERIA PENDEKATAN DALAM PROTEKSI RADIASI

Pada ICRP publikasi 60 dinyatakan bahwa jika dosis individu berada jauh di bawah ambang batas untuk terjadinya efek deterministik, efek dari suatu sumber radiasi tidak bergantung pada efek dari sumber radiasi yang lain (ICRP, 1991). Dalam kaitan ini, setiap sumber radiasi atau kelompok sumber radiasi harus dianggap sebagai suatu entitas mandiri. Setelah itu pengkajian dosis individu yang berasal dari satu sumber radiasi atau satu kelompok sumber radiasi baru dapat dihitung.

Prosedur di atas disebut dengan pengkajian dosis 'terkait sumber' (*source-related*). Pengkajian dosis dengan pendekatan ini sangat penting karena tindakan proteksi dapat dilakukan pada sumber untuk memastikan dilakukannya tindakan proteksi terhadap kelompok individu dari sumber tersebut. Untuk situasi pajanan terencana, besaran yang digunakan dalam hal ini adalah 'penghambat dosis' (*dose constraint*), sedangkan besaran tingkat acuan digunakan untuk situasi pajanan darurat atau situasi pajanan eksisting.

Jika yang menjadi fokus adalah individu maka pengkajian dosis atau pajanan dilakukan dengan pendekatan 'terkait individu' (*individual-related*). Hal ini dilakukan dalam beberapa situasi pajanan terencana di mana diperlukan pembatasan terpisah pada

jumlah dosis dari pajanan kerja dan jumlah dosis dari pajanan publik. Besaran yang digunakan adalah nilai batas dosis.

Namun demikian, pengkajian pajanan total individu dari semua sumber jarang dilakukan. Untuk pajanan publik, pengkajian dosis biasanya dilakukan dengan membandingkannya dengan batas kuantitatif. Untuk pajanan kerja, perkiraan lebih cenderung akurat karena manajemen operasi memiliki akses ke informasi yang diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengendalikan dosis dari semua sumber yang relevan.

A. Jenis Dosis yang Dikaji

Jenis dosis yang dikaji dalam sistem proteksi radiasi (nilai batas dosis, penghambat dosis, dan tingkat acuan) dalam kaitannya dengan jenis situasi pajanan dan kategori pajanan diberikan pada Tabel 8.1 (ICRP, 2007). Sebagai catatan, dalam situasi pajanan terencana dikenal pula penghambat risiko untuk memperhitungkan pajanan potensial.

Tabel 8.1 Jenis Dosis yang Dikaji dalam Sistem Proteksi Radiasi

Jenis Situasi	Pajanan Kerja	Pajanan Publik	Pajanan Medik
Pajanan terencana	Nilai batas dosis Penghambat dosis	Nilai batas dosis Penghambat dosis	Tingkat acuan diagnostik ^d (Penghambat dosis ^e)
Pajanan darurat	Tingkat acuan ^a	Tingkat acuan	T.b ^b
Pajanan eksisting	T.b ^c	Tingkat acuan	T.b ^b

Keterangan: ^a Operasi pemulihan jangka panjang harus dipandang sebagai bagian dari pajanan kerja terencana.



^b T.b: tidak berlaku.

^c Pajanan yang berasal dari operasi pemulihan jangka panjang atau dari pekerjaan yang berlarut pada daerah terkena dampak harus dipandang sebagai bagian dari pajanan kerja terencana, meskipun sumber radiasinya merupakan pajanan eksisting.

^d Untuk pasien.

^e Untuk pendamping pasien dan relawan pada suatu riset.

Sumber: ICRP (2007)

Nilai Batas Dosis	Penghambat Dosis dan Nilai Acuan
Melindungi pekerja individu dari pajanan kerja dan Orang Pewakil dari pajanan publik	
	
Dari semua sumber terdaftar pada situasi pajanan terencana	Dari satu sumber pada semua situasi pajanan

Sumber: ICRP (2007)

Gambar 8.1 Nilai Batas Dosis Dibandingkan dengan Penghambat Dosis dan Tingkat Acuan untuk Proteksi Pekerja dan Publik

Gambar 8.1 memberikan ilustrasi mengenai perbedaan konsep antara penggunaan nilai batas dosis individu pada situasi pajanan terencana dengan penghambat dosis atau tingkat acuan untuk proteksi dari satu sumber pada semua situasi pajanan.

B. Pendekatan Terkait Sumber

Seperti terlihat pada Tabel 8.1, untuk situasi pajanan terencana, batasan terkait sumber terhadap dosis yang mungkin ditimbulkan oleh individu adalah penghambat dosis (*dose constraint*). Untuk pajanan potensial, konsep yang setara adalah penghambat risiko. Untuk situasi pajanan darurat dan eksisting, batasan terkait sumber adalah tingkat acuan.

Konsep penghambat dosis dan tingkat acuan digunakan dalam proses optimisasi proteksi untuk membantu dalam memastikan bahwa semua pajanan dijaga serendah mungkin, dengan mempertimbangkan faktor sosial dan ekonomi. Penghambat dosis dan tingkat acuan dengan demikian merupakan bagian penting dalam proses optimisasi yang akan memastikan diperolehnya tingkat proteksi yang sesuai dalam kondisi tertentu.

Pendekatan terkait sumber mungkin tidak dapat memberikan perlindungan yang memadai jika sumber radiasinya cukup banyak. Namun, dari sekian banyak sumber radiasi tersebut, diperkirakan akan ada satu yang dominan, dan penentuan penghambat dosis dan/atau tingkat acuan dosis berdasar sumber yang dominan umumnya dapat memberikan tingkat proteksi yang cukup memadai. ICRP menyatakan bahwa prinsip optimisasi terkait sumber di bawah penghambat atau tingkat acuan merupakan alat yang paling efektif dalam melakukan proteksi, apapun situasi pajanannya (ICRP, 2007).

Nilai yang dipilih untuk penghambat dosis atau tingkat acuan akan bergantung pada keadaan atau situasi pajanan terkait. Perlu pula diketahui bahwa baik penghambat dosis atau risiko, atau juga tingkat acuan, tidak berfungsi sebagai batas antara “aman” dan “berbahaya”, atau mencerminkan perubahan tahapan dalam penilaian risiko kesehatan bagi seseorang.

1. Penghambat Dosis

Penghambat dosis adalah pembatasan dosis individu dari suatu sumber yang bersifat prospektif dan terkait sumber pada situasi pajanan terencana (kecuali pada pajanan medik pasien), dan berfungsi sebagai batas atas untuk dosis yang diperkirakan diterima dalam optimisasi proteksi untuk sumber tersebut. Penghambat dosis juga merupakan tingkat dosis yang di atasnya tindakan proteksi tidak lagi optimal untuk suatu sumber pajanan tertentu, dan karenanya suatu tindakan hampir selalu harus diambil. Penghambat dosis untuk situasi terencana mewakili tingkat dasar proteksi dan akan selalu lebih rendah dari batas dosis yang bersangkutan.

Selama perencanaan kegiatan harus dipastikan bahwa sumber yang bersangkutan tidak akan memberikan pajanan yang melebihi nilai penghambat yang ditetapkan. Optimisasi proteksi akan menetapkan tingkat dosis yang dapat diterima di bawah penghambat. Tingkat optimal ini kemudian menjadi nilai yang diperkirakan akan timbul dari suatu tindakan proteksi yang direncanakan.

Tindakan yang perlu dilakukan jika penghambat dosis dilampaui, antara lain menentukan apakah proteksi telah dioptimalkan, apakah

nilai penghambat dosis yang tepat telah dipilih, dan apakah langkah lanjutan untuk mengurangi dosis ke tingkat yang dapat diterima akan diperlukan (ICRP, 2007). Untuk pajanan potensial, pembatasan terkait sumber yang terkait disebut sebagai penghambat risiko. Memperlakukan penghambat dosis sebagai nilai target tidak cukup, dan optimisasi proteksi akan diperlukan untuk menetapkan tingkat dosis yang dapat diterima di bawah nilai penghambat.

Untuk pajanan kerja, penghambat dosis adalah nilai dosis individu yang digunakan untuk membatasi rentang pilihan sehingga hanya pilihan yang menyebabkan dosis di bawah nilai penghambat yang dipertimbangkan dalam proses optimisasi. Sedangkan, untuk pajanan publik, penghambat dosis adalah batas atas dari dosis tahunan yang dapat diterima oleh anggota masyarakat dari suatu kegiatan terencana untuk sumber tertentu yang terkendali. Dalam hal ini, dapat ditekankan bahwa penghambat dosis tidak boleh digunakan atau dipahami sebagai peraturan nilai batas yang bersifat preskriptif.

2. Tingkat Acuan

Dalam situasi pajanan darurat atau eksisting, rencana kegiatan yang dapat menyebabkan terjadinya pajanan tidak boleh dibuat jika besar pajanan tersebut melampaui tingkat acuan. Karena itu, tindakan protektif harus direncanakan dan dioptimalkan. Nilai yang dipilih untuk tingkat acuan akan bergantung pada keadaan yang ada dari situasi pajanan yang berlaku.

Ketika situasi pajanan darurat telah terjadi, atau situasi pajanan yang ada telah teridentifikasi, dan tindakan protektif telah dikerjakan, dosis untuk pekerja dan anggota masyarakat dapat diukur atau dinilai. Tingkat acuan kemudian dapat berubah fungsinya sebagai pembanding sehingga pilihan proteksi yang diambil dapat dinilai secara retrospektif.

a. Tingkat Acuan Situasi Pajanan Eksisting

Tingkat acuan untuk situasi pajanan eksisting ditetapkan sekitar 1–20 mSv dari dosis yang diperkirakan dapat diterima (ICRP,

2007). Penetapan nilai tingkat acuan yang lebih rinci memerlukan pengetahuan mengenai situasi pajanan yang relevan, manfaat dari situasi pajanan terhadap individu dan masyarakat, dan kepraktisan dalam mengurangi atau mencegah pajanan yang ada, di samping pengalaman masa lalu dalam mengelola situasi pajanan yang serupa (ICRP, 2007).

Tabel 8.2 Tingkat Acuan untuk Situasi Pajanan Eksisting

Situasi Pajanan	Pajanan Kerja	Pajanan Publik
Radiasi kosmis	5-10 mSv/tahun	5-10 mSv/tahun
Radon	10 mSv/tahun	10 mSv/tahun
NORM	20 mSv/tahun	1-10 mSv/tahun
Tapak terkontaminasi	*	*
Area terkontaminasi	20 mSv/tahun	Bagian bawah dari 1-20 mSv/tahun Jangka panjang = 1 mSv/tahun

Keterangan:* Belum ditentukan.

Sumber: Lecomte (2016)

Meskipun situasi pajanan eksisting dapat menyebabkan terjadinya pajanan publik dan pajanan kerja, ICRP tidak menyarankan untuk menentukan tingkat acuan untuk setiap kategori pajanan tersebut. Namun, ICRP juga menyatakan bahwa dalam sebagian besar situasi pajanan eksisting, ada keinginan dari individu terpajan, dan dari pihak yang berwenang, untuk mengurangi pajanan ke tingkat yang mendekati atau serupa dengan situasi yang dianggap normal. Hal ini berlaku terutama untuk situasi pajanan dari bahan yang berasal dari kegiatan manusia (seperti residu NORM dan kontaminasi dari kecelakaan) (ICRP, 2007).

Tabel 8.2 memperlihatkan nilai tingkat acuan untuk berbagai situasi pajanan eksisting (Lecomte, 2016). Nilai tingkat acuan ini dapat berubah selama penerapan proses optimisasi dalam rangka

penyempurnaan tindakan proteksi radiasi yang dilakukan sesuai dengan kondisi yang berkembang.

Salah satu sumber pajanan publik adalah radiasi kosmis. Radiasi yang berasal dari luar angkasa ini secara signifikan dilemahkan oleh atmosfer bumi. Pada ketinggian jelajah pesawat terbang komersial, laju dosis rata-rata dari radiasi kosmis adalah sekitar 0,003–0,008 mSv per jam, atau sekitar dua kali lebih besar dibandingkan dengan di permukaan laut (UNSCEAR, 2010).

Mengingat bahwa jumlah penumpang akan terus meningkat, sesuai dengan kebutuhan akan bepergian ke tempat-tempat yang jauh, dan teknologi pesawat yang juga terus berkembang sehingga mampu terbang lebih lama pada ketinggian yang lebih tinggi, pajanan radiasi yang dapat diterima para awak pesawat dan penumpang juga diperkirakan akan meningkat. Untuk ini, ICRP telah membuat rekomendasi mengenai tindakan untuk individu yang mungkin dapat menerima pajanan radiasi kosmis dalam penerbangan seperti diberikan pada Tabel 8.3.

Sesuai dengan prinsip ”hak untuk tahu”, yaitu hak setiap orang untuk diberi tahu tentang potensi risiko yang mungkin mereka hadapi dalam kehidupan sehari-hari, dan nilai-nilai etika yang mendasari otonomi, keadilan, dan kehati-hatian, ICRP mendorong otoritas nasional, perusahaan penerbangan, lembaga konsumen, dan agen perjalanan untuk memberikan informasi umum tentang radiasi kosmis yang terkait dengan penerbangan (ICRP, 2016).

Informasi tentang radiasi kosmis tersebut harus mudah diakses dan menyajikan asal radiasi kosmis, pengaruh ketinggian, garis lintang, dan siklus matahari, dan menunjukkan dosis tipikal yang terkait dengan serangkaian rute penerbangan tradisional dan potensi menerima pajanan tak terduga dalam kasus *ground-level enhancements or events* (GLEs) yang sangat jarang namun cukup besar jika terjadi (ICRP, 2016). Selain itu, ICRP juga menyatakan bahwa radiasi kosmis harus dilihat secara proporsional dengan risiko kesehatan yang lain sehingga semua risiko dapat dilihat secara menyeluruh dan seseorang dapat mengambil keputusan untuk

bepergian atau tidak setelah mempertimbangkan semua risiko yang ada.

Tabel 8.3 Rekomendasi tindakan untuk individu yang menerima pajanan radiasi kosmis dalam penerbangan

	Individu Terpapar	Rekomendasi	Kategori Pajanan
Tingkat acuan pada rentang laju dosis 5-10 mSv/tahun	Penumpang sesekali	Informasi umum	Publik
	Penumpang tetap (<i>frequent flyer</i>)	Informasi umum Kaji diri dosis Inisiatif individu untuk mengatur frekuensi perjalanan	Publik*
	Awak pesawat	Informasi individu Kajian dosis individu Rekaman dosis individu Tidak ada pemeriksaan medik tambahan yang khusus Penyesuaian jadwal terbang	Kerja

Keterangan: * Beberapa kelompok penumpang tetap dapat dikelola dengan cara yang mirip dengan mereka yang terpapar di tempat kerja, diputuskan kasus per kasus sesuai dengan keadaan yang ada.

Sumber: ICRP (2016)

b. Tingkat Acuan Diagnostik

Di bidang medis, yang merupakan situasi pajanan terencana, *diagnostic reference level* (DRL) 'tingkat acuan diagnostik', sudah lama digunakan untuk mengetahui apakah dalam kondisi rutin, tingkat dosis pasien atau aktivitas radionuklida yang diberikan pada suatu prosedur pencitraan tertentu terlalu tinggi atau rendah untuk prosedur tersebut. Jika terlalu tinggi atau rendah, pengkajian awal harus dilakukan untuk menentukan apakah tindakan proteksi telah

cukup optimal atau apakah tindakan korektif perlu diperlukan. DRL tidak berlaku untuk terapi radiasi.

DRL juga tidak ada kaitan langsung dengan nilai batas dosis atau penghambat dosis. Nilai tingkat acuan dipilih berdasarkan titik persentil pada distribusi dosis pada pasien atau pada pasien rujukan. Nilai harus ditentukan oleh dokter ahli bersama dengan otoritas kesehatan dan tenaga proteksi radiasi dan dikaji secara berkala untuk menunjukkan kompromi antara kestabilan yang diperlukan dan perubahan jangka panjang dalam distribusi dosis yang teramati (ICRP, 2007).

Badan yang berwenang dapat mensyaratkan penggunaan proses DRL sebagai alat untuk menerapkan optimisasi proteksi, tetapi nilai DRL harus dipandang sebagai nilai pengingat (ICRP, 2017a). Nilai DRL harus dikaitkan dengan persyaratan klinis dan teknis yang ditentukan untuk tindakan pencitraan medis yang sesuai. ICRP merekomendasikan penetapan nilai DRL dilakukan dengan dasar survei besaran DRL yang sesuai untuk prosedur yang dilakukan pada sampel pasien yang dipilih. Dalam banyak hal, penggunaan fantom untuk menetapkan nilai DRL tidak atau kurang tepat karena efek kinerja operator tidak diperhitungkan saat fantom digunakan.

Nilai DRL tidak berlaku selamanya karena pesawat sinar-X dan perangkat lunaknya akan terus mengalami pengembangan dan peningkatan. Oleh karena itu, nilai DRL harus diperbarui secara berkala. Saat memperkenalkan suatu teknik pencitraan yang baru, nilai DRL yang sesuai harus segera dihitung dan ditetapkan (ICRP, 2017a).

Di Indonesia, nilai DRL medis ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dan disebut sebagai “Indonesian Diagnostic Reference Level (I-DRL)” atau ‘tingkat panduan diagnostik Indonesia’. Dua kumpulan I-DRL telah diterbitkan oleh BAPETEN, yaitu untuk CT-*scan* dan radiografi umum (Kepka BAPETEN, 2021) dan untuk kedokteran nuklir diagnostik dan pesawat sinar-X fluoroskopi intervensional (Kepka BAPETEN, 2022). Tabel 8.4, Tabel 8.5, Tabel 8.6, dan Tabel 8.7 masing-masing memberikan I-DRL untuk CT-*scan*, radiografi umum, kedokteran

nuklir diagnostik dan pesawat sinar-X fluoroskopi intervensional. Keempat nilai I-DRL ini berlaku untuk pasien dengan usia lebih dari 15 tahun. Dalam penetapan I-DRL ini, pihak BAPETEN telah melibatkan beberapa pemangku kepentingan, seperti Kementerian Kesehatan, pihak rumah sakit, dokter spesialis, dan fisikawan medik (BAPETEN, 2022).

Tabel 8.4 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 <i>cardiac studies</i> kontras	47	1200
CT <i>chest</i> kontras	16	810
CT <i>chest</i> nonkontras	11	430
CT <i>head</i> kontras	60	2500
CT <i>head</i> nonkontras	60	1275
CT <i>neck</i> kontras	50	2600
CT urologi nonkontras	17	830

Keterangan:

* Nilai CTDIvol merupakan rerata dari serial pemindaian setiap pasien.

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

Sumber: Kepka BAPETEN Nomor 1211/K/V/2021 (2021)

Tabel 8.5 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

Jenis Pemeriksaan	ESAK (mGy)*	INAK (mGy)**
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

Keterangan:

* 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: Kepka BAPETEN No.1211/K/V/2021 (2021)

Tabel 8.6 Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Kedokteran Nuklir Diagnostik

Jenis Pemeriksaan	Radiofarmaka	Aktivitas (MBq)
PET tumor	^{18}F FDG	340
Thyroid scan	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ pertechnetate	170
Thyroid WBS scan	^{131}I iodide	150
WBS scan	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ MIBI	1030
Renal scan	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ DTPA	200
Myocardial perfusion imaging (MPI) stress*	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ tetrafosmin, MIBI	410
Myocardial perfusion imaging (MPI) rest*	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ tetrafosmin, MIBI	410
Myocardial perfusion imaging (MPI)**	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ tetrafosmin, MIBI	1260
Bone scan	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ MDP, pyrophosphate	770

Keterangan:

* Jenis pemeriksaan tersebut dilaksanakan pada hari yang berbeda (*over two days*)

** Pemeriksaan MPI rest/stress dilakukan pada hari yang sama (*one day services*).

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

Tabel 8.7 Tingkat Panduan Diagnostik Indonesia untuk Fluoroskopi Intervensional

Jenis Pemeriksaan	Total Kerma (mGy)	Dose Area Product (Gy.cm ²)
Abdominal angiogram	140	12
Cerebral angiosgram (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

Jenis Pemeriksaan	Total Kerma (mGy)	Dose Area Product (Gy.cm ²)
Tunneled Double Lumen Catheter (TDLC)	6,5	2,7
Digital Subtraction Angiography (DSA) kepala	350	71
Endoscopic 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 Infusin (TACI) / Trans Arterial Chemo Embolization (TACE)	170	45

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

3. Faktor Pemilihan Penghambat Dosis dan Ttingkat Acuan

Untuk membantu dalam melakukan pilihan untuk menggunakan penghambat dosis atau tingkat acuan, ICRP telah memberikan panduan dalam bentuk kerangka rentang dosis untuk penghambat dan tingkat acuan berdasar karakteristik situasi pajanan (ICRP, 2007). Tabel 8.8 memberikan kerangka untuk pemilihan penghambat dosis atau tingkat acuan tersebut.

4. Nilai Numerik Terkait Situasi Pajanan Radiasi

Seperti diuraikan pada Bab VI, pembatasan dosis individu pada situasi pajanan eksisting dilakukan dengan menetapkan penghambat dosis dan tingkat acuan sebagai peringatan awal dalam menjaga agar dosis yang diterima tidak melebihi nilai batas dosis. Penetapan nilai penghambat dosis dan tingkat acuan pada dasarnya cukup sulit untuk dilakukan karena berbagai parameter yang terjadi di lapangan saat kejadian sangat menentukan dalam proses penetapan tersebut. Tabel 8.9 memperlihatkan nilai rentang dosis yang diberikan ICRP dalam menentukan nilai penghambat dosis dan tingkat acuan untuk ketiga situasi pajanan radiasi (ICRP, 2007).

Tabel 8.8 Kerangka Pemilihan Penghambat Dosis dan Tingkat Acuan

Rentang dosis^a	Karakteristik Situasi Paparan	Persyaratan Proteksi Radiasi	Contoh
Lebih besar dari 20 mSv hingga 100 mSv ^{b,c} .	Individu terpajan dari sumber yang tidak memiliki izin atau jika tindakan untuk mengurangi dosis tidak tepat. Paparan biasanya dikendalikan oleh tindakan pada jalur paparan.	Pengurangan dosis harus dipertimbangkan. Perlu diusahakan upaya lebih besar untuk mengurangi dosis begitu mendekati 100 mSv. Individu harus menerima informasi mengenai risiko radiasi dan tindakan untuk mengurangi dosis. Pengkajian dosis individu harus dilakukan.	Tingkat acuan untuk dosis residu terencana tertinggi pada keadaan darurat radiologis.
Lebih besar dari 1 mSv hingga 20 mSv	Individu biasanya menerima manfaat dari situasi paparan, tetapi tidak berarti dari paparan itu sendiri. Paparan dapat dikendalikan pada sumber, atau dengan melakukan tindakan pada jalur paparan	Informasi umum perlu diberikan agar individu dapat menurunkan dosisnya. Untuk situasi paparan terencana perlu dilakukan pelatihan dan pengkajian paparan secara individu.	Penghambat untuk paparan kerja pada situasi terencana. Penghambat untuk pen-damping pasien yang ditangani dengan radiofarmaka. Tingkat acuan untuk dosis residu terencana tertinggi dari radon di perumahan.

1 mSv atau kurang	Individu menerima dosis yang tidak bermanfaat bagi dirinya, tetapi berguna bagi masyarakat secara umum. Pajanan biasanya dikendalikan dengan tindakan yang diambil langsung pada sumber yang persyaratan proteksinya bisa direncanakan sejak awal.	Informasi umum mengenai tingkat pajanan harus tersedia. Pengecekan berkala harus dilakukan pada jalur pajanan untuk mengetahui tingkat pajanannya.	Penghambat untuk pajanan publik pada situasi pajanan terencana.
-------------------	--	--	---

Keterangan: ^a Dosis akut atau dosis tahunan.

^b Dalam situasi yang tidak normal, pekerja relawan dapat menerima dosis di atas batas ini untuk menyelamatkan nyawa, mencegah efek kesehatan yang parah akibat radiasi, atau mencegah berkembangnya kondisi bencana.

^c Situasi di mana ambang batas dosis untuk efek deterministik pada organ atau jaringan yang relevan dapat terlampaui harus selalu membutuhkan tindakan.

Sumber: ICRP (2007)

Tabel 8.10 memperlihatkan nilai numerik kriteria proteksi untuk tiga kategori pajanan berdasar tiga situasi pajanan radiasi (ICRP, 2007). Nilai ini cukup komprehensif dan menggambarkan nilai numerik dari keseluruhan aspek dari sistem proteksi radiasi direkomendasikan ICRP. Namun, nilai numerik ini disusun dengan mengacu pada pengetahuan yang dimiliki saat ini. Di masa mendatang nilai-nilai numerik ini mungkin saja berubah dan menjadi lebih kecil, sama seperti nilai yang diberikan saat ini lebih rendah dibanding dengan nilai yang diberikan sebelumnya (ICRP, 1991).

Tabel 8.9 Nilai Penghambat Dosis untuk Kategori dan Situasi Paparan Radiasi Tertentu

Rentang Dosis untuk Menentukan Nilai Penghambat Dosis dan Tingkat Acuan	Kategori Paparan dan Jenis Situasi Paparan
20 hingga 100 mSv	Tingkat acuan untuk paparan publik pada situasi paparan darurat.
1 hingga 20 mSv per tahun	<p>Penghambat dosis untuk paparan kerja pada situasi paparan terencana.</p> <p>Penghambat dosis untuk paparan medis bagi pendamping pada situasi paparan terencana.</p> <p>Penghambat dosis untuk individu yang menjalani pencitraan nonmedis yang dilakukan oleh personil medis menggunakan peralatan radiologis pada situasi paparan terencana.</p> <p>Tingkat acuan untuk pekerja pada situasi paparan eksisting.</p> <p>Tingkat acuan untuk paparan publik pada situasi paparan eksisting tertentu, misalnya paparan akibat radon di perumahan, area dengan bahan radioaktif residu.</p>
Tidak lebih dari 1 mSv per tahun	<p>Penghambat dosis untuk paparan publik pada situasi paparan terencana.</p> <p>Tingkat acuan untuk paparan publik pada situasi paparan eksisting tertentu, misalnya paparan akibat radionuklida di komoditas, seperti bahan makanan, air minum, atau bahan bangunan.</p>

Sumber: ICRP (2007)

Tabel 8.10 Kriteria Proteksi dalam Kaitannya dengan Situasi Paparan Radiasi

Kategori Paparan	Kriteria Proteksi
Situasi Paparan Terencana	
Nilai Batas Dosis	
<i>Paparan kerja</i>	20mSv/tahun dirata-ratakan selama periode 5 tahun
- Lensa mata	150 mSv/tahun
- Kulit	500 mSv/tahun
- Tangan dan kaki	500 mSv/tahun
- Wanita hamil, sisa masa kehamilan	1 mSv pada embrio/janin
<i>Paparan publik</i>	1 mSv dalam setahun
- Lensa mata	15 mSv/tahun
- Kulit	50 mSv/tahun
Penghambat Dosis	
<i>Paparan kerja</i>	≤ 20 mSv/tahun
<i>Paparan publik</i>	Dipilih di bawah 1 mSv/tahun
- umum	Sesuai dengan situasi
- pembuangan limbah radioaktif	$\leq 0,3$ mSv/tahun
- pembuangan limbah radioaktif berumur panjang	$\leq 0,3$ mSv/tahun
- paparan berkepanjangan	$< \sim 1$ & $\sim 0,3$ mSv/tahun
- komponen panjang dari nuklida berumur panjang	$\leq 0,1$ mSv/tahun
<i>Paparan medik</i>	
Relawan untuk untuk riset biomedik, jika bermanfaat bagi masyarakat, adalah:	
- minor	< 1 mSv
- menengah	0,1-1 mSv
- moderat	1-10 mSv
- substansial	> 10 mSv

- pendamping/pemberi kenyamanan	5 mSv per kegiatan
Situasi Paparan Darurat	
Tingkat Acuan	
<i>Paparan kerja</i>	
- penyelamatan nyawa (relawan sadar)	Tidak ada batasan dosis jika manfaat bagi orang lain melebihi risiko bagi penyelamat
- operasi penyelamatan segera yang lain	1000 atau 500 mSv
- operasi penyelamatan yang lain	≤100 mSv
<i>Paparan publik</i>	
- semua tindakan pencegahan (pembatasan konsumsi bahan makanan, distribusi iodine stabil, berlindung, evakuasi sementara, relokasi permanen) digabung dalam satu strategi proteksi secara keseluruhan	Dalam perencanaan, umumnya antara 20 dan 100 mSv/tahun sesuai dengan situasi
Situasi Paparan Eksisting	
Tingkat acuan	
<i>Radon</i>	
- di perumahan	< 10 mSv/tahun (<600 Bq/m ³)
- di tempat kerja	< 10 mSv/tahun (<1500 Bq/m ³)
<i>NORM, radiasi latar alami, residu radioaktif di habitat manusia</i>	
Intervensi:	
- tidak dapat dibenarkan	Antara 1 dan 20 mSv/tahun
- mungkin dapat dibenarkan	sesuai dengan situasi
- hampir selalu dapat dibenarkan	

Sumber: Modifikasi ICRP (2007)

Tabel 8.11 Nilai Batas Dosis pada Situasi Paparan Terencana^a

Jenis Nilai Batas	Pekerja	Publik
Dosis efektif	20 mSv per tahun, dirata-ratakan selama periode 5 tahun ^e	1 mSv per tahun ^f
Dosis ekuivalen tahunan, pada:		
Lensa mata ^b	20 mSv	15 mSv
Kulit ^{c,d}	500 mSv	50 mSv
Tangan dan kaki	500 mSv	-

Keterangan: ^a Nilai batas dosis efektif berlaku untuk penjumlahan dosis akibat paparan eksternal dengan dosis terikat dari paparan internal akibat masukan radionuklida pada periode yang sama. Untuk orang dewasa, dosis efektif terikat dihitung untuk periode 50 tahun setelah masukan, sedangkan untuk anak-anak dihitung untuk periode hingga usia 70 tahun.

^b Sampai diterbitkannya ICRP Publikasi 103 (ICRP, 2007), nilainya masih 150 mSv per tahun. Namun, nilai ini kemudian diturunkan menjadi 20 mSv per tahun karena dosis ambang untuk terjadinya katarak diyakini sebesar 0,5 Gy (ICRP, 2012).

^c Nilai batas dosis efektif memberkan proteksi yang cukup untuk kulit terhadap efek stokastik.

^d Dirata-ratakan untuk luasan kulit 1 cm² di manapun areanya.

^e Dengan ketentuan tambahan bahwa dosis efektif tidak melebihi 50 mSv dalam satu tahun. Pembatasan tambahan berlaku bagi paparan kerja pada wanita hamil.

^f Pada keadaan tertentu, nilai dosis efektif yang lebih tinggi dapat diizinkan dalam satu tahun, asal rata-rata dalam 5 tahun tidak melebihi 1 mSv per tahun.

Sumber: ICRP (2007).

C. Pendekatan Terkait Individu

Seperti terlihat pada Gambar 8.1, nilai batas dosis merupakan besaran yang digunakan pada pendekatan terkait individu. Nilai batas dosis (NBD) adalah nilai dosis efektif atau dosis ekuivalen pada individu dalam situasi paparan terencana yang tidak boleh dilampaui. Nilai batas dosis efektif berlaku untuk penjumlahan dosis akibat paparan eksternal dengan dosis terikat dari paparan internal akibat masukan radionuklida. NBD yang direkomendasikan ICRP

(2007 dan diadopsi di Indonesia (Perka BAPETEN, 2013) diberikan pada Tabel 8.11.

NBD tidak berlaku pada situasi pajanan darurat di mana individu yang telah memahami bahaya radiasi terlibat dalam tindakan penyelamatan jiwa secara sukarela atau berupaya mencegah terjadinya situasi bencana. Untuk relawan seperti ini yang melakukan operasi penyelamatan yang mendesak, pembatasan dosis yang biasa mungkin dapat dilonggarkan. Namun, orang yang melakukan operasi pemulihan dan restorasi pada tahap situasi pajanan darurat tahap lanjut harus dianggap sebagai pekerja yang menerima pajanan kerja dan harus mendapat proteksi sesuai dengan standar proteksi radiasi kerja normal, dan pajanan yang diterimanya tidak boleh melebihi NBD yang berlaku. Dalam situasi pajanan darurat ini, pekerja wanita hamil, merasa sedang hamil atau sedang menyusui dilarang terlibat dalam tindakan penyelamatan karena mereka menerima tindakan proteksi khusus untuk melindungi janin dan bayinya.

NBD untuk mencegah terjadinya efek reaksi jaringan atau deterministik diberikan dalam besaran dosis ekuivalen. Hal ini dilakukan dengan asumsi bahwa nilai *relative biological effectiveness* (RBE) ‘keefektifan biologis relatif’ yang relevan untuk efek deterministik selalu lebih rendah dibanding nilai faktor bobot radiasi (w_R) untuk efek stokastik (ICRP, 2007). Dengan asumsi ini, diyakini bahwa NBD memberikan proteksi yang sama terhadap radiasi dengan LET tinggi seperti terhadap radiasi dengan LET rendah. RBE adalah nisbah dosis radiasi acuan yang memiliki LET rendah dengan dosis radiasi yang dianggap memberikan efek biologis yang identik.

Namun, seperti diuraikan sebelumnya pada Bab 5, dosis ekuivalen merupakan ”dosis antara” untuk menghitung dosis efektif yang hanya berlaku untuk efek stokastik lanjut dan tidak berlaku untuk efek reaksi jaringan. Sementara itu, titik akhir dari efek stokastik adalah kanker atau efek herediter (UNSCEAR, 2015), bukan kematian sel yang merupakan titik akhir dari efek deterministik. Oleh karena itu, nilai batas untuk mencegah terjadinya efek reaksi jaringan atau deterministik akan lebih tepat jika diberikan dalam

besaran dosis serap (dengan satuan Gy) dan bukan dosis ekuivalen (dengan satuan Sv) (Kleiman, 2012).

buku ini tidak diperjualbelikan

BAB IX

PROTEKSI RADIASI LINGKUNGAN

Pada publikasi 60, ICRP menyatakan keyakinannya bahwa standar pengendalian lingkungan yang diperlukan untuk melindungi manusia sampai pada tingkat yang diinginkan saat ini dijamin tidak berisiko bagi spesies lain (ICRP, 1991). Disadari bahwa kadang-kadang anggota individual spesies nonmanusia mungkin dalam bahaya, tetapi dipercayai bahwa hal ini tidak akan sampai membahayakan seluruh spesies atau menimbulkan ketidakseimbangan antara spesies.

Sejak rekomendasi pada publikasi 60 tersebut dikeluarkan, perhatian kepada lingkungan menjadi meningkat, dan berbagai metode pengkajian lingkungan telah dikembangkan dengan cukup variatif. Dengan alasan tersebut, ICRP telah mencoba untuk memberikan pedoman dalam isu proteksi radiasi lingkungan ini (ICRP, 2007).

Namun, rekomendasi tahun 2007 terbatas hanya menyatakan keinginan ICRP untuk membuat kerangka sistem proteksi yang lebih jelas. Kerangka awal sebelumnya telah menyatakan bahwa pendekatan untuk membuat suatu sistem proteksi radiasi lingkungan akan mirip dengan pendekatan yang digunakan dalam mengembangkan sistem proteksi manusia (ICRP, 1991).

A. Kerangka Umum Proteksi Radiasi Lingkungan

Kerangka kerja sistem proteksi radiasi lingkungan yang diusulkan pada ICRP Publikasi 103 (2007) dikembangkan lebih lanjut dalam Publikasi 108 (ICRP, 2008) dengan menjelaskan konsep dan penggunaan sekumpulan kecil hewan dan tanaman acuan (RAPs, *reference animals and plants*) untuk menggali isu-isu yang mengaitkan pajanan dengan dosis, dan dosis dengan efek untuk beberapa jenis hewan dan tanaman.

Deskripsi mengenai hewan dan tanaman acuan tersebut—yang meliputi data efek radiasi yang relevan—sejumlah istilah baru dan nilai numerik, seperti konversi dosis spesifik RAP untuk berbagai radionuklida, dan tingkat acuan tertimbang turunan (DCRLs, *derived consideration reference levels*) sebagai titik awal untuk melakukan optimisasi tingkat proteksi, diberikan pada Publikasi 108 (ICRP, 2008).

Lebih lanjut, kumpulan data keseluruhan untuk RAPs telah diperluas dengan kompilasi faktor transfer yang relevan (rasio konsentrasi), yang menggambarkan hubungan antara konsentrasi lingkungan dari sejumlah radionuklida dan konsentrasinya pada hewan dan tanaman tersebut (ICRP, 2009).

1. Tujuan Proteksi Radiasi Lingkungan

Berdasarkan ICRP, tujuan proteksi lingkungan adalah untuk mencegah atau mengurangi frekuensi efek radiasi yang merusak pada biota ke tingkat di mana dampaknya dapat diabaikan untuk memelihara keanekaragaman hayati; konservasi spesies; atau kesehatan dan status habitat, komunitas dan ekosistem alami (ICRP, 2007).

Titik awal untuk melakukan tindakan proteksi radiasi lingkungan adalah adanya tiga situasi pajanan radiasi yang berbeda dan tujuan proteksi lingkungan tersebut. Berdasarkan hal ini, beberapa pertanyaan muncul (Pentreath et al., 2015).

- 1) Efek biologis radiasi yang mana yang relevan?
- 2) Ke komponen lingkungan mana (hewan atau tanaman) proteksi dilakukan?

- 3) Bagaimana cara mengetahui berapa besar dosis yang diterima hewan dan tanaman?
- 4) Bagaimana cara mengetahui efek radiasi yang diterima hewan dan tanaman?
- 5) Bagaimana cara mengetahui bahwa tujuan proteksi telah tercapai?

Efek atau titik akhir biologis radiasi yang relevan kemudian disepakati oleh para ilmuwan sebagai efek yang dapat menyebabkan perubahan ukuran atau struktur populasi. Namun demikian, radiasi memengaruhi individu, dan sebagian besar data tentang efek radiasi yang ada ternyata berkaitan dengan individu dan bukan dengan populasi (ICRP, 2014a).

Titik akhir biologis yang berarti bagi individu yang dapat memiliki konsekuensi pada tingkat populasi adalah sebagai berikut (ICRP, 2014a).

- 1) kematian dini (menyebabkan perubahan dalam distribusi usia, angka kematian, dan kepadatan penduduk);
- 2) beberapa bentuk morbiditas (yang dapat mengurangi kebugaran individu, membuatnya lebih sulit untuk bertahan hidup di lingkungan alami);
- 3) gangguan kapasitas reproduksi baik dengan penurunan kesuburan atau fekunditas (memengaruhi angka kelahiran, distribusi usia, jumlah, dan kepadatan); dan
- 4) induksi kerusakan kromosom.

Pengelompokan efek ke dalam efek stokastik dan reaksi jaringan seperti pada proteksi radiasi manusia tidak dapat diterapkan untuk mengkaraterisasi titik akhir biologis untuk hewan dan tanaman. Konsekuensi biologis yang lebih luas akan lebih berguna terutama pada tingkat populasi. Tidak akan ada efek pada tingkat populasi jika tidak ada efek yang terjadi pada salah satu individu dari populasi, meskipun kebalikannya tidak selalu terjadi. Hal terakhir disebabkan karena efek yang dapat dideteksi pada beberapa anggota populasi belum tentu memiliki konsekuensi bagi populasi secara keseluruhan (ICRP, 2014a).

Karena keragaman biota yang begitu besar dan juga responsnya terhadap radiasi yang sangat beragam, sistem proteksi yang dikembangkan harus memiliki beberapa titik acuan utama yang kemudian dapat dihubungkan dengan elemen dasar kerangka proteksi secara bersama-sama. Sistem ini akan sangat berguna di masa berikutnya saat data yang terkumpul menjadi lebih besar. Keuntungan dari pendekatan sistematis semacam ini adalah bahwa saat kebutuhan untuk mengubah setiap komponen sistem muncul (seperti diperolehnya data ilmiah baru, perubahan sikap masyarakat, atau pengalaman yang diperoleh dalam penerapan praktisnya), konsekuensi perubahan sejenis di tempat lain di dalam sistem, atau pada sistem secara keseluruhan, dapat dipertimbangkan (ICRP, 2014a).

2. Hewan dan Tanaman Acuan

Tujuan penetapan hewan dan tanaman acuan terutama adalah untuk menciptakan kerangka kerja di mana suatu hubungan tertentu dapat dipelajari dan digali dengan cara yang konsisten sehingga dapat menjadi dasar dalam pembuatan keputusan (ICRP, 2008). Hubungan tersebut, antara lain adalah hubungan antara pajanan dan dosis dalam situasi pajanan yang berbeda, kecukupan pemodelan dosimetri untuk jenis biota yang berbeda dan efek radiasi yang berbeda yang dapat terjadi, dan bagaimana efek radiasi yang berbeda dapat memengaruhi biologi mereka dan kelangsungan hidupnya dengan cara yang berbeda.

Dengan menyatukan berbagai informasi tersebut secara yang konsisten, pertimbangan dalam bentuk DCRLs atau nilai dosimetri mana yang digunakan untuk mengoptimalkan upaya untuk proteksi lingkungan dengan situasi pajanan yang berbeda, dapat diberikan.

Agar konsisten dengan konsep awal manusia acuan, hewan dan tanaman acuan juga didefinisikan sebagai entitas hipotetis dengan asumsi karakteristik biologis dasar dari jenis hewan atau tanaman tertentu, seperti diuraikan pada tingkat taksonomi umum famili,

dengan sifat anatomis, fisiologis dan riwayat hidup tertentu, yang dapat digunakan untuk tujuan menghubungkan pajanan dengan dosis, dan dosis dengan efek, untuk jenis organisme hidup tersebut (ICRP, 2007).

Dalam memilih kumpulan hewan dan tanaman (atau biota) acuan, beberapa hal berikut ini telah dipertimbangkan (ICRP, 2008).

- 1) sejumlah informasi radiobiologis dari biota acuan sudah tersedia, termasuk data tentang efek radiasi yang dialami;
- 2) biota dapat diteliti lebih lanjut di masa mendatang untuk mendapatkan data yang hilang atau tidak tepat, khususnya yang berkaitan dengan efek radiasi;
- 3) biota dianggap sebagai fauna atau flora khas yang mewakili ekosistem tertentu dan memiliki variasi geografis yang luas;
- 4) biota dapat menerima pajanan radiasi dari berbagai radionuklida dalam situasi tertentu, baik sebagai hasil dari bioakumulasi dan sifat lingkungannya, maupun karena masa hidup, siklus hidup, dan biologi umum biota secara keseluruhan;
- 5) siklus hidup biota dapat memiliki beberapa relevansi untuk mengevaluasi dosis total atau laju dosis, dan untuk menghasilkan berbagai jenis respons efek-dosis;
- 6) pajanan radiasi biota dapat dimodelkan menggunakan geometri yang relatif sederhana;
- 7) setiap efek pada tingkat organisme individu yang terkait dengan pajanan radiasi dapat diidentifikasi (bakteri dan organisme uniseluler tidak termasuk karena daya tahannya yang tinggi terhadap radiasi); dan
- 8) biota telah cukup dikenal sehingga pembuat keputusan dan masyarakat umum mengetahui dengan jelas apa sebenarnya organisme tersebut.

Tabel 9.1 memberikan jenis hewan dan tanaman yang terpilih sebagai acuan, sedangkan Tabel 9.2 menguraikan karakteristik populasinya, yaitu reproduksi selama masa hidupnya, rasio gender, fekunditas², dan ukuran total. Karakteristik populasi ini perlu diingat ketika mempertimbangkan konsekuensi potensial dari setiap efek radiasi yang diduga terjadi.

Wilayah geografis untuk mendukung populasi juga relevan. Setiap pemodelan ekosistem untuk efek radiasi di masa depan perlu diawali dengan asumsi dasar tentang parameter populasi dasar seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9.2. Pemodelan dilakukan untuk menghubungkan berbagai kategori efek radiasi yang diamati pada individu atau kelompok individu, dan untuk efek yang mungkin terjadi pada tingkat populasi atau komunitas populasi yang berbeda.

Tabel 9.1 Tanaman dan Hewan Acuan

Terrestrial	Kelautan	Air Tawar
Rusa: mamalia darat besar	Ikan pipih; ikan laut	Katak: amfibi
Tikus: mamalia darat kecil	Kepiting; krustasea laut	Bebek: burung akuatik
Pohon pinus: tanaman terestrial besar	Rumput laut coklat:	<i>Trout</i> : ikan air tawar
Rumput: tanaman terestrial kecil	rumput laut	
Cacing tanah: anelida terestrial		
Lebah: serangga darat		

Sumber: Higley (2018)

² Fekunditas adalah kemampuan untuk menghasilkan banyak keturunan atau pertumbuhan baru.

Tabel 9.2 Karakteristik Populasi Dasar untuk Hewan dan Tanaman Acuan

Hewan atau Tanaman Acuan	Karakteristik Populasi
Rusa (<i>Cervidae</i>)	Iteroparous ³ , kohort berbeda, rasio betina: jantan tinggi, fekunditas rendah, jumlah populasi <500.
Tikus (<i>Muridae</i>)	Iteroparous, rasio gender sama, fekunditas tinggi, jumlah populasi <1000.
Bebek (<i>Anatidae</i>)	Iteroparous, kohort berbeda, rasio gender sama, fekunditas rendah, jumlah populasi <500.
Katak (<i>Ranidae</i>)	Iteroparous, kohort berbeda, rasio gender sama, fekunditas tinggi, jumlah populasi <500.
<i>Trout</i> (<i>Salmonidae</i>)	Iteroparous, kohort berbeda, rasio gender sama, fekunditas tinggi, jumlah populasi <500.
Ikan pipih (<i>Pleuronectidae</i>)	Iteroparous, kohort berbeda, rasio gender sama, fekunditas tinggi, jumlah populasi <10.000.
Lebah (<i>Apidae</i>)	Semelparous (untuk jantan), rasio betina: jantan tinggi, fekunditas tinggi, jumlah populasi <10000.
Kepiting (<i>Cancridae</i>)	Iteroparous, kohort berbeda, rasio gender sama, fekunditas tinggi, jumlah populasi >500.
Cacing tanah (<i>Lumbricidae</i>)	Iteroparous, hermafrodit, fekunditas tinggi, jumlah populasi >10.000.
Pohon pinus (<i>Pinaceae</i>)	Iteroparous, pembentuk kanopi, fekunditas tinggi, ukuran populasi >1000.
Rumput liar (<i>Poaceae</i>)	Iteroparous, fekunditas tinggi, abadi dengan tumbuh kembali tahunan, ukuran populasi >1000.
Rumput laut coklat (<i>Cyclosporea</i>)	Iteroparous, rekrutmen rendah untuk populasi dewasa, ukuran populasi >1000.

Sumber: ICRP (2014a)

³ Iteroparous mengandung arti hewan yang mampu menghasilkan keturunan lebih dari sekali selama hidupnya, atau tanaman yang mampu menghasilkan bunga dan buah lebih dari satu kali sebelum mati.

3. Tingkat Acuan Tertimbang Turunan

Tingkat acuan tertimbang turunan (DCRLs, *derived consideration reference levels*) adalah pita laju dosis radiasi yang jika nilai laju dosis di dalam pita diterima oleh hewan atau tanaman acuan dapat menyebabkan terjadinya efek yang merugikan pada hewan atau tanaman acuan tersebut. Tujuan utama DCRLs adalah untuk dapat mengevaluasi dosis dan laju dosis yang terjadi dan kemudian membandingkannya dengan nilai DCRLs yang ditetapkan untuk tujuan proteksi lingkungan (ICRP, 2017b).

Tabel 9.3 menguraikan dasar penetapan DCRL menggunakan data hipotetis dan berdasarkan penalaran yang tercantum dalam publikasi 108 (ICRP, 2008). Pendekatan ini sesuai dengan meningkatnya efek saat menjadi nyata pada tingkat organisasi biologis yang lebih tinggi. Untuk dua belas hewan dan tanaman acuan yang telah ditentukan, DCRL kemudian dapat dibagi atas tiga pita: 0,1–1 mGy/hari (rusa, tikus, bebek, pohon pinus); 1–10 mGy/hari (katak, *trout*, ikan pipih, rumput, rumput laut); dan 10 –100 mGy/hari (lebah, kepiting, cacing tanah), seperti terlihat pada Gambar 9.1 (ICRP, 2017b).

Tabel 9.3 Dasar Penetapan Tingkat Acuan Tertimbang Turunan (DCRL) Untuk Hewan Dan Tanaman Acuan.

Interval Laju Dosis (mGy/hari)	Pengamatan (Hipotetis)	Pertimbangan
1000 – 10.000	Mortalitas signifikan	Tinggi hingga sangat tinggi
100 - 1000	Gangguan populasi dari pajanan berkepanjangan	Tinggi jika pajanan berkepanjangan
10 – 100	Efek pada morbiditas	Meningkat
1 – 10	Beberapa gangguan reproduksi	Pita DCRL

Interval Laju Dosis (mGy/hari)	Pengamatan (Hipotetis)	Pertimbangan
0,1 – 1	Tidak ada efek yang teramati	Sangat rendah hingga rendah
0,01 – 0,1	Dekat atau berada dalam latar alam, tidak ada pengamatan terhadap efek	Nol hingga sangat rendah

Sumber: Larsson (2012)

4. Jalur Paparan

Dalam mengkaji dosis dan efeknya terhadap organisme yang ada di lingkungan, semua jalur paparan yang relevan perlu dipertimbangkan sebagai berikut (ICRP, 2014a).

- 1) Inhalasi partikel kontaminasi atau gas radionuklida yang (kembali) tersuspensi.

Jalur ini relevan untuk hewan darat dan burung air, mamalia, dan herptofauna. Radionuklida dalam bentuk yang dapat terhirup atau mudah menguap juga dapat memberikan kontribusi pada paparan tanaman melalui pertukaran gas.

- 2) Kontaminasi bulu, kulit, dan permukaan vegetasi.

Jalur ini memiliki komponen paparan eksternal (radionuklida pada atau dekat epidermis yang menyinari sel hidup di bawahnya), ditambah komponen paparan internal karena kontaminan tertelan dan masuk ke dalam tubuh hewan. Jalur ini jelas sangat relevan dengan fauna terestrial dalam situasi kecelakaan.

- 3) Ingesti tanaman dan hewan tingkat trofik rendah.

Jalur ini menyebabkan terjadinya penyinaran langsung pada saluran pencernaan, dan paparan internal jika radionuklida berasimilasi dan didistribusikan di dalam tubuh hewan.

- 4) Ambilan (*uptake*) langsung dari kolom air.

Jalur ini relevan untuk organisme air yang sebenarnya (misalnya ikan, moluska, krustasea, makro-alga, dan makrofit air), yang mengarah ke penyinaran langsung, misalnya insang atau sistem

pernapasan, dan pajanan internal jika radionuklida berasimilasi dan didistribusikan dalam tubuh hewan.

5) Menelan air yang terkontaminasi.

Selain imbibisi (minum) oleh hewan, jalur ini sesuai untuk tanaman karena berkaitan dengan penyerapan air oleh akar.

6) Pajanan eksternal.

Jalur ini berlaku untuk pajanan gamma dan sedikit banyak untuk pajanan beta yang berasal dari radionuklida yang ada di sekitar organisme. Untuk organisme kecil, penyinaran dari partikel juga relevan. Konfigurasi sumber relatif terhadap target dalam hal ini bergantung pada karakteristik ekologis dan habitat organisme. Ikan dewasa yang tinggal di benthik akan, misalnya, terpajan radiasi dari radionuklida yang ada di kolom air dan terendapkan dalam sedimen. Namun, ikan pelagis hanya dapat terpajan radiasi dengan cara yang pertama, sedangkan telur ikan dapat diletakkan di sedimen atau mengapung di dekat permukaan.



Sumber: ICRP (2017b)

Gambar 9.1 DCRLs untuk tujuan Proteksi Lingkungan untuk Setiap Hewan dan Tanaman Acuan

Secara umum, dominasi suatu jalur pajanan tertentu oleh suatu jenis tertentu hewan atau tanaman acuan tidak hanya ditentukan oleh biologi hewan dan tahapan yang relevan dalam siklus hidupnya, tetapi juga oleh jenis situasi pajanan (ICRP, 2014a).

B. Konsep dan Penggunaan Hewan dan Tanaman Acuan

Berbagai publikasi mengenai efek radiasi pada tingkat sel, jaringan, organ, dan organisme individu, dan juga pada populasi dan ekosistem pada saat ini telah dapat diperoleh dengan mudah. Namun, sebagian besar data yang ditampilkan lebih mengarah untuk memahami efek radiasi pada manusia, dan belum mengarah pada data yang diperlukan untuk mendukung proteksi lingkungan. Pada data yang relevan dengan proteksi lingkungan sayangnya ada bias terhadap data efek akut untuk organisme terestrial, dan kekurangan data untuk beberapa kelompok satwa liar penting yang terpapar pada tingkat radiasi yang relevan dengan lingkungan (Larsson, 2012). Pendekatan dengan menggunakan hewan dan tanaman acuan memungkinkan pengumpulan data efek ke dalam basis data generik, yang kemudian dapat dikaji sebagai dasar untuk menetapkan tindakan protektif.

1. Efek Radiasi pada Hewan dan Tanaman Acuan

Efek radiasi pada dasarnya adalah titik akhir biologis (*biological end point*) dari interaksi radiasi dengan suatu materi biologis. Data efek radiasi pada hewan dan tanaman acuan secara umum dapat dikelompokkan ke dalam empat kategori, yaitu mortalitas, morbiditas, penurunan kemampuan reproduksi, dan kerusakan kromosom. Namun, batas antara keempat kategori tersebut sebenarnya tidak jelas.

Pada awalnya, karakteristik untuk keempat kategori diperkirakan akan sama dengan karakteristik yang terjadi pada manusia, seperti adanya reaksi jaringan. Namun, data tentang mutasi pada konteks

proteksi lingkungan ternyata cukup sulit untuk ditafsirkan (Larsson, 2012).

a. Mortalitas

Yang termasuk dalam kategori mortalitas, meliputi efek yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan distribusi usia, tingkat, dan rapat kematian. Mortalitas juga memiliki efek langsung pada laju atau struktur pertumbuhan populasi.

Secara umum, mortalitas pada hewan setelah penyinaran radiasi biasanya merupakan akibat dari deplesi atau penipisan sel, atau beberapa gangguan fungsi utama satu atau lebih organ vital tubuh (ICRP, 2008). Setelah penyinaran sebagian tubuh, peluang kematian pada individu akan bergantung pada organ tertentu yang terpajan, volume yang tersinar dan tingkat dosisnya. Setelah penyinaran sekujur, kematian dapat terjadi akibat salah satu dari beberapa sindrom yang merupakan karakteristik dari rentang dosis tertentu karena cedera pada sistem organ. Mortalitas dapat diketahui dengan baik pada mamalia sehingga berguna dalam memahami mamalia yang lebih besar dan berumur panjang.

Untuk sindrom spesifik yang berpotensi menyebabkan kematian, hubungan antara persentase penyintas (orang yang selamat) dengan dosis yang diterima berbentuk sigmoidal pada plot linier. Hubungan dosis-penyintas sering dijelaskan oleh titik tengahnya, atau LD_{50} (dosis yang mematikan bagi separuh individu) dan kemiringan kurva. Ungkapan $LD_{50/60}$ biasanya digunakan untuk menunjukkan kematian separuh individu dalam 60 hari.

Kemampuan radiasi untuk mengurangi masa hidup telah dipelajari pada sejumlah spesies hewan. Kecuali pada spesies mamalia yang lebih baik, data pada spesies lain masih belum terkonfirmasi dengan baik. Beberapa parameter masih belum meyakinkan, seperti penyebab kematian. Hari kematian juga ditetapkan bervariasi, seperti 30, 40, atau 50 hari, tetapi tidak ada penjelasan yang tegas kenapa lama waktu tersebut yang diambil (ICRP, 2008).

b. Morbiditas

Efek radiasi yang termasuk dalam kategori morbiditas adalah efek yang dapat mengurangi kebugaran individu atau membuat hewan dan tanaman, atau biota, lebih sulit untuk bertahan hidup di lingkungan liar. Selain itu, efek tertunda radiasi dapat digolongkan pula sebagai morbiditas, seperti reaksi jaringan dan kanker pada manusia.

Hewan di lingkungan liar juga dapat mengalami kanker, meski belum ada riset yang komprehensif untuk mengumpulkan data kanker pada hewan. Semua bentuk morbiditas pada hewan dan tanaman dapat dipandang sebagai mengurangi kebugaran, yang selanjutnya dapat memengaruhi peluang kelangsungan hidup atau kemampuan organisme untuk bereproduksi (ICRP, 2008).

c. Penurunan Kemampuan Reproduksi

Dalam mempertimbangkan efek radiasi dalam konteks lingkungan, efek yang berkaitan dengan kemampuan reproduksi akan sangat penting. Penurunan kemampuan reproduksi dapat disebabkan oleh banyak faktor, seperti berkurangnya kesuburan jantan atau betina, termasuk periode di mana efek tersebut dalam berlangsung, atau penurunan fekunditas, dalam hal ukuran rasio gender, embrio cacat, bahkan perubahan perilaku atau distribusi yang dapat mengurangi keberhasilan perkawinan yang efektif (ICRP, 2008).

Dalam hal efek pada janin yang sedang berkembang, berdasarkan data manusia dan hewan, diperkirakan terdapat ambang batas dosis sekitar 100 mGy untuk induksi malformasi, dan ambang batas sekitar 300 mGy pada periode prenatal yang paling sensitif (8– 15 minggu pasca konsepsi) untuk setiap efek keterbelakangan mental. Secara umum juga diamati bahwa efek penyinaran akut pada kapasitas reproduksi (fekunditas dan kesuburan) sangat bergantung pada waktu perkembangan atau umur hewan pada saat pajanan berlangsung (ICRP, 2008).

d. Kerusakan Kromosom

Selain ketiga efek sebelumnya, titik akhir biologis lain yang menarik adalah kerusakan kromosom yang dapat diamati dan tingkat mutasi.

Dari beberapa data untuk mamalia, telah disimpulkan bahwa kepekaan ikan mirip atau bahkan lebih rendah dengan yang ditunjukkan oleh tikus (Shima dan Shimada, 1991). Namun demikian, sangat sulit untuk menyatakan hal yang sama untuk semua hewan atau tanaman, meskipun potensi efek tersebut jelas menarik dalam kaitannya dengan integritas genetik dan keanekaragaman hayati populasi liar (ICRP, 2008).

2. Koefisien Dosis

Koefisien dosis (DC, *dose coefficient*) adalah suatu nilai numerik yang menghubungkan laju dosis serap di sekujur, atau sebagian tubuh, dengan konsentrasi aktivitas radionuklida di dalam tubuh untuk pajanan internal, atau di lingkungan untuk pajanan eksternal. Untuk biota, pajanan dari sumber radiasi yang terdistribusi secara internal, koefisien dosis diberikan dalam satuan laju dosis ($\mu\text{Gy jam}^{-1}$) per satuan konsentrasi aktivitas dalam tubuh (Bq kg^{-1}), sedangkan untuk pajanan eksternal, laju dosis diberikan sebagai laju dosis ($\mu\text{Gy jam}^{-1}$) per satuan massa (Bq kg^{-1}), atau per satuan luas permukaan (Bq m^{-2}), atau per satuan volume (Bq L^{-1} atau Bq m^{-3}) konsentrasi aktivitas (ICRP 136, 2017b). Sebelumnya, istilah koefisien dosis diberikan sebagai koefisien konversi dosis (ICRP, 2008) dan faktor konversi dosis (ICRP, 2009c).

Secara ekstensif ICRP Publikasi 136 (2017b) telah memberikan nilai DC dalam satuan $\mu\text{Gy jam}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ untuk pajanan internal eksternal dari organisme terestrial, dalam satuan $\mu\text{Gy jam}^{-1}/\text{Bq L}^{-1}$ untuk pajanan eksternal dari organisme akuatik, dan dalam satuan $\mu\text{Gy jam}^{-1}/\text{Bq m}^{-3}$ untuk pajanan eksternal dari organisme terestrial yang ada di udara terkontaminasi radioaktif di atas permukaan tanah.

Untuk pajanan eksternal, nilai DC berkurang dengan ukuran hewan karena bertambahnya efek pelindung diri (*self-shielding*). Perbedaan DC untuk pajanan eksternal lebih terlihat pada radiasi pemancar energi rendah karena efek pelindung diri tersebut. Untuk pajanan internal dari pemancar gamma, nilai DC bertambah dengan kenaikan massa organisme karena fraksi serap bertambah, dan lebih terlihat pada pemancar foton energi tinggi (ICRP, 2008).

DC untuk pajanan eksternal pada organisme akuatik juga dapat digunakan untuk mengkaji pajanan eksternal dari radioaktivitas yang ada di dasar sedimen dengan catatan nilai densitas dan komposisi kimia sedimen hampir sama dengan nilai dari medium air.

Nilai DC yang diberikan pada ICRP Publikasi 136 (2017b) diawali dengan nilai untuk lingkungan terestrial, diikuti dengan organisme akuatik. Setiap kelompok diurutkan sesuai dengan kenaikan massa organisme. DC untuk pajanan internal juga diberi tambahan informasi kumpulan fraksi yang mewakili kontribusi jenis radiasi terhadap dosis internal. Dalam hal ini, f_0 mewakili kontribusi fragmen fisi dan inti rekoil alfa, f_1 mewakili partikel alfa, f_2 mewakili radiasi beta energi rendah dan radiasi gamma ($E < 10$ keV), dan f_3 mewakili radiasi beta dan gamma ($E > 10$ keV). Tabel 9.4 memberikan contoh nilai DC untuk isotop radioaktif ^{60}Co .

3. Rasio Konsentrasi

Rasio konsentrasi (CR, *concentration ratio*) adalah perbandingan konsentrasi aktivitas pada organisme dibandingkan dengan pada habitat sekelilingnya, biasanya diwakili oleh media tertentu, seperti udara, sedimen, tanah, atau air (ICRP, 2009c). CR biasanya digunakan dalam model perhitungan pajanan atau laju dosis pada hewan dan tanaman untuk memprediksi konsentrasi aktivitas pada hewan atau tanaman tersebut dengan asumsi terdapat kesetimbangan antara organisme secara keseluruhan dengan medianya, biasanya tanah pada ekosistem terestrial (Guillén et al., 2018).

ICRP telah memberikan data CR secara cukup komprehensif pada publikasi 114 (ICRP, 2009c). Namun, data tersebut hanya mencakup 37% dari sekitar 200 kombinasi hewan dan tanaman acuan yang diberikan pada publikasi tersebut. Contoh dari CR yang tersedia untuk beberapa unsur radioaktif pada sebagian hewan dan tanaman acuan diberikan pada Tabel 9.5.

Tabel 9.4. Koefisien Dosis (Dc) Untuk Biota Nonmanusia Terpajan Isotop Radioaktif Co.

Hewan dan tanaman acuan	Pajanan internal					Pajanan eksternal				
	μGy jam ⁻¹ Bq ⁻¹ kg	f ₀	f ₁	f ₂	f ₃	Akuatik (μGy jam ⁻¹ Bq ⁻¹ L)	Di tanah (μGy jam ⁻¹ Bq ⁻¹ kg)	Di permukaan (μGy jam ⁻¹ Bq ⁻¹ kg)	Di atas permukaan (μGy jam ⁻¹ Bq ⁻¹ kg)	Imersi di udara (μGy jam ⁻¹ Bq ⁻¹ m ³)
		Bq ⁻¹ kg								
⁶⁰ Co (anak luruh tidak termasuk)										
Lebah	6,5x10 ⁻⁵	0,000	0,000	0,003	0,997	-	-	4,4x10 ⁻⁴	4,3x10 ⁻⁴	5,8x10 ⁻⁴
Rumput liar	7,4x10 ⁻⁵	0,000	0,000	0,003	0,997	1,4x10 ⁻³	-	4,8x10 ⁻⁴	-	6,1x10 ⁻⁴
Cacing tanah	7,7x10 ⁻⁵	0,000	0,000	0,002	0,998	-	1,3x10 ⁻³	4,9x10 ⁻⁴	-	6,3x10 ⁻⁴
Katak	1,1x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,002	0,998	1,4x10 ⁻³	1,3x10 ⁻³	5,1x10 ⁻⁴	-	6,4x10 ⁻⁴
Tikus	1,6x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,001	0,999	-	1,2x10 ⁻³	5,1x10 ⁻⁴	-	6,5x10 ⁻⁴
Bebek	2,4x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,001	0,999	1,3x10 ⁻³	-	5,1x10 ⁻⁴	4,6x10 ⁻⁴	6,8x10 ⁻⁴
Rusa	8,5x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,000	1,000	-	-	3,6x10 ⁻⁴	-	4,4x10 ⁻⁴
Pohon Pinus	7,3x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,000	1,000	-	-	3,6x10 ⁻⁴	-	-
Rumput Laut	1,5x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,001	0,999	1,4x10 ⁻³	-	-	-	-
Kepiting	2,1x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,001	0,999	1,3x10 ⁻³	-	-	-	-
Trout	2,1x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,001	0,999	1,3x10 ⁻³	-	-	-	-
Ikan Pipih	1,6x10 ⁻⁴	0,000	0,000	0,001	0,999	1,3x10 ⁻³	-	-	-	-

Sumber: (ICRP 136, 2017b).

Tabel 9.5 Ketersediaan Nilai Rasio Konsentrasi (Cr) untuk Beberapa unsur Radioaktif pada Sebagian Hewan dan Tanaman Acuan untuk Ekosistem Terrestrial.

Unsur	Cacing Tanah	Lebah	Tikus	Katak	Rusa	Bebek	Rumput Liar	Pohon Pinus
Am	X		X	X	X	X	X	
Ba								X
Cd	X			X			X	
Ce	X							X
Cl	X						X	X
Co			X					X
Cr								X
Cs	X		X	X	X	X	X	X
Eu	X							X
I	X							
La								X
Mn	X							
Nb	X							
Ni	X						X	
Pb	X		X	X			X	X
Po	X		X				X	X
Pu			X		X	X	X	
Ra			X			X	X	X
Sb	X						X	
Se	X						X	
Sr	X		X	X	X	X	X	X
Tc						X	X	
Th			X				X	X
U	X		X				X	X
Zn	X						X	X

Sumber: Guillén et al. (2018)

Namun, data CR pada ICRP publikasi 114 sangat spesifik lokasi (*site specific*) sehingga variasinya cukup besar. Selain itu, data yang tersedia tidak cukup representatif dunia, karena sebagian berasal dari Eropa, Jepang, Amerika Utara dan Australasia, dan terutama diperoleh dari ekosistem bersuhu sedang dan arktik (Guillén et al., 2018).

C. Integrasi Proteksi Manusia dengan Proteksi Lingkungan

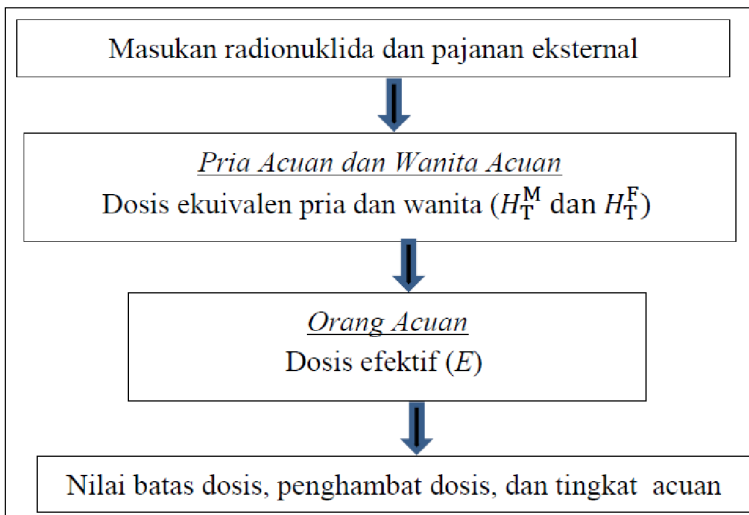
Pendekatan dalam sistem proteksi radiasi manusia untuk mengelola situasi dalam konteks pajanan kerja, pajanan medis, dan pajanan publik telah dikembangkan secara sistematis selama bertahun-tahun. Pendekatan ini didasarkan pada pengetahuan efek radiasi pada manusia, yang dilengkapi dengan data lain yang diperoleh dari studi pada hewan.

Dalam dua puluh tahun terakhir ini, ICRP mencoba untuk menyusun kerangka sistem proteksi lingkungan, dan kemudian mengintegrasikannya dengan sistem proteksi manusia yang telah mapan. Kerangka sistem proteksi radiasi lingkungan diawali dengan penetapan hewan dan tanaman acuan (ICRP, 2003), pengembangan lebih lanjut mengenai konsep dan penggunaan hewan dan tanaman acuan (ICRP, 2008), penetapan rasio konsentrasi aktivitas pada organisme dibandingkan dengan pada habitat sekelilingnya (ICRP, 2009c), pengembangan proteksi lingkungan pada berbagai situasi pajanan (ICRP, 2014a), penetapan koefisien dosis untuk biota nonmanusia yang terpajan radiasi (ICRP, 2017b), dan penetapan faktor bobot radiasi untuk hewan dan tanaman acuan (ICRP, 2021).

Dalam sistem proteksi radiasi manusia, tahapan penting dalam pengembangan kerangka sistem adalah penetapan entitas yang sebelumnya disebut sebagai manusia acuan dan kemudian berkembang menjadi pria acuan, wanita acuan, dan orang acuan, yang telah berfungsi sebagai alat konseptual dan analitis untuk berbagai analisis numerik ICRP dan kesimpulan yang dihasilkan (ICRP, 2007). Gambar 9.2 memperlihatkan tahapan dalam menentukan nilai numerik untuk proteksi radiasi manusia.

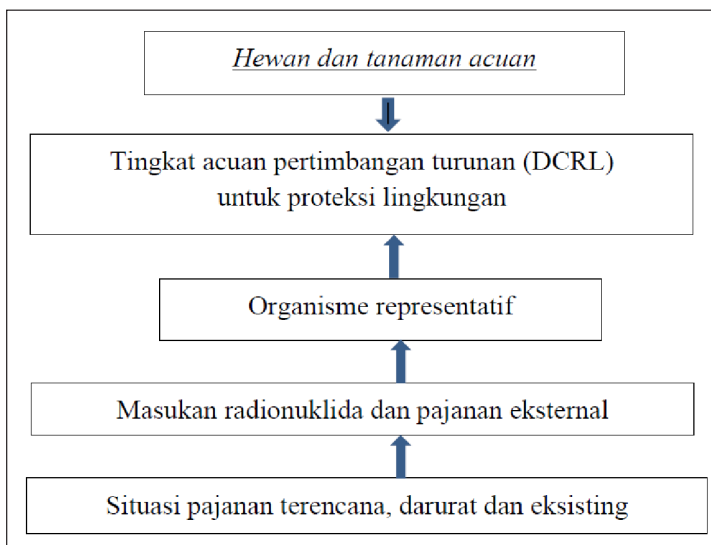
Konsep atau pendekatan pada sistem proteksi radiasi manusia kemudian diperluas untuk mencakup kumpulan kecil hewan dan tanaman acuan sebagai dasar untuk menghasilkan dan menganalisis data numerik untuk tujuan proteksi lingkungan. Keuntungan dari pendekatan ini adalah dapat diperolehnya tingkat kesamaan analisis, khususnya yang berkaitan dengan pita data efek dosis sebagai dasar untuk mempertimbangkan apa yang harus dilakukan dalam situasi pajanan yang berbeda dalam konteks prinsip proteksi radiasi (Pentreath, 2012).

Hewan dan tanaman acuan akan berperan yang sama dengan manusia acuan dalam konteks proteksi radiasi lingkungan, meskipun peranan tersebut jauh lebih sederhana, dalam membantu pengambilan keputusan manajemen terkait dengan semua tiga situasi pajanan. Gambar 9.3 memperlihatkan tahapan dalam menentukan nilai numerik untuk proteksi radiasi lingkungan.



Sumber: Pentreath (2009)

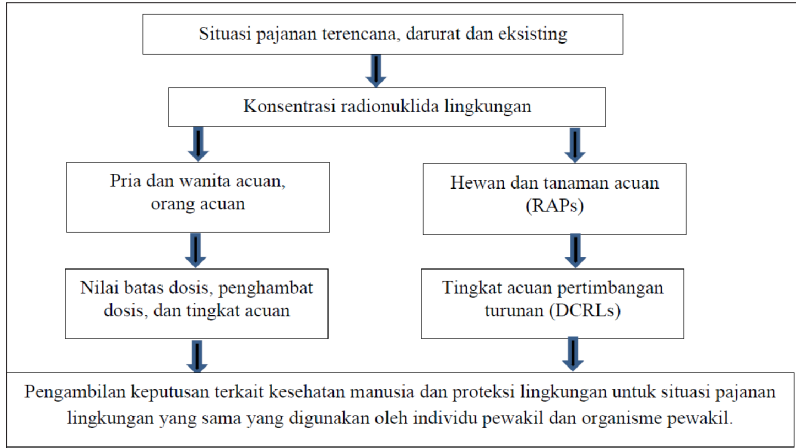
Gambar 9.2 Tahapan dalam Menentukan Nilai Numerik untuk Proteksi Radiasi Manusia



Sumber: Pentreath (2009)

Gambar 9.3 Tahapan dalam Menentukan Nilai Numerik untuk Proteksi Radiasi Lingkungan

Kerangka proteksi manusia telah cukup mapan karena telah dikembangkan cukup lama sejak diterbitkannya ICRP publikasi 26 (ICRP, 1977). Sebaliknya, sistem untuk membantu mengelola efek radiasi aktual atau potensial dari lingkungan masih dalam tahap awal. Namun, dengan telah dikembangkannya sistem yang komprehensif untuk mengoptimalkan proteksi manusia dan lingkungan dari semua situasi pajanan, suatu kerangka proteksi radiasi gabungan telah diperkenalkan. Gambar 9.4 memperlihatkan bagaimana pendekatan dalam proteksi manusia dan lingkungan yang dikembangkan dengan mempertimbangkan subyek radiobiologi dan radioekologi sehingga dapat memastikan bahwa keputusan terkait proteksi keduanya didasarkan pada pertimbangan ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan.



Sumber: Pentreath (2009)

Gambar 9.4 Pendekatan dalam Proteksi untuk Manusia dan Lingkungan dalam Kaitannya dengan Sstiap Situasi Pajanan

buku ini tidak diperjualbelikan

BAB X

PENUTUP

Sistem proteksi radiasi merupakan suatu konsep yang dikembangkan untuk dapat melakukan upaya perlindungan yang komprehensif bagi makhluk hidup dan lingkungannya dari efek pajanan radiasi yang berbahaya. Secara resmi sistem proteksi radiasi ini diperkenalkan pada ICRP publikasi 26 yang terbit tahun 1977 dan dikembangkan pada ICRP publikasi 103 yang terbit tahun 2007.

Perubahan dari sisi teknis dan penyajian dapat diamati dari kedua publikasi yang disebutkan sebelumnya. Perubahan dari sisi teknis misalnya penyesuaian nilai faktor bobot radiasi dan faktor bobot jaringan, sedangkan perubahan penyajian terlihat dengan dilakukannya pendekatan baru dengan adanya kategorisasi pajanan radiasi berdasar obyek pajanan tersebut, pembagian situasi pajanan dari dua jenis situasi menjadi tiga jenis situasi, dan metode pengkajian dosis berdasar pendekatan dari sisi sumber radiasinya atau dari sisi individu yang terpajan. Prinsip proteksi radiasi tetap dipertahankan, tetapi kali ini mendapat dukungan secara spiritual karena sesuai dengan nilai-nilai etika yang berlaku di masyarakat dan yang diajarkan oleh agama-agama besar di dunia.

Namun, kebijakan proteksi radiasi secara konsep sebenarnya telah diperkenalkan sejak tahun 1958 pada ICRP publikasi 1. Kebijakan tersebut tercantum pada bab awal yang disebut sebagai

Prefatory Review, meski isinya sebagian besar membahas mengenai rekomendasi terkait nilai batas dosis.

Secara keseluruhan, rekomendasi pada ICRP publikasi 103 lebih merupakan upaya konsolidasi dari rekomendasi sebelumnya, dan setiap perubahan yang diberikan lebih banyak bersifat penyempurnaan daripada fundamental. Perubahan yang bisa dikatakan sebagai fundamental adalah pendekatan untuk mengembangkan kerangka proteksi radiasi lingkungan, yang didasarkan pada premis baru bahwa tingkat proteksi yang diberikan pada spesies manusia tidak serta merta memberikan tingkat proteksi yang sama bagi spesies lain yang ada di lingkungan.

DAFTAR SINGKATAN

ABCC	: Atomic Bomb Casualty Commission
ALARA	: <i>As low as reasonably achievable</i>
ALL	: <i>Acute lymphocytic leukemia</i>
AML	: <i>Acute myeloid leukemia</i>
BAPETEN	: Badan Pengawas Tenaga Nuklir
CLL	: <i>Chronic lymphocytic leukemia</i>
CML	: <i>Chronic myeloid leukemia</i>
DC	: <i>Dose coefficient</i>
DCRL	: <i>Derived consideration reference level</i>
DDREF	: <i>Dose and dose rate effectiveness factor</i>
DNA	: <i>Deoxyribonucleic acid</i>
DRL	: <i>Diagnostic reference level</i>
EAR	: <i>Excess absolute risk</i>
EER	: <i>Excess relative risk</i>
IAEA	: International Atomic Energy Agency
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
ICRU	: International Commission on Radiation Units and Measurements
I-DRL	: Indonesian Diagnostic Reference Level
IRPA	: International Radiation Protection Association

IXRPC	: International X-ray and Radium Protection Committee
LD	: <i>Lethal dose</i>
LET	: <i>Linear energy transfer</i>
LNT	: <i>Linear non-threshold</i>
NBD	: Nilai batas dosis
PACS	: <i>Picture archiving and communication systems</i>
PSC	: <i>Posterior sub capsular</i>
PLTN	: Pembangkit listrik tenaga nuklir
RBE	: <i>Relative biological effectiveness</i>
RERF	: Radiation Effects Research Foundation
RNA	: <i>Ribonucleic acid</i>
RR	: <i>Relative risk</i>
SRA	: Sindroma radiasi akut
SRP	: Society for Radiological Protection
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

DAFTAR PUSTAKA

- Ainsbury, E. A., Barnard, S., Bright, S., Dalke, C., Jarrin, M., Kunze, S., Tanner, R., Dynlacht, J.R., Quinlan, R.A., Graw, J., Kadhim, M., & Hamada, N. (2016). Ionizing radiation induced cataracts: Recent biological and mechanistic developments and perspectives for future research. *Mutat.Research/Rev.Mutat.Research*, 770, 238–261. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.07.010>
- American College of Radiology (ACR). (t.t.) *Radiation dose to adults from common imaging examinations*. Diakses pada 23 Februari, 2023, dari <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Radiology-Safety/Radiation-Safety/Dose-Reference-Card.pdf>
- BAPETEN. (2022, 30 November). *Seremonial peluncuran nilai tingkat panduan diagnostik Indonesia untuk fluoroskopi intervensional dan kedokteran nuklir diagnostik*. Diakses pada 6 Februari, 2023, dari <https://www.bapeten.go.id/berita/peluncuran-nilai-tingkat-panduan-diagnostik-indonesia-indonesia-diagnostic-reference-level-pada-kedokteran-nuklir-diagnostik-dan-fluoroskopi-intervensial-133844>
- Beauchamp, T. L., & Childress, J. F. (2001). *Principles of biomedical ethics*. Oxford University Press.
- Becker, D., & Kaul, A. (Eds.). (2005). *Radiological protection*. In *Landolt-Börnstein: Numerical data and functional relationships in science and technology - New series, group VIII, volume 4 (2-15–2-34)*. Springer Verlag.

- Bedford, J. S., & Dewey, W. C. (2002). Radiation research society 1952–2002: Historical and current highlights in radiation biology: Has anything important been learned by irradiating cells? *Radiation Research*, 158, 251–291. [https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2002\)158\[0251:HACHIR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2002)158[0251:HACHIR]2.0.CO;2)
- Behrens, R., & Dietze, G. (2011). Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.*, 56, 415–437. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/2/009>
- Britannica. (t.t.1). *Ethics philosophy*. Diakses pada 10 Februari, 2023, dari <https://www.britannica.com/topic/ethics-philosophy>.
- Britannica. (t.t.2). *Deontological ethics*. Diakses pada 8 Februari, 2023, dari <https://www.britannica.com/topic/deontological-ethics>.
- Broughton, J., Cantone, M. C., Ginjaume, M., Shah, B., Czarwinski, R. (2015). Implications of the implementation of the revised dose limit to the lens of the eye: the view of IRPA professionals, dalam: *Proceedings of the Second International Symposium on the System of Radiological Protection*. *Ann. ICRP*, 44(1S), 138-143. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>.
- California Biomedical Research Association (CBRA). (t.t.). *What is biomedical research?* Diakses pada 15 Februari, 2023, dari <https://ca-biomed.org/get-the-facts/>
- Cambridge Dictionary. (t.t.1). *Dignity*. Diakses pada 20 Februari, 2023, dari <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/dignity>
- Cambridge Dictionary. (t.t.2). *Accountability*. Diakses pada 20 Februari, 2023, dari <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/accountability>.
- Cambridge Dictionary (t.t.3). *inclusiveness*. Diakses pada 20 Februari, 2023, dari <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/inclusiveness>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (t.t.). *Acute radiation syndrome: A fact sheet for clinicians*. Diakses pada 3 Februari, 2023 dari <https://www.cdc.gov/radiation-emergencies/hcp/clinical-guidance/ars.html>
- Cho, K. W. (2016). Ethical foundations of the radiological protection system. In *proceedings of the third international symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 45(1S), 297–308. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>

- Cho, K. W. (2017). The rork of ICRP on the ethical fundations of the system of radiological protection. *Radiat. Prot. Dosim*, 173(1–3), 49–54. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw309>
- Clarke, R. H. (1999). Control fof low-level radiation exposure: time for a change? *J. radiool. Prot.* 19(2), 107–115. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/19/2/301>.
- Clarke, R. H., & Valentin, J. (2008). The history of ICRP and the evolution of its policies: In application of the commision’s recommendations for the protection of people in emergency exposure situations (ICRP Publication 109). *Ann. ICRP*, 39(1), 75–86. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20109>
- Cool, D. A. (2015). Review of the ICRP system of protection: the approach to existing exposure situations. In *Proceedings of the second international symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 44(1S), 179–187. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202013%20Proceedings>
- Cuttler, J. M. (2018). Evidence of a dose-threshold for radiation-induced leukemia. *Dose Response*, 16(4), 1–5. <https://doi.org/10.1177/1559325818811537>
- Dauer, L. T., Miller, D. L., Schueler, B., Silberzweig, J., Balter, ST., Bartal, G., Chamers, C., Collins, J. D., Damilakis, J., Dixon, R. G., Marx, V., Stecker, M. S., Vañó, E., Venkatesan, A. M., & Nikolic, B. (2015). Occupational radiation protection of pregnant or potentially pregnant workers in IR: A joint guideline of the society of interventional radiology and the cardiovascular and interventional radiology society of Europe. *J Vasc Interv Radiol*, 26, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2014.11.026>
- Desai, M. H. (1953). *The Diary of Mahadev Desai*, Volume I. Internet Archive. <https://archive.org/details/diaryofmahadevde01maha/page/n1/mode/2up>
- Dimova, E. G., Bryant, P.E., & Chankova, S.G. (2008). “Adaptive response” – Some underlying mechanisms and open questions. *Genet. Mol. Biol.* 31(2), 396–408. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572008000300002>
- Desmaris, G. (2016). Cosmic radiation in aviation: Radiological protection of air France aircraft crew. In *Proceedings of the third symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 45(1S), 64–74. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>

- Endo, A. (2016). Operational quantities and new approach by ICRU. In *Proceedings of the third ICRP symposium on the international system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 45(1S), 178–187. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>
- Forshier, S. (2002). *Essentials of radiation biology and protection*. Delmar.
- Guillén, J., Beresford, N. A., Baeza, A., Izquierdo, M., Wood, M. D., Salas, A., Muñoz-Serrano, A., Corrales-Vázquez, J. M., & Muñoz- Muñoz, J. G. (2018). Transfer parameters for ICRP's reference animals and plants in a terrestrial Mediterranean ecosystem. *J. Environ. Radioact*, 186, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.024>
- Hamada, N., & Sato, T. (2016). Cataractogenesis following high-LET radiation exposure. *Mut.Research/Rev.Mut.Research* 770, 262–291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.08.005>
- Hansson, S. O. (2007). Ethics and radiation protection. *J. Radiol. Prot.*, 27, 147–156. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/27/2/002>
- Harrison, J. D., & Streffer, C. (2007). The ICRP protection quantities, equivalent and effective dose: their basis and application. *Radiat Prot Dosim*, 127(1–4), 12–18. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm248>.
- Harrison, J., & Lopez, P. O. (2015). Use of effective dose in medicine. In *Proceedings of the second ICRP symposium on the international system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 44(1S), 221–228. <https://icrp.org/publicationN.Asp?id=ICRP%202013%20Proceedings>.
- Harrison, J. D., Balonov, M., Martin, C. J., Ortiz Lopez, P., Menzel, H. G., Simmonds, J.R., Smith-Bindman, R., & Wakeford, R. (2016). Use of effective dose. In *Proceedings of the third symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 45(1S), 215–224. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>
- Hendry, J. H. (2015). Threshold doses and circulatory disease risks. In *Proceedings of the second international symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 44(1S), 69–75. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202013%20Proceedings>
- Higley, K. A. (2018). Integration of radiological protection of the environment into the system of radiological protection. In *Proceedings of the fourth international symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 47(3–4), 270–284. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202017%20Proceedings>

- Hiswara, E. (2023). *Istilah dan definisi dalam proteksi dan keselamatan radiasi*. BRIN Press. <https://penerbit.brin.go.id/press/catalog/book/522>
- Howe, G. R. (2017). Leukemia following the Chernobyl accident. *Health Phys*, 93(5), 512-515. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000281178.75068.e3>
- IAEA. (2002). Optimization of radiation protection in the control of occupational exposure (IAEA Safety Reports Series No. 21). *International Atomic Energy Agency*. <https://www.iaea.org/publications/6288/optimization-of-radiation-protection-in-the-control-of-occupational-exposure>
- IAEA. (2014). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards* (IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3). <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>
- IAEA. (2015a). *Radiation protection of itinerant workers* (IAEA safety report series No. 84). <https://www.iaea.org/publications/10788/radiation-protection-of-itinerant-workers>
- IAEA. (2015b). *Radiation protection in medicine: Setting the scene for the next decade*, Proceedings of an International Conference, 3–7 December 2012. <https://www.iaea.org/publications/10611/radiation-protection-in-medicine-setting-the-scene-for-the-next-decade>
- IAEA. (2018). *Occupational radiation protection* (IAEA Safety Standards Series No. GSG-7), 114–137. <https://www.iaea.org/publications/11113/occupational-radiation-protection>
- IAEA. (2022). *IAEA nuclear safety and security glossary: Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response*. IAEA. <https://www.iaea.org/publications/15236/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary>
- IAEA. (t.t.1) *Radiation protection of medical staff from cataract*. IAEA. Diakses pada 8 Februari, 2023, dari <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/radiology/ataract/staff>
- IAEA (t.t.2). *Publications advanced search, emergency preparedness and response*. IAEA. Diakses pada 5 Februari 2023, dari <https://www.iaea.org/publications/search/type/emergency-preparedness-and-response>

- IAEA. (t.t.3). *Emergency preparedness and response (EPR) – Training*. IAEA. Diakses pada 5 Februari, 2023 <https://www.iaea.org/topics/emergency-preparedness-and-response-epr/resources/training>
- IAEA. (t.t.4). *Activities related to Bonn call for action*. IAEA. Diakses pada 25 Februari, 2023, dari <https://www.iaea.org/resources/rpop/resources/bonn-call-for-action-platform/activities-related-to-bonn-call-for-action>
- International X-Ray and Radium Protection Committee (IXRPC). (1929). 1928 International recommendations for x-ray and radium protection. Kungl. Boktryckeriet P.A. Norstedt & Söner. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1016/S0074-27402880010-9>
- IXRPC. (1934). International recommendations for x-ray and radium protection. *Br. J. Radiol*, 7, 83. <https://icrp.org/publication.asp?id=1934%20Recommendations>
- ICRP. (1951). International recommendations on radiological protection. *Br. J. Radiol*, 24, 46–53. <https://icrp.org/publication.asp?id=1950%20Recommendations>
- ICRP. (1973). *Implications of commission recommendations that dose be kept as low as readily achievable* (ICRP Publication 22). Pergamon Press. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2022>
- ICRP. (1977). Recommendations of the international commission on radiological protection (ICRP Publication 26). *Ann. ICRP*, 1(3). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2026>
- ICRP. (1984). Nonstochastic effects of ionizing radiation (ICRP Publication 41). *Ann. ICRP*, 14(3). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2041>
- ICRP. (1987). Protection of the patient in nuclear medicine (and statement from the 1987 Como meeting of ICRP), (ICRP Publication 52). *Ann. ICRP*, 17(4). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2052>
- ICRP. (1991). 1990 Recommendations of the international commission on radiological protection (ICRP Publication 60). *Ann. ICRP* 21(1–3). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2060>
- ICRP. (1993). Protection from potential exposures: A conceptual framework (ICRP Publication 64). *Ann. ICRP*, 23(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2064>

- ICRP. (1997a). General principles for the radiation protection of workers (ICRP Publication 75). *Ann. ICRP*, 27(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2075>
- ICRP. (1997b). Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste (ICRP Publication 77). *Ann. ICRP*, 27 (S). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2077>
- ICRP. (1999). Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure (ICRP Publication 82). *Ann. ICRP*, 29(1–2), 14. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2082>.
- ICRP. (2000). *Pregnancy and medical radiation* (ICRP Publication 84). *Ann. ICRP* 30(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2084>
- ICRP. (2003). A Framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species (ICRP Publication 91). *Ann. ICRP*, 33(3). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2091>
- ICRP. (2005a). *Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack* (ICRP Publication 96). *Ann. ICRP* 35(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2096>
- ICRP. (2005b). Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk (ICRP Publication 99). *Ann. ICRP*, 35(4). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2099>
- ICRP. (2006). Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimisation of radiological protection: Broadening the process (ICRP Publication 101). *Ann. ICRP*, 38(3). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20101b>
- ICRP. (2007). The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection (ICRP Publication 103). *Ann. ICRP*, 37(2–4). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
- ICRP. (2008). Environmental protection – the concept and use of reference animals and plants (ICRP Publication 108). *Ann. ICRP*, 38(4–6). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20108>
- ICRP. (2009a). Application of the commission's recommendations for the protection of people in emergency exposure situations (ICRP Publication 109). *Ann. ICRP*, 39(1).

- <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20109>
- ICRP. (2009b). Adult reference computational phantom (ICRP Publication 110). *Ann. ICRP*, 39(2). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20110>
- ICRP. (2009c). Environmental protection: Transfer parameters for reference animals and plants (ICRP Publication 114). *Ann. ICRP*, 39(4).
<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20114>
- ICRP. (2010). Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures (ICRP Publication 116). *Ann. ICRP*, 40(2-5). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20116>
- ICRP. (2012). ICRP statement on tissue reactions/Early and late effects of radiation in normal tissues and organs – Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context (ICRP Publication 118). *Ann. ICRP* 41(1/2). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118>
- ICRP. (2013). Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste (ICRP Publication 122). *Ann. ICRP*, 42(3), 29. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20122>
- ICRP. (2014a). Protection of the environment under different exposure situations (ICRP Publication 124). *Ann. ICRP*, 43(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20124>
- ICRP. (2014b). Radiological protection against radon exposure (ICRP Publication 126). *Ann. ICRP*, 43(3). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20126>
- ICRP. (2016). Radiological protection from cosmic radiation in aviation (ICRP Publication 132). *Ann. ICRP*, 45(1), 40. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20132>
- ICRP. (2017a). Diagnostic reference levels in medical imaging (ICRP Publication 135). *Ann. ICRP*, 46(1), 14–16. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20135>
- ICRP. (2017b). Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation (ICRP Publication 136). *Ann. ICRP*, 46(2).
<https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20136>

- ICRP. (2018). Ethical foundations of the system of radiological protection (ICRP Publication 138). *Ann. ICRP*, 47(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20138>
- ICRP. (2019). Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial process (ICRP Publication 142). *Ann. ICRP*, 48(4). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20142>.
- ICRP. (2021). Use of dose quantities in radiological protection (ICRP Publication 147). *Ann. ICRP*, 50(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20147>.
- ICRP (2021b). *radiation weighting for reference animals and plants*. (ICRP Publication 148). *Ann. ICRP*, 50(2). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20148>
- ICRP (t.t.). *Exposure categories and situations*. Diakses pada 18 Februari, 2023, dari http://icrpaedia.org/Exposure_Categories_and_Situations
- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). (1985). *Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources* (ICRU Report 39). <https://www.icru.org/report/determination-of-dose-equivalents-resulting-from-external-radiation-sources-report-39/>.
- ICRU. (1998). *Fundamental quantities and units for ionizing radiation* ICRU Report 60. <https://www.icru.org/report/fundamental-quantities-and-units-for-ionizing-radiation-report-60/>
- ICRU. (2020). *Operational quantities for external radiation exposure*. (ICRU Report 95). *J. ICRU*, 20(1). <https://www.icru.org/report/icru-report-95-operational-quantities-for-external-radiation-exposure/>
- Ivanov, V., Tsyb, A., Gorsky, A., Maksioutov, M., Khait, S., Preston, D., and Shibata, Y. (2003). *Elevated leukemia rates in Chernobyl accident liquidators*. *BMJ Rapid Response of 15 April 2003*. Diakses pada 5 Februari, 2023, dari <http://www.bmj.com/rapid-response/2011/10/29/elevated-leukemia-rates-chernobyl-accident-liquidators>
- Jargin, S.V. (2014). Letter to the editor: On the radiation-leukemia dose-response relationship among recovery workers after the Chernobyl accident. *Dose Response*, 12, 162–165. <https://doi.org/10.2203/dose-response.13-031.Jargin>

- JSI Research and Training Institute Inc. (JSI, t.t.). *leukemia cancer and exposure to ionizing radiation*. Diakses 6 Juni 2024 dari <https://commons.clarku.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=jsi>
- KBBI. (t.t.1). *pajan dan papar*. Diakses pada 10 Januari, 2021, dari <https://kbbi.web.id/pajan> dan <https://kbbi.web.id/papar>
- KBBI. (t.t.2). *adil*. Diakses pada 20 Februari, 2023, dari <https://kbbi.kemdikbud.go.id/entri/adil>
- 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. <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/keputusan-kepala-badan-no-1211kv2021-tahun-2021-tentang-penetapan-nilai-tingkat-panduan-diagnostik-indonesia-indonesian-diagnostic-reference-level-untuk-modalitas-sinar-x-ct-scan-dan-radiografi-umum>
- 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. <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/keputusan-kepala-badan-no-3426kxi2022-tahun-2022-tentang-penetapan-nilai-tingkat-panduan-diagnostik-indonesia-atau-i-drl-untuk-pemeriksaan-pasien-dengan-kedokteran-nuklir-diagnostik-dan-pesawat-sinar-x-fluoroskopi-intervensional>
- Kleiman, N. J. (2012). Radiation cataract. In proceedings of the first ICRP symposium on the international system of radiological protection. *Ann. ICRP*, 41(3–4), 80–97. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202011%20Proceedings>
- Larsson, C. M. (2012). Biological basis for protection of the environment. In *Proceedings of the first ICRP symposium on the international system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 41(3–4), 208–217. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202011%20Proceedings>
- Lecomte, J. F. (2015). Application of the commission's recommendations to naturally occurring radioactive material. In *Proceedings of the second international symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 44(1S), 188–196. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202013%20Proceedings>

- Lecomte, J. F. (2016). Understanding existing exposure situation. In proceedings of the third international symposium on the system of radiological protection. *Ann. ICRP* 45(1S), 54–63. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>
- Lochard, J. (2012). Application of the commission's recommendations: The activities of ICRP Committee 4. In *proceedings of the first ICRP symposium on the international system of radiological protection*. *Ann. ICRP* 41(3–4), 32–44. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202011%20Proceedings>
- Martin, A., Harbison, S., Beach, K., & Cole, P. (2012). *An introduction to radiation protection* (6th Ed.). Hoder Arnold.
- Martin, C. J. (2020). Effective dose in medicine. In *Proceedings of the fifth ICRP symposium on the international system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 49(S1), 126–140. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202019%20Proceedings>
- McCombs School of Business. (t.t.). *Consequentialism*. Diakses pada 8 Februari 2023 dari <https://ethicsunwrapped.utexas.edu/glossary/consequentialism>
- McCullough, C. H., Christner, J. A., & Kofler, J. K. (2010). How effective is effective dose as a predictor of radiation risk? *Am. J. Roentgenol*, 194, 890–896. <https://doi.org/10.2214/AJR.09.4179>
- Møller, P. (2005). Genotoxicity of environmental agents assessed by the alkaline comet assay. *Basic Clin Pharmacol Toxicol* 96 Suppl., 1, 1–42. <https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2005.pto960101.x>
- Moreels, M., Baselet, B., Van Hoey, O., Vanhavere, F., & Baatout, S. (2020). Stress and radiation responsiveness. In Choukèr, A. (Ed.) *Stress challenges and immunity in space*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16996-1_20
- Najafi, M., Fardid, R., Hadadi, G. H., & Fardid, M. (2014). The mechanisms of Radiation-induced Bystander Effect. *J. Biomed. Phys. Eng.* 4(4), 163–172 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4289523/pdf/jbpe-4-163.pdf>.
- Nakamura, N. (2006). Genetic effects of radiation in atomic-bomb survivors and their children: Past, present and future. *J. Radiat. Res*, 47 Suppl. B, B67-B73. <https://doi.org/10.1269/jrr.47.b67>.

- National Research Council (NRC). (2006). *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11340>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2016). *Radiological protection science and application*. OECD Publishing, NEA No. 7265, 105. <https://www.oecd-nea.org/tools/publication?query=7265§or=&lang=English&period=100y&sort=title&filter=1>
- Paquet, F., Bailey, M.R., Leggett, R. W., & Harrison, J. D. (2016). Assessment and interpretation of internal doses: Uncertainty and reliability. In *Proceedings of the third symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 45(1S), 202–214. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>.
- Pentreath, R. J. (2009). Radioecology, radiobiology, and radiation protection: Frameworks and fractures. *J. Environ. Radioact.*, 100, 1019–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.06.004>
- Pentreath, R. J. (2012). Radiation and protection of the environment: The work of committee 5. In *Proceedings of the first ICRP symposium on the international system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 41(3–4), 45–56. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202011%20Proceedings>
- Pentreath, R. J., Larsson, C. M., & Copplestone, D. (2015). ICRP's approach to protection of the living environment under different exposure situations. In *Proceedings of the second international symposium on the system of radiological protection*. *Ann. ICRP*, 44(1S), 288–294. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>
- 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/peraturan/peraturan-kepala-badan-no-4-tahun-2013-tentang-keselamatan-radiasi-dalam-pemanfaatan-tenaga-nuklir>
- Radiation Effects Research Foundation (RERF). (2020). *Genetic effects of radiation in the offspring of atomic bomb survivors*. Diakses pada 7 Februari, 2023, dari https://www.rerf.or.jp/en/programs/roadmap_e/health_effects-en/geneefx-en/
- Rehani, M. M. (2009). Smart protection. *IAEA Bull.*, 50(2), 1–3. <https://www.iaea.org/bulletin/50-2>

- Rehani, M. M., Holmberg, O., Ortiz Lopez, P., & Mettler, F. (2011). International action plan on the radiation protection of patients. *Radiat. Prot. Dosim.*, 147(1–2), 38–42. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr258>
- Rehani, M. M., & Berris, T. (2014). Templates and existing elements and models for implementation of patient exposure tracking. *Radiat. Prot. Dosim.*, 158(1), 36–42. <https://doi.org/10.1093/rpd/nct185>
- Rehani, M. M. (2017). Patient radiation exposure and dose tracking: A perspective. *J Med Imag*, 4(3), 031206. <https://doi.org/10.1117/1.JMI.4.3.031206>.
- Seals, K. F., Lee, E. W., Cagnon, C. H., Al-Hakim, R. A., Kee, S.T. (2016). Radiation-induced cataractogenesis: A critical review for the interventional radiologist. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 39(2), 151-60. <https://doi.org/10.1007/s00270-015-1207-z>
- Seuntjens, J. P., Strydom, W., & Shortt, K. R. (2005). Dosimetric principles, quantities and units. In *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students* (Podgorsak, E.B., Ed.). IAEA, 45–70. <https://www.iaea.org/publications/7086/radiation-oncology-physics>
- Shah, D. J., Sachs, R. K., & Wilson, D. J. (2012). Radiation-induced cancer: A modern view. *Brit. J. Radiol.*, 85(1020), e1166–e1173. <https://doi.org/10.1259/bjr/25026140>
- Shima, A., & Shimada, A. (1991). Development of a possible nonmammalian test system for radiation induced germ-cell mutagenesis using a fish, the Japanese medaka (*Oryzias latipes*). *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 88(6), 2545–2549. <https://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2545>
- Statista. (t.t.). Distribution of the global population 2022, by continent. Diakses pada 10 Februari, 2023, dari <https://www.statista.com/statistics/237584/distribution-of-the-world-population-by-continent/>.
- Tatsuzaki, H. (2013, 1–4 Oktober). *Health effects of radiation (acute and late effects)*. [Presentasi makalah] ANSN regional workshop on medical response to radiological emergency handling complex situations, Chiba, Jepang.
- Taylor, L. S. (1980). Some non-scientific influences on radiation protection standards and practice. *Proceedings of the 5th International Congress of the International Radiation Protection Association*, March 9-14, 1980. Book of Papers. 307-319. https://www.irpa.net/members/OCR_IRPA_5_Proceedings_reduced.pdf

- Thome, C., Chambers, D. B., Hooker, A. M., Thompson, J. W. (2018). Deterministic effects to the lens of the eye following ionizing radiation exposure: is there evidence to support a reduction in threshold dose? *Health Phys*, 114(3), 328–343. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000810>
- Topdoctors. (t.t.). *Circulatory disorders*. Topdoctors. Diakses pada 25 Februari, 2023, dari <https://www.topdoctors.co.uk/medical-dictionary/circulatory-disorders>
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 39 Tahun 1999 tentang Hak Asasi Manusia (1999). <https://www.komnasham.go.id/files/1475231474-uu-nomor-39-tahun-1999-tentang-H9FVDS.pdf>
- UNSCEAR. (2010). *Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report to the general assembly with scientific annexes, volume I: Sources*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html.
- UNSCEAR. (2012). *Biological mechanisms of radiation actions at low doses: A white paper to guide the scientific committee's future programme of work*. United Nations. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2012_WP.pdf
- UNSCEAR. (2015). Annex A: Attributing health effects to ionizing radiation exposure and inferring risks. In *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. United Nations. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2012_Annex-A.pdf
- UNSCEAR. (2018). Annex B: epidemiological studies of cancer risks due to low-dose-rate radiation from environmental sources. In *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. United Nations. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2017_Annex-B.pdf
- Wagner L. K., & Hayman L. A, 1982. Pregnancy and women radiologists. *Radiology* 145(2), 559-562. <https://doi.org/10.1148/radiology.145.2.7134471>.
- Wahyuni, T. (2015, 27 Maret). 'Bystander effect' tak hanya terjadi pada orang dewasa. *CNN Indonesia*. <https://www.cnnindonesia.com/gaya-hidup/20150327130618-255-42332/bystander-effect-tak-hanya-terjadi-pada-orang-dewasa>.

- Websters Dictionary 1828. (t.t.). *American dictionary of the english language*. Justice. Diakses pada 20 February, 2023, dari <https://webstersdictionary1828.com/Dictionary/justice>.
- Wundergem, I. (2014). Radiation biology. In Dance, D.R., Christofides, S., Maldment, A.D. A., McLean, I. D., Ng, K. H. (Eds.) *Diagnostic Radiology Physics: A handbook for teachers and students* (499-524). IAEA. <https://www.iaea.org/publications/8841/diagnostic-radiology-physics>
- Yao, Y., & Dai, W. (2014). Genomic instability and cancer. *J. Carcinog. Mutagen*, 5, 1–17. <https://doi.org/10.4172/2157-2518.1000165>.
- Zablotska, L.B., Bazyka, D., Lubin, J. H., Gudzenko, N., Little, M.P., Hatch, M., Finch, S., Dyagil, I., Reiss, R. F., Chumak, V. V., Bouville, A., Drozdovitch, V., Kryuchkov, V. P., Golovanov, I., Bakhanova, E., Babkina, N., Lubarets, T., Bebeshko, V., Romanenko, A., and Mambuchi, K. (2013). Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among chornobyl cleanup workers. *Environ Health Perspect*, 121, 59–65. <https://doi.org/10.1289/ehp.1204996>
- Zölzer F. (2016). Are the core values of the radiological protection system shared across cultures? In proceedings of the third international symposium on the system of radiological protection. *Ann. ICRP*, 45(1S), 358-372. <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%202015%20Proceedings>
- Zölzer, F. (2020). Ethics of radiological protection – recent developments. *J. Public Health*, 42(1), 183–187. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdy069>

TENTANG PENULIS



Eri Hiswara menyelesaikan pendidikan formal sarjana (S-1) pada jurusan fisika di Universitas Indonesia Jakarta, tahun, 1982 dan master (S-2) pada bidang studi *Radiation and Environmental Protection* di University of Surrey, Guildford, Inggris, tahun 1990. Setelah menamatkan S-1, penulis bekerja di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan menjadi peneliti sejak tahun 1984 dengan jabatan Asisten Peneliti

Madya. Jabatan tertinggi, yaitu 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. Setelah BATAN dilebur ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada tahun 2021, penulis menjadi peneliti di BRIN pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir.

Penulis mendapat pengetahuan tambahan melalui berbagai pelatihan teknis dan lokakarya di bidang proteksi radiasi yang diikuti sejak tahun 1984 di berbagai negara. Berbagai kegiatan ilmiah

internasional yang membahas isu-isu terkait proteksi radiasi juga pernah diikuti oleh penulis, baik dalam bentuk konferensi, seminar, simposium, pertemuan teknis, interkomparasi, penyusunan proyek kerja sama dalam kerangka IAEA, maupun sidang tahunan Komite Ilmiah PBB untuk efek radiasi atom (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation [UNSCEAR]).

Selain aktif sebagai peneliti, saat ini penulis juga menjadi staf pengajar luar biasa pada PPDS Radiologi di FKUI untuk mata ajar fisika dan proteksi radiasi, serta di Sekolah Tinggi Intelijen Negara (STIN) untuk mata ajar nuklir biologi kimia (Nubika) dengan kekhususan pada keselamatan dan keamanan nuklir dan radiasi. Penulis saat ini merupakan anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), Perkumpulan Ahli Proteksi Radiasi Indonesia (APRI), dan *Health Physics Society* (HPS).



Suzie Darmawati adalah purnabakti dari Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sejak tahun 2021 setelah mengabdikan selama 35 tahun. Penulis menamatkan pendidikan formal sarjana (S-1) pada jurusan fisika di FMIPA UI tahun 1985, dan master (S-2) pada jurusan fisika di University of Surrey, Guildford, Inggris tahun 1990. Setelah menamatkan S-1, penulis bekerja di Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif BATAN, kemudian pindah ke Pusat Standardisasi dan Jaminan Mutu Nuklir BATAN pada tahun 2000.

Penulis mendapat pengetahuan tambahan melalui berbagai pelatihan teknis dan lokakarya di bidang proteksi radiasi yang diikuti sejak tahun 1987 di beberapa negara, seperti Jepang dan Australia. Beberapa kegiatan ilmiah internasional yang membahas isu-isu terkait proteksi radiasi yang dilangsungkan di kantor pusat Badan Tenaga Atom Internasional (International Atomic Energy Agency [IAEA]) di Wina, Austria, juga pernah diikuti oleh penulis.

INDEKS

- aberasi kromosom 34, 205
agama Budha 73, 205
agama Hindu 76, 78, 205
agama Islam 72, 73, 76, 78, 205
agama Kristen 76
akuntabilitas 74, 75, 76, 205
ALARA 45, 50, 185, 206
Al-Qur'an 70, 78, 206
analisis biaya-manfaat 53, 54, 55,
56, 206
analisis biaya-manfaat diperluas 53,
206
analisis utilitas multi-atribut 53, 55,
56, 206
Awak Pesawat Terbang 126
besaran fisis 6, 79, 80, 83, 85, 102,
206
besaran operasional 6, 80, 93, 95,
96, 97, 99, 102, 206
besaran proteksi 79, 85, 93, 95, 96,
97, 99, 206
borok 19, 206

cema 83, 207

daerah pengendalian 116, 123, 207
daerah supervisi 116, 123, 124, 207
DNA 9, 10, 14, 35, 36, 38, 43, 185,
207

dosis ambang 13, 14, 15, 16, 20,
21, 23, 25, 31, 33, 34, 38, 71,
157, 207
dosis ambien 97, 100
dosis efektif 2, 3, 6, 50, 51, 85, 88,
89, 90, 92, 93, 97, 98, 105,
116, 128, 129, 157, 158, 207
dosis ekuivalen 93, 94, 95, 96, 100,
157
dosis ekuivalen ambien 93
dosis ekuivalen berarah 94
dosis personal 98, 100
dosis sekujur akut 29, 208
dosis serap 30, 84, 131
dosis serap berarah pada kulit lokal
98, 100
dosis serap berarah pada lensa mata
98, 100
dosis serap personal pada kulit
lokal 99, 100
dosis serap personal pada lensa
mata 98, 100
dosis serap sekujur 30
dosis toleransi 2, 208
edema 29, 208
efek abskopal 42, 43, 208
efek akut 171, 209
efek biologis 6, 11, 18, 85, 86, 128,

- 158, 209
- efek dalam kandungan 11, 209
- efek deterministik xiii, 14, 15, 23, 70, 71, 86, 109, 139, 153, 158, 209
- efek genetik 11, 34, 35, 209
- efek imbas-samping 42, 43, 44, 209
- efek in-utero 16, 209
- efek kesehatan 6, 11, 13, 14, 39, 54, 55, 134, 153, 209
- efek reaksi jaringan 6, 10, 11, 15, 16, 23, 31, 88, 158, 209
- efek stokastik 3, 6, 10, 11, 31, 61, 70, 71, 85, 86, 88, 89, 92, 108, 128, 157, 158, 163, 209
- efek tertunda 173, 209
- eritema 13, 19, 210
- etika biomedis 63, 69, 73, 210
- etika deontologik 63, 210
- etika konsekuensialis 63, 64, 65, 210
- etika normatif 63, 210
- etika terapan 63, 210
- faktor bobot jaringan 85, 89, 90, 92, 102, 183, 210
- faktor bobot radiasi 85, 86, 88, 90, 96, 102, 158, 178, 183, 210
- fantom 90, 97, 99, 100, 101, 102, 129, 147, 210
- fibrosis 19, 210
- fluens 80, 81, 82, 95, 97, 98, 99, 102, 211
- fluens energi 80, 81, 211
- fluens partikel 80
- folikel rambut 19, 211
- gangguan peredaran darah 30
- ginjal 29, 30, 91, 211
- gonad 24, 90, 211
- hewan dan tanaman acuan 162, 164, 168, 171, 175, 177, 178, 179, 211
- hubungan dosis-respons 23, 26, 30, 41, 211
- ICRP xix, xx, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 15, 17, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 37, 39, 40, 41, 45, 47, 48, 51, 53, 54, 61, 62, 63, 65, 69, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 113, 116, 118, 119, 122, 123, 124, 126, 127, 128, 130, 131, 132, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 151, 152, 153, 154, 155, 157, 158, 161, 162, 163, 164, 165, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 178, 180, 183, 185, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 202, 213
- ICRU 79, 80, 82, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 102, 185, 190, 195, 214
- inklusivitas 74, 78, 212
- intervensi xx, 5, 6, 27, 62, 104, 114, 132, 156, 212
- jalur pajanan 46, 103, 104, 113, 114, 152, 153, 169, 171, 212
- justifikasi 4, 7, 45, 46, 47, 48, 62, 64, 74, 108, 129, 136, 212
- kanker 12, 13, 14, 17, 19, 30, 31, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 54, 79, 88, 89, 90, 92, 128, 129, 130, 132, 133, 158,

- 173, 212
- katarak 21, 23, 24, 157, 212
- keadilan 62, 69, 72, 73, 74, 78, 145, 212
- kebaikan 64, 69, 70, 71, 74, 213
- kehati-hatian 62, 69, 71, 145, 213
- kelompok kritis 127, 213
- Kemandulan 24, 25
- kematian jaringan 19, 213
- kerma 80, 83, 84, 95, 96, 97, 102, 149
- kerontokan rambut 19, 213
- kerusakan kulit 20, 213
- keterbelakangan mental 13, 16, 17, 173, 213
- keterlibatan pemangku kepentingan 62, 77, 213
- ketidakstabilan genomik 42, 43, 44, 213
- koefisien konversi 92, 95, 96, 97, 98, 99, 102, 174, 213
- Komite Proteksi Radium dan Sinar-X Internasional 1
- konfusius 76
- laju dosis serap berarah pada kulit lokal 98
- kaju dosis serap berarah pada lensa mata 98
- lensa mata 21, 22, 23, 95, 97, 98, 100, 102, 118, 208, 214
- leukemia 31, 32, 37, 191
- leukemia limfositik akut 32
- leukemia mieloid akut 32
- leukemia mieloid kronis 32
- life span study (lss) 35
- likuidator chernobyl 23
- limitasi 7, 62, 74, 85, 105, 107
- martabat 62, 69, 73, 74, 78
- meningitis 29
- meta-etika 63
- metrologi radiasi 9
- model risiko relatif 39
- nilai batas dosis 2, 4, 6, 21, 22, 23, 45, 50, 57, 58, 62, 73, 89, 92, 94, 97, 105, 106, 107, 116, 128, 139, 140, 141, 147, 151, 157, 183
- nonkejahatan 69, 70, 71, 74
- NORM 110, 113, 114, 117, 118, 119, 144, 156, 195
- optimisasi proteksi xx, 5, 7, 45, 49, 50, 51, 52, 53, 62, 65, 72, 77, 92, 105, 107, 108, 129, 136, 141, 142, 143, 147
- orang perwakilan 127
- pajanan akut 13, 21, 23, 26, 30, 33
- Pajanan Kerja 105, 122, 123, 140, 144
- pajanan medis 47, 48, 57, 105, 121, 127, 128, 129, 130, 132, 135, 136, 137, 154, 178
- pajanan potensial 107
- pajanan publik 107, 122, 127, 140, 144
- paru-paru 29, 37, 90
- pasien hamil 130
- peluruhan radioaktif 114, 115
- pemantauan area 100, 101
- pemantauan individual 93, 95
- pemerahan 1, 18, 19
- pendekatan terkait individu 157
- pendekatan terkait sumber 141
- pengelupasan 18
- penghambat dosis 50, 72, 73, 105, 106, 107, 108, 129, 139, 140, 141, 142, 143, 147, 151

penyakit genetik 34
 periode laten 32, 37, 39
 persetujuan setelah penjelasan (informed consent) 62, 76
 pigmentasi 19
 pneumonitis 29
 praktik 45, 104, 135
 prinsip kehati-hatian 62, 69
 prinsip proteksi radiasi 7, 45, 58, 60, 183
 proteksi radiasi lingkungan xvi, 7, 161, 162, 178, 179, 183
 Radiation Effects Research Foundation 34, 186, 199
 radioekologi 9, 180
 radioterapi 13, 18, 122, 125, 128
 radon xx, 5, 113, 114, 115, 116, 152, 154, 194
 rasio konsentrasi 162, 177, 178
 respons adaptif 44
 risiko xx, 3, 4, 6, 18, 23, 30, 32, 33, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 46, 48, 50, 60, 65, 70, 71, 73, 85, 89, 90, 92, 108, 109, 125, 129, 130, 132, 136, 140, 141, 142, 143, 145, 152, 156
 risiko kanker 36, 37, 38, 39, 43, 129, 132
 risiko relatif 39
 risiko relatif berlebih 39
 sindroma radiasi akut 26
 sistem pembatasan dosis 3, 5, 45
 situasi pajanan darurat 5, 6, 47, 57, 62, 72, 110, 111, 112, 121, 127, 139, 141, 143, 154, 158
 situasi pajanan eksisting 5, 47, 60, 62, 72, 112, 113, 114, 127, 139, 143, 144, 151, 154
 situasi pajanan radiasi 6, 46, 58, 74, 77, 121, 151, 153, 162
 situasi pajanan terencana 5, 6, 45, 46, 47, 57, 62, 72, 73, 105, 106, 107, 108, 112, 113, 114, 121, 127, 128, 139, 140, 141, 142, 146, 152, 153, 154, 157
 spermatogonia 24
 Sumpah Hipokrates 70
 The Atomic Bomb Casualty Commission 34
 thoron 114
 tindakan radiasi 6, 11, 42
 tingkat acuan 50, 72, 73, 92, 116, 117, 118, 129, 136, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 147, 151, 162, 168
 tingkat acuan diagnostik 136, 146
 tingkat acuan tertimbang turunan 72, 162, 168
 transparansi 74, 76
 vaskulitis 29
 whatsapp iv
 Wolfram Fuchs 2

Selain membawa manfaat yang sangat besar, penggunaan tenaga nuklir diketahui memiliki efek yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Efek radiasi yang dihasilkan dari tenaga nuklir dapat berupa efek deterministik (reaksi jaringan) ataupun stokastik. Untuk mencegah terjadinya efek tersebut, perlu dilakukan tindakan proteksi radiasi. Secara luas, proteksi radiasi mencakup semua upaya, pemahaman, dan tindakan untuk memberikan perlindungan dari efek radiasi yang berbahaya.

Buku Pengantar Sistem Proteksi Radiasi menguraikan sistem proteksi radiasi yang menjadi dasar untuk penerapan proteksi radiasi praktis di lapangan. Sistem ini diperkenalkan oleh Komisi Internasional untuk Proteksi Radiasi (ICRP) yang memberikan rekomendasi terkait nilai batas dosis yang boleh diterima oleh seseorang. Pada dasarnya, sistem proteksi radiasi terdiri atas prinsip proteksi radiasi, kategori paparan, situasi paparan, dan pendekatan dalam memperhitungkan besar dosis radiasi.

Sistem proteksi radiasi merupakan hal yang wajib dipahami bagi para pekerja, peneliti, dan pemerhati bidang nuklir untuk meminimalisasi dampak dari efek radiasi. Walaupun praktisi proteksi radiasi di Indonesia telah cukup banyak, masih sangat sedikit informasi yang tersedia untuk menjelaskan sistem proteksi radiasi dari sisi teoretis secara komprehensif. Buku ini dimaksudkan untuk mengisi kekurangan tersebut.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

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

DOI: 10.55981/brin.873



ISBN 978-602-6303-30-1



9 786026 303301