



Dasar-Dasar Proteksi Radiasi

dalam Radiologi

Santa Mareta, A.Md.Rad., SKM., M.Kes., Mirfauddin, A.Md.Rad., S.Si., M.Si.,
Delfi Iskardyani, S.Pd., M.Si., Dr. Farida Wahyuni, S.Si., M.Si.,
Oktavia Puspita Sari, Dipl.Rad., S.Si., M.Kes., Sarika Setya Putri,
S.Tr.Kes(Rad), M.Eng., Rini Hatma Rusli, S.ST., M.Adm.Kes.,
Linda Armitasari, M.Sc., Ayu Wita Sari, S.Si., M.Sc.,
dan Ali Roo'in Mas'uul, AMR., S.Si., M.K.M.

Dasar-Dasar Proteksi Radiasi dalam Radiologi

Santa Mareta, A.Md.Rad., SKM., M.Kes.

Mirfauddin, A.Md.Rad., S.Si., M.Si.

Delfi Iskardyani, S.Pd., M.Si.

Dr. Farida Wahyuni, S.Si., M.Si.

Oktavia Puspita Sari, Dipl.Rad., S.Si., M.Kes.

Sarika Setya Putri, S.Tr.Kes(Rad)., M.Eng.

Rini Hatma Rusli, S.ST., M.Adm.Kes.

Linda Armitasari, M.Sc.

Ayu Wita Sari, S.Si., M.Sc.

Ali Roo'in Mas'uul, AMR., S.Si., M.K.M.

PT BUKULOKA LITERASI BANGSA

Anggota IKAPI: No. 645/DKI/2024



Dasar-Dasar Proteksi Radiasi dalam Radiologi

Penulis : Santa Mareta, A.Md.Rad., SKM., M.Kes.,
Mirfauddin, A.Md.Rad., S.Si., M.Si., Delfi
Iskardiani, S.Pd., M.Si., Dr. Farida Wahyuni, S.Si.,
M.Si., Oktavia Puspita Sari, Dipl.Rad., S.Si., M.Kes.,
Sarika Setya Putri, S.Tr.Kes(Rad)., M.Eng., Rini
Hatma Rusli, S.ST., M.Adm.Kes., Linda Armitasari,
M.Sc., Ayu Wita Sari, S.Si., M.Sc., dan Ali Roo'in
Mas'uul, AMR., S.Si., M.K.M.

ISBN : 978-634-250-388-1 (PDF)

Penyunting Naskah : Ahmad Fauzy Pratama, S.Pd.

Tata Letak : Ahmad Fauzy Pratama, S.Pd.

Desain Sampul : Novikean Keysah Sanisri

Penerbit

Penerbit PT Bukuloka Literasi Bangsa

Distributor: PT Yapindo

Kompleks Business Park Kebon Jeruk Blok I No. 21, Jl. Meruya Ilir Raya
No. 88, Kelurahan Meruya Utara, Kecamatan Kembangan, Kota Adm.
Jakarta Barat, Provinsi DKI Jakarta, Kode Pos: 11620

Email : penerbit.blb@gmail.com

Whatsapp : 0878-3483-2315

Website : bukuloka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran Pasal 2 UU Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta.

Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku referensi berjudul *Dasar-Dasar Proteksi Radiasi dalam Radiologi* ini dapat disusun dan hadir sebagai bacaan yang memberikan pemahaman mengenai pentingnya keselamatan dalam penggunaan radiasi pada bidang radiologi.

Buku ini ditujukan untuk masyarakat umum agar pembaca memahami bahwa teknologi radiologi, meskipun sangat bermanfaat dalam diagnosis dan pengobatan, tetap memiliki risiko yang perlu dikelola dengan baik. Dengan bahasa yang sederhana, buku ini menjelaskan prinsip dasar proteksi radiasi, cara kerja sistem perlindungan, serta langkah-langkah praktis untuk menjaga keselamatan pasien, tenaga kesehatan, dan masyarakat.

Jakarta, September 2025

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
Bab 1: Fisika Radiasi Dasar dan Interaksinya dengan Materi Biologis	1
1.1 Konsep Dasar Fisika Radiasi.....	1
1.2 Jenis-Jenis Radiasi dalam Radiologi	4
1.3 Interaksi Radiasi dengan Materi Biologis	7
1.4 Efek Biologis dari Paparan Radiasi	11
Bab 2: Efek Biologis Radiasi Pengion dan Prinsip Fundamental Proteksi Radiasi.....	15
2.1 Mekanisme Efek Biologis Radiasi Pengion	15
2.2 Efek Akut dan Kronis Paparan Radiasi	18
2.3 Prinsip Dasar Proteksi Radiasi	21
2.4 Strategi Implementasi Proteksi Radiasi di Fasilitas Radiologi	24
Bab 3: Besaran Proteksi Radiasi, Satuan Pengukuran, dan Batas Nilai Dosis.....	28
3.1 Besaran Fisika dalam Proteksi Radiasi.....	28
3.2 Satuan Pengukuran Radiasi	32
3.3 Konversi dan Hubungan Antar Besaran	35
3.4 Batas Nilai Dosis yang Diperbolehkan.....	38
Bab 4: Kerangka Regulasi Nasional dan Standar Internasional Proteksi Radiasi.....	42
4.1 Peran dan Prinsip Regulasi Proteksi Radiasi	42
4.2 Kerangka Regulasi Nasional di Indonesia	45
4.3 Standar Internasional dalam Proteksi Radiasi	49
4.4 Implementasi dan Pengawasan Kepatuhan.....	52

Bab 5: Optimalisasi Proteksi Radiasi Pasien dalam Radiodiagnostik dan Intervensional.....	56
5.1 Pentingnya Proteksi Radiasi Pasien.....	56
5.2 Strategi Proteksi dalam Pemeriksaan Radiodiagnostik	59
5.3 Proteksi Radiasi dalam Prosedur Intervensional	62
5.4 Audit dan Evaluasi Dosis Pasien	66
Bab 6: Strategi Proteksi Radiasi Komprehensif bagi Pekerja di Instalasi Radiologi.....	69
6.1 Risiko Paparan Radiasi bagi Pekerja Radiologi	69
6.2 Prinsip Dasar Perlindungan Pekerja Radiasi	72
6.3 Monitoring dan Evaluasi Dosis Individu.....	75
6.4 Pelatihan dan Budaya Keselamatan Radiasi.....	78
Bab 7: Aspek Proteksi Radiasi Khusus dalam Prosedur Kedokteran Nuklir	83
7.1 Karakteristik Prosedur Kedokteran Nuklir	83
7.2 Risiko Paparan dalam Kedokteran Nuklir	86
7.3 Prinsip Proteksi Radiasi dalam Fasilitas Nuklir Medis	90
7.4 Monitoring Pasien dan Pengunjung.....	93
Bab 8: Sistem Pemantauan Dosis Radiasi dan Surveilans Area Kerja.....	97
8.1 Pentingnya Pemantauan Dosis dan Lingkungan Kerja.....	97
8.2 Jenis-jenis Pemantauan Dosis.....	100
8.3 Penempatan dan Kalibrasi Alat Pemantauan.....	103
8.4 Dokumentasi dan Evaluasi Hasil Pemantauan	106
Bab 9: Jaminan Kualitas dan Kendali Kualitas Program Proteksi Radiasi.....	110
9.1 Pengertian Jaminan Kualitas dalam Proteksi Radiasi.....	110
9.2 Komponen Utama Program Jaminan Kualitas	113
9.3 Kendali Kualitas Peralatan Radiologi.....	116
9.4 Evaluasi Efektivitas Program Proteksi Radiasi	120

Bab 10: Kesiapsiagaan dan Respons terhadap Insiden

Kecelakaan Radiologi 123

10.1 Jenis dan Dampak Insiden Kecelakaan Radiologi..... 123

10.2 Komponen Utama Kesiapsiagaan Radiologi 126

10.3 Prosedur Respons Terhadap Paparan dan Kontaminasi 129

10.4 Pelaporan, Evaluasi, dan Perbaikan Sistem..... 132

Profil Penulis 136

Daftar Pustaka..... 148

Bab 1: Fisika Radiasi Dasar dan Interaksinya dengan Materi Biologis

1.1 Konsep Dasar Fisika Radiasi

Radiasi adalah bentuk energi yang dipancarkan dari suatu sumber dan merambat melalui ruang atau medium dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel. Fenomena ini merupakan konsep dasar dalam ilmu fisika yang memiliki penerapan luas, salah satunya dalam bidang radiologi medis. Di dalam konteks kesehatan, pemahaman terhadap sifat dan karakteristik radiasi menjadi sangat penting, terutama karena teknologi pencitraan dan terapi berbasis radiasi terus berkembang pesat dalam dunia kedokteran modern.

Radiasi terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu radiasi pengion (*ionizing radiation*) dan radiasi non-pengion (*non-ionizing radiation*). Radiasi pengion memiliki cukup energi untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul, sehingga menghasilkan ion. Contoh dari jenis ini meliputi sinar-X, sinar gamma, serta partikel alfa dan beta. Radiasi jenis ini digunakan dalam prosedur medis seperti *computed tomography* (CT), radiografi, dan terapi radiasi. Sementara itu, radiasi non-pengion, seperti gelombang radio, cahaya tampak, dan gelombang mikro, tidak memiliki energi yang

cukup untuk mengionisasi atom dan umumnya digunakan dalam komunikasi dan pengobatan berbasis frekuensi rendah.

Beberapa karakteristik penting dari radiasi antara lain panjang gelombang, frekuensi, dan energi. Hubungan antara ketiganya dijelaskan dalam persamaan Planck: $E = h \times f$, di mana E adalah energi, h adalah konstanta Planck, dan f adalah frekuensi. Semakin tinggi frekuensi suatu radiasi, semakin besar energi yang dimilikinya, dan semakin pendek panjang gelombangnya. Hal ini menjelaskan mengapa sinar-X dan sinar gamma yang memiliki frekuensi tinggi dan panjang gelombang pendek sangat efektif dalam menembus jaringan tubuh (Bushberg et al., 2012).

Dalam praktik medis, kemampuan penetrasi radiasi sangat penting karena memungkinkan visualisasi organ-organ internal tanpa perlu pembedahan. Sinar-X, misalnya, dapat melewati jaringan lunak tetapi diserap oleh tulang, sehingga memberikan kontras yang memungkinkan identifikasi fraktur atau kelainan struktur. Dalam radioterapi, radiasi diarahkan ke sel kanker dengan tujuan merusak materi genetik sel tersebut sehingga tidak dapat berkembang lebih lanjut. Namun, sifat destruktif dari radiasi pengion juga menjadi perhatian karena dapat merusak sel sehat jika tidak dikendalikan dengan benar (Hall & Giaccia, 2019).

Radiasi juga memiliki perilaku tertentu saat berinteraksi dengan materi. Tiga mekanisme utama interaksi sinar-X dengan jaringan tubuh adalah efek fotoelektrik, hamburan Compton, dan transmisi. Efek fotoelektrik terjadi ketika foton sinar-X sepenuhnya diserap oleh elektron dalam atom, sedangkan hamburan Compton

melibatkan perubahan arah dan energi foton akibat tumbukan dengan elektron. Keduanya menghasilkan kontras dan membentuk dasar dari pencitraan diagnostik (Bushong, 2020).

Keamanan dalam penggunaan radiasi sangat bergantung pada pemahaman terhadap dosis dan dampaknya. Dosis radiasi diukur dalam satuan *gray* (Gy) untuk menyatakan jumlah energi yang diserap per kilogram jaringan, dan *sievert* (Sv) untuk menyatakan dampak biologisnya. Konsep *ALARA* (*As Low As Reasonably Achievable*) diterapkan dalam praktik medis untuk meminimalkan paparan radiasi terhadap pasien dan tenaga kesehatan sambil tetap mencapai hasil diagnostik atau terapeutik yang optimal.

Dalam dunia kedokteran, teknologi berbasis radiasi telah menjadi bagian integral dari sistem pelayanan kesehatan. Modalitas seperti CT scan, fluoroskopi, *mammography*, dan terapi radiasi onkologi adalah contoh nyata bagaimana radiasi digunakan secara terkontrol dan presisi tinggi untuk meningkatkan kualitas diagnosis dan perawatan pasien. Perkembangan sistem digital dan perangkat lunak pemrosesan gambar juga turut berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi serta menurunkan dosis radiasi yang diperlukan.

Pemahaman tentang konsep dasar fisika radiasi juga diperlukan oleh tenaga kesehatan non-radiolog, seperti perawat, teknisi medis, dan dokter umum. Hal ini bertujuan agar semua pihak yang terlibat dalam pelayanan pasien memiliki kesadaran terhadap pentingnya proteksi radiasi serta dapat mengambil keputusan klinis yang aman dan tepat.

Dengan demikian, fisika radiasi merupakan fondasi penting dalam praktik radiologi dan radioterapi modern. Pemahaman mendalam tentang sifat, jenis, dan interaksi radiasi tidak hanya memperkaya pengetahuan ilmiah, tetapi juga membantu tenaga kesehatan mengaplikasikan teknologi ini secara aman, efektif, dan bertanggung jawab dalam meningkatkan mutu pelayanan kesehatan.

1.2 Jenis-Jenis Radiasi dalam Radiologi

Dalam dunia radiologi, pemahaman mengenai jenis-jenis radiasi menjadi dasar penting untuk memastikan keselamatan serta efektivitas prosedur pencitraan dan terapi. Radiasi adalah bentuk energi yang merambat dalam bentuk gelombang atau partikel. Beberapa jenis radiasi memiliki kemampuan untuk menembus jaringan tubuh manusia, yang dimanfaatkan dalam berbagai teknik pencitraan medis maupun terapi pengobatan.

Secara umum, jenis radiasi yang digunakan dalam praktik radiologi dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama, yaitu radiasi elektromagnetik dan radiasi partikel. Masing-masing jenis memiliki karakteristik fisik, sumber asal, serta kegunaan klinis yang berbeda.

1.2.1 Radiasi Elektromagnetik: Sinar-X dan Sinar Gamma

Radiasi elektromagnetik merupakan bentuk radiasi tanpa massa dan tanpa muatan. Dua jenis radiasi yang paling umum digunakan dalam bidang medis adalah *sinar-X* (*X-ray*) dan *sinar gamma* (*gamma ray*).

Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik berenergi tinggi yang dihasilkan ketika elektron dengan kecepatan tinggi ditabrakkan ke target logam. Proses ini terjadi di dalam tabung sinar-X yang terdapat pada peralatan radiografi konvensional maupun digital. Kemampuan *sinar-X* untuk menembus jaringan tubuh sangat bergantung pada densitas jaringan tersebut. Tulang, yang memiliki densitas tinggi, menyerap lebih banyak sinar dan tampak putih pada hasil gambar, sedangkan jaringan lunak yang lebih ringan tampak lebih gelap.

Teknologi ini digunakan secara luas dalam berbagai prosedur, mulai dari pemeriksaan dada, foto tulang, hingga fluoroskopi. Keunggulan *sinar-X* terletak pada kemampuannya menghasilkan gambaran struktur internal tubuh secara cepat dan noninvasif (Bushong, 2021).

Sinar gamma, di sisi lain, merupakan radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh inti atom yang tidak stabil. Sumber sinar gamma biasanya berasal dari isotop radioaktif seperti *technetium-99m* atau *iodine-131* yang digunakan dalam kedokteran nuklir. Ketika isotop radioaktif disuntikkan atau diminum oleh pasien, radiasi gamma yang dipancarkan dapat dideteksi oleh kamera khusus, seperti *gamma camera*, untuk menghasilkan gambar fungsi organ tertentu.

Berbeda dengan sinar-X yang digunakan untuk melihat struktur, sinar gamma lebih banyak digunakan untuk melihat fungsi, seperti perfusi miokard atau aktivitas metabolik suatu organ. Selain

pencitraan, sinar gamma juga digunakan dalam terapi radiasi untuk menghancurkan jaringan kanker secara terfokus.

1.2.2 Radiasi Partikel: Alfa dan Beta

Radiasi partikel terdiri dari partikel bermassa, yang berasal dari inti atom yang mengalami peluruhan radioaktif. Dua jenis partikel yang relevan dalam konteks radiologi adalah partikel alfa dan partikel beta.

Partikel alfa adalah inti atom helium yang terdiri atas dua proton dan dua neutron. Karena ukuran dan muatannya yang besar, partikel ini memiliki daya tembus yang sangat rendah dan hanya mampu menembus beberapa mikrometer jaringan. Meskipun demikian, jika masuk ke dalam tubuh, misalnya melalui inhalasi atau kontaminasi luka terbuka, partikel alfa dapat menyebabkan kerusakan sel yang signifikan.

Partikel beta merupakan elektron bermuatan negatif atau positron bermuatan positif yang dipancarkan dari inti atom selama proses peluruhan radioaktif. Partikel beta memiliki daya tembus sedang dan dapat digunakan dalam aplikasi tertentu, misalnya dalam terapi radioisotop untuk kanker tiroid. Penggunaan isotop beta seperti *strontium-89* telah membantu meredakan nyeri pada pasien kanker yang mengalami metastasis tulang.

Penggunaan partikel alfa dan beta lebih terbatas dalam pencitraan, tetapi tetap relevan dalam konteks terapi, terutama untuk kondisi-kondisi tertentu yang membutuhkan efek lokal dan spesifik terhadap jaringan target (*Hall & Giaccia, 2018*).

1.2.3 Implikasi dalam Praktik Klinis

Setiap jenis radiasi memiliki karakteristik interaksi dengan jaringan tubuh yang berbeda, sehingga pemilihannya dalam praktik medis harus mempertimbangkan tujuan klinis, risiko terhadap pasien, serta kebutuhan diagnostik atau terapeutik. Misalnya, *computed tomography* (CT scan) menggunakan *sinar-X* dalam jumlah besar untuk menghasilkan gambar potongan melintang tubuh, sementara *positron emission tomography* (PET scan) mengandalkan peluruhan positron dari radioisotop untuk mencitrakan aktivitas metabolik jaringan.

Peran tenaga kesehatan, terutama radiografer dan dokter radiologi, adalah memastikan bahwa jenis radiasi yang digunakan sesuai dengan indikasi klinis dan dilakukan dengan protokol proteksi radiasi yang optimal. Hal ini bertujuan untuk menyeimbangkan manfaat pencitraan atau terapi dengan potensi efek samping paparan radiasi (ICRP, 2007).

1.3 Interaksi Radiasi dengan Materi Biologis

Paparan radiasi terhadap tubuh manusia dapat menimbulkan berbagai dampak biologis yang bergantung pada banyak faktor. Ketika radiasi memasuki jaringan biologis, energi yang dibawanya dapat menyebabkan perubahan fisik dan kimiawi pada struktur seluler. Proses ini terutama terjadi melalui ionisasi atom dan molekul dalam sel, yang dapat mengganggu fungsi biologis normal dan berujung pada kerusakan jaringan.

Pemahaman mengenai mekanisme interaksi radiasi dengan materi biologis sangat penting, khususnya dalam bidang radiologi, radioterapi, proteksi radiasi, dan kedokteran nuklir. Interaksi ini tidak hanya berkaitan dengan tingkat energi radiasi, tetapi juga menyangkut karakteristik jaringan yang terkena dan kondisi lingkungan paparan.

1.3.1 Mekanisme Dasar Interaksi

Radiasi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama berdasarkan efeknya terhadap materi: radiasi pengion dan radiasi nonpengion. Radiasi pengion, seperti sinar-X, sinar gamma, dan partikel alfa dan beta, memiliki cukup energi untuk melepaskan elektron dari atom, menghasilkan ion. Ionisasi inilah yang menjadi penyebab utama efek biologis dari radiasi pengion terhadap jaringan tubuh.

Ketika radiasi mengenai sel, molekul air yang merupakan komponen utama sel mengalami ionisasi. Hal ini memunculkan *radical bebas* seperti *hydroxyl radical* ($\bullet OH$) yang sangat reaktif dan dapat merusak komponen seluler, terutama DNA. Reaksi lanjutan dari radikal bebas ini dapat menimbulkan perubahan struktural atau mutasi genetik yang permanen (Hall & Giaccia, 2019).

Kerusakan DNA dapat berupa patahan untai tunggal atau ganda. Jika kerusakan ini tidak diperbaiki dengan benar oleh sistem perbaikan seluler, maka dapat mengarah pada apoptosis, transformasi sel menjadi kanker, atau bahkan kelainan genetik jika terjadi pada sel germinal.

1.3.2 Faktor yang Mempengaruhi Efek Biologis

Beberapa variabel menentukan tingkat keparahan efek biologis dari paparan radiasi. Faktor pertama adalah jenis radiasi. Partikel alfa memiliki energi ionisasi tinggi tetapi jangkauan pendek, sedangkan sinar gamma dan sinar-X memiliki daya tembus tinggi namun densitas ionisasinya lebih rendah.

Faktor kedua adalah dosis dan laju dosis. Dosis radiasi diukur dalam satuan *gray (Gy)* untuk menyatakan energi yang diserap jaringan, dan *sievert (Sv)* untuk menyatakan dampak biologis berdasarkan sensitivitas jaringan. Laju dosis, yaitu kecepatan penyampaian dosis dalam waktu tertentu, juga memengaruhi respons biologis. Dosis yang tinggi dalam waktu singkat cenderung menyebabkan kerusakan yang lebih parah dibandingkan dosis rendah yang diserap secara perlahan.

Faktor ketiga adalah sensitivitas jaringan. Jaringan yang aktif membelah seperti sumsum tulang, saluran pencernaan, dan jaringan embrionik lebih sensitif terhadap radiasi dibandingkan jaringan yang lebih stabil seperti otot atau saraf.

1.3.3 Efek Deterministik dan Efek Stokastik

Efek biologis dari radiasi dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama: efek deterministik dan efek stokastik.

Efek deterministik terjadi jika dosis radiasi melampaui ambang batas tertentu. Contohnya termasuk eritema kulit, katarak, dan kerusakan sumsum tulang. Efek ini bersifat berat dan tingkat keparahannya meningkat seiring bertambahnya dosis. Dalam konteks klinis, efek deterministik perlu dicegah dengan

pengendalian dosis ketat, khususnya dalam prosedur radioterapi dan fluoroskopi yang berulang.

Sebaliknya, efek stokastik tidak memiliki ambang batas dan berhubungan dengan probabilitas, bukan keparahan. Artinya, semakin tinggi dosis radiasi, semakin besar kemungkinan terjadinya efek ini, meskipun beratnya tidak bertambah. Efek stokastik terutama mencakup kanker radiasi-induksi dan kelainan genetik. Oleh karena itu, meskipun dosis kecil, paparan berulang dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko efek stokastik (ICRP, 2007).

1.3.4 Implikasi dan Tindakan Pencegahan

Dalam praktik kesehatan dan industri, pemahaman terhadap interaksi radiasi dengan materi biologis digunakan untuk menetapkan standar keselamatan. Prinsip ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) diterapkan guna meminimalkan paparan tanpa mengurangi manfaat diagnostik atau terapeutik dari penggunaan radiasi.

Langkah-langkah proteksi meliputi penggunaan pelindung timbal, pembatasan waktu paparan, dan peningkatan jarak dari sumber radiasi. Monitoring dosis juga penting dilakukan untuk pekerja profesional dan pasien yang menjalani prosedur radiologis berulang.

Pengetahuan tentang interaksi ini juga penting dalam menghadapi situasi darurat nuklir atau paparan lingkungan akibat kecelakaan radiasi. Identifikasi dini terhadap gejala dan penerapan

protokol penanganan yang tepat dapat mengurangi dampak jangka panjang terhadap individu dan masyarakat.

1.4 Efek Biologis dari Paparan Radiasi

Paparan radiasi terhadap tubuh manusia dapat menyebabkan berbagai perubahan biologis yang bergantung pada jenis radiasi, dosis, lama paparan, serta sensitivitas individu. Efek yang ditimbulkan dapat diklasifikasikan secara umum menjadi dua kelompok utama: efek deterministik dan efek stokastik. Keduanya memiliki mekanisme, manifestasi, dan implikasi yang berbeda dalam bidang kesehatan dan keselamatan kerja, khususnya dalam praktik kedokteran, radiologi, serta industri nuklir.

1.4.1 Efek Deterministik

Efek deterministik (kadang disebut *non-stochastic effects*) adalah perubahan biologis yang muncul ketika individu menerima paparan radiasi di atas ambang batas tertentu. Artinya, efek ini hanya terjadi apabila dosis radiasi yang diterima melebihi nilai ambang tertentu, yang biasanya dinyatakan dalam satuan *gray (Gy)*. Semakin tinggi dosis yang diterima di atas ambang ini, maka semakin berat kerusakan yang ditimbulkan.

Efek deterministik terjadi karena kerusakan besar pada sejumlah besar sel dalam waktu singkat, yang mengakibatkan kegagalan fungsi jaringan. Beberapa contoh efek deterministik meliputi:

1. **Eritema kulit**, yaitu kemerahan pada kulit yang muncul beberapa jam atau hari setelah terpapar dosis tinggi.
2. **Katarak**, kerusakan lensa mata akibat radiasi kronis, khususnya pada pekerja radiasi seperti teknisi radiologi.
3. **Kerusakan jaringan atau organ**, seperti sindrom gastrointestinal atau hematopoietik akibat paparan akut pada tingkat tinggi.

Ambang dosis untuk terjadinya efek ini bervariasi tergantung organ yang terpapar. Misalnya, ambang katarak biasanya sekitar 0,5 Gy untuk paparan kronis dan lebih tinggi untuk paparan akut. Karena efek deterministik bersifat dapat diprediksi dan memiliki ambang batas, pengendalian dosis menjadi strategi utama dalam pencegahan (ICRP, 2007).

1.4.2 Efek Stokastik

Berbeda dengan efek deterministik, efek stokastik (*stochastic effects*) tidak memiliki ambang batas dosis. Artinya, bahkan paparan radiasi pada dosis rendah sekalipun dapat memicu efek ini. Efek stokastik bersifat acak dan probabilistik; semakin besar dosis yang diterima, semakin besar pula kemungkinan terjadinya efek, namun tingkat keparahan tidak dipengaruhi oleh besarnya dosis.

Efek utama dari kelompok ini adalah:

1. **Kanker**: Radiasi dapat menginduksi transformasi sel normal menjadi sel ganas. Kanker tiroid, leukemia, dan kanker paru-paru adalah beberapa jenis kanker yang sering dikaitkan dengan paparan radiasi kronis.

2. **Mutasi genetik:** Perubahan pada materi genetik yang dapat diwariskan ke generasi berikutnya. Walaupun kasus ini jarang dilaporkan secara epidemiologis, potensi teoretis tetap diakui oleh komunitas radioproteksi global.

Karena tidak ada dosis yang benar-benar aman, maka prinsip *as low as reasonably achievable (ALARA)* digunakan secara luas dalam pengelolaan risiko stokastik. Upaya proteksi radiasi lebih ditekankan pada meminimalkan durasi paparan, menjaga jarak aman dari sumber radiasi, dan penggunaan pelindung fisik seperti *lead apron* atau dinding berpelindung.

1.4.3 Faktor yang Mempengaruhi Efek Biologis

Beberapa faktor turut memengaruhi derajat efek biologis dari paparan radiasi, antara lain:

1. **Jenis radiasi:** Radiasi alfa lebih berbahaya dibandingkan beta atau gamma jika masuk ke dalam tubuh, meskipun daya tembusnya rendah.
2. **Laju dosis:** Paparan dalam waktu singkat (akut) cenderung menimbulkan efek lebih berat dibanding paparan yang sama namun berlangsung lama (kronis).
3. **Sensitivitas jaringan:** Sel yang aktif membelah seperti sel sumsum tulang, mukosa gastrointestinal, dan embrio lebih rentan terhadap efek radiasi.
4. **Usia dan kondisi kesehatan:** Bayi, anak-anak, dan individu dengan sistem imun lemah memiliki risiko lebih tinggi.

Pemahaman tentang semua faktor ini penting agar tenaga medis, pekerja industri, dan masyarakat umum dapat dilindungi

dengan tepat melalui kebijakan, pelatihan, dan penerapan standar keselamatan.

Bab 2: Efek Biologis Radiasi

Pengion dan Prinsip

Fundamental Proteksi

Radiasi

2.1 Mekanisme Efek Biologis Radiasi Pengion

Radiasi pengion memiliki dampak yang signifikan terhadap sistem biologis, terutama karena kemampuannya untuk menyebabkan ionisasi atom dan molekul dalam jaringan hidup. Proses ionisasi ini menghasilkan efek biologis yang kompleks, baik secara langsung melalui interaksi dengan struktur DNA maupun secara tidak langsung melalui pembentukan radikal bebas. Pemahaman mengenai mekanisme efek biologis radiasi pengion sangat penting dalam konteks penggunaan teknologi radiasi di bidang kesehatan, industri, maupun lingkungan.

Ketika radiasi pengion—seperti sinar-X, sinar gamma, atau partikel alfa dan beta—berinteraksi dengan jaringan tubuh, ia dapat memindahkan energi ke atom atau molekul dalam sel. Akibatnya, atom atau molekul tersebut kehilangan atau memperoleh elektron, sehingga berubah menjadi ion. Salah satu target utama dari radiasi adalah molekul air, yang merupakan komponen utama dalam tubuh

manusia. Proses ionisasi air akan menghasilkan radikal bebas seperti *hydroxyl radical* ($\cdot OH$) dan *hydrogen peroxide* (H_2O_2), yang sangat reaktif dan dapat merusak berbagai komponen seluler, termasuk lipid membran, protein, dan asam nukleat (Hall & Giaccia, 2019).

Efek biologis dari radiasi pengion dapat dibedakan menjadi dua mekanisme utama: efek langsung dan efek tidak langsung. Efek langsung terjadi ketika partikel radiasi secara langsung menyerang struktur penting dalam sel, seperti DNA, dan menyebabkan kerusakan. Efek ini dapat menimbulkan mutasi genetik, translokasi kromosom, atau bahkan kematian sel. Sebaliknya, efek tidak langsung terjadi ketika radiasi menghasilkan radikal bebas yang kemudian bereaksi dengan komponen seluler dan menyebabkan kerusakan secara sekunder. Meskipun kedua mekanisme ini berkontribusi terhadap kerusakan sel, diperkirakan lebih dari 70% efek biologis radiasi disebabkan oleh mekanisme tidak langsung melalui radikal bebas (Bushong, 2020).

Salah satu dampak paling kritis dari radiasi pengion adalah kerusakan pada DNA, baik dalam bentuk *single-strand breaks* (SSB) maupun *double-strand breaks* (DSB). Kerusakan SSB biasanya dapat diperbaiki oleh mekanisme seluler dengan relatif cepat. Namun, DSB memiliki konsekuensi yang lebih serius karena sulit diperbaiki secara sempurna dan berisiko menyebabkan perubahan genetik permanen atau apoptosis. Jika perbaikan DNA gagal atau terjadi kesalahan, sel dapat mengalami transformasi menjadi sel kanker atau mengalami kematian sel terprogram (*apoptosis*) (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2018).

Tingkat kerusakan biologis akibat paparan radiasi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. **Jenis radiasi:** Partikel alfa memiliki daya ionisasi tinggi namun jangkauan pendek, sehingga sangat merusak bila berada di dalam tubuh. Sinar gamma dan sinar-X memiliki penetrasi lebih dalam tetapi daya ionisasi yang lebih rendah per satuan jarak.
2. **Energi radiasi:** Semakin tinggi energi radiasi, semakin dalam penetrasi dan luas daerah yang terpapar.
3. **Dosis:** Dosis radiasi diukur dalam satuan *gray* (Gy) untuk menyatakan jumlah energi yang diserap per kilogram jaringan. Efek biologis meningkat seiring dengan kenaikan dosis.
4. **Sensitivitas jaringan:** Jaringan yang memiliki tingkat pembelahan sel tinggi seperti sumsum tulang, jaringan embrionik, dan saluran pencernaan lebih sensitif terhadap radiasi dibandingkan jaringan seperti otot atau saraf. Hal ini berkaitan dengan konsep *law of Bergonie and Tribondeau*, yang menyatakan bahwa sel-sel yang aktif membelah lebih rentan terhadap efek radiasi.

Efek biologis radiasi dapat dibagi menjadi efek deterministik dan stokastik. Efek deterministik, seperti eritema kulit atau sindrom gastrointestinal akut, memiliki ambang batas dosis dan keparahannya meningkat sesuai dengan peningkatan dosis. Sebaliknya, efek stokastik tidak memiliki ambang dosis dan berkaitan dengan probabilitas terjadinya, seperti mutasi genetik dan

kanker. Oleh karena itu, perlindungan terhadap paparan radiasi menjadi aspek kritis dalam praktik radiologi dan radioterapi medis.

Meskipun radiasi pengion memiliki potensi merusak, pemanfaatan yang tepat dengan pengendalian dosis dan perlindungan yang memadai memberikan manfaat besar dalam dunia medis, khususnya dalam diagnosis dan terapi. Teknologi modern memungkinkan perhitungan dan pengaturan dosis yang akurat, sehingga manfaat klinisnya jauh melebihi risikonya dalam kondisi yang dikendalikan dengan baik.

2.2 Efek Akut dan Kronis Paparan Radiasi

Paparan radiasi merupakan isu penting dalam praktik radiologi karena melibatkan risiko terhadap kesehatan manusia, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Radiasi yang digunakan untuk tujuan diagnostik dan terapeutik memang memberikan manfaat besar, namun tetap memiliki potensi efek samping bila tidak dikendalikan secara ketat.

Efek radiasi dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu efek akut yang muncul dalam waktu singkat setelah paparan dosis tinggi, dan efek kronis yang berkembang perlahan akibat paparan kumulatif dalam jangka panjang, bahkan ketika dosisnya relatif rendah. Pemahaman terhadap dua bentuk dampak ini menjadi kunci dalam menerapkan prinsip keselamatan radiasi, terutama bagi tenaga kesehatan dan pasien.

2.2.1 Efek Akut Paparan Radiasi

Efek akut biasanya muncul ketika seseorang terpapar radiasi dalam jumlah besar dalam waktu singkat. Kondisi ini dapat menimbulkan gejala yang disebut sebagai *acute radiation syndrome* (ARS), yang umumnya terjadi setelah terpapar dosis lebih dari 1 Gray (Gy). ARS terjadi karena kerusakan besar pada jaringan tubuh, terutama jaringan yang membelah cepat seperti sumsum tulang, saluran cerna, dan sistem limfatik.

Gejala awal meliputi mual, muntah, diare, lemas, dan sakit kepala. Jika paparan melebihi ambang tertentu, gejala berkembang menjadi perdarahan, infeksi, dehidrasi berat, serta kerusakan organ vital. Pada kasus ekstrem, seperti insiden nuklir atau kecelakaan radiasi, efek ini bisa berakibat fatal. Tingkat keparahan sangat tergantung pada dosis dan area tubuh yang terkena paparan (*Hall & Giaccia, 2018*).

Selain gejala sistemik, kulit yang terkena paparan langsung dapat mengalami reaksi lokal seperti eritema, lepuh, hingga nekrosis. Oleh karena itu, penggunaan pelindung seperti *lead apron* dan *thyroid shield* menjadi standar dalam prosedur radiologi untuk mencegah paparan tidak perlu terhadap bagian tubuh yang tidak diperiksa.

2.2.2 Efek Kronis Paparan Radiasi

Berbeda dengan efek akut, efek kronis tidak muncul segera setelah paparan, melainkan berkembang secara perlahan dalam hitungan bulan atau bahkan tahun. Paparan kronis biasanya terjadi dalam konteks pekerjaan atau terapi jangka panjang. Meskipun dosis

per paparan relatif rendah, akumulasi dari paparan berulang dapat menyebabkan kerusakan permanen pada sel dan jaringan.

Salah satu efek kronis yang paling dikenal adalah peningkatan risiko kanker. Radiasi pengion memiliki kemampuan untuk menyebabkan kerusakan DNA, yang jika tidak diperbaiki tubuh secara efektif, dapat memicu mutasi yang mengarah pada keganasan. Riset epidemiologis terhadap penyintas bom atom di Hiroshima dan Nagasaki menunjukkan bahwa bahkan paparan sedang dapat meningkatkan risiko leukemia dan kanker tiroid (ICRP, 2007).

Selain kanker, efek lain yang sering dikaitkan dengan paparan jangka panjang adalah katarak, yang terjadi akibat kerusakan kumulatif pada lensa mata. Pada pekerja medis seperti radiografer atau ahli fluoroskopi, penggunaan pelindung mata sangat disarankan untuk mencegah gangguan penglihatan ini. Mutasi genetik juga menjadi perhatian, terutama pada populasi usia reproduktif, karena kerusakan pada gamet dapat diwariskan ke generasi berikutnya.

2.2.3 Upaya Pencegahan dan Pemantauan

Karena bahaya paparan radiasi bersifat tidak langsung dan tidak dapat dirasakan secara kasatmata, pemantauan dan pengendalian menjadi sangat penting. Salah satu prinsip utama dalam keselamatan radiasi adalah *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA), yang berarti paparan radiasi harus ditekan serendah mungkin sesuai kebutuhan klinis.

Pemantauan paparan dilakukan dengan menggunakan dosimeter pribadi yang dikenakan oleh tenaga medis. Alat ini mencatat jumlah radiasi yang diterima dalam periode tertentu dan menjadi alat evaluasi risiko kesehatan secara berkala. Bila batas ambang tercapai atau terlampaui, tindakan korektif segera dilakukan, seperti rotasi tugas atau penggunaan pelindung tambahan.

Di samping itu, pendidikan berkelanjutan tentang keselamatan radiasi sangat diperlukan agar tenaga medis tetap memperbarui pengetahuannya mengenai teknik perlindungan dan protokol kerja. Penerapan sistem kerja yang aman, seperti menjaga jarak dari sumber radiasi, meminimalkan waktu paparan, dan menggunakan pelindung radiasi, adalah langkah konkret yang wajib diterapkan.

Pasien juga harus dilibatkan dalam perlindungan radiasi, terutama dalam prosedur radiologi berulang. Informasi tentang manfaat dan risiko pemeriksaan, serta alternatif yang lebih aman jika tersedia, perlu disampaikan dengan jujur dan jelas agar pasien dapat mengambil keputusan yang tepat.

2.3 Prinsip Dasar Proteksi Radiasi

Proteksi radiasi merupakan bagian penting dalam penggunaan teknologi radiasi, baik di bidang medis, industri, maupun riset, demi menjaga keselamatan manusia dan lingkungan. Tujuannya adalah mencegah efek merugikan dari paparan radiasi pengion, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, dengan

tetap mempertahankan manfaat penggunaan radiasi secara maksimal.

Organisasi internasional seperti International Commission on Radiological Protection (ICRP) telah menetapkan kerangka kerja proteksi radiasi yang diterima secara global. Kerangka ini didasarkan pada tiga prinsip utama: *justifikasi*, *optimisasi*, dan *pembatasan dosis*. Ketiganya saling berkaitan dan harus diterapkan secara terpadu dalam seluruh kegiatan yang melibatkan penggunaan radiasi.

2.3.1 Justifikasi: Menyeimbangkan Manfaat dan Risiko

Prinsip *justifikasi* menegaskan bahwa setiap kegiatan yang melibatkan paparan radiasi harus memberikan manfaat yang lebih besar daripada potensi risikonya. Artinya, penggunaan radiasi tidak boleh dilakukan secara sembarangan, dan harus ada alasan yang kuat bahwa manfaatnya bagi individu atau masyarakat lebih signifikan dibandingkan dampak yang mungkin timbul.

Dalam praktik medis, misalnya, penggunaan sinar-X untuk pemeriksaan diagnostik harus diputuskan dengan mempertimbangkan kebutuhan klinis pasien. Pemeriksaan radiologis yang tidak diperlukan, berulang, atau tidak relevan dengan kondisi pasien dapat meningkatkan risiko efek biologis jangka panjang tanpa manfaat diagnostik yang sepadan (ICRP, 2007).

Oleh karena itu, peran tenaga kesehatan dalam mengevaluasi kebutuhan tindakan radiasi menjadi sangat penting. Mereka harus mempertimbangkan kondisi pasien, alternatif non-radiasi yang

tersedia, serta pertimbangan usia dan sensitivitas jaringan sebelum menyetujui prosedur yang melibatkan paparan.

2.3.2 Optimisasi: Menjaga Paparan Serendah Mungkin

Prinsip *optimisasi* menekankan bahwa paparan radiasi harus dijaga serendah mungkin, sejauh dapat dicapai secara logis dan praktis. Konsep ini dikenal luas dengan istilah *As Low As Reasonably Achievable (ALARA)*, yang merupakan pendekatan dinamis untuk mengelola risiko paparan radiasi.

Prinsip ini tidak berarti menghilangkan radiasi sama sekali, tetapi menyesuaikan dosis dengan kebutuhan, meminimalkan eksposur tanpa mengorbankan kualitas hasil atau fungsi operasional. Dalam radiologi diagnostik, contohnya, penggunaan teknik pencitraan dengan dosis rendah dan perangkat *collimator* dapat mengurangi paparan ke jaringan yang tidak dituju.

Strategi optimisasi juga mencakup pelatihan rutin untuk operator alat radiasi, pemeliharaan peralatan, serta penerapan teknologi pendukung seperti sistem digital dan perangkat otomatisasi yang meminimalkan kesalahan manusia.

2.3.3 Pembatasan Dosis: Menjaga di Bawah Ambang Aman

Prinsip ketiga dalam proteksi radiasi adalah *pembatasan dosis*, yaitu memastikan bahwa paparan individu tidak melebihi batas yang telah ditetapkan secara internasional. Batas ini ditetapkan untuk melindungi pekerja radiasi, masyarakat umum, dan pasien dari efek deterministik dan stokastik yang berbahaya.

Menurut pedoman *ICRP*, batas dosis tahunan untuk pekerja radiasi adalah 20 milisievert (*mSv*) dalam rerata lima tahun, dengan

batas maksimum 50 *mSv* dalam satu tahun. Untuk masyarakat umum, batasnya jauh lebih rendah, yaitu 1 *mSv* per tahun di luar paparan medis atau lingkungan alamiah (UNSCEAR, 2020).

Monitoring rutin terhadap dosis yang diterima individu menjadi aspek penting dalam prinsip ini. Teknologi seperti dosimeter pribadi dan pemantauan area kerja digunakan untuk memastikan bahwa paparan tetap dalam batas aman. Pelaporan dosis juga harus dilakukan secara transparan dan terdokumentasi untuk keperluan audit dan evaluasi berkala.

2.3.4 Implementasi dalam Berbagai Sektor

Prinsip-prinsip proteksi radiasi ini tidak hanya berlaku di fasilitas kesehatan, tetapi juga dalam berbagai sektor seperti industri nuklir, pengolahan logam berat, pengujian nondestruktif (*non-destructive testing*), dan laboratorium riset. Pelatihan tenaga kerja dan penetapan sistem pengawasan internal menjadi bagian integral dari penerapan prinsip tersebut.

Perlu juga disadari bahwa perlindungan terhadap lingkungan merupakan bagian penting dari prinsip-prinsip ini. Paparan terhadap flora, fauna, serta kontaminasi air dan udara harus dikelola sedemikian rupa agar tidak membahayakan ekosistem secara luas.

2.4 Strategi Implementasi Proteksi Radiasi di Fasilitas Radiologi

Proteksi radiasi merupakan unsur krusial dalam operasional fasilitas radiologi untuk menjamin keselamatan pekerja, pasien, dan

lingkungan sekitar. Tujuan utamanya adalah meminimalkan paparan radiasi pengion tanpa mengorbankan kualitas diagnostik dan terapeutik. Oleh karena itu, strategi perlindungan harus dirancang secara menyeluruh dan diterapkan secara konsisten.

2.4.1 Prinsip-Prinsip Dasar Proteksi Radiasi

Strategi proteksi radiasi didasarkan pada tiga prinsip utama: pembatasan waktu, peningkatan jarak, dan penggunaan pelindung (*shielding*). Prinsip-prinsip ini dikenal sebagai *time*, *distance*, *shielding* dan telah menjadi fondasi dalam sistem keselamatan radiasi di seluruh dunia.

1. **Waktu:** Makin singkat waktu paparan terhadap sumber radiasi, makin kecil dosis yang diterima. Oleh karena itu, setiap prosedur harus dirancang untuk dilakukan secara efisien, tanpa mengurangi ketepatan diagnostik.
2. **Jarak:** Dosis radiasi menurun secara eksponensial terhadap kuadrat jarak dari sumber. Petugas harus menjaga jarak aman saat melakukan prosedur fluoroskopi atau saat sumber radiasi aktif digunakan.
3. **Perisai (*shielding*):** Penggunaan dinding timbal, kaca berlapis timbal, *lead apron*, dan sarung tangan pelindung adalah contoh upaya fisik untuk meredam radiasi yang tersebar atau bocor.

Ketiga prinsip ini wajib diterapkan secara terpadu agar keselamatan kerja tetap terjaga selama prosedur radiologi berlangsung (Mettler & Upton, 2008).

2.4.2 Penggunaan dan Pemantauan Dosimeter

Dosimeter adalah alat penting dalam pemantauan dosis radiasi individual. Alat ini memungkinkan evaluasi dosis kumulatif yang diterima oleh tenaga kerja dan memastikan bahwa tidak ada individu yang melampaui batas tahunan yang ditetapkan, seperti yang direkomendasikan oleh *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, yaitu 20 mSv per tahun rata-rata selama lima tahun berturut-turut.

Jenis dosimeter yang umum digunakan antara lain:

1. **Thermoluminescent dosimeter (TLD):** Mengukur dosis kumulatif berdasarkan cahaya yang dilepaskan saat pemanasan kristal tertentu.
2. **Dosimeter film badge:** Menggunakan film fotografik untuk mendeteksi paparan.
3. **Electronic personal dosimeter (EPD):** Menyediakan pembacaan waktu nyata yang memudahkan intervensi langsung.

Setiap petugas yang bekerja di lingkungan dengan risiko paparan harus menggunakan dosimeter secara rutin dan melaporkan hasilnya kepada petugas proteksi radiasi (*radiation protection officer*).

2.4.3 Pelatihan dan Kompetensi Personel

Aspek manusia tidak dapat diabaikan dalam sistem proteksi radiasi. Semua personel yang bekerja di fasilitas radiologi harus menjalani pelatihan awal dan pelatihan ulang secara berkala terkait

keselamatan radiasi, penggunaan alat pelindung diri, serta penanganan keadaan darurat.

Materi pelatihan dapat mencakup:

1. Prinsip dasar fisika radiasi
2. Penggunaan peralatan radiologi secara aman
3. Pengendalian kontaminasi dan limbah radioaktif
4. Prosedur evakuasi dalam keadaan darurat

Pelatihan yang baik akan membangun budaya keselamatan (*safety culture*) di lingkungan kerja dan meningkatkan kepatuhan terhadap protokol yang berlaku (IAEA, 2018).

2.4.4 Kepatuhan terhadap Prosedur dan Regulasi

Implementasi strategi proteksi radiasi yang efektif tidak terlepas dari penerapan kebijakan dan regulasi yang jelas. Fasilitas radiologi harus memiliki prosedur standar operasional (*standard operating procedure* atau SOP) yang mengatur setiap langkah kerja, mulai dari persiapan alat hingga pengelolaan limbah radiasi.

Kepatuhan terhadap peraturan nasional dan internasional sangat penting. Di Indonesia, pengawasan dilakukan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) yang menetapkan standar dan melakukan inspeksi berkala. Sedangkan di tingkat global, pedoman ICRP dan International Atomic Energy Agency (IAEA) digunakan secara luas sebagai acuan.

Setiap pelanggaran terhadap prosedur harus dicatat, dilaporkan, dan ditindaklanjuti melalui sistem audit internal sebagai bagian dari manajemen risiko. Sistem pelaporan insiden juga berperan penting dalam mencegah kejadian serupa di masa depan.

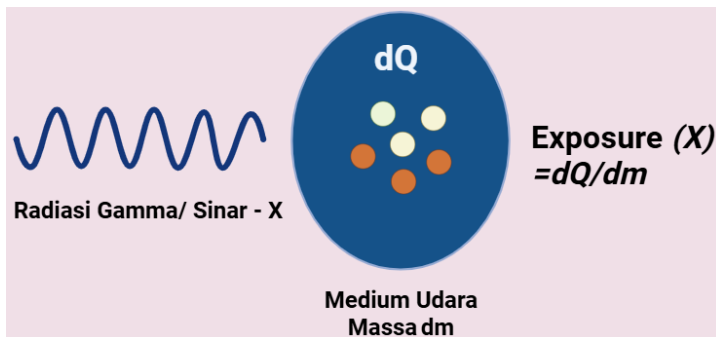
Bab 3: Besaran Proteksi

Radiasi, Satuan Pengukuran, dan Batas Nilai Dosis

3.1 Besaran Fisika dalam Proteksi Radiasi

Dalam praktik proteksi radiasi, penggunaan besaran fisika yang tepat menjadi sangat penting untuk menilai tingkat paparan dan potensi risiko biologis akibat radiasi pengion. Pemahaman terhadap besaran-besaran ini memungkinkan pengendalian dan pengawasan paparan terhadap tenaga kesehatan, pasien, maupun masyarakat umum. Terdapat tiga besaran utama yang digunakan dalam proteksi radiasi: paparan (*exposure*), dosis serap (*absorbed dose*), serta dosis ekivalen dan dosis efektif (*equivalent dose* dan *effective dose*).

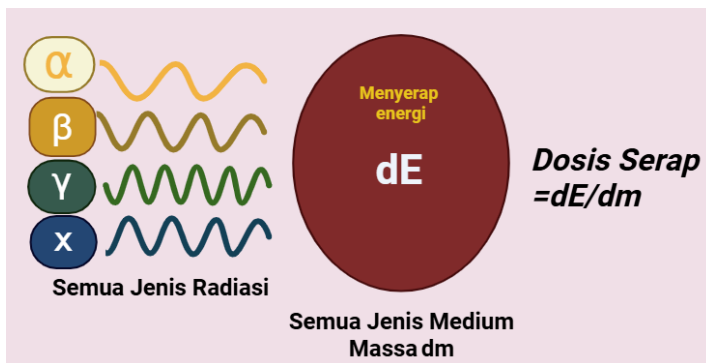
3.1.1 Paparan (*Exposure*)



Paparan adalah ukuran kemampuan foton (sinar-X atau sinar gamma) untuk menghasilkan ionisasi di udara. Satuan internasional untuk paparan adalah coulomb per kilogram (C/kg), yang menggambarkan jumlah muatan listrik dari ion positif dan negatif yang terbentuk di satu kilogram udara. Secara historis, satuan roentgen (R) digunakan, namun kini telah digantikan oleh satuan SI. Konsep paparan digunakan terutama untuk mengukur radiasi dalam ruang terbuka atau di sekitar sumber radiasi sebelum energi tersebut diserap oleh jaringan (Bushong, 2020).

Meskipun paparan merupakan indikator awal dari interaksi radiasi dengan materi, parameter ini tidak memberikan informasi langsung tentang jumlah energi yang diserap oleh tubuh manusia. Oleh karena itu, diperlukan besaran tambahan untuk menggambarkan efek biologis lebih akurat.

3.1.2 Dosis Serap (*Absorbed Dose*)



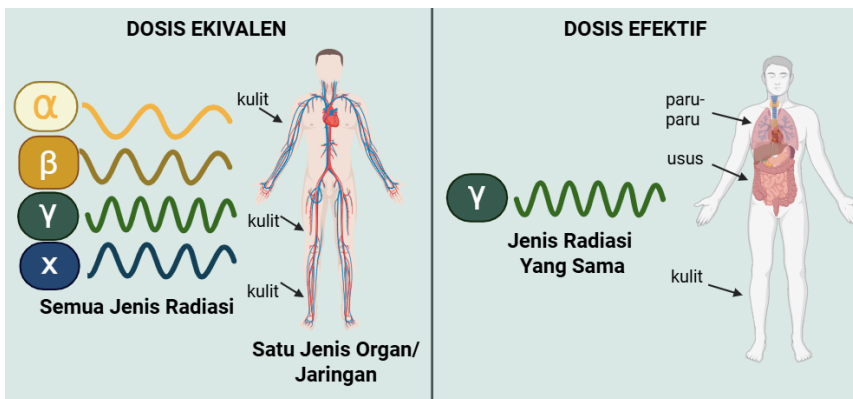
Dosis serap merujuk pada jumlah energi radiasi yang benar-benar diserap oleh suatu massa jaringan atau materi. Satuan untuk dosis serap adalah gray (Gy), di mana 1 Gy setara dengan penyerapan energi sebesar satu joule per kilogram massa. Dosis

serap digunakan untuk menggambarkan seberapa banyak energi yang diterima oleh jaringan tubuh dan sangat penting dalam konteks radioterapi, di mana dosis tinggi secara sengaja diarahkan ke jaringan target seperti tumor.

Besarnya dosis serap tergantung pada jenis dan energi radiasi, serta sifat fisik dan kimia dari jaringan yang terpapar. Misalnya, tulang menyerap lebih banyak energi daripada jaringan lunak karena densitas dan komposisi kimianya berbeda. Oleh karena itu, dalam evaluasi medis, dosis serap sering menjadi dasar penghitungan dosis lanjut yang mempertimbangkan risiko biologis (Hall & Giaccia, 2019).

3.1.3 Dosis Ekuivalen dan Dosis Efektif

Dosis ekuivalen dan dosis efektif merupakan besaran turunan dari dosis serap yang digunakan untuk memperkirakan risiko biologis terhadap organisme hidup. Keduanya diukur dalam satuan sievert (Sv), satuan yang secara khusus dirancang untuk mempertimbangkan dampak biologis dari berbagai jenis radiasi dan sensitivitas jaringan tubuh.



1. **Dosis ekivalen (*Equivalent Dose*)** mempertimbangkan jenis radiasi yang mengenai tubuh. Karena berbagai jenis radiasi memiliki potensi kerusakan biologis yang berbeda, setiap jenis radiasi diberi faktor pembobot (misalnya 1 untuk sinar-X, 20 untuk partikel alfa). Dosis ekivalen dihitung dengan mengalikan dosis serap dengan faktor pembobot radiasi.
2. **Dosis efektif (*Effective Dose*)** melangkah lebih jauh dengan mempertimbangkan juga sensitivitas berbagai organ dan jaringan tubuh. Beberapa jaringan seperti sumsum tulang, paru-paru, dan payudara lebih rentan terhadap efek radiasi, sehingga memiliki faktor pembobot jaringan yang lebih tinggi. Dosis efektif merupakan jumlah dari produk dosis ekivalen untuk tiap organ dikalikan dengan faktor pembobot organ tersebut. Nilai ini digunakan sebagai indikator risiko keseluruhan terhadap kesehatan, termasuk risiko kanker dan gangguan genetik.

Penggunaan dosis efektif sangat penting dalam penilaian risiko terhadap populasi umum dan pekerja radiasi. Misalnya, dalam radiografi dada, dosis efektif berkisar antara 0,1 hingga 0,2 mSv, sedangkan dalam CT scan perut bisa mencapai 10 mSv atau lebih, tergantung teknik dan protokol pencitraan (*International Commission on Radiological Protection* [ICRP], 2007).

3.1.4 Aplikasi Besaran dalam Proteksi Radiasi

Dalam praktik klinis dan industri, ketiga besaran ini digunakan secara bersamaan untuk menilai, membatasi, dan mendokumentasikan paparan radiasi. Misalnya, dalam pemantauan

pekerja radiasi, film badge atau *thermoluminescent dosimeter* (TLD) digunakan untuk mencatat dosis serap yang diterima selama periode waktu tertentu. Data ini kemudian dikonversi ke dosis ekivalen dan dosis efektif untuk mengevaluasi risiko jangka panjang.

Untuk perlindungan publik dan pekerja, organisasi internasional seperti ICRP menetapkan batas dosis tahunan. Untuk pekerja profesional, batas maksimum dosis efektif yang disarankan adalah 20 mSv per tahun rata-rata selama lima tahun, dan tidak boleh melebihi 50 mSv dalam satu tahun. Sedangkan untuk masyarakat umum, batasannya lebih rendah yaitu 1 mSv per tahun, kecuali dalam situasi khusus seperti pemeriksaan medis (ICRP, 2007).

3.2 Satuan Pengukuran Radiasi

Pemahaman tentang satuan pengukuran radiasi sangat penting dalam bidang radiologi karena berkaitan langsung dengan keselamatan pasien dan tenaga medis. Radiasi pengion yang digunakan dalam berbagai prosedur diagnostik dan terapeutik memiliki potensi untuk menimbulkan efek biologis, baik yang diinginkan (seperti dalam terapi kanker) maupun yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pengukuran dosis radiasi secara akurat menjadi bagian yang tidak terpisahkan dalam pengendalian risiko.

Satuan radiasi telah mengalami perkembangan seiring dengan kemajuan teknologi dan pemahaman terhadap efek biologis radiasi. Saat ini, sistem satuan internasional (*International System of Units* atau SI) telah diterima secara global untuk meningkatkan

konsistensi, transparansi, dan pemahaman dalam praktik medis, ilmiah, serta regulasi.

3.2.1 Dosis Serap: Gray (Gy)

Gray (disingkat Gy) adalah satuan untuk mengukur dosis serap (*absorbed dose*), yaitu jumlah energi radiasi yang diserap oleh suatu materi per satuan massa. Satu gray setara dengan satu joule energi yang diserap per kilogram massa ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$). Konsep ini sangat penting dalam praktik radioterapi karena memungkinkan penentuan jumlah energi yang disalurkan ke jaringan target.

Semakin tinggi dosis serap, semakin besar pula kemungkinan terjadi kerusakan pada jaringan yang terpapar. Misalnya, dalam radioterapi kanker, dosis serap sebesar 2 Gy per sesi dapat diberikan secara bertahap hingga total mencapai 60–70 Gy tergantung jenis dan lokasi tumor. Penggunaan *gray* memungkinkan perhitungan dosis yang presisi untuk memaksimalkan manfaat terapeutik dan meminimalkan risiko efek samping (*Bushong, 2021*).

Sebelum diberlakukannya satuan SI, satuan yang digunakan adalah rad, yang berasal dari istilah *radiation absorbed dose*. Satu gray setara dengan 100 rad. Meskipun rad masih ditemukan dalam beberapa literatur lama, penggunaannya kini telah digantikan secara resmi oleh gray.

3.2.2 Dosis Ekuivalen dan Dosis Efektif: Sievert (Sv)

Tidak semua jenis radiasi menimbulkan efek biologis yang sama, meskipun memiliki energi yang setara. Oleh karena itu, digunakan konsep dosis ekuivalen untuk mempertimbangkan jenis radiasi yang terlibat. Dosis ekuivalen adalah hasil dari dosis serap

dikalikan dengan faktor pembobot radiasi (*radiation weighting factor*), yang mencerminkan potensi biologis dari jenis radiasi tersebut. Satuan yang digunakan adalah *sievert* (Sv).

Sebagai contoh, sinar-X dan sinar gamma memiliki faktor pembobot sebesar 1, sedangkan partikel alfa memiliki faktor sebesar 20 karena efek biologisnya jauh lebih merusak. Jadi, 1 Gy dari partikel alfa setara dengan 20 Sv dalam hal risiko biologis.

Sementara itu, dosis efektif adalah ukuran risiko keseluruhan dari paparan radiasi terhadap berbagai organ tubuh, yang dihitung dengan mengalikan dosis ekuivalen pada masing-masing organ dengan faktor pembobot organ (*organ weighting factor*), lalu dijumlahkan. Konsep ini penting karena tidak semua organ tubuh memiliki sensitivitas yang sama terhadap radiasi. Sebagai contoh, jaringan tiroid dan sumsum tulang lebih sensitif dibandingkan kulit atau otot.

Dengan menggunakan satuan *sievert*, tenaga medis dan regulator dapat menilai risiko kesehatan secara lebih komprehensif, baik untuk individu yang menjalani pemeriksaan radiologi berulang, maupun untuk pekerja yang setiap hari terpapar radiasi di lingkungan kerja (ICRP, 2007).

3.2.3 Aplikasi Praktis dan Regulasi

Dalam praktik sehari-hari, satuan *millisievert* (mSv) lebih sering digunakan karena kebanyakan prosedur diagnostik menghasilkan dosis di bawah 1 Sv. Misalnya, radiografi dada menghasilkan sekitar 0,1 mSv, sedangkan *computed tomography* (CT scan) abdomen dapat mencapai 10 mSv per pemeriksaan.

Informasi ini penting untuk pasien dan tenaga medis dalam mempertimbangkan manfaat dan potensi risiko suatu tindakan pencitraan.

Untuk melindungi tenaga medis, otoritas kesehatan di berbagai negara menetapkan batas paparan tahunan yang diperbolehkan. Menurut rekomendasi *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), batas dosis efektif tahunan untuk pekerja radiasi adalah 20 mSv rata-rata selama lima tahun, dan tidak boleh melebihi 50 mSv dalam satu tahun. Sementara itu, untuk masyarakat umum, batas paparan tahunan adalah 1 mSv.

Penerapan standar ini memerlukan pemantauan ketat melalui penggunaan dosimeter individu dan audit berkala terhadap fasilitas radiologi. Transparansi dalam pelaporan serta pendidikan tentang satuan radiasi menjadi kunci dalam menumbuhkan kesadaran dan kepatuhan terhadap protokol keselamatan (McEwen & Nies, 2019).

3.3 Konversi dan Hubungan Antar Besaran

Dalam bidang proteksi radiasi dan fisika kesehatan, pemahaman mengenai satuan radiasi dan hubungan antar besaran merupakan aspek fundamental. Penggunaan satuan yang tepat dan konversi yang akurat sangat penting untuk menilai risiko paparan, merancang protokol keselamatan, serta menyampaikan informasi yang konsisten kepada tenaga medis, regulator, maupun masyarakat umum.

Tiga jenis besaran utama yang sering digunakan dalam pengukuran dan pengelolaan radiasi adalah dosis serap, dosis ekuivalen, dan dosis efektif. Masing-masing memiliki makna fisik dan biologis yang berbeda, serta menggunakan satuan yang khas.

3.3.1 Dosis Serap: Gray dan Rad

Dosis serap menunjukkan jumlah energi radiasi yang diserap oleh suatu massa materi, biasanya jaringan biologis. Satuan internasional untuk dosis serap adalah gray (Gy), yang didefinisikan sebagai satu joule energi radiasi yang diserap oleh satu kilogram massa. Dalam sistem satuan tradisional, dosis serap dinyatakan dalam rad, dengan konversi:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Dosis serap memberikan informasi dasar mengenai seberapa banyak energi yang ditransfer oleh radiasi ke dalam jaringan. Namun, informasi ini belum cukup untuk menilai dampak biologis secara menyeluruh karena jenis radiasi dan sensitivitas jaringan juga memainkan peran penting (Martin & Harbison, 2018).

3.3.2 Dosis Ekuivalen: Sievert dan Rem

Karena berbagai jenis radiasi memiliki tingkat bahaya biologis yang berbeda meskipun dengan dosis serap yang sama, maka digunakanlah konsep dosis ekuivalen untuk mencerminkan efek biologis tersebut. Dosis ekuivalen dihitung dengan mengalikan dosis serap dengan faktor bobot radiasi (*radiation weighting factor*, disimbolkan dengan W_R), yang nilainya tergantung pada jenis radiasi.

Misalnya, W_R untuk sinar-X, sinar gamma, dan elektron adalah 1, sementara untuk partikel alfa adalah 20, menunjukkan bahwa partikel alfa lebih merusak secara biologis.

$$\text{Dosis Ekuivalen (Sv)} = \text{Dosis Serap (Gy)} \times \text{Faktor Bobot Radiasi (} W_R \text{)}$$

Satuan internasional dosis ekuivalen adalah *sievert (Sv)*, dan satuan tradisionalnya adalah *rem*. Hubungannya adalah:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Perhitungan dosis ekuivalen ini penting dalam menentukan paparan pekerja radiasi dan mengatur batas tahunan sesuai dengan risiko kesehatan yang dapat ditimbulkan oleh berbagai jenis radiasi.

3.3.3 Dosis Efektif: Perhitungan Multijaringan

Dosis efektif memperhitungkan bahwa tidak semua jaringan tubuh memiliki sensitivitas yang sama terhadap radiasi. Oleh karena itu, dosis efektif dihitung dengan menjumlahkan dosis ekuivalen dari masing-masing organ atau jaringan, dikalikan dengan faktor bobot jaringan (*tissue weighting factor*, disimbolkan W_T). Nilai W_T mencerminkan kontribusi relatif suatu jaringan terhadap risiko kesehatan secara keseluruhan.

$$\text{Dosis Efektif (Sv)} = \sum (\text{Dosis Ekuivalen untuk jaringan} \times W_T)$$

Contohnya, jaringan seperti sumsum tulang, paru-paru, dan payudara memiliki nilai W_T yang lebih tinggi dibandingkan dengan kulit atau permukaan tulang, karena lebih rentan terhadap transformasi seluler akibat paparan radiasi.

Konsep dosis efektif digunakan secara luas dalam proteksi radiasi untuk memberikan penilaian risiko secara keseluruhan terhadap tubuh manusia, dan juga menjadi dasar dalam pengaturan

batas paparan tahunan bagi pekerja dan masyarakat umum (ICRP, 2007).

3.3.4 Penerapan dalam Praktik

Dalam praktik klinis maupun industri, pemahaman konversi satuan sangat penting untuk interpretasi hasil pengukuran dan pengambilan keputusan. Misalnya, dalam radiologi diagnostik, alat pencitraan mungkin menampilkan dosis dalam miligray (*mGy*), sementara laporan kepada pasien atau regulator biasanya menggunakan sievert (*mSv*) untuk mencerminkan risiko biologis.

Kesalahan dalam konversi antara *gray*, *rad*, *sievert*, dan *rem* dapat menyebabkan salah interpretasi tingkat paparan dan risiko yang menyertainya. Oleh karena itu, pelatihan rutin dan penggunaan sistem otomatis yang mengintegrasikan konversi satuan menjadi langkah penting dalam menjaga akurasi dan keselamatan kerja.

Di sisi lain, untuk komunikasi publik, penggunaan satuan internasional seperti *sievert* dan *gray* lebih disarankan karena bersifat universal dan sesuai standar global.

3.4 Batas Nilai Dosis yang Diperbolehkan

Paparan terhadap radiasi pengion harus dikendalikan secara ketat agar tidak menimbulkan dampak kesehatan jangka pendek maupun panjang. Untuk itu, lembaga internasional seperti *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* telah menetapkan nilai batas dosis yang diperbolehkan guna melindungi pekerja dan masyarakat umum dari risiko biologis yang mungkin

timbul. Nilai batas ini menjadi acuan dalam penyusunan kebijakan, regulasi nasional, serta pedoman keselamatan di berbagai sektor, termasuk medis, industri, dan riset.

3.4.1 Dosis Efektif Tahunan untuk Pekerja Radiasi

Pekerja radiasi adalah individu yang, karena pekerjaannya, berisiko terpapar radiasi lebih tinggi dibanding masyarakat umum. Untuk mengendalikan risiko tersebut, ICRP menetapkan bahwa:

1. **Dosis efektif tahunan maksimum adalah 20 mSv**, dihitung sebagai rata-rata selama 5 tahun berturut-turut.
2. Dalam satu tahun tertentu, dosis tidak boleh melebihi **50 mSv**.

Dosis efektif memperhitungkan sensitivitas jaringan tubuh terhadap radiasi, sehingga lebih representatif dalam menilai risiko kesehatan secara keseluruhan. Misalnya, paparan pada paru-paru atau sumsum tulang akan dihitung dengan koefisien pembobot yang lebih besar dibanding paparan pada tulang atau kulit.

Batas ini memungkinkan paparan tetap dalam rentang yang aman secara statistik, tanpa menimbulkan efek deterministik dan dengan risiko stokastik yang sangat rendah jika protokol keselamatan dijalankan dengan baik (ICRP, 2007).

3.4.2 Dosis untuk Masyarakat Umum

Bagi masyarakat umum, standar keselamatan lebih ketat karena diasumsikan bahwa individu tersebut tidak mendapat pelatihan khusus, tidak memiliki perlindungan tambahan, dan mungkin memiliki kondisi fisik yang lebih beragam (seperti anak-anak atau lansia).

1. Batas dosis efektif tahunan yang diperbolehkan untuk masyarakat umum adalah **1 mSv per tahun**.
2. Dalam kondisi tertentu seperti perawatan medis yang melibatkan radiasi, batas ini tidak berlaku karena pertimbangan manfaat lebih besar dari risiko.

Selain dari prosedur medis, paparan yang relevan bagi publik dapat berasal dari lingkungan (misalnya radon), transportasi bahan radioaktif, atau limbah industri. Oleh karena itu, pengawasan terhadap fasilitas penyimpan sumber radiasi, rumah sakit, dan instalasi industri menjadi penting untuk menjamin bahwa paparan tidak melebihi batas tersebut.

3.4.3 Batas Dosis Organ atau Jaringan Tertentu

Selain batas umum, ICRP juga menetapkan batas dosis untuk jaringan atau organ tertentu karena perbedaan sensitivitas biologis. Beberapa batas yang penting untuk diketahui antara lain:

1. **Lensa mata:** Batas tahunan adalah **20 mSv** untuk pekerja dan **15 mSv** untuk masyarakat umum. Hal ini disebabkan oleh kerentanan lensa terhadap opasitas dan katarak akibat akumulasi dosis radiasi kronis.
2. **Kulit:** Batas dosis ekuivalen tahunan adalah **500 mSv**, dihitung sebagai dosis rata-rata pada area seluas 1 cm². Kulit memiliki toleransi yang lebih tinggi karena regenerasi yang cepat.
3. **Tangan dan kaki:** Juga memiliki batas dosis yang sama dengan kulit, yaitu **500 mSv** per tahun, karena kedekatan tangan dengan sumber radiasi saat prosedur intervensi.

Batas dosis ini memungkinkan tenaga kerja medis dan industri tetap aman dalam melakukan aktivitas yang memerlukan kontak dekat atau manipulasi sumber radiasi.

3.4.4 Implikasi dan Tindakan Pencegahan

Mengetahui dan menerapkan batas dosis bukan hanya tanggung jawab perorangan, tetapi merupakan bagian dari sistem manajemen keselamatan radiasi yang melibatkan:

1. Penggunaan dosimeter pribadi untuk memantau paparan.
2. Rotasi kerja untuk mengurangi akumulasi paparan individu.
3. Pelatihan berkala mengenai keselamatan radiasi dan penggunaan alat pelindung diri.
4. Audit dan inspeksi oleh otoritas seperti BAPETEN di Indonesia.

Penerapan prinsip *justification*, *optimization*, dan *dose limitation* merupakan landasan dalam semua aktivitas yang melibatkan radiasi. Dengan prinsip ini, diharapkan setiap paparan radiasi dilakukan hanya bila benar-benar diperlukan, dengan dosis serendah mungkin, dan tidak melampaui batas yang ditentukan.

Bab 4: Kerangka Regulasi Nasional dan Standar Internasional Proteksi Radiasi

4.1 Peran dan Prinsip Regulasi Proteksi Radiasi

Regulasi proteksi radiasi merupakan pilar utama dalam sistem keselamatan radiasi yang bertujuan untuk memastikan bahwa semua aktivitas yang melibatkan radiasi pengion dijalankan dengan cara yang aman, terkendali, dan bertanggung jawab. Peraturan ini dirancang untuk melindungi manusia, hewan, dan lingkungan dari risiko yang ditimbulkan oleh paparan radiasi, baik dalam konteks medis, industri, maupun riset. Regulasi yang kuat tidak hanya memberikan panduan teknis, tetapi juga menetapkan tanggung jawab hukum dan etika bagi semua pihak yang terlibat dalam penggunaan radiasi.

Tujuan utama dari regulasi proteksi radiasi adalah mencegah terjadinya efek merugikan akibat paparan radiasi yang tidak terkendali, serta meminimalkan risiko paparan yang tidak perlu. Hal ini mencakup perlindungan terhadap pekerja radiasi, pasien yang menerima prosedur radiologis, masyarakat umum, dan lingkungan

tempat aktivitas radiasi dilakukan. Perlindungan ini juga mencakup aspek jangka panjang, seperti pencegahan dampak genetik dan pencemaran lingkungan yang dapat terjadi akibat pengelolaan limbah radioaktif yang tidak tepat.

Dalam kerangka kerja internasional, regulasi proteksi radiasi dipandu oleh prinsip-prinsip dasar yang telah ditetapkan oleh badan-badan seperti *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* dan *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. Ketiga prinsip utama proteksi radiasi yang diakui secara global adalah justifikasi, optimisasi, dan pembatasan dosis.

1. **Justifikasi (Justification)**

Semua kegiatan yang melibatkan paparan radiasi harus memberikan manfaat yang lebih besar dibandingkan risiko yang mungkin timbul. Artinya, suatu prosedur radiologis tidak boleh dilakukan apabila tidak ada alasan kuat atau hasil yang signifikan terhadap kesehatan atau keselamatan. Misalnya, penggunaan CT scan dalam diagnosis harus didasarkan pada kebutuhan klinis yang jelas dan tidak semata-mata karena ketersediaan teknologi.

2. **Optimisasi (Optimization)**

Setelah suatu kegiatan dinyatakan layak atau *justified*, maka langkah selanjutnya adalah memastikan bahwa paparan radiasi yang terjadi berada pada tingkat serendah mungkin yang secara rasional dapat dicapai, dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial. Prinsip ini dikenal sebagai *ALARA (As Low As Reasonably Achievable)*,

yaitu menjaga dosis radiasi serendah mungkin tanpa mengorbankan kualitas hasil atau keselamatan lainnya (ICRP, 2007).

3. **Pembatasan Dosis (Dose Limitation)**

Untuk mencegah efek deterministik dan mengurangi kemungkinan efek stokastik, regulasi menetapkan batas maksimum dosis radiasi yang diperbolehkan. Batas dosis ini berbeda tergantung pada kelompok populasi: pekerja radiasi profesional diperbolehkan menerima paparan lebih tinggi dibandingkan masyarakat umum, dengan batas tahunan yang telah ditentukan oleh ICRP, yaitu 20 mSv untuk pekerja dan 1 mSv untuk publik.

Penerapan regulasi ini tidak hanya memerlukan instrumen hukum, tetapi juga pengawasan aktif dari lembaga pemerintah. Di Indonesia, otoritas pengatur yang bertanggung jawab dalam bidang ini adalah *Badan Pengawas Tenaga Nuklir* (BAPETEN). Lembaga ini memiliki kewenangan untuk menetapkan standar keselamatan, melakukan inspeksi, memberikan izin operasional, serta menindak pelanggaran yang terjadi dalam aktivitas penggunaan radiasi dan zat radioaktif.

Regulasi juga mencakup kewajiban untuk melaksanakan pelatihan dan sertifikasi bagi tenaga profesional yang bekerja di lingkungan dengan paparan radiasi. Semua personel harus memiliki pengetahuan tentang keselamatan radiasi, teknik proteksi, serta penggunaan alat pelindung diri. Selain itu, fasilitas yang menggunakan radiasi wajib menerapkan sistem dokumentasi,

pencatatan paparan, serta prosedur darurat apabila terjadi kebocoran atau insiden radiologis.

Pentingnya regulasi yang kuat menjadi semakin jelas ketika mempertimbangkan potensi bahaya dari radiasi pengion. Meski radiasi memiliki manfaat besar dalam bidang diagnostik dan terapi, kesalahan dalam pengelolaan atau paparan berlebihan dapat menyebabkan kerusakan genetik, kanker, atau gangguan organik yang serius. Oleh karena itu, regulasi bukan hanya instrumen administratif, tetapi fondasi bagi sistem keselamatan dan kepercayaan publik terhadap penggunaan teknologi berbasis radiasi.

Dengan adanya kerangka regulasi yang komprehensif dan pelaksanaannya yang konsisten, tujuan utama dari proteksi radiasi—yaitu melindungi manusia dan lingkungan dari risiko yang tidak perlu—dapat tercapai. Prinsip-prinsip dasar seperti justifikasi, optimisasi, dan pembatasan dosis menjadi pedoman yang tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga mencerminkan nilai-nilai etika dalam praktik profesional.

4.2 Kerangka Regulasi Nasional di Indonesia

Di Indonesia, pengelolaan keselamatan radiasi merupakan bagian integral dari sistem kesehatan dan ketenaganukliran nasional. Penggunaan radiasi pengion dalam bidang medis, industri, riset, maupun pertahanan menuntut adanya tata kelola yang komprehensif demi melindungi masyarakat, tenaga profesional, serta lingkungan dari potensi bahaya radiasi.

Tanggung jawab utama dalam pengawasan radiasi di Indonesia diemban oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Lembaga ini memiliki wewenang untuk menetapkan regulasi teknis, mengeluarkan izin, melakukan inspeksi, serta menindak pelanggaran yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir dan sumber radiasi. Keberadaan BAPETEN menjadi penting dalam menjaga keseimbangan antara pemanfaatan teknologi radiasi dan upaya perlindungan keselamatan publik.

4.2.1 Landasan Hukum Nasional

Landasan hukum utama yang menjadi payung dalam pengawasan radiasi di Indonesia adalah Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. Undang-undang ini mengatur seluruh aspek pemanfaatan tenaga nuklir, mulai dari perizinan, pembinaan, pengawasan, hingga sanksi hukum bagi pelanggaran.

Dalam Pasal 15 dan Pasal 16, disebutkan bahwa setiap pemanfaatan tenaga nuklir wajib memiliki izin dan melaksanakan program proteksi serta keselamatan sesuai ketentuan. Ketentuan ini berlaku tidak hanya bagi institusi besar seperti rumah sakit atau industri, tetapi juga untuk fasilitas kesehatan primer yang menggunakan alat radiasi sederhana seperti *dental X-ray*.

Undang-undang ini juga menetapkan kewajiban bagi pengguna radiasi untuk melakukan pengukuran dosis, penyimpanan dan pembuangan limbah radioaktif, serta pelatihan bagi petugas yang bekerja di area radiasi. Tujuannya adalah memastikan bahwa

standar keselamatan terpenuhi dan risiko kesehatan dapat diminimalkan.

4.2.2 Regulasi Teknis oleh BAPETEN

Sebagai pelaksana teknis, BAPETEN mengeluarkan berbagai regulasi pelaksana yang lebih rinci dalam bentuk Peraturan Kepala BAPETEN dan Keputusan Kepala BAPETEN. Peraturan ini mencakup standar teknis dan prosedur kerja yang harus diikuti oleh fasilitas radiasi. Misalnya, Perka BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 mengatur tentang proteksi dan keselamatan radiasi dalam pemanfaatan tenaga nuklir untuk kepentingan medis.

Dalam dokumen ini dijelaskan kewajiban penyusunan program keselamatan kerja, termasuk kalibrasi alat, pelatihan petugas proteksi radiasi, dan pemantauan paparan individu dengan dosimeter. Selain itu, peraturan ini juga mengatur pelaporan insiden dan evaluasi berkala terhadap paparan yang diterima tenaga kesehatan maupun pasien.

Setiap fasilitas yang menggunakan sumber radiasi, baik terbuka maupun tertutup, wajib melakukan pengajuan izin yang mencakup rencana keselamatan radiasi, struktur organisasi pelaksana, serta kualifikasi tenaga yang terlibat. Izin ini bersifat terbatas dan perlu diperbarui secara berkala setelah melalui proses audit (*BAPETEN, 2021*).

4.2.3 Pemantauan dan Evaluasi Lapangan

BAPETEN memiliki tim inspektur yang bertugas melakukan evaluasi lapangan dan audit keselamatan. Inspeksi dapat dilakukan secara terjadwal maupun insidental jika terdapat laporan

pelanggaran atau insiden. Tujuan dari inspeksi ini bukan semata mencari kesalahan, melainkan memastikan bahwa sistem manajemen keselamatan radiasi dijalankan secara nyata.

Dalam praktiknya, tim inspektur akan memverifikasi penggunaan dosimeter personal, dokumentasi pelatihan, hasil kalibrasi alat, serta prosedur kerja yang diterapkan di ruang radiologi atau laboratorium nuklir. Jika ditemukan ketidaksesuaian, fasilitas akan diberikan waktu untuk melakukan perbaikan sebelum dikenai sanksi administratif.

Kegiatan pemantauan ini juga mencakup edukasi kepada tenaga kerja mengenai pentingnya *safety culture* dalam lingkungan kerja radiasi. Kesadaran akan keselamatan tidak hanya terbatas pada penggunaan alat pelindung, tetapi juga pada sikap, kebiasaan kerja, dan kepatuhan terhadap prosedur standar.

4.2.4 Harmonisasi dengan Standar Internasional

Regulasi nasional yang ditetapkan BAPETEN tidak berdiri sendiri, melainkan selaras dengan standar dan pedoman internasional. Indonesia sebagai anggota *International Atomic Energy Agency* (IAEA) merujuk pada dokumen seperti *IAEA Safety Standards Series* dan rekomendasi dari *International Commission on Radiological Protection* (ICRP).

Harmonisasi ini penting untuk menjamin bahwa perlindungan terhadap masyarakat dan pekerja radiasi di Indonesia setara dengan praktik terbaik global. Selain itu, hal ini juga mendukung kerja sama lintas negara dalam hal transportasi zat

radioaktif, sistem pelaporan insiden, dan pertukaran informasi teknologi.

4.3 Standar Internasional dalam Proteksi Radiasi

Dalam menghadapi risiko yang ditimbulkan oleh paparan radiasi, keberadaan standar internasional menjadi komponen penting dalam menjamin keselamatan manusia dan lingkungan. Standar ini berfungsi sebagai acuan global bagi negara-negara dalam menyusun peraturan nasional, membentuk sistem pengawasan, dan menyelenggarakan pelatihan untuk para profesional yang bekerja di bidang radiasi. Tiga organisasi utama yang berperan dalam pengembangan dan pemantauan standar internasional adalah *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, dan *World Health Organization (WHO)*.

4.3.1 Peran IAEA dalam Keselamatan Radiasi Global

International Atomic Energy Agency (IAEA), sebagai badan internasional di bawah Perserikatan Bangsa-Bangsa, bertanggung jawab dalam mengembangkan standar keselamatan nuklir dan radiasi yang bersifat mengikat secara moral. Meskipun tidak memiliki kekuatan hukum di tingkat nasional, pedoman yang dikeluarkan oleh *IAEA* dijadikan rujukan utama oleh banyak negara dalam merancang sistem regulasi domestik.

Salah satu kontribusi utama *IAEA* adalah dokumen *General Safety Requirements (GSR)* yang merinci prinsip dan langkah teknis dalam pengelolaan keselamatan radiasi, termasuk aspek proteksi bagi pekerja, pasien, dan masyarakat umum. *IAEA* juga memiliki program audit keselamatan (*IRRS – Integrated Regulatory Review Service*) untuk membantu negara-negara mengevaluasi efektivitas sistem pengawasan mereka (*IAEA*, 2018).

Di samping itu, *IAEA* secara aktif terlibat dalam pelatihan tenaga profesional, pengembangan infrastruktur radiologi, serta bantuan teknis bagi negara berkembang agar mampu menerapkan sistem proteksi yang sesuai dengan standar internasional.

4.3.2 ICRP: Perumus Prinsip Dasar Proteksi Radiasi

International Commission on Radiological Protection (ICRP) adalah organisasi non-pemerintah yang telah berperan penting sejak awal abad ke-20 dalam menyusun prinsip-prinsip etis dan ilmiah bagi proteksi radiasi. Tiga prinsip utama yang dikembangkan oleh *ICRP*—*justifikasi*, *optimisasi*, dan *pembatasan dosis*—telah menjadi landasan global yang diadopsi oleh hampir seluruh negara.

ICRP tidak hanya menetapkan nilai ambang batas dosis untuk pekerja dan masyarakat umum, tetapi juga mengembangkan kerangka konsep tentang *dose constraint*, *reference levels*, dan *tissue weighting factors* yang digunakan dalam perhitungan dosis efektif (*ICRP*, 2007). Prinsip-prinsip ini diterapkan baik dalam radiologi medis, industri, maupun situasi darurat.

Kontribusi *ICRP* juga mencakup pendekatan etis terhadap proteksi radiasi, seperti penghargaan terhadap martabat manusia, keadilan distribusi risiko, serta partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan terkait paparan.

4.3.3 WHO: Perspektif Kesehatan Publik terhadap Radiasi

Sebagai organisasi kesehatan dunia, *World Health Organization (WHO)* memberikan perhatian utama pada dampak kesehatan dari paparan radiasi terhadap masyarakat. Peran *WHO* meliputi penyusunan rekomendasi kesehatan, pedoman tanggap darurat radiologis, dan pengelolaan risiko jangka panjang.

WHO bekerja sama dengan *IAEA*, *ICRP*, dan badan lain dalam mengembangkan panduan untuk penggunaan radiasi di bidang medis, termasuk keamanan prosedur radiologi diagnostik dan radioterapi. Salah satu kontribusi penting adalah *Global Initiative on Radiation Safety in Health Care Settings*, yang bertujuan meningkatkan keselamatan pasien dalam penggunaan radiasi di layanan kesehatan (WHO, 2016).

Selain itu, *WHO* memantau efek kesehatan dari insiden radiasi besar seperti kecelakaan Chernobyl dan Fukushima, serta mengoordinasikan respons global terhadap potensi bahaya radiologis.

4.3.4 Harmonisasi dan Implikasi Global

Kerja sama antara *IAEA*, *ICRP*, dan *WHO* menciptakan harmonisasi kebijakan dan praktik di seluruh dunia. Meski masing-masing organisasi memiliki mandat dan fokus yang berbeda, sinergi ketiganya menjamin bahwa proteksi radiasi tidak hanya didekati dari

sisi teknis, tetapi juga dari aspek etis, sosial, dan kesehatan masyarakat.

Negara-negara anggota diharapkan mengadopsi standar ini ke dalam peraturan nasional, menyesuaikannya dengan kondisi lokal, serta melakukan pelatihan rutin bagi seluruh pemangku kepentingan. Harmonisasi ini penting untuk mencegah kesenjangan perlindungan antar negara, mengingat sifat radiasi yang lintas batas dan berdampak luas.

4.4 Implementasi dan Pengawasan Kepatuhan

Keberhasilan program proteksi radiasi sangat bergantung pada sejauh mana standar yang telah ditetapkan benar-benar diterapkan di lapangan. Implementasi tidak hanya melibatkan pengadaan alat dan penyusunan dokumen, tetapi juga bagaimana seluruh sistem bekerja secara harmonis dan konsisten untuk melindungi pekerja, pasien, serta masyarakat dari risiko paparan radiasi pengion. Di sisi lain, pengawasan kepatuhan merupakan jaminan bahwa semua pihak menjalankan tugasnya sesuai peraturan yang berlaku.

4.4.1 Prosedur Operasional Standar

Implementasi dimulai dengan penyusunan *standard operating procedures* (SOP) yang mendetail dan relevan dengan jenis kegiatan serta tingkat risiko radiasi. SOP berfungsi sebagai pedoman teknis dan administratif yang harus diikuti oleh seluruh

tenaga kerja dalam setiap aspek kegiatan radiologi atau penggunaan sumber radiasi.

Contoh isi SOP antara lain:

1. Prosedur penggunaan *lead apron* dan pelindung lainnya
2. Protokol pengambilan gambar radiologi
3. Tindakan evakuasi dalam keadaan darurat
4. Penanganan limbah radioaktif

SOP ini harus ditinjau dan diperbarui secara berkala mengikuti perkembangan teknologi serta perubahan regulasi dari instansi pengawas.

4.4.2 Pelatihan dan Sosialisasi Internal

Pelatihan rutin menjadi komponen penting dalam implementasi. Pelatihan tidak hanya diberikan kepada tenaga teknis, tetapi juga kepada manajemen dan staf pendukung yang terlibat secara langsung atau tidak langsung. Materi pelatihan mencakup keselamatan radiasi, penggunaan dosimeter, teknik minimisasi paparan, serta simulasi keadaan darurat.

Pelatihan yang efektif akan membentuk budaya keselamatan (*safety culture*) yang kuat. Dalam konteks ini, setiap pekerja memiliki tanggung jawab pribadi dan kolektif untuk menjaga keselamatan dirinya dan orang lain (IAEA, 2018). Sosialisasi yang berkelanjutan juga diperlukan agar informasi tentang prosedur baru atau revisi kebijakan segera dipahami dan dijalankan dengan benar.

4.4.3 Penggunaan Dosimeter dan Pemantauan Dosis

Penggunaan dosimeter pribadi adalah kewajiban yang tidak bisa ditawar. Setiap tenaga kerja di fasilitas radiasi wajib memakai

dosimeter secara konsisten selama jam kerja. Alat ini mencatat akumulasi dosis radiasi yang diterima individu dan memberikan data objektif yang digunakan dalam evaluasi keselamatan kerja.

Pengelolaan data dosis dilakukan oleh petugas proteksi radiasi. Jika terjadi paparan yang melebihi batas atau mendekati nilai ambang, investigasi harus segera dilakukan, dan tindakan korektif diberikan. Penggunaan *electronic personal dosimeter (EPD)* memungkinkan pemantauan dosis secara waktu nyata (*real time*) dan memberikan peringatan dini apabila pekerja berada dalam risiko.

4.4.4 Audit Internal dan Eksternal

Audit adalah instrumen penting untuk menilai kepatuhan dan efektivitas sistem proteksi radiasi. Audit internal dilakukan secara berkala oleh unit pengelola fasilitas, sedangkan audit eksternal dilakukan oleh instansi pengawas seperti BAPETEN di Indonesia.

Audit mencakup aspek administratif, teknis, dan dokumentasi, antara lain:

1. Pemeriksaan log penggunaan alat radiologi
2. Verifikasi pemakaian dosimeter
3. Penilaian efektivitas SOP
4. Observasi langsung praktik kerja di lapangan

Hasil audit menjadi dasar bagi perbaikan sistem dan pengambilan kebijakan manajerial yang lebih akurat. Temuan dari audit juga menjadi indikator komitmen organisasi dalam menjaga keselamatan kerja.

4.4.5 Penegakan Kepatuhan dan Sanksi

Pengawasan terhadap implementasi dilakukan oleh lembaga resmi yang memiliki kewenangan regulasi, seperti *regulatory authority*. Di Indonesia, BAPETEN bertugas melakukan inspeksi, memberikan izin operasional, serta memberlakukan sanksi administratif apabila terjadi pelanggaran.

Sanksi dapat berupa:

1. Teguran tertulis
2. Pembekuan izin sementara
3. Penutupan fasilitas
4. Denda administratif

Tindakan ini penting untuk memastikan bahwa keselamatan bukan hanya menjadi slogan, melainkan komitmen nyata yang dijalankan oleh seluruh institusi yang menggunakan teknologi radiasi.

Bab 5: Optimalisasi Proteksi Radiasi Pasien dalam Radiodiagnostik dan Intervensional

5.1 Pentingnya Proteksi Radiasi Pasien

Proteksi radiasi terhadap pasien merupakan elemen kunci dalam praktik radiologi diagnostik dan intervensional. Pasien adalah individu yang secara langsung terpapar radiasi sebagai bagian dari pemeriksaan atau terapi, sehingga perhatian utama perlu diberikan untuk menjaga agar paparan tersebut tidak menimbulkan risiko yang tidak perlu. Prinsip utama proteksi dalam hal ini adalah untuk memastikan bahwa dosis radiasi serendah mungkin tanpa mengorbankan kualitas diagnostik ataupun keberhasilan tindakan.

Dalam konteks radiologi, pasien sering kali menjadi penerima paparan terbesar dibandingkan petugas atau masyarakat umum, karena mereka berada langsung dalam jalur berkas radiasi. Oleh karena itu, penting untuk menyeimbangkan antara kebutuhan klinis dan keselamatan pasien. Prinsip justification dan optimization dari International Commission on Radiological Protection (ICRP) secara khusus menekankan bahwa setiap tindakan yang melibatkan

radiasi harus memberikan manfaat klinis yang lebih besar daripada risikonya, dan pelaksanaannya harus dilakukan dengan dosis sekecil mungkin (ICRP, 2007).

Proteksi pasien tidak hanya berlaku pada prosedur yang melibatkan dosis tinggi seperti computed tomography (CT scan) atau fluoroskopi intervensional, tetapi juga pada pemeriksaan konvensional seperti radiografi dada atau pemeriksaan gigi. Meskipun masing-masing prosedur memiliki tingkat dosis berbeda, paparan berulang atau kumulatif dapat meningkatkan risiko jangka panjang, termasuk potensi terjadinya kanker atau mutasi genetik. Oleh karena itu, penting bagi tenaga kesehatan untuk selalu mempertimbangkan apakah prosedur radiologi memang diperlukan dan apakah ada alternatif diagnostik lain yang tidak menggunakan radiasi pengion.

Salah satu strategi proteksi pasien yang efektif adalah penerapan prinsip ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Prinsip ini menekankan penggunaan teknik dan protokol yang dapat mengurangi dosis tanpa menurunkan mutu citra. Dalam praktiknya, hal ini dapat dilakukan dengan mengatur parameter teknis seperti tegangan (kV), arus (mA), waktu eksposur, serta penggunaan teknik kolimasi dan filtrasi. Selain itu, penggunaan alat pelindung seperti apron timbal dan pelindung gonad dapat mengurangi dosis yang diterima jaringan sensitif (Bushong, 2020).

Pendekatan berbasis teknologi juga berperan dalam peningkatan proteksi pasien. Sistem digital modern memungkinkan penyesuaian dosis secara otomatis melalui teknologi seperti

automatic exposure control (AEC) atau algoritma pemrosesan citra dengan noise reduction. Selain itu, adanya sistem dose tracking membantu rumah sakit dan klinik mencatat akumulasi paparan pasien secara historis, yang penting untuk evaluasi risiko jangka panjang. Transparansi ini juga menjadi bagian dari patient-centered care, di mana pasien berhak mendapatkan informasi mengenai paparan radiasi yang mereka terima.

Peran penting juga dimainkan oleh tenaga profesional, khususnya radiografer dan radiolog. Kompetensi teknis dan pemahaman mereka terhadap prinsip proteksi radiasi sangat menentukan keberhasilan penerapan protokol yang aman. Pelatihan berkala dan sertifikasi kompetensi menjadi syarat mutlak untuk menjamin bahwa setiap prosedur dilakukan secara tepat dan bertanggung jawab. Selain itu, komunikasi efektif antara tim medis dan pasien juga sangat penting. Memberikan informasi yang jelas mengenai manfaat, risiko, dan alternatif prosedur akan meningkatkan kepercayaan dan pemahaman pasien terhadap tindakan yang dijalani (IAEA, 2018).

Perhatian khusus juga perlu diberikan pada kelompok pasien yang rentan, seperti anak-anak dan ibu hamil. Anak-anak memiliki sensitivitas jaringan yang lebih tinggi terhadap radiasi karena tingkat pembelahan sel yang cepat dan harapan hidup yang lebih panjang. Oleh sebab itu, dosis yang digunakan pada anak harus dikalibrasi secara khusus untuk menghindari paparan berlebihan. Untuk ibu hamil, pemeriksaan radiologi harus dipertimbangkan secara hati-hati

dan, jika memungkinkan, ditunda hingga risiko terhadap janin dapat dihindari atau diminimalkan.

Dengan meningkatnya pemanfaatan teknologi radiologi dalam sistem kesehatan modern, perlindungan terhadap pasien menjadi semakin kompleks namun sangat penting. Tanpa regulasi dan kesadaran yang memadai, risiko dari penggunaan radiasi yang tidak terkendali dapat menimbulkan masalah kesehatan jangka panjang. Oleh karena itu, institusi pelayanan kesehatan harus menerapkan standar operasional yang jelas, memfasilitasi pelatihan bagi tenaga medis, serta melakukan audit berkala terhadap praktik proteksi radiasi yang dijalankan.

5.2 Strategi Proteksi dalam Pemeriksaan Radiodiagnostik

Keselamatan dalam pemeriksaan radiodiagnostik merupakan elemen kunci dalam pelayanan kesehatan modern yang mengandalkan teknologi pencitraan untuk mendeteksi dan mengevaluasi berbagai kondisi medis. Radiasi pengion, meskipun sangat berguna dalam memberikan gambaran internal tubuh, tetap membawa risiko terhadap jaringan biologis bila tidak digunakan secara tepat. Oleh karena itu, diperlukan berbagai strategi proteksi untuk meminimalkan paparan terhadap pasien, tenaga kesehatan, dan lingkungan sekitar.

Proteksi dalam radiologi bukan hanya sekadar menggunakan alat pelindung diri atau memasang rambu-rambu peringatan.

Perlindungan yang optimal memerlukan pemahaman menyeluruh mengenai teknik eksposur, penggunaan protokol yang tepat, serta kompetensi operator dalam mengoperasikan peralatan dengan benar dan efisien.

5.2.1 Penggunaan Teknik Eksposur yang Tepat

Teknik eksposur dalam pemeriksaan radiologi mencakup pengaturan *kilovolt peak* (kVp), *milliampere-seconds* (mAs), dan waktu eksposur. Nilai-nilai ini harus disesuaikan dengan jenis pemeriksaan, ukuran tubuh pasien, serta tujuan diagnostik. Penggunaan kVp yang terlalu tinggi dapat meningkatkan *penetrasi* sinar tetapi mengurangi kontras gambar, sementara mAs yang terlalu tinggi dapat meningkatkan dosis radiasi secara signifikan tanpa menambah kualitas diagnostik yang berarti (*Bushong, 2021*).

Prinsip optimasi harus diterapkan, yaitu mencapai kualitas gambar yang memadai dengan dosis radiasi serendah mungkin. Pengaturan ini tidak bersifat seragam, tetapi harus bersifat individual sesuai karakteristik pasien. Sebagai contoh, anak-anak memerlukan dosis lebih rendah karena sensitivitas jaringan mereka terhadap radiasi lebih tinggi dibandingkan orang dewasa.

5.2.2 Pemilihan Protokol Pencitraan Sesuai Indikasi

Penggunaan protokol pencitraan harus dipandu oleh indikasi klinis yang jelas. Tidak semua keluhan memerlukan pemeriksaan dengan sinar-X atau *computed tomography* (CT), terutama jika ada alternatif lain yang tidak menggunakan radiasi pengion, seperti *ultrasound* atau *magnetic resonance imaging* (MRI).

Setiap modalitas pencitraan memiliki protokol standar yang telah dikembangkan berdasarkan uji klinis dan pertimbangan keselamatan. Protokol ini mencakup pengaturan teknis dan prosedur kerja yang disesuaikan dengan area tubuh yang diperiksa dan tujuan evaluasi. Pemilihan protokol yang tepat tidak hanya meningkatkan efisiensi diagnosis, tetapi juga menurunkan dosis radiasi yang diterima pasien secara signifikan (ICRP, 2007).

Implementasi *clinical decision support system* (CDSS) dalam pengajuan permintaan pencitraan telah terbukti membantu dokter dalam memilih pemeriksaan yang paling sesuai, sehingga menghindari pengulangan atau pemeriksaan yang tidak diperlukan.

5.2.3 Penggunaan Kolimasi dan Filtrasi Tambahan

Kolimasi adalah proses membatasi area paparan sinar-X hanya pada bagian tubuh yang menjadi fokus pemeriksaan. Penggunaan kolimator berbentuk persegi atau lingkaran membantu mengarahkan sinar hanya ke area target dan mengurangi paparan terhadap jaringan di sekitarnya yang tidak diperlukan dalam diagnosis.

Sementara itu, filtrasi tambahan, seperti penggunaan *aluminium filter*, berfungsi untuk menyerap sinar-X dengan energi rendah yang tidak memberikan kontribusi pada pembentukan citra tetapi justru menambah dosis radiasi pada permukaan tubuh. Dengan teknik ini, kualitas berkas sinar-X meningkat, dan risiko kerusakan kulit atau jaringan superfisial berkurang secara signifikan.

Prinsip *beam limitation* dan *beam hardening* menjadi bagian dari strategi ini, yang telah dibuktikan secara luas mampu menekan paparan total pasien tanpa menurunkan nilai diagnostik gambar.

5.2.4 Pelatihan Operator dan Kompetensi Praktis

Kualitas perlindungan terhadap radiasi sangat bergantung pada kemampuan operator dalam mengoperasikan peralatan secara tepat. Operator yang terlatih akan memahami pentingnya pengaturan parameter teknis, penggunaan pelindung seperti *lead apron* dan *thyroid shield*, serta protokol keselamatan lainnya.

Pelatihan tidak hanya meliputi teori, tetapi juga praktik penggunaan alat, pemahaman terhadap efek biologis radiasi, serta kemampuan menangani insiden teknis yang mungkin terjadi. Pelatihan berkala dan sertifikasi ulang menjadi bagian dari pengembangan profesional berkelanjutan yang seharusnya dijalankan oleh institusi pelayanan kesehatan.

Pemahaman terhadap protokol keselamatan juga penting dalam komunikasi dengan pasien. Operator yang kompeten akan menjelaskan secara ringkas tujuan pemeriksaan, durasi, serta perlindungan yang diberikan, sehingga menumbuhkan rasa aman dan kepercayaan pasien terhadap layanan yang diterima.

5.3 Proteksi Radiasi dalam Prosedur Intervensional

Prosedur radiologi intervensional telah menjadi bagian integral dari praktik kedokteran modern karena kemampuannya

memberikan diagnosis dan terapi secara minimal invasif. Namun, prosedur ini memiliki karakteristik yang membedakannya dari radiologi diagnostik konvensional, terutama dalam hal durasi paparan yang lebih panjang, penggunaan fluoroskopi secara real-time, serta frekuensi pemaparan berulang dalam satu sesi.

Paparan radiasi yang lebih tinggi dalam prosedur seperti angiografi, kateterisasi jantung, dan embolisasi menimbulkan tantangan tersendiri bagi proteksi radiasi, baik untuk pasien maupun tenaga medis. Oleh karena itu, pengendalian paparan secara aktif menjadi kebutuhan mendasar yang harus dilakukan dengan cermat dan berkesinambungan.

5.3.1 Optimalisasi Paparan pada Pasien

Salah satu aspek krusial dalam proteksi pasien adalah penerapan prinsip *optimisasi*, yakni menjaga paparan serendah mungkin tanpa mengurangi kualitas diagnostik atau efektivitas terapeutik prosedur. Dalam konteks ini, penggunaan fluoroskopi intermiten menjadi strategi penting. Artinya, fluoroskopi hanya diaktifkan ketika diperlukan, bukan secara terus-menerus sepanjang prosedur.

Selain itu, perekaman gambar dilakukan secara selektif, hanya pada fase kritis yang memberikan informasi maksimal. Tindakan ini tidak hanya mengurangi akumulasi dosis pada pasien, tetapi juga membantu mengefisienkan proses dokumentasi klinis.

Penyesuaian posisi antara tabung sinar-X dan pasien juga memiliki pengaruh besar terhadap distribusi dan intensitas paparan. Menjaga jarak fokus terhadap kulit tetap optimal, menghindari

bidang pencitraan yang berulang pada area yang sama, serta mengatur sudut pemancaran secara variatif dapat mengurangi risiko cedera jaringan lokal akibat dosis tinggi (Miller et al., 2010).

5.3.2 Perlindungan Fisik dan Peralatan Tambahan

Pelindung radiasi fisik seperti celemek timbal, pelindung gonad, dan pelindung tiroid perlu digunakan sesuai indikasi dan posisi pasien. Penggunaan pelindung ini membantu melindungi jaringan radiosensitif dari paparan langsung atau penyebaran sinar hambur (*scatter radiation*).

Pada beberapa prosedur, terutama pada pasien pediatrik dan wanita usia subur, proteksi tambahan menjadi sangat penting mengingat sensitivitas biologis jaringan terhadap efek radiasi yang lebih tinggi dibandingkan populasi dewasa lainnya. Penempatan *shielding* harus dilakukan tanpa mengganggu jalannya prosedur dan tetap memperhatikan kenyamanan pasien.

Pemanfaatan teknologi pendukung seperti sistem *last image hold*, *image store*, dan pemrosesan citra digital turut membantu dalam menurunkan frekuensi eksposur langsung. Teknologi ini memungkinkan operator untuk melakukan penilaian ulang tanpa perlu mengulang pemaparan fisik terhadap pasien.

5.3.3 Monitoring Dosis dan Dokumentasi

Pemantauan waktu fluoroskopi dan dosis kumulatif selama prosedur adalah bagian penting dalam manajemen proteksi radiasi. Alat fluoroskopi modern biasanya dilengkapi dengan fitur pengukur dosis yang menampilkan data seperti waktu eksposur, *cumulative air kerma*, dan *dose area product (DAP)* secara real-time.

Data dosis ini harus dicatat dalam rekam medis pasien, terutama jika prosedur berlangsung lama atau melibatkan area tubuh yang sensitif. Dokumentasi dosis tidak hanya berfungsi sebagai catatan klinis, tetapi juga sebagai dasar evaluasi keselamatan jangka panjang dan pengendalian kualitas layanan (European Commission, 2014).

Tenaga medis perlu diberi pelatihan berkala untuk memahami arti nilai dosis, mengenali ambang batas efek deterministik seperti eritema kulit atau nekrosis, serta mengetahui langkah-langkah mitigasi bila dosis mendekati atau melebihi batas yang disarankan.

5.3.4 Proteksi terhadap Tenaga Kesehatan

Selain pasien, operator dan tenaga pendukung juga terpapar radiasi selama prosedur intervensional. Oleh karena itu, penggunaan pelindung seperti apron timbal, pelindung mata, sarung tangan timbal, dan kaca pelindung menjadi wajib. Penempatan layar pelindung bergerak juga membantu mengurangi paparan *scatter* di sekitar meja prosedur.

Jarak menjadi faktor penting dalam prinsip proteksi: semakin jauh dari sumber, semakin rendah intensitas paparan. Maka, perencanaan ruang intervensi harus mempertimbangkan desain ergonomis yang memungkinkan mobilitas dan jarak kerja yang optimal.

5.4 Audit dan Evaluasi Dosis Pasien

Dalam layanan radiologi diagnostik maupun intervensional, pasien merupakan pihak yang secara langsung menerima paparan radiasi pengion. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi dosis secara berkala untuk memastikan bahwa paparan yang diterima tetap berada dalam batas yang dapat diterima dan sejalan dengan prinsip optimisasi. Audit dosis pasien tidak hanya bertujuan untuk melindungi pasien dari paparan yang tidak perlu, tetapi juga sebagai sarana untuk meningkatkan mutu layanan.

5.4.1 Pentingnya Evaluasi Dosis Pasien

Evaluasi dosis merupakan proses yang dilakukan untuk menilai seberapa besar radiasi yang diterima pasien selama prosedur diagnostik atau terapeutik. Tujuan utamanya adalah untuk menjamin bahwa kualitas gambar atau hasil prosedur tetap baik, tetapi dengan dosis serendah mungkin. Prinsip *as low as reasonably achievable* (ALARA) menjadi landasan utama dalam setiap keputusan terkait penggunaan radiasi pada pasien.

Dalam praktik sehari-hari, evaluasi ini memungkinkan penyedia layanan mengetahui apakah terdapat variasi dosis yang tidak wajar antara operator, peralatan, atau teknik tertentu. Apabila ditemukan penyimpangan, maka tindakan korektif dapat segera dilakukan untuk mencegah terulangnya paparan yang tidak optimal.

5.4.2 Indikator Dosis: DAP dan CTDI

Dua indikator yang paling sering digunakan dalam evaluasi dosis adalah *Dose Area Product* (DAP) dan *Computed Tomography*

Dose Index (CTDI). Keduanya memberikan gambaran yang objektif mengenai jumlah radiasi yang digunakan dalam suatu prosedur.

1. **DAP (Dose Area Product)**: Mengukur total energi radiasi yang dihantarkan ke pasien, dihitung dari perkalian antara dosis dan luas bidang radiasi. DAP digunakan secara luas dalam radiografi konvensional dan fluoroskopi.
2. **CTDI (Computed Tomography Dose Index)**: Digunakan untuk mengukur dosis rata-rata dalam prosedur CT scan. CTDI memberikan estimasi dosis pada satu irisan dan digunakan bersama nilai *dose length product (DLP)* untuk menghitung dosis total.

Indikator-indikator ini menjadi acuan dalam menentukan standar diagnostik lokal (*diagnostic reference levels* atau DRLs) serta membandingkan praktik di berbagai fasilitas (Mettler & Upton, 2008).

5.4.3 Pelaksanaan Audit Dosis

Audit dosis pasien dilakukan secara terstruktur dan sistematis. Proses audit melibatkan pencatatan dosis dari sejumlah prosedur yang dilakukan, analisis data dosis berdasarkan jenis prosedur, serta membandingkan hasilnya dengan nilai referensi nasional atau internasional.

Langkah-langkah audit dosis biasanya meliputi:

1. **Pengumpulan data dosis** dari peralatan radiologi digital.
2. **Analisis statistik** untuk mengidentifikasi penyimpangan signifikan dari nilai referensi.

3. **Evaluasi faktor teknis**, termasuk protokol pemeriksaan, kualitas peralatan, dan pengalaman operator.
4. **Pemberian umpan balik** kepada teknisi radiologi dan dokter pengirim.

Audit dosis ini juga mendorong fasilitas untuk melakukan kalibrasi berkala, memperbarui protokol, serta meningkatkan pelatihan teknis operator agar kualitas tetap terjaga dan risiko pasien ditekan seminimal mungkin.

5.4.4 Perbaikan Berkelanjutan melalui Evaluasi

Hasil audit tidak hanya dicatat, tetapi harus ditindaklanjuti dengan perbaikan sistem dan prosedur. Evaluasi dosis membuka ruang untuk inovasi, misalnya dengan memperkenalkan teknik pemrosesan citra berbasis *iterative reconstruction*, penggunaan peralatan baru dengan fitur pengurang dosis otomatis, serta penyesuaian protokol berdasarkan usia, berat badan, dan indikasi klinis.

Fasilitas layanan radiologi juga didorong untuk membangun sistem pelaporan internal terkait dosis tinggi yang tidak terduga, agar dapat ditangani secara cepat dan tepat. Sistem semacam ini telah terbukti meningkatkan kesadaran staf akan pentingnya proteksi pasien dan berkontribusi pada penurunan kejadian paparan berlebih (*overexposure*) (IAEA, 2014).

Bab 6: Strategi Proteksi Radiasi Komprehensif bagi Pekerja di Instalasi Radiologi

6.1 Risiko Paparan Radiasi bagi Pekerja Radiologi

Pekerja di bidang radiologi merupakan kelompok profesional yang secara rutin berinteraksi dengan sumber radiasi pengion dalam lingkungan kerja mereka. Meskipun paparan tersebut dilakukan dalam konteks prosedur medis yang terkontrol, tetap terdapat potensi risiko kesehatan, baik jangka pendek maupun jangka panjang. Paparan radiasi yang bersifat kronis dan berulang, meskipun dalam dosis rendah, dapat memberikan dampak kumulatif yang signifikan terhadap tubuh manusia jika tidak dikelola dengan tepat.

Radiasi pengion bekerja dengan cara mengionisasi molekul dalam sel, menghasilkan radikal bebas yang dapat merusak struktur DNA, protein, dan membran sel. Meskipun tubuh memiliki kemampuan untuk memperbaiki kerusakan tersebut, paparan yang

terjadi secara terus-menerus dapat mengalahkan mekanisme perbaikan alami tubuh. Dalam jangka panjang, hal ini berpotensi meningkatkan risiko terjadinya mutasi genetik dan pertumbuhan sel tidak normal, yang dapat berujung pada kanker atau gangguan sistem organ tertentu (Hall & Giaccia, 2019).

Beberapa efek kesehatan yang paling umum dikaitkan dengan paparan radiasi kronis di lingkungan kerja adalah katarak, infertilitas, leukemia, dan kanker tiroid. Katarak radiasi, misalnya, dapat terjadi akibat akumulasi paparan pada lensa mata tanpa perlindungan yang memadai. Efek ini dapat muncul meskipun dosis yang diterima berada di bawah ambang efek deterministik yang sebelumnya diyakini aman, seperti diungkap dalam laporan *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* pada tahun 2012. Oleh karena itu, kini perlindungan terhadap mata menjadi prioritas tambahan dalam pengaturan proteksi pekerja radiologi.

Pekerja radiologi juga berisiko mengalami gangguan pada sistem reproduksi, baik pria maupun wanita. Paparan kronis dapat memengaruhi kualitas sperma atau ovum, serta meningkatkan kemungkinan gangguan kehamilan bagi perempuan yang bekerja di lingkungan radiologi. Karena itu, penggunaan pelindung seperti apron timbal, pelindung ovarium, dan kebijakan rotasi kerja menjadi sangat penting untuk diterapkan secara konsisten.

Selain itu, efek psikososial dari pekerjaan di lingkungan yang mengandung radiasi tidak bisa diabaikan. Rasa cemas terhadap risiko jangka panjang sering kali muncul, terutama pada pekerja

yang tidak mendapatkan informasi yang cukup atau pelatihan tentang proteksi radiasi. Oleh karena itu, pendekatan yang komprehensif dalam pengelolaan risiko radiasi mencakup aspek teknis, administratif, serta edukatif.

Untuk menilai dan memantau tingkat paparan yang dialami pekerja, digunakan alat pemantauan seperti *personal dosimeter*—termasuk *film badge*, *thermoluminescent dosimeter (TLD)*, atau *electronic personal dosimeter*. Alat-alat ini dipakai secara rutin dan diperiksa secara berkala untuk memastikan bahwa dosis yang diterima tidak melebihi batas yang ditetapkan. Menurut ICRP, batas tahunan dosis efektif bagi pekerja profesional adalah 20 milisievert (mSv), dihitung sebagai rata-rata selama lima tahun, dengan tidak melebihi 50 mSv dalam satu tahun (ICRP, 2007).

Penerapan prinsip proteksi radiasi seperti *time*, *distance*, dan *shielding* menjadi langkah dasar dalam melindungi pekerja. Mengurangi waktu paparan, menjaga jarak sejauh mungkin dari sumber radiasi, serta menggunakan pelindung (seperti dinding timbal atau pelindung portabel) secara efektif dapat menurunkan dosis yang diterima. Selain itu, prosedur kerja yang benar, pemeliharaan alat radiologi yang optimal, serta pelatihan berkelanjutan merupakan elemen penting dalam budaya keselamatan kerja.

Pelatihan dan edukasi secara rutin menjadi fondasi dalam membangun kesadaran proteksi radiasi di kalangan tenaga kesehatan. Pemahaman mengenai prinsip-prinsip dasar radiasi, teknik kerja yang aman, serta penggunaan peralatan pelindung harus

ditanamkan sejak awal karier dan diperbarui secara berkala. Hal ini tidak hanya melindungi kesehatan individu pekerja, tetapi juga menjaga keberlangsungan layanan radiologi yang aman dan berkualitas tinggi bagi pasien.

Dengan meningkatnya kompleksitas teknologi radiologi saat ini, termasuk penggunaan fluoroskopi jangka panjang dan *interventional radiology*, risiko terhadap pekerja pun semakin menuntut sistem manajemen radiasi yang ketat. Tanpa pengawasan dan pelatihan yang memadai, risiko efek kesehatan jangka panjang dapat meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, kesadaran dan disiplin dalam menerapkan proteksi radiasi harus menjadi bagian integral dari budaya kerja di semua fasilitas layanan radiologi.

6.2 Prinsip Dasar Perlindungan Pekerja Radiasi

Pekerja yang terlibat dalam penggunaan radiasi pengion di lingkungan medis, industri, maupun riset, menghadapi risiko yang tidak dapat diabaikan. Paparan yang terus-menerus, meskipun dalam dosis rendah, dapat berdampak pada kesehatan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, perlindungan terhadap pekerja merupakan tanggung jawab institusi dan bagian dari sistem keselamatan radiasi yang menyeluruh.

Tiga prinsip utama dalam proteksi terhadap pekerja radiasi dikenal dengan istilah *time*, *distance*, *shielding*. Ketiganya menjadi landasan dalam setiap kegiatan yang melibatkan paparan radiasi dan

telah diadopsi secara luas dalam berbagai pedoman nasional dan internasional.

6.2.1 Waktu: Meminimalkan Durasi Paparan

Durasi kontak langsung dengan sumber radiasi harus ditekan seminimal mungkin tanpa mengorbankan efektivitas kerja. Semakin lama seseorang berada dalam area terpapar, semakin besar dosis yang diterima. Oleh karena itu, perencanaan kerja harus dilakukan secara efisien, termasuk mempersiapkan semua alat dan prosedur sebelum masuk ke ruang dengan paparan aktif.

Misalnya, dalam prosedur fluoroskopi atau intervensi radiologi, operator perlu mengetahui urutan tindakan dan menghindari pengulangan yang tidak perlu. Dokumentasi atau pengaturan parameter sebaiknya dilakukan di luar area radiasi bila memungkinkan (*Bushong, 2021*).

Pelatihan untuk mempercepat pengambilan gambar, pemasangan peralatan, atau penempatan pasien yang tepat menjadi bagian penting dari pengurangan waktu paparan.

6.2.2 Jarak: Menjaga Posisi Aman dari Sumber Radiasi

Hukum *inverse square* menyatakan bahwa intensitas radiasi berkurang sebanding dengan kuadrat jarak dari sumbernya. Artinya, dengan menggandakan jarak, intensitas paparan akan menurun hingga seperempat. Oleh karena itu, menjaga jarak yang cukup dari tabung sinar-X atau sumber radioaktif menjadi salah satu strategi paling efektif.

Dalam praktiknya, operator sebaiknya berdiri di balik pelindung tetap (seperti kaca timbal) atau menggunakan alat bantu

seperti *remote control* atau *foot switch* untuk menghindari paparan langsung. Ruang radiologi yang baik akan dilengkapi dengan zona aman dan marka jarak minimal untuk mengingatkan posisi operator yang sesuai.

Ketika menggunakan bahan radioaktif terbuka, seperti dalam kedokteran nuklir, penempatan sumber dalam wadah terlindungi dan pemindahan dengan alat bantu seperti penjepit panjang menjadi prosedur standar yang harus dipatuhi.

6.2.3 Perisai: Penggunaan Alat Pelindung Fisik

Perisai atau *shielding* mencakup segala bentuk penghalang fisik yang dirancang untuk menyerap atau mengurangi intensitas radiasi sebelum mencapai tubuh manusia. Bahan pelindung yang umum digunakan adalah timbal (*lead*), karena memiliki massa jenis tinggi dan efektivitas dalam menyerap sinar-X dan *gamma rays*.

Beberapa peralatan pelindung yang wajib digunakan meliputi *lead apron*, *thyroid shield*, sarung tangan timbal, dan pelindung gonad. Selain itu, ruang pemeriksaan harus dilengkapi dengan dinding berlapis timbal dan kaca pelindung yang memungkinkan pengamatan pasien tanpa kontak langsung dengan berkas radiasi.

Fasilitas radiologi juga perlu memastikan bahwa alat pelindung diperiksa secara berkala untuk mendeteksi kerusakan, sobekan, atau penurunan ketebalan timbal. Pelindung yang rusak dapat memberikan rasa aman yang palsu dan justru membahayakan penggunaanya (McEwen & Nies, 2019).

6.2.4 Pemantauan dan Budaya Keselamatan

Selain penerapan prinsip waktu, jarak, dan perisai, pekerja radiasi harus menggunakan dosimeter pribadi untuk mencatat dosis kumulatif yang diterima. Alat ini biasanya dipakai di dada dan diganti secara berkala untuk dianalisis oleh laboratorium akreditasi.

Bila hasil pemantauan menunjukkan angka mendekati batas tahunan yang diperbolehkan, pekerja tersebut akan dievaluasi dan bisa diberi rotasi tugas untuk menghindari akumulasi lebih lanjut. Penerapan prinsip *as low as reasonably achievable (ALARA)* menjadi panduan utama dalam mengelola risiko paparan (ICRP, 2007).

Di samping itu, institusi perlu menanamkan budaya keselamatan kerja yang kuat. Kesadaran kolektif terhadap bahaya radiasi, kepatuhan pada prosedur, dan pelaporan insiden tanpa rasa takut menjadi bagian penting dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman.

6.3 Monitoring dan Evaluasi Dosis Individu

Keselamatan pekerja dalam lingkungan yang menggunakan sumber radiasi merupakan tanggung jawab utama dalam sistem proteksi radiasi. Salah satu cara utama untuk menjaga keselamatan ini adalah melalui kegiatan monitoring dan evaluasi dosis individu. Setiap pekerja yang berisiko terpapar radiasi harus dipantau secara sistematis guna memastikan bahwa paparan yang diterima tetap dalam batas aman dan terkendali.

Sistem monitoring ini tidak hanya merupakan bagian dari praktik keselamatan kerja, tetapi juga sebagai bentuk perlindungan hukum dan administratif bagi pekerja dan institusi.

6.3.1 Penggunaan Dosimeter Pribadi

Alat utama yang digunakan untuk mengukur paparan individu adalah dosimeter pribadi. Salah satu jenis yang paling umum adalah *Thermoluminescent Dosimeter (TLD)*, yang bekerja berdasarkan prinsip bahwa material tertentu menyimpan energi radiasi dan melepaskannya dalam bentuk cahaya saat dipanaskan. Jumlah cahaya yang dipancarkan berbanding lurus dengan jumlah radiasi yang diserap oleh material tersebut.

Dosimeter biasanya dipasang di bagian tubuh yang paling representatif terhadap paparan, seperti di dada atau pinggang, tergantung pada posisi kerja dan arah sumber radiasi. Dalam beberapa kasus, dosimeter tambahan dapat dipasang di bawah pelindung timbal untuk mengukur paparan residu yang masuk ke dalam tubuh (Martin & Harbison, 2018).

Penting bagi setiap pekerja untuk menggunakan dosimeter secara konsisten selama jam kerja, dan tidak digunakan oleh orang lain. Kedisiplinan dalam penggunaan ini menjadi syarat utama dalam mendapatkan data akurat untuk evaluasi.

6.3.2 Evaluasi Berkala dan Dokumentasi Dosis

Evaluasi dosis dilakukan secara berkala, biasanya setiap bulan atau kuartal, tergantung pada tingkat risiko di tempat kerja. Data dari dosimeter dikumpulkan dan dianalisis oleh petugas keselamatan radiasi atau laboratorium dosimetri yang ditunjuk. Hasil

evaluasi ini kemudian dicatat dalam sistem dokumentasi internal sebagai bagian dari rekam keselamatan individu.

Dokumen ini menjadi dasar dalam menilai efektivitas program proteksi radiasi serta untuk mendeteksi tren paparan yang tidak normal. Jika terjadi peningkatan dosis yang signifikan, evaluasi tambahan akan dilakukan untuk mengetahui penyebabnya dan menentukan apakah prosedur kerja atau perlindungan yang ada perlu ditingkatkan.

Informasi dosis ini juga dilaporkan ke otoritas pengawas nasional untuk keperluan verifikasi dan pengawasan eksternal. Pelaporan yang konsisten memungkinkan adanya database nasional yang dapat digunakan untuk analisis tren paparan di seluruh sektor pengguna radiasi.

6.3.3 Tindakan saat Terjadi Paparan Berlebih

Jika hasil evaluasi menunjukkan bahwa seorang pekerja menerima paparan melebihi batas tahunan yang ditetapkan—seperti 20 milisievert (*mSv*) per tahun untuk pekerja profesional—maka institusi harus segera melakukan investigasi menyeluruh. Investigasi ini bertujuan mengidentifikasi apakah paparan tersebut disebabkan oleh kesalahan prosedur, kegagalan alat pelindung, atau faktor lain.

Setelah penyebab diidentifikasi, tindakan korektif harus segera dilaksanakan. Ini dapat mencakup pelatihan ulang, revisi prosedur operasional, peningkatan sistem pelindung, atau pembatasan sementara terhadap aktivitas kerja individu yang terdampak.

Selama proses tersebut, pekerja yang terpapar biasanya akan menjalani pemeriksaan medis untuk memastikan tidak terjadi efek biologis yang signifikan. Hasil evaluasi medis ini juga menjadi bagian dari dokumentasi keselamatan kerja.

6.3.4 Budaya Keselamatan dan Kedisiplinan

Monitoring dan evaluasi dosis tidak dapat berjalan efektif tanpa dukungan budaya keselamatan yang kuat. Setiap pekerja harus memahami bahwa keselamatan adalah tanggung jawab bersama dan bahwa kedisiplinan dalam menggunakan dosimeter, mematuhi prosedur, dan melaporkan kondisi kerja yang berisiko merupakan bagian dari etika profesional.

Institusi wajib memberikan pelatihan berkala terkait penggunaan alat proteksi, interpretasi hasil monitoring, serta pentingnya laporan dini terhadap insiden atau kondisi yang berpotensi menyebabkan paparan berlebih.

Teknologi modern juga mendukung pengembangan sistem monitoring digital yang memungkinkan pelacakan dosis secara *real-time*, sehingga respons terhadap kejadian tidak normal bisa dilakukan dengan lebih cepat dan tepat (IAEA, 2014).

6.4 Pelatihan dan Budaya Keselamatan Radiasi

Keselamatan radiasi tidak hanya bergantung pada peralatan dan regulasi, tetapi juga pada sikap, perilaku, dan kesadaran setiap individu yang terlibat. Oleh karena itu, pelatihan dan pembangunan budaya keselamatan merupakan fondasi yang tidak dapat diabaikan

dalam sistem proteksi radiasi. Dalam lingkungan kerja yang melibatkan radiasi pengion, kesalahan kecil dapat berdampak besar jika tidak ditangani dengan prinsip keselamatan yang kuat dan pemahaman yang menyeluruh.

6.4.1 Peran Pendidikan dan Pelatihan

Pendidikan dan pelatihan tentang keselamatan radiasi dirancang untuk membekali tenaga kerja dengan pengetahuan, keterampilan, dan sikap yang diperlukan dalam menjalankan tugas secara aman. Pelatihan tidak hanya dilakukan sekali saat orientasi awal, tetapi harus diberikan secara berkala agar sesuai dengan perkembangan teknologi dan regulasi.

Materi pelatihan mencakup:

1. Prinsip dasar proteksi radiasi dan sifat radiasi pengion
2. Penggunaan alat pelindung diri, seperti *lead apron*, pelindung tiroid, dan kaca berlapis timbal
3. Prosedur kerja yang aman dalam berbagai jenis pemeriksaan radiologi
4. Teknik meminimalkan paparan kepada pasien dan diri sendiri
5. Tindakan darurat jika terjadi kebocoran atau paparan berlebih

Pelatihan juga harus mencakup simulasi keadaan darurat, seperti evakuasi ruang radiologi atau pengendalian kontaminasi, guna meningkatkan kesiapsiagaan staf dalam menghadapi insiden aktual (IAEA, 2018).

6.4.2 Membangun Budaya Keselamatan

Safety culture atau budaya keselamatan adalah sekumpulan nilai, kepercayaan, dan perilaku yang mencerminkan komitmen terhadap keselamatan sebagai prioritas utama. Dalam konteks radiasi, budaya ini mencakup kesadaran terhadap risiko, kepatuhan terhadap protokol, serta keinginan untuk melaporkan dan memperbaiki setiap potensi bahaya.

Budaya keselamatan tidak bisa dibentuk secara instan. Diperlukan upaya yang konsisten dari semua tingkatan organisasi, mulai dari pimpinan hingga petugas lapangan. Komunikasi yang terbuka, saling menghormati, serta pemberian penghargaan terhadap tindakan proaktif dalam keselamatan turut memperkuat budaya ini.

Contoh indikator adanya budaya keselamatan yang baik antara lain:

1. Staf secara sukarela melaporkan insiden keselamatan tanpa takut disalahkan
2. Penggunaan alat pelindung dilakukan dengan kesadaran, bukan karena instruksi
3. Evaluasi rutin terhadap risiko dilakukan tanpa harus menunggu inspeksi eksternal

Dengan membangun budaya keselamatan yang kuat, risiko paparan yang tidak disengaja dapat ditekan secara signifikan, dan kualitas pelayanan meningkat karena prosedur dijalankan dengan lebih hati-hati.

6.4.3 Evaluasi Efektivitas Pelatihan

Pelatihan tidak akan efektif jika tidak dievaluasi. Oleh karena itu, setiap sesi pelatihan harus disertai dengan penilaian awal dan akhir untuk mengukur pemahaman peserta. Selain itu, evaluasi kinerja lapangan, pengamatan langsung terhadap praktik kerja, serta audit insiden juga digunakan untuk menilai sejauh mana pelatihan berdampak pada perubahan perilaku.

Dalam beberapa fasilitas, *radiation safety officer (RSO)* bertanggung jawab untuk melakukan monitoring kepatuhan terhadap praktik keselamatan, serta memberikan pelatihan ulang bagi staf yang tidak memenuhi standar.

Pelatihan yang efektif dapat dilihat dari turunnya jumlah insiden paparan, meningkatnya penggunaan pelindung radiasi secara mandiri, serta keterlibatan aktif tenaga kerja dalam pengawasan dan perbaikan sistem proteksi (Mettler & Upton, 2008).

6.4.4 Dukungan Organisasi terhadap Keselamatan

Komitmen institusi menjadi kunci utama keberlanjutan budaya keselamatan. Pihak manajemen harus menyediakan anggaran, waktu, dan sumber daya untuk menyelenggarakan pelatihan serta memperbarui peralatan yang mendukung keselamatan.

Selain itu, keberadaan forum keselamatan radiasi internal yang melibatkan perwakilan dari berbagai bagian dapat menjadi wadah diskusi untuk menyampaikan keluhan, usulan, dan tindak lanjut dari pelaporan insiden. Dengan demikian, keselamatan tidak

hanya menjadi tanggung jawab petugas proteksi, tetapi menjadi milik bersama.

Bab 7: Aspek Proteksi

Radiasi Khusus dalam

Prosedur Kedokteran Nuklir

7.1 Karakteristik Prosedur Kedokteran Nuklir

Kedokteran nuklir merupakan cabang kedokteran yang memanfaatkan senyawa radioaktif, atau *radiopharmaceuticals*, untuk tujuan diagnostik dan terapi. Dalam prosedur ini, pasien diberikan zat radioaktif melalui injeksi, inhalasi, atau oral, dan senyawa tersebut akan berdistribusi di dalam tubuh sesuai dengan fungsi fisiologis organ sasaran. Karena pasien yang telah menerima *radiopharmaceutical* menjadi sumber radiasi internal, maka pendekatan keselamatan dalam kedokteran nuklir memiliki karakteristik yang unik dan memerlukan perhatian khusus terhadap proteksi lingkungan, staf medis, serta pengunjung.

Salah satu keunikan utama kedokteran nuklir dibandingkan dengan modalitas pencitraan lain seperti *computed tomography* atau radiografi konvensional adalah bahwa sumber radiasi berasal dari dalam tubuh pasien, bukan dari alat yang dipancarkan secara eksternal. Oleh karena itu, proteksi radiasi tidak hanya ditujukan untuk melindungi pasien dari radiasi eksternal, tetapi juga difokuskan pada pengendalian paparan dari pasien kepada orang lain

di sekitarnya. Hal ini menciptakan tantangan tersendiri dalam manajemen keselamatan, terutama dalam pengaturan ruang perawatan, waktu kunjungan, dan pengelolaan limbah radioaktif yang berasal dari ekskresi pasien (Bushong, 2020).

Prosedur diagnostik yang umum dalam kedokteran nuklir antara lain *positron emission tomography (PET)*, *single-photon emission computed tomography (SPECT)*, serta pemindaian tiroid, tulang, dan perfusi jantung. Dalam terapi, kedokteran nuklir digunakan untuk pengobatan penyakit seperti hipertiroidisme, kanker tiroid, dan metastasis tulang melalui pemberian radioisotop seperti *iodine-131* atau *lutetium-177*. Dosis yang digunakan dalam terapi jauh lebih tinggi dibandingkan prosedur diagnostik, sehingga langkah protektif yang lebih ketat perlu diterapkan.

Karakteristik penting lainnya dalam kedokteran nuklir adalah adanya risiko paparan sekunder terhadap tenaga kesehatan. Teknologi ini mengharuskan staf untuk menangani, menyiapkan, dan memberikan zat radioaktif secara langsung. Oleh karena itu, perlindungan terhadap staf sangat tergantung pada penerapan prinsip *time, distance, dan shielding*. Penggunaan sarung tangan, pelindung tubuh, dan alat bantu jarak seperti *remote handling devices* dapat mengurangi kontak langsung dan paparan berlebih. Ruang kerja di *radiopharmacy* harus dirancang sedemikian rupa untuk meminimalkan paparan, dilengkapi dengan *shielded fume hood*, detektor kontaminasi, dan sistem ventilasi khusus (IAEA, 2018).

Selain staf, lingkungan fasilitas kedokteran nuklir juga harus dirancang untuk meminimalkan penyebaran kontaminasi radioaktif.

Lantai, meja, dan alat-alat harus terbuat dari bahan yang mudah dibersihkan dan tidak menyerap radiasi. Jalur ekskresi pasien seperti toilet dan saluran limbah harus terhubung dengan sistem penampungan khusus yang memungkinkan peluruhan radioaktif sebelum limbah dibuang ke lingkungan umum. Pemantauan kontaminasi secara berkala dilakukan untuk mendeteksi adanya paparan yang tidak terduga di area kerja.

Pengunjung dan keluarga pasien juga perlu diberikan informasi dan perlindungan yang memadai. Dalam prosedur terapi dengan dosis tinggi, pasien biasanya dirawat secara isolasi selama beberapa hari hingga tingkat radiasi turun ke ambang yang aman. Petugas kesehatan perlu memberikan edukasi yang jelas tentang batasan kunjungan dan tindakan pencegahan selama dan setelah terapi. Misalnya, pasien yang telah menjalani terapi dengan *iodine-131* akan diminta menghindari kontak dekat dengan anak-anak dan wanita hamil untuk sementara waktu.

Aspek hukum dan etika dalam kedokteran nuklir juga tidak dapat diabaikan. Pasien berhak mengetahui risiko dan manfaat dari prosedur ini, serta diberikan kesempatan untuk memberikan persetujuan secara sadar (*informed consent*). Tenaga kesehatan bertanggung jawab untuk menjelaskan sifat radioaktivitas, kemungkinan efek samping, serta protokol keamanan yang harus diikuti pascaterapi. Edukasi ini merupakan bagian penting dari *patient-centered care* dan membantu membangun kepercayaan terhadap layanan kedokteran nuklir.

Dalam konteks global, standar keamanan dan kualitas kedokteran nuklir dirumuskan oleh lembaga seperti *International Atomic Energy Agency (IAEA)* dan *World Health Organization (WHO)*. Di Indonesia, pengawasan dilakukan oleh *Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN)* yang menetapkan regulasi terkait perizinan, pemantauan, serta inspeksi keselamatan fasilitas yang menggunakan teknologi nuklir medis.

Dengan karakteristik yang kompleks dan tingkat risiko yang tidak dapat diabaikan, kedokteran nuklir membutuhkan pengelolaan yang disiplin, sistematis, dan berbasis teknologi. Perlindungan terhadap pasien, staf, lingkungan, dan publik menjadi landasan utama dalam praktiknya. Ketepatan dalam desain fasilitas, pengelolaan limbah, serta pelatihan personel adalah komponen krusial dalam menjaga keamanan dan efektivitas terapi nuklir yang terus berkembang secara global.

7.2 Risiko Paparan dalam Kedokteran Nuklir

Kedokteran nuklir merupakan cabang pelayanan kesehatan yang menggunakan zat radioaktif untuk tujuan diagnostik maupun terapi. Penggunaan *radiopharmaceutical*, yaitu senyawa radioaktif yang diberikan kepada pasien, memungkinkan visualisasi fungsi organ secara fisiologis melalui proses yang tidak dapat dicapai dengan modalitas pencitraan konvensional. Meski demikian, teknik ini membawa risiko paparan radiasi yang cukup kompleks, terutama karena bersumber dari bahan radioaktif terbuka yang dapat

menimbulkan kontaminasi lingkungan dan risiko internal bagi pekerja maupun pasien lain.

Salah satu risiko utama dalam kedokteran nuklir adalah paparan dari bahan radioaktif itu sendiri. Paparan ini dapat terjadi melalui tiga jalur utama: (1) paparan eksternal dari sumber radiasi aktif, termasuk dari pasien yang telah disuntik *radiopharmaceutical*; (2) paparan internal akibat inhalasi atau konsumsi tidak sengaja zat radioaktif; dan (3) kontaminasi silang melalui permukaan kerja atau alat yang tidak didekontaminasi dengan baik.

7.2.1 Penanganan Zat Radioaktif

Zat radioaktif yang digunakan dalam kedokteran nuklir, seperti *technetium-99m*, *iodine-131*, atau *fluorine-18*, memiliki aktivitas tinggi meskipun waktu paruhnya bervariasi. Karena itu, penanganannya memerlukan keahlian dan kehati-hatian tingkat tinggi. Kesalahan dalam menyiapkan atau menyuntikkan zat ini dapat menimbulkan paparan tak terkendali baik bagi tenaga kesehatan maupun pasien lain di sekitarnya (*Bushong, 2021*).

Setiap unit kedokteran nuklir harus memiliki ruang khusus untuk persiapan dan injeksi, lengkap dengan pelindung timbal, *fume hood*, dan sistem ventilasi negatif untuk mencegah penyebaran kontaminan ke luar ruangan. Selain itu, seluruh prosedur harus dilakukan oleh personel yang terlatih dan dilengkapi dengan alat pelindung diri sesuai standar.

7.2.2 Kontaminasi Silang

Kontaminasi silang menjadi isu serius dalam praktik kedokteran nuklir. Sisa radioaktivitas dapat tertinggal di permukaan

meja, alat suntik, pakaian kerja, atau bahkan kulit dan rambut tenaga kesehatan. Bila tidak segera dibersihkan, zat tersebut dapat menyebar ke area lain dan mengakibatkan paparan tidak langsung pada individu yang tidak terkait langsung dengan prosedur tersebut.

Penggunaan *survey meter* secara rutin sangat penting untuk mendeteksi adanya kontaminasi. Alat ini digunakan untuk memindai area kerja, pakaian, dan tubuh personel setelah prosedur. Bila ditemukan adanya kontaminasi, dekontaminasi harus segera dilakukan menggunakan larutan pembersih khusus atau metode mekanis seperti pengelupasan permukaan pelindung (McEwen & Nies, 2019).

Selain itu, manajemen limbah radioaktif juga memegang peran vital. Limbah padat dan cair yang mengandung sisa radioaktivitas harus disimpan dalam kontainer khusus dan dibiarkan meluruh sampai aktivitasnya mencapai ambang aman sebelum dibuang.

7.2.3 Paparan Eksternal dari Pasien

Salah satu karakteristik unik dalam kedokteran nuklir adalah pasien sendiri menjadi sumber radiasi setelah menerima injeksi zat radioaktif. Dalam hal ini, pasien dapat memancarkan radiasi *gamma* yang dapat menembus tubuh dan mengenai individu lain di sekitarnya. Oleh karena itu, protokol isolasi pasien kadang diperlukan, terutama untuk prosedur terapi seperti pemberian *iodine-131* dosis tinggi pada pengobatan kanker tiroid (ICRP, 2007).

Pasien juga perlu diberikan edukasi mengenai tindakan pencegahan yang harus dilakukan setelah prosedur. Hal ini

mencakup menjaga jarak dari orang lain, terutama anak-anak dan wanita hamil, menggunakan toilet terpisah bila memungkinkan, serta menghindari kontak fisik dalam beberapa hari pertama setelah prosedur.

Tenaga kesehatan yang menangani pasien post-injeksi harus menjaga waktu kontak seminimal mungkin, tetap berada pada jarak yang aman, serta menggunakan alat pelindung dan penghalang bila diperlukan. Informasi tentang waktu paruh dan karakteristik emisi zat radioaktif yang digunakan menjadi landasan dalam menentukan batas aman kontak.

7.2.4 Monitoring Lingkungan dan Paparan Individu

Pengawasan lingkungan kerja dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa tingkat radiasi berada dalam batas aman. Penggunaan *area monitor* di ruang kerja, koridor, dan ruang tunggu menjadi sarana penting dalam memantau kebocoran radiasi yang tidak terdeteksi secara kasat mata.

Setiap personel juga diwajibkan menggunakan *dosimeter pribadi*, baik jenis pasif seperti *TLD* (thermoluminescent dosimeter) maupun aktif seperti *electronic personal dosimeter*. Data dari dosimeter ini dicatat dan dievaluasi secara berkala untuk memastikan bahwa paparan yang diterima pekerja tidak melebihi batas tahunan yang ditentukan.

7.3 Prinsip Proteksi Radiasi dalam Fasilitas Nuklir Medis

Fasilitas nuklir medis adalah tempat pelayanan kesehatan yang menggunakan bahan radioaktif untuk diagnosis dan terapi, seperti dalam prosedur kedokteran nuklir dan terapi radioisotop. Karena penggunaan radionuklida melibatkan potensi paparan radiasi internal dan eksternal, maka prinsip proteksi radiasi harus diterapkan secara ketat untuk melindungi pasien, pekerja, dan lingkungan sekitar.

Prinsip ini mencakup sistem pengamanan bahan radioaktif, penggunaan peralatan pelindung, pengelolaan limbah, serta prosedur dekontaminasi yang sesuai dengan standar keselamatan internasional.

7.3.1 Penanganan Zat Radioaktif di Ruang Terlindungi

Salah satu aspek utama dari proteksi radiasi dalam fasilitas nuklir medis adalah penanganan bahan radioaktif di ruang yang dirancang khusus. Ruang ini harus memiliki ventilasi lokal dengan sistem *high-efficiency particulate air (HEPA)* filter dan tekanan negatif untuk mencegah penyebaran partikel atau gas radioaktif ke area lain.

Ruang kerja juga harus dilapisi dengan bahan yang tahan terhadap kontaminasi dan mudah dibersihkan, seperti permukaan logam atau plastik polimer khusus. Aktivitas pencampuran, penandaan, atau injeksi radionuklida dilakukan di dalam *shielded*

hot cell atau *lead castle* untuk mengurangi paparan langsung terhadap operator (IAEA, 2008).

Sistem pengawasan berbasis detektor radiasi, seperti *Geiger-Müller* dan monitor kontaminasi permukaan, wajib tersedia untuk mendeteksi adanya kebocoran atau kontaminasi selama proses kerja berlangsung.

7.3.2 Penyimpanan Radionuklida dan Kontainer Pelindung

Bahan radioaktif harus disimpan dalam kontainer pelindung yang sesuai dengan jenis dan tingkat aktivitasnya. Kontainer ini umumnya dibuat dari timbal atau tungsten yang mampu menahan emisi radiasi gamma dengan efektif. Selain itu, wadah penyimpanan diberi label dengan jelas mencantumkan jenis radionuklida, aktivitas, serta waktu peluruhan.

Ruang penyimpanan radionuklida juga dilengkapi sistem keamanan akses terbatas, pemantauan suhu, serta alarm kebocoran untuk mencegah risiko paparan tidak disengaja maupun penyalahgunaan bahan radioaktif.

Prinsip *time*, *distance*, *shielding* tetap berlaku dalam penempatan kontainer, yaitu meminimalkan waktu kontak, menjaga jarak aman, dan menggunakan pelindung radiasi sesuai intensitas sumber.

7.3.3 Alat Pelindung Diri dan Keamanan Operator

Setiap petugas yang menangani radionuklida wajib menggunakan alat pelindung diri, seperti sarung tangan, apron timbal, pelindung mata, dan masker jika terdapat risiko inhalasi.

Penggunaan *forceps* atau *remote manipulator* disarankan untuk menghindari kontak langsung dengan sumber radiasi.

Sebelum dan sesudah prosedur, operator harus mencuci tangan dan memeriksa kemungkinan kontaminasi pada kulit atau pakaian menggunakan alat *contamination monitor*. Pelatihan rutin diberikan untuk meningkatkan kesadaran akan pentingnya pelindung diri dan cara penggunaannya secara benar.

Penerapan standar ergonomi juga penting agar operator tidak mengalami kelelahan fisik selama menangani prosedur berisiko tinggi. Kesalahan akibat kelelahan dapat meningkatkan risiko paparan dan kontaminasi.

7.3.4 Pengawasan Limbah dan Prosedur Dekontaminasi

Limbah radioaktif yang dihasilkan dari prosedur medis meliputi jarum, botol, alat suntik, bahan pembungkus, dan limbah cair seperti urin pasien setelah terapi. Semua limbah ini harus dikumpulkan dalam wadah khusus yang tahan bocor, diberi label, dan disimpan sementara dalam fasilitas penyimpanan berpelindung sebelum dikirim ke instalasi pengolahan limbah.

Prosedur dekontaminasi diterapkan jika terjadi tumpahan atau kontaminasi permukaan. Larutan dekontaminasi seperti *decon* cair atau tisu *radio-wipe* digunakan untuk membersihkan area kerja. Semua prosedur ini harus dicatat dalam log harian dan diawasi oleh petugas keselamatan radiasi.

Sistem drainase dalam fasilitas nuklir medis juga dirancang agar limbah cair tidak langsung masuk ke saluran umum, melainkan terlebih dahulu melalui tangki penampungan khusus yang

memungkinkan peluruhan aktivitas sebelum dibuang secara aman (Martin & Harbison, 2018).

7.4 Monitoring Pasien dan Pengunjung

Dalam layanan kedokteran nuklir, radioterapi internal, dan intervensi diagnostik tertentu, pasien dapat tetap memancarkan radiasi setelah prosedur selesai. Oleh karena itu, perhatian khusus harus diberikan pada monitoring pasien serta pengaturan interaksi dengan pengunjung. Tujuannya adalah untuk meminimalkan paparan tidak perlu terhadap orang lain, terutama individu yang rentan seperti anak-anak dan wanita hamil.

7.4.1 Pasien yang Masih Mengandung Radionuklida

Beberapa prosedur medis, seperti terapi *radioiodine* untuk kanker tiroid atau *brachytherapy*, menggunakan radionuklida yang dapat bertahan dalam tubuh pasien selama beberapa jam hingga beberapa hari. Selama periode ini, pasien menjadi sumber radiasi eksternal yang dapat memaparkan lingkungan sekitarnya.

Pasien seperti ini biasanya dirawat di ruang isolasi radiasi yang didesain khusus, dengan dinding pelindung dan sistem ventilasi yang terkontrol. Petugas kesehatan dibekali dengan alat pemantau dosis serta mengikuti batas waktu kontak yang telah ditentukan untuk setiap jenis prosedur. Selain itu, pasien juga diberikan instruksi tertulis tentang tindakan pencegahan yang harus dilakukan setelah dipulangkan, seperti menjaga jarak aman dari anggota

keluarga, menggunakan toilet secara terpisah, dan menghindari penggunaan alat makan bersama.

7.4.2 Edukasi Pasien Setelah Prosedur

Salah satu aspek penting dalam monitoring adalah pemberian edukasi. Pasien harus memahami bahwa mereka dapat menjadi sumber radiasi untuk sementara waktu dan harus mematuhi petunjuk agar tidak membahayakan orang lain. Edukasi diberikan secara lisan dan tertulis, serta dilengkapi dengan penjelasan menggunakan media visual apabila diperlukan.

Materi edukasi mencakup:

1. Durasi waktu pasien masih memancarkan radiasi
2. Jarak aman yang harus dijaga dari orang lain
3. Batasan aktivitas sosial dan interaksi fisik
4. Penanganan limbah tubuh seperti urin atau keringat yang mungkin mengandung radioaktivitas
5. Gejala atau tanda yang harus dilaporkan segera jika muncul keluhan

Riset menunjukkan bahwa kepatuhan pasien terhadap instruksi keselamatan pascaperawatan berkorelasi erat dengan tingkat pemahaman mereka atas informasi yang disampaikan (IAEA, 2014).

7.4.3 Pengaturan dan Pembatasan Kunjungan

Pengunjung merupakan kelompok yang paling rentan terhadap paparan tidak langsung karena mereka seringkali tidak dilengkapi dengan perlindungan dan belum tentu memahami risiko

paparan. Oleh karena itu, perlu dibuat sistem kontrol kunjungan yang jelas dan konsisten.

Langkah-langkah yang biasanya diterapkan meliputi:

1. Penetapan waktu kunjungan maksimal per hari
2. Penentuan batas usia pengunjung (misalnya tidak mengizinkan anak di bawah 12 tahun)
3. Penandaan zona aman di sekitar tempat tidur pasien
4. Edukasi singkat sebelum masuk ruang isolasi

Staf keperawatan bertanggung jawab dalam menerapkan pengawasan terhadap pengunjung dan memberikan penjelasan jika terjadi pelanggaran prosedur.

7.4.4 Pemantauan Lingkungan dan Dosis Sekitar

Selain monitoring pasien dan pengunjung secara langsung, pemantauan lingkungan ruang rawat juga dilakukan untuk memastikan tidak terjadi kontaminasi. Alat deteksi radiasi seperti *Geiger counter* atau detektor *ion chamber* digunakan untuk mengukur tingkat radiasi pada permukaan benda, dinding, dan udara.

Pemantauan dilakukan secara berkala, terutama setelah pasien keluar dari ruang perawatan atau sebelum ruangan digunakan kembali. Hasil pengukuran dicatat dan disimpan sebagai bagian dari dokumentasi keselamatan fasilitas. Bila ditemukan tingkat paparan melebihi ambang batas, dilakukan prosedur dekontaminasi sesuai protokol.

Prinsip *time*, *distance*, *shielding* tetap menjadi pedoman utama dalam membatasi dosis yang diterima pengunjung dan staf,

yaitu dengan mengurangi waktu kontak, menjaga jarak, dan menggunakan pelindung (Mettler & Upton, 2008).

Bab 8: Sistem Pemantauan Dosis Radiasi dan Surveilans Area Kerja

8.1 Pentingnya Pemantauan Dosis dan Lingkungan Kerja

Pemantauan dosis radiasi dan evaluasi kondisi lingkungan kerja merupakan bagian penting dari sistem proteksi radiasi yang dirancang untuk melindungi tenaga kesehatan dan masyarakat umum dari dampak negatif paparan radiasi pengion. Dalam konteks praktik radiologi, kedokteran nuklir dan terapi radiasi, pemantauan ini tidak hanya bersifat administratif, tetapi menjadi elemen fungsional dalam menjaga keselamatan dan mendukung kinerja profesional yang berkelanjutan.

Paparan radiasi pengion dalam lingkungan kerja medis, walaupun telah dirancang agar minimal, tetap memiliki potensi menimbulkan efek biologis yang merugikan jika tidak dikendalikan. Oleh karena itu, setiap fasilitas kesehatan yang menggunakan sumber radiasi wajib memiliki sistem pemantauan dosis individu dan pemantauan lingkungan secara berkala. Sistem ini memungkinkan institusi untuk mengidentifikasi tren paparan, mendeteksi potensi

kontaminasi, serta mengevaluasi efektivitas proteksi yang diterapkan (IAEA, 2014).

Pemantauan dosis individu umumnya dilakukan dengan perangkat *personal dosimeter* seperti *thermoluminescent dosimeter (TLD)* atau *electronic personal dosimeter* yang dipakai oleh petugas selama bekerja. Alat ini mencatat akumulasi paparan radiasi yang diterima oleh individu dalam periode tertentu, biasanya sebulan. Data ini dianalisis dan dilaporkan kepada petugas dan pihak pengelola fasilitas untuk dibandingkan dengan batas yang ditetapkan oleh *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*. Batas paparan tahunan untuk pekerja radiasi profesional adalah 20 milisievert (mSv) per tahun, dihitung sebagai rata-rata selama lima tahun, dengan maksimum 50 mSv dalam satu tahun (ICRP, 2007).

Selain pemantauan individu, pemantauan lingkungan kerja mencakup pengukuran tingkat radiasi di berbagai titik dalam ruang kerja, termasuk area pasien, ruang persiapan, serta jalur transportasi bahan radioaktif. Instrumen seperti survey meter atau monitor kontaminasi digunakan untuk mendeteksi adanya radiasi tersembunyi atau paparan yang tidak terduga. Pengukuran ini membantu menentukan apakah desain fisik ruang, ventilasi, dan pelindung radiasi telah berfungsi sesuai standar yang ditetapkan.

Kegagalan dalam melakukan pemantauan dosis dan lingkungan dapat menyebabkan paparan berlebih yang tidak terdeteksi hingga munculnya gejala klinis atau efek jangka panjang seperti kanker, katarak, atau gangguan reproduksi. Dalam beberapa kasus, kegagalan ini juga dapat menimbulkan masalah hukum dan

etika, terutama jika tenaga medis tidak diinformasikan secara memadai tentang risiko atau tidak dilindungi dengan baik. Oleh karena itu, akuntabilitas dan transparansi dalam pengelolaan paparan menjadi keharusan yang tidak dapat ditawar.

Pemantauan juga memberikan manfaat penting dalam konteks pengendalian mutu dan peningkatan berkelanjutan. Data paparan yang dikumpulkan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi untuk menyesuaikan prosedur kerja, meningkatkan pelatihan petugas, atau memperbaiki desain fasilitas. Misalnya, jika ditemukan bahwa paparan di area tertentu secara konsisten lebih tinggi dari area lain, maka dapat dilakukan investigasi mendalam dan intervensi seperti peningkatan shielding atau perubahan alur kerja untuk menurunkan dosis.

Dalam praktik terbaik, hasil pemantauan dosis dan lingkungan dicatat secara sistematis dalam sistem manajemen informasi radiologi. Dengan integrasi ini, fasilitas dapat melacak sejarah paparan setiap individu, mengatur rotasi kerja, serta membuat kebijakan berbasis data yang lebih presisi. Pemanfaatan teknologi digital dan sistem otomatis dalam pemantauan juga semakin berkembang dan memberikan kemudahan dalam pelaporan serta pelacakan waktu nyata (*real-time monitoring*).

Sebagai bagian dari keselamatan kerja, edukasi kepada tenaga kesehatan mengenai pentingnya pemantauan dosis harus terus dilakukan. Banyak kejadian paparan berlebih yang sebenarnya dapat dicegah jika staf memahami cara kerja sistem pemantauan, cara membaca alat dosimeter, dan tindakan apa yang harus dilakukan

ketika ambang batas tercapai. Kesadaran ini membentuk budaya keselamatan yang lebih kuat di lingkungan kerja.

Selain untuk staf, pemantauan lingkungan juga memberikan jaminan kepada pasien dan publik bahwa fasilitas layanan medis yang mereka kunjungi aman dari kontaminasi radiasi. Hal ini penting terutama dalam menghadapi isu-isu sensitif seperti penggunaan isotop radioaktif atau prosedur yang melibatkan dosis tinggi. Kepercayaan masyarakat terhadap fasilitas kesehatan sangat dipengaruhi oleh komitmen institusi dalam menjaga standar keselamatan.

Dengan meningkatnya kompleksitas prosedur medis yang melibatkan radiasi, mulai dari intervensi *cardiology* hingga terapi kanker berbasis *radionuclide*, pemantauan dosis dan lingkungan kerja akan menjadi semakin penting dalam sistem manajemen risiko fasilitas kesehatan modern. Investasi pada perangkat, pelatihan, dan dokumentasi bukan hanya kepatuhan regulatif, tetapi bentuk perlindungan menyeluruh terhadap keselamatan kerja dan kualitas pelayanan kesehatan itu sendiri.

8.2 Jenis-jenis Pemantauan Dosis

Secara umum, pemantauan dosis terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu pemantauan personal dan pemantauan area. Keduanya saling melengkapi dalam menyediakan informasi yang akurat mengenai tingkat paparan dan efektivitas strategi perlindungan yang diterapkan.

8.2.1 Pemantauan Personal

Pemantauan personal bertujuan untuk mengukur akumulasi dosis radiasi yang diterima oleh individu selama menjalankan aktivitas profesionalnya. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan dosimeter pribadi yang dikenakan secara langsung pada tubuh. Posisi pemakaian umumnya di dada atau pinggang, dekat organ-organ vital yang rentan terhadap radiasi.

Salah satu alat yang paling sering digunakan adalah *thermoluminescent dosimeter* (TLD). TLD berisi kristal khusus, seperti *lithium fluoride*, yang menyimpan energi dari radiasi yang mengenainya. Ketika dosimeter ini dipanaskan, energi tersebut dilepaskan dalam bentuk cahaya, dan intensitasnya mencerminkan jumlah radiasi yang diserap. TLD memiliki sensitivitas tinggi dan dapat digunakan untuk pengukuran dosis akumulatif dalam periode waktu tertentu (*Bushong, 2021*).

Selain TLD, *optically stimulated luminescence* (OSL) menjadi pilihan modern yang semakin populer. OSL bekerja berdasarkan prinsip serupa dengan TLD, tetapi alih-alih menggunakan panas, alat ini menggunakan cahaya untuk merangsang emisi dari material yang terkena radiasi. Keunggulannya adalah kemampuan pembacaan berulang dan sensitivitas tinggi terhadap dosis rendah (*McEwen & Nies, 2019*).

Jenis lain adalah dosimeter elektronik yang menawarkan keunggulan dalam pemantauan waktu nyata (*real-time*). Alat ini dilengkapi dengan layar digital yang menunjukkan nilai paparan saat itu juga, sehingga memungkinkan pekerja melakukan penyesuaian

perilaku secara langsung apabila nilai yang terdeteksi mendekati ambang batas.

8.2.2 Pemantauan Area

Sementara pemantauan personal berfokus pada individu, pemantauan area bertujuan untuk mengukur tingkat radiasi di lingkungan kerja. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa desain ruang, prosedur kerja, dan perisai yang digunakan telah cukup melindungi personel dari paparan tidak sengaja.

Alat yang digunakan dalam pemantauan area dapat berupa detektor tetap maupun portabel. Alat tetap biasanya dipasang di titik-titik strategis seperti pintu masuk ruang radiologi, dekat sumber radiasi, atau di area istirahat staf. Alat ini terus-menerus memantau tingkat radiasi dan memberikan alarm jika terjadi lonjakan di atas ambang normal.

Alat portabel, seperti *Geiger-Müller counter*, digunakan untuk survei periodik dan inspeksi kebocoran radiasi. Dengan alat ini, petugas keselamatan radiasi dapat mengevaluasi efisiensi perisai, mendeteksi kontaminasi permukaan, serta memastikan bahwa tidak ada paparan tersembunyi di area kerja.

Pemantauan area juga mencakup pengukuran tingkat *background radiation*, yaitu radiasi lingkungan alami yang menjadi dasar perbandingan terhadap paparan buatan. Data ini sangat penting untuk mengidentifikasi perubahan yang tidak normal atau peningkatan aktivitas yang mencurigakan.

Hasil dari pemantauan area menjadi dasar dalam menetapkan zona radiasi, penggunaan alat pelindung tambahan, dan penyesuaian

desain fasilitas. Semua hasil pengukuran wajib dicatat dan disimpan untuk keperluan audit dan evaluasi berkala oleh otoritas terkait, seperti Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) di Indonesia.

8.2.3 Integrasi Sistem Pemantauan

Keberhasilan pengendalian paparan radiasi sangat bergantung pada integrasi antara pemantauan personal dan area. Sistem informasi modern memungkinkan keduanya untuk dikaitkan secara digital, sehingga memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi paparan dalam suatu fasilitas.

Sebagai contoh, sistem manajemen dosis dapat memadukan data dari dosimeter elektronik dan alat monitor ruangan dalam satu platform terpusat. Dengan demikian, analisis tren, identifikasi risiko dan perencanaan perlindungan bisa dilakukan dengan lebih efektif dan responsif.

8.3 Penempatan dan Kalibrasi Alat Pemantauan

Alat pemantauan radiasi merupakan komponen utama dalam sistem proteksi radiasi di fasilitas medis, industri, maupun riset. Fungsi utama alat ini adalah untuk memberikan informasi waktu nyata (*real-time*) mengenai tingkat paparan radiasi lingkungan dan individu. Penempatan serta kalibrasi alat yang tepat akan memastikan deteksi dini terhadap potensi bahaya dan memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat dan tepat dalam pengendalian risiko radiasi.

Keakuratan dan keandalan alat pemantauan menjadi faktor yang tidak dapat dikompromikan karena kesalahan pengukuran dapat berdampak langsung terhadap keselamatan manusia maupun lingkungan.

8.3.1 Lokasi Strategis Penempatan Alat Pemantauan

Alat pemantauan harus ditempatkan pada titik-titik yang memungkinkan deteksi optimal terhadap sumber radiasi atau lokasi dengan potensi paparan tertinggi. Penempatan yang umum dilakukan meliputi:

1. **Ruang kontrol:** Di mana operator atau petugas sering berada, terutama saat melakukan prosedur radiologi intervensional atau penggunaan sumber terbuka. Pemantauan di ruang ini penting untuk mengukur radiasi hambur (*scatter radiation*) yang dapat menjangkau area kerja.
2. **Pintu masuk ruang pemeriksaan:** Menjadi titik kritis untuk mencegah paparan tidak disengaja kepada personel atau pengunjung yang tidak terlindungi. Dengan menempatkan alat pemantauan di lokasi ini, sistem dapat memberikan peringatan jika terjadi kebocoran radiasi.
3. **Dekat sumber radiasi:** Seperti di ruang penyimpanan radionuklida, ruang pencampuran radiofarmaka, atau ruang terapi radiologi. Penempatan ini memungkinkan pemantauan kontaminasi atau kegagalan perisai pelindung secara langsung.

Selain lokasi-lokasi tersebut, fasilitas yang memiliki sistem ventilasi khusus, seperti laboratorium dengan tekanan negatif, perlu menempatkan detektor udara di saluran keluar untuk mendeteksi potensi kontaminan radioaktif yang terbawa udara (IAEA, 2014).

Jenis alat pemantauan yang digunakan meliputi detektor *Geiger-Müller*, detektor scintilasi, dosimeter area dan monitor kontaminasi permukaan. Pemilihan jenis alat disesuaikan dengan jenis radiasi, tingkat aktivitas, dan sensitivitas yang diperlukan.

8.3.2 Kalibrasi Berkala dan Standarisasi

Akurasi alat pemantauan tidak bersifat permanen, karena seiring waktu dapat terjadi *drift* pada komponen elektronik, kerusakan sensor, atau penyimpangan fungsi deteksi akibat kondisi lingkungan. Oleh karena itu, kalibrasi secara berkala menjadi kewajiban setiap fasilitas yang menggunakan alat pemantauan radiasi.

Kalibrasi harus dilakukan oleh lembaga yang diakui dan memiliki akreditasi, seperti laboratorium metrologi nasional atau institusi yang ditunjuk oleh otoritas pengawas. Proses kalibrasi melibatkan perbandingan pembacaan alat terhadap standar acuan yang telah dikalibrasi secara internasional.

Interval kalibrasi dapat berbeda tergantung pada jenis alat dan frekuensi penggunaan, namun umumnya dilakukan setiap 6–12 bulan. Hasil kalibrasi dicatat dalam sertifikat yang mencantumkan tanggal, penyimpangan nilai, serta status kelayakan alat untuk digunakan.

8.3.3 Implikasi terhadap Sistem Keselamatan

Penempatan alat pemantauan yang tidak sesuai atau penggunaan alat yang tidak dikalibrasi dapat menyebabkan keterlambatan dalam mendeteksi paparan berlebih atau kebocoran radiasi. Hal ini berisiko menyebabkan paparan tidak terkendali pada pekerja, pasien, atau masyarakat.

Sistem pemantauan yang baik harus dilengkapi dengan alarm suara atau visual yang aktif saat nilai paparan melebihi ambang batas. Sistem ini juga sebaiknya terhubung dengan sistem keamanan dan pengendalian akses ruangan untuk memicu tindakan darurat secara otomatis.

Investasi dalam pemeliharaan dan pengelolaan alat pemantauan tidak hanya meningkatkan keamanan, tetapi juga memberikan kepastian hukum dan kredibilitas institusi di mata otoritas pengawas serta masyarakat luas.

8.4 Dokumentasi dan Evaluasi Hasil Pemantauan

Dalam sistem keselamatan radiasi, pemantauan yang dilakukan tanpa disertai dokumentasi dan evaluasi tidak akan memberikan manfaat optimal. Oleh karena itu, setiap kegiatan pemantauan—baik terhadap dosis personal, lingkungan kerja, maupun peralatan—harus dicatat secara sistematis dan dianalisis untuk mendeteksi kecenderungan peningkatan risiko serta memastikan kepatuhan terhadap batasan yang berlaku.

8.4.1 Pentingnya Dokumentasi

Dokumentasi pemantauan radiasi merupakan fondasi untuk pelacakan historis dan dasar pengambilan keputusan. Setiap hasil pengukuran dosis dari dosimeter pribadi, pengukuran paparan lingkungan, serta data dari detektor area harus disimpan dalam format yang terstandar dan mudah diakses. Format digital semakin banyak digunakan karena memudahkan pencarian kembali data dan penyusunan laporan berkala.

Dokumen ini memiliki berbagai fungsi penting, antara lain:

1. Menyediakan bukti objektif untuk audit internal dan eksternal
2. Menjadi acuan dalam evaluasi risiko paparan jangka panjang
3. Memberikan perlindungan hukum bagi institusi maupun tenaga kerja
4. Mendukung riset risiko kesehatan akibat paparan kronis

Sesuai standar dari *International Atomic Energy Agency* (IAEA), dokumentasi harus disimpan untuk jangka waktu tertentu, bergantung pada jenis prosedur dan kebijakan nasional, biasanya selama lima hingga dua puluh tahun (IAEA, 2014).

8.4.2 Analisis Hasil Pemantauan

Setelah data dikumpulkan, tahap berikutnya adalah analisis. Data dari dosimeter individu akan dibandingkan dengan nilai ambang yang ditetapkan oleh lembaga seperti *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) atau otoritas lokal seperti BAPETEN. Jika hasil berada dalam rentang aman, data

dicatat sebagai catatan rutin. Namun jika mendekati atau melebihi ambang batas, maka tindakan lanjutan harus segera dilakukan.

Analisis ini melibatkan:

1. Identifikasi pola paparan berdasarkan waktu, lokasi, dan peran pekerja
2. Evaluasi tren peningkatan dosis pada individu atau area tertentu
3. Penelusuran faktor penyebab jika terjadi lonjakan nilai paparan
4. Komparasi dengan *diagnostic reference levels* (DRLs) untuk pasien

Melalui analisis ini, manajemen dapat mengidentifikasi celah dalam sistem perlindungan serta memutuskan apakah perlu dilakukan perbaikan prosedur atau pelatihan ulang bagi staf terkait.

8.4.3 Investigasi Hasil di Atas Ambang Batas

Jika ditemukan hasil pemantauan yang melebihi batas yang ditetapkan, maka diperlukan investigasi menyeluruh. Tujuan utama dari investigasi ini bukan sekadar mencari kesalahan, melainkan untuk memahami akar masalah dan mencegah terulangnya insiden serupa.

Langkah-langkah investigasi meliputi:

1. Konfirmasi keakuratan data dengan memverifikasi alat ukur
2. Wawancara dengan pihak-pihak terkait yang terpapar atau bekerja di lokasi tersebut
3. Pemeriksaan dokumentasi prosedur kerja, penggunaan alat pelindung, dan kondisi peralatan

4. Penelusuran kemungkinan paparan tidak terduga, seperti kebocoran sumber atau kegagalan pelindung.

Setelah investigasi selesai, hasilnya harus didokumentasikan dalam laporan insiden keselamatan yang kemudian dilaporkan kepada otoritas terkait.

8.4.4 Mitigasi dan Tindak Lanjut

Setiap hasil paparan di atas ambang batas harus diikuti dengan tindakan mitigasi segera. Bentuk tindakan dapat berupa:

1. Penghentian sementara prosedur atau penggunaan alat tertentu
2. Penyesuaian protokol operasional
3. Pelatihan ulang staf
4. Pemeriksaan kesehatan tambahan bagi pekerja yang terdampak

Selain itu, perlu dilakukan tinjauan ulang sistem keselamatan secara keseluruhan. Tinjauan ini dapat menghasilkan perubahan kebijakan, revisi *standard operating procedures (SOP)*, atau investasi dalam teknologi yang lebih aman.

Evaluasi berkala terhadap efektivitas tindakan korektif juga penting untuk memastikan bahwa mitigasi benar-benar menurunkan risiko dan tidak menimbulkan konsekuensi baru.

Bab 9: Jaminan Kualitas dan Kendali Kualitas Program Proteksi Radiasi

9.1 Pengertian Jaminan Kualitas dalam Proteksi Radiasi

Jaminan kualitas atau *quality assurance* (QA) dalam proteksi radiasi adalah suatu sistem yang dirancang secara sistematis dan menyeluruh untuk menjamin bahwa seluruh aktivitas radiologi—baik diagnostik, terapeutik, maupun kedokteran nuklir—berjalan sesuai standar keselamatan dan efisiensi tertinggi. Dalam konteks ini, jaminan kualitas tidak hanya mengacu pada teknis pengoperasian alat, tetapi juga mencakup aspek manajerial, administratif, serta perilaku kerja personel yang terlibat. Tujuan utamanya adalah mencegah terjadinya paparan radiasi yang tidak perlu terhadap pasien, pekerja, dan lingkungan sekitar.

Dalam implementasinya, sistem jaminan kualitas mencakup berbagai elemen mulai dari pemilihan peralatan, pemeliharaan berkala, pelatihan personel, kalibrasi instrumen, hingga audit internal secara rutin. Aspek-aspek tersebut saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan, karena satu saja kelalaian pada salah satu

komponen dapat menyebabkan kegagalan sistemik yang berdampak pada keselamatan. Misalnya, kesalahan dalam pengaturan parameter pemindaian sinar-X atau ketidaktepatan posisi pasien dapat meningkatkan dosis radiasi tanpa memberikan tambahan nilai diagnostik yang berarti (Bushong, 2020).

Penerapan QA dalam proteksi radiasi juga didukung oleh prinsip dasar yang telah ditetapkan secara internasional, yaitu prinsip *justification*, *optimization*, dan *dose limitation*. Prinsip *justification* mengharuskan bahwa setiap prosedur medis yang menggunakan radiasi harus memiliki manfaat klinis yang lebih besar daripada risikonya. Sementara itu, prinsip *optimization* atau yang dikenal dengan istilah *As Low As Reasonably Achievable (ALARA)* menekankan bahwa dosis radiasi harus diminimalkan sejauh mungkin tanpa mengorbankan kualitas hasil. Terakhir, prinsip *dose limitation* menetapkan batas maksimum paparan radiasi yang dapat diterima oleh pekerja dan masyarakat umum per tahun, sesuai panduan dari *International Commission on Radiological Protection (ICRP, 2007)*.

Pelaksanaan QA dilakukan melalui kebijakan dan prosedur tertulis yang menjadi panduan operasional harian. Fasilitas radiologi wajib menyusun protokol kerja yang mencakup pengoperasian alat, pengelolaan pasien, proteksi staf, serta tanggap darurat apabila terjadi paparan tidak disengaja atau insiden teknis. Protokol ini harus diperbaharui secara berkala mengikuti perkembangan teknologi dan regulasi. Selain itu, pengawasan eksternal melalui audit dari badan regulator seperti *BAPETEN* di Indonesia menjadi bagian penting

dalam menjamin kepatuhan terhadap standar nasional dan internasional.

Peran personel dalam sistem QA sangatlah sentral. Setiap anggota tim—baik dokter, fisikawan medis, teknolog radiologi, maupun perawat—harus memahami tanggung jawab masing-masing dalam menjaga keselamatan radiasi. Pelatihan rutin dan peningkatan kapasitas menjadi komponen wajib agar pemahaman tentang risiko radiasi, penggunaan alat pelindung, dan pengelolaan dosis tetap terjaga di level optimal. *Continuing professional development* dalam proteksi radiasi merupakan hal esensial untuk menjaga standar kompetensi dan kepercayaan masyarakat terhadap layanan medis berbasis radiasi.

Selain perlindungan terhadap pekerja, QA juga menempatkan perhatian besar pada keselamatan pasien. Misalnya, dalam radiografi pediatrik, anak-anak lebih sensitif terhadap radiasi sehingga diperlukan protokol khusus dengan pengaturan dosis yang rendah dan *collimation* ketat. Begitu pula dalam prosedur intervensi fluoroskopi yang memiliki durasi panjang dan potensi dosis tinggi, penting dilakukan pemantauan waktu paparan dan *dose tracking* untuk memastikan keamanan pasien tetap dalam batas wajar (IAEA, 2014).

Keterlibatan teknologi informasi juga semakin memperkuat pelaksanaan QA. Sistem manajemen mutu berbasis digital memungkinkan pencatatan data pemantauan alat, riwayat kalibrasi, dosis kumulatif pasien, serta pelaporan insiden secara sistematis.

Data-data ini menjadi dasar pengambilan keputusan dan peningkatan mutu layanan secara berkelanjutan.

QA bukanlah kegiatan satu kali, melainkan suatu proses siklik yang memerlukan pemantauan dan perbaikan terus-menerus. Melalui sistem ini, fasilitas pelayanan kesehatan tidak hanya mampu memenuhi kewajiban regulatif, tetapi juga membangun budaya kerja yang berorientasi pada keselamatan dan tanggung jawab profesional. Dalam jangka panjang, pelaksanaan QA yang konsisten akan meningkatkan efisiensi operasional, menurunkan risiko litigasi, serta memberikan dampak positif terhadap kepuasan pasien dan reputasi institusi.

9.2 Komponen Utama Program Jaminan Kualitas

Jaminan kualitas (*quality assurance* atau QA) dalam konteks layanan kesehatan, khususnya di bidang radiologi, merupakan proses sistematis untuk memastikan bahwa seluruh prosedur dan hasil pelayanan berjalan sesuai standar mutu yang ditetapkan. Tujuan dari program ini adalah menjamin keamanan pasien dan tenaga kesehatan, menjaga konsistensi kinerja peralatan, serta meningkatkan efisiensi pelayanan diagnostik maupun terapeutik yang menggunakan radiasi pengion.

Pelaksanaan program QA yang komprehensif membutuhkan komitmen organisasi, dukungan regulasi, dan keterlibatan aktif seluruh personel. Terdapat sejumlah komponen utama yang harus

diperhatikan dalam penyusunan dan pelaksanaan program jaminan kualitas, yaitu standar prosedur, pelatihan, pemeliharaan alat, dan sistem audit.

9.2.1 Standar Operasional Prosedur (SOP)

SOP yang terdokumentasi dengan baik merupakan landasan utama dalam program QA. Dokumen ini mencakup instruksi rinci mengenai pelaksanaan prosedur radiologi, mulai dari persiapan pasien, pengaturan parameter eksposur, pengoperasian alat, hingga dokumentasi hasil. Standar ini harus disusun berdasarkan pedoman nasional maupun internasional serta disesuaikan dengan jenis pelayanan yang diberikan.

Penerapan SOP bertujuan untuk memastikan bahwa semua personel bekerja secara konsisten dan sesuai standar keamanan. Dalam situasi kritis seperti pemeriksaan gawat darurat atau tindakan invasif, keberadaan SOP memungkinkan personel untuk bertindak cepat dan terstruktur tanpa mengabaikan aspek keselamatan.

Pentingnya SOP tidak hanya terletak pada pelaksanaannya, tetapi juga pada evaluasi berkala dan revisi apabila ditemukan perubahan teknologi atau regulasi baru (*Bushong, 2021*). Proses ini menjamin bahwa dokumen SOP selalu relevan dan efektif untuk digunakan dalam operasional sehari-hari.

9.2.2 Pelatihan Personel

Kompetensi sumber daya manusia menjadi faktor penentu keberhasilan program QA. Pelatihan personel secara berkala memastikan bahwa staf radiologi memahami prinsip proteksi radiasi, pengoperasian alat, serta prosedur keselamatan kerja. Pelatihan ini

juga memberikan pembaruan terkait perkembangan teknologi dan regulasi terbaru.

Pelatihan dapat mencakup topik seperti teknik pencitraan terbaru, manajemen dosis radiasi, pemantauan paparan, serta pelatihan khusus untuk situasi darurat radiasi. Pelatihan berbasis simulasi juga sangat berguna untuk memperkuat keterampilan teknis dan pengambilan keputusan di lapangan (*McEwen & Nies, 2019*).

Evaluasi terhadap hasil pelatihan menjadi bagian penting dalam proses pengembangan kompetensi. Pencatatan sertifikat dan riwayat pelatihan membantu manajemen dalam merencanakan pelatihan lanjutan serta mendeteksi kebutuhan pembelajaran tambahan bagi staf tertentu.

9.2.3 Pemeliharaan dan Kalibrasi Alat

Peralatan radiologi yang digunakan dalam pencitraan atau terapi harus selalu dalam kondisi optimal untuk menghasilkan gambar diagnostik yang berkualitas dan aman bagi pasien. Oleh karena itu, program QA mewajibkan adanya jadwal pemeliharaan rutin dan kalibrasi alat secara teratur.

Pemeliharaan mencakup kegiatan seperti pembersihan, penggantian komponen aus, pemeriksaan sistem pendingin, serta pengecekan sistem proteksi radiasi. Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa output alat sesuai dengan nilai yang diatur, sehingga dosis radiasi yang diberikan kepada pasien sesuai dan tidak berlebihan.

Pemeliharaan dan kalibrasi harus dilakukan oleh teknisi atau fisikawan medik yang kompeten, serta didokumentasikan dengan

rinci dalam log pemeliharaan alat. Ketika hasil kalibrasi menunjukkan deviasi dari nilai standar, tindakan korektif harus segera dilakukan sebelum alat digunakan kembali.

9.2.4 Audit Internal dan Eksternal

Audit merupakan sarana evaluasi menyeluruh terhadap efektivitas dan konsistensi pelaksanaan program QA. Audit internal dilakukan oleh tim dari dalam organisasi untuk meninjau dokumen, prosedur, dan hasil pemeriksaan. Tujuannya adalah mendeteksi ketidaksesuaian atau potensi risiko sebelum menjadi masalah yang lebih besar.

Sementara itu, audit eksternal biasanya dilakukan oleh lembaga independen atau otoritas pengawas seperti BAPETEN. Audit ini memastikan bahwa fasilitas pelayanan radiologi mematuhi standar nasional dan peraturan keselamatan radiasi yang berlaku.

Hasil audit menjadi bahan perbaikan berkelanjutan. Rekomendasi yang diberikan perlu ditindaklanjuti dengan tindakan nyata dan dokumentasi yang memadai, sehingga proses peningkatan mutu berlangsung secara sistematis dan terukur (IAEA, 2018).

9.3 Kendali Kualitas Peralatan Radiologi

Kinerja optimal peralatan radiologi sangat bergantung pada sistem kendali kualitas yang diterapkan secara konsisten. Dalam praktik pelayanan kesehatan, kendali kualitas (*quality control* atau QC) merupakan elemen penting untuk memastikan bahwa perangkat

yang digunakan memberikan hasil diagnostik yang akurat sekaligus aman bagi pasien dan tenaga medis.

Tujuan utama dari kendali kualitas adalah menjaga mutu citra, mencegah paparan berlebih, serta memperpanjang usia pakai peralatan melalui deteksi dini terhadap kerusakan atau penurunan kinerja.

9.3.1 Elemen Penting dalam QC Radiologi

Kegiatan QC mencakup berbagai jenis pengujian teknis yang dilakukan terhadap komponen utama peralatan radiologi. Beberapa elemen kunci dalam QC meliputi:

1. **Pengujian kinerja generator sinar-X:** Generator merupakan sumber utama radiasi dalam sistem radiologi konvensional. Pemeriksaan dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan tegangan (kVp), arus (mA), dan waktu paparan. Deviasi pada parameter ini dapat memengaruhi kualitas citra dan tingkat paparan radiasi.
2. **Resolusi citra:** Evaluasi terhadap ketajaman dan kontras citra dilakukan menggunakan *phantom* standar. Resolusi yang menurun dapat menandakan kerusakan pada detektor atau kegagalan dalam sistem pemrosesan gambar.
3. **Keseragaman dosis (dose uniformity):** Keseragaman dosis penting untuk mencegah area tertentu menerima paparan yang lebih tinggi dari yang lain. Uji ini memastikan bahwa sistem pencitraan menghasilkan paparan yang merata di seluruh bidang pencitraan.

4. **Waktu eksposur:** Akurasi waktu eksposur sangat penting dalam menentukan dosis total dan kualitas gambar. Sistem QC akan mendeteksi jika waktu eksposur menyimpang dari nilai yang ditetapkan, yang dapat berakibat pada overexposure atau underexposure.

Semua pengujian ini menggunakan alat ukur yang dikalibrasi dan prosedur standar yang telah ditetapkan oleh organisasi seperti *American Association of Physicists in Medicine* (AAPM) dan *International Atomic Energy Agency* (IAEA, 2014).

9.3.2 Jadwal dan Frekuensi QC

Pengujian kendali kualitas dibedakan berdasarkan frekuensinya, antara lain harian, mingguan, bulanan, atau tahunan. Pengujian harian biasanya sederhana seperti pemeriksaan kebersihan layar monitor atau kerapatan citra. Pengujian bulanan dan tahunan cenderung lebih kompleks, seperti pengukuran parameter fisik sistem dan pengujian dosis radiasi.

Tenaga pelaksana QC harus memiliki keahlian teknis khusus. Di banyak negara, pemeriksaan ini dilakukan oleh *medical physicist* atau teknisi terlatih yang telah memperoleh sertifikasi. Kegiatan QC juga harus terdokumentasi secara sistematis untuk keperluan evaluasi, audit mutu, dan pelaporan ke otoritas pengawas (Martin & Harbison, 2018).

9.3.3 Implikasi terhadap Mutu Layanan dan Keselamatan

Kinerja alat radiologi yang tidak optimal dapat mengarah pada kesalahan diagnosis, peningkatan dosis, dan kerusakan peralatan jangka panjang. Misalnya, jika generator sinar-X

menghasilkan tegangan tidak stabil, maka citra yang dihasilkan bisa terlalu gelap atau terlalu terang, menyulitkan interpretasi.

Selain itu, sistem deteksi dini melalui QC dapat mencegah insiden paparan berlebih, terutama dalam praktik radiologi pediatrik dan *interventional fluoroscopy*, di mana pasien rentan terhadap akumulasi dosis tinggi. Oleh karena itu, kendali kualitas berperan sebagai penghubung antara keselamatan pasien dan mutu diagnostik.

Implementasi QC juga merupakan syarat legal dalam akreditasi fasilitas pelayanan radiologi. Banyak lembaga kesehatan nasional maupun internasional mewajibkan dokumentasi QC sebagai bagian dari standar keselamatan radiasi dan mutu layanan.

9.3.4 Integrasi dengan Program Kendali Mutu Keseluruhan

QC tidak berdiri sendiri, tetapi merupakan bagian dari sistem kendali mutu secara menyeluruh (*quality assurance* atau QA). QA mencakup kebijakan, prosedur operasional standar, pelatihan personel, dan pemantauan kinerja fasilitas. Dengan demikian, QC menjadi komponen teknis yang mendukung QA dalam menjamin pelayanan radiologi yang efektif, efisien, dan aman.

Integrasi yang baik antara QC dan QA juga memungkinkan perbaikan berkelanjutan berdasarkan hasil pengujian dan pemantauan yang telah dilakukan. Hal ini sejalan dengan prinsip *continuous improvement* yang diterapkan dalam sistem manajemen mutu modern.

9.4 Evaluasi Efektivitas Program Proteksi Radiasi

Evaluasi terhadap efektivitas program proteksi radiasi merupakan bagian penting dalam sistem manajemen keselamatan radiasi. Tanpa evaluasi yang komprehensif dan berkelanjutan, risiko paparan tidak akan terkendali secara optimal, dan peluang terjadinya kesalahan prosedur tetap terbuka. Oleh karena itu, evaluasi ini tidak hanya bersifat administratif, tetapi berperan strategis dalam menjaga keselamatan individu dan lingkungan kerja dari dampak radiasi pengion.

9.4.1 Indikator Evaluasi

Indikator utama dalam menilai efektivitas program proteksi radiasi meliputi hasil audit internal dan eksternal, kepatuhan terhadap batas dosis tahunan yang ditetapkan oleh *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), serta jumlah dan jenis insiden paparan yang dilaporkan. Jika indikator-indikator ini menunjukkan peningkatan kepatuhan, penurunan jumlah insiden, dan stabilitas dosis yang diterima oleh pekerja, maka program dapat dinilai berjalan dengan efektif.

Sebagai contoh, laporan bulanan dari pemantauan dosimeter individu dapat memberikan gambaran tren paparan dalam jangka panjang. Jika terjadi peningkatan dosis secara bertahap meskipun masih di bawah ambang batas, hal ini tetap perlu dianalisis untuk mencegah potensi akumulasi paparan jangka panjang (IAEA, 2018).

9.4.2 Audit dan Tinjauan Berkala

Audit keselamatan radiasi dilakukan secara sistematis untuk mengevaluasi kesesuaian antara prosedur operasional dengan kebijakan proteksi yang berlaku. Audit dapat dilakukan oleh tim internal rumah sakit atau oleh lembaga regulator eksternal seperti BAPETEN. Hasil audit akan mengungkap kekuatan dan kelemahan program yang ada, serta memberikan dasar untuk menetapkan prioritas dalam perbaikan.

Tinjauan berkala juga mencakup penilaian terhadap keefektifan pelatihan keselamatan radiasi, penggunaan alat pelindung, sistem pelaporan insiden, dan mekanisme pengendalian paparan. Evaluasi menyeluruh ini sangat penting agar sistem tidak hanya bersifat reaktif, melainkan juga mampu mencegah kejadian yang tidak diinginkan sejak dini.

9.4.3 Keterlibatan Staf dan Umpan Balik

Program yang efektif harus menciptakan budaya partisipatif, di mana staf merasa memiliki tanggung jawab atas keselamatan dan berani menyampaikan masukan secara terbuka. Salah satu indikator efektivitas adalah tingkat keterlibatan staf dalam pelaporan insiden dan pelaksanaan simulasi darurat.

Keterlibatan aktif ini menunjukkan adanya kesadaran kolektif bahwa keselamatan adalah prioritas bersama. Selain itu, mekanisme umpan balik yang jelas, baik dari staf kepada manajemen maupun sebaliknya, dapat mempercepat proses perbaikan dan meningkatkan kepatuhan terhadap prosedur keselamatan.

Misalnya, form evaluasi singkat yang diisi setelah pelatihan atau simulasi dapat memberikan gambaran tentang pemahaman peserta serta efektivitas materi yang disampaikan. Data ini menjadi dasar dalam menyusun pelatihan berikutnya agar lebih relevan dan aplikatif (Mettler & Upton, 2008).

9.4.4 Perbaikan Berkelanjutan

Evaluasi bukanlah akhir dari siklus proteksi radiasi, melainkan titik tolak bagi perbaikan berkelanjutan. Konsep ini dikenal sebagai *continuous quality improvement*, yang bertujuan untuk secara konsisten meningkatkan proses dan hasil keselamatan kerja. Setiap hasil evaluasi harus ditindaklanjuti dengan rencana aksi yang jelas dan dapat diukur.

Misalnya, jika ditemukan bahwa pelindung radiasi tidak digunakan optimal karena desain yang tidak ergonomis, maka tindakan korektif bisa berupa pengadaan alat baru, penyesuaian SOP, atau pelatihan ulang. Penting untuk melakukan penilaian ulang setelah implementasi koreksi guna memastikan bahwa solusi yang diterapkan efektif.

Manajemen juga perlu berkomitmen menyediakan sumber daya yang cukup untuk mendukung perbaikan ini, baik dalam bentuk dana, waktu, maupun dukungan kebijakan internal.

Bab 10: Kesiapsiagaan dan Respons terhadap Insiden Kecelakaan Radiologi

10.1 Jenis dan Dampak Insiden Kecelakaan Radiologi

Insiden dalam bidang radiologi adalah peristiwa yang melibatkan pelepasan atau penggunaan radiasi pengion secara tidak terkendali sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada manusia, lingkungan, maupun infrastruktur. Insiden ini dapat terjadi di fasilitas medis, industri, maupun laboratorium riset yang menggunakan sumber radiasi. Meskipun telah diterapkan sistem proteksi yang ketat, kecelakaan tetap dapat terjadi akibat kegagalan teknis, kesalahan manusia, atau kelalaian prosedur. Oleh karena itu, memahami jenis-jenis insiden radiologi dan dampaknya sangat penting dalam upaya mitigasi dan penguatan sistem keselamatan radiasi.

Jenis insiden radiologi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori utama. Pertama, pelepasan tidak disengaja (*accidental release*) dari sumber radiasi, baik yang bersifat tertutup (*sealed sources*) maupun terbuka (*unsealed sources*). Hal ini bisa

disebabkan oleh kerusakan alat, kebocoran kontainer, atau kelalaian dalam penyimpanan. Kedua, paparan berlebih (*overexposure*) yang dialami oleh pasien, tenaga kesehatan, atau masyarakat umum akibat prosedur medis yang tidak sesuai standar, seperti parameter pemindaian yang salah atau kegagalan sistem interlock pelindung. Ketiga, kontaminasi lingkungan yang muncul akibat tumpahan atau pembuangan limbah radioaktif yang tidak dikelola dengan baik. Kontaminasi ini dapat mencemari udara, air, atau permukaan, sehingga menimbulkan dampak jangka panjang terhadap kesehatan dan ekosistem.

Dampak dari insiden radiologi sangat bervariasi tergantung pada besar dosis, durasi paparan, dan jenis radiasi yang terlibat. Paparan akut dengan dosis tinggi dapat menimbulkan *acute radiation syndrome* (ARS), ditandai dengan mual, muntah, diare, gangguan hematopoietik, dan dalam kasus berat, kematian. Cedera lokal seperti *radiation burns* atau nekrosis jaringan juga dapat terjadi jika kulit atau organ tertentu terpapar secara langsung dalam waktu yang lama (Hall & Giaccia, 2019). Selain efek langsung terhadap kesehatan, insiden juga dapat mengakibatkan dampak psikologis seperti kecemasan, stres pascatrauma, dan stigma terhadap korban atau komunitas yang terdampak.

Insiden terkenal seperti kecelakaan di Goiânia, Brasil pada tahun 1987 menunjukkan betapa berbahayanya sumber radioaktif yang tidak dikelola dengan baik. Dalam peristiwa tersebut, sebuah kapsul *cesium-137* yang ditinggalkan di fasilitas radioterapi lama ditemukan oleh warga dan menyebabkan kontaminasi lingkungan

serta kematian beberapa individu. Kasus ini menjadi pelajaran penting mengenai kebutuhan sistem pengawasan dan pengamanan sumber radiasi yang ketat, termasuk pelabelan, penyimpanan, dan pelacakan inventaris (IAEA, 2006).

Selain dampak kesehatan, kecelakaan radiologi juga memiliki konsekuensi sosial dan ekonomi. Ketika terjadi kontaminasi lingkungan, biaya dekontaminasi, evakuasi penduduk, dan rehabilitasi fasilitas dapat menjadi sangat besar. Ketakutan publik atau *radiophobia* yang timbul dari persepsi bahaya, meskipun dosis sebenarnya rendah, dapat menurunkan kepercayaan terhadap layanan kesehatan dan institusi pemerintah. Oleh karena itu, komunikasi risiko yang jelas dan berbasis data menjadi aspek penting dalam menangani krisis radiologi.

Kesiapsiagaan sistemik menjadi sangat penting dalam mengantisipasi dan menangani insiden radiologi. Fasilitas yang menggunakan radiasi wajib memiliki *emergency response plan* yang meliputi identifikasi potensi bahaya, prosedur evakuasi, sistem pelaporan cepat, serta pelatihan rutin bagi semua personel. Simulasi insiden dan audit berkala terhadap kesiapan peralatan dan petugas harus dijadikan standar operasional. Koordinasi dengan instansi seperti pemadam kebakaran, rumah sakit rujukan, dan badan pengawas juga diperlukan agar respons terhadap insiden dapat dilakukan secara terpadu dan efektif (IAEA, 2018).

Penggunaan teknologi modern juga berperan dalam mendeteksi dan mencegah insiden lebih awal. Sistem pemantauan dosis waktu nyata (*real-time dose monitoring*), sensor kebocoran,

serta penguncian otomatis pada ruang beradiasi dapat memberikan lapisan proteksi tambahan. Selain itu, dokumentasi dan analisis insiden masa lalu penting untuk pembelajaran kolektif guna menghindari kejadian serupa di masa depan.

Dalam dunia yang semakin bergantung pada teknologi berbasis radiasi untuk diagnosis dan terapi, kebutuhan akan penguatan sistem keselamatan tidak dapat ditawar. Pemahaman terhadap potensi insiden, dampak yang ditimbulkan, serta cara-cara mitigasi harus menjadi bagian dari kompetensi dasar setiap tenaga kesehatan dan pengelola fasilitas radiasi. Hanya dengan sistem yang terorganisir, kesadaran tinggi, dan evaluasi berkelanjutan, keselamatan pengguna dan publik dapat terjamin secara optimal.

10.2 Komponen Utama Kesiapsiagaan Radiologi

Kesiapsiagaan radiologi merupakan bagian krusial dalam sistem manajemen keselamatan fasilitas kesehatan yang memanfaatkan sumber radiasi pengion. Dalam situasi darurat, seperti kebocoran radiasi, kegagalan alat, atau insiden nuklir, kesiapsiagaan yang memadai dapat mengurangi risiko cedera, paparan yang tidak diinginkan, serta kerusakan lingkungan kerja. Oleh karena itu, setiap fasilitas medis yang melakukan prosedur radiologi harus memiliki sistem kesiapsiagaan yang sistematis, terdokumentasi, dan dilatih secara berkala.

Terdapat beberapa komponen utama yang menjadi dasar kesiapsiagaan radiologi yang efektif, antara lain identifikasi risiko, perencanaan tanggap darurat, pelatihan personel, serta pelaksanaan simulasi secara berkala. Setiap komponen tersebut berperan dalam membangun budaya keselamatan dan kemampuan respons yang cepat dan tepat terhadap situasi tak terduga.

10.2.1 Identifikasi Potensi Risiko Radiologi

Langkah awal dalam kesiapsiagaan adalah melakukan identifikasi dan analisis potensi risiko yang mungkin terjadi di fasilitas medis. Risiko dapat berasal dari berbagai sumber, seperti kebocoran tabung sinar-X, kegagalan sistem proteksi pada alat CT scan, kesalahan pemakaian radiofarmaka, hingga kebakaran di ruang radiologi yang menyebabkan pelepasan radiasi.

Identifikasi risiko dilakukan melalui inspeksi fasilitas, peninjauan desain ruangan, evaluasi peralatan, serta wawancara dengan personel yang bekerja langsung dengan alat radiasi. Proses ini juga melibatkan analisis *near-miss* dan insiden sebelumnya sebagai bahan pelajaran untuk memperkuat sistem yang ada.

Penting untuk mempertimbangkan tidak hanya risiko terhadap pekerja, tetapi juga terhadap pasien, pengunjung, dan masyarakat sekitar. Oleh karena itu, pendekatan komprehensif dalam analisis risiko menjadi landasan bagi seluruh strategi kesiapsiagaan (IAEA, 2018).

10.2.2 Penyusunan Rencana Tanggap Darurat

Setelah risiko diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menyusun rencana tanggap darurat (*radiological emergency*

response plan). Dokumen ini berisi prosedur sistematis yang harus dilakukan jika terjadi insiden radiasi, termasuk alur evakuasi, identifikasi area terkontaminasi, isolasi sumber paparan, serta penanganan individu yang terdampak.

Rencana tersebut juga menetapkan struktur tim tanggap darurat, tanggung jawab masing-masing anggota, serta alur komunikasi internal dan eksternal. Hal ini mencakup cara berkoordinasi dengan otoritas seperti Dinas Kesehatan, pemadam kebakaran, dan BAPETEN.

Dokumen tanggap darurat harus diperbaharui secara berkala, terutama jika terjadi perubahan pada fasilitas, alat, atau personel kunci. Revisi ini dilakukan berdasarkan hasil simulasi atau audit yang mengungkapkan kelemahan prosedur sebelumnya.

10.2.3 Pelatihan Tim Tanggap Darurat

Personel yang terlibat dalam radiologi harus menerima pelatihan khusus mengenai kesiapsiagaan dan tanggap darurat. Pelatihan ini meliputi pemahaman dasar tentang bahaya radiasi, teknik evakuasi, penggunaan alat pelindung diri, serta prosedur dekontaminasi apabila terjadi paparan langsung.

Tim tanggap darurat terdiri dari perwakilan berbagai unit, termasuk radiografer, teknisi alat, perawat, petugas keamanan, dan petugas lingkungan. Seluruh anggota tim harus memahami peran masing-masing dan dapat bekerja secara terkoordinasi dalam tekanan waktu yang tinggi.

Pelatihan yang diberikan tidak hanya berbentuk teori, tetapi juga praktik langsung, termasuk simulasi penggunaan alat pelindung

seperti apron timbal dan detektor radiasi portabel (*Bushong, 2021*). Prosedur komunikasi darurat juga menjadi bagian penting yang dilatih agar tidak terjadi miskomunikasi selama kejadian.

10.2.4 Simulasi Insiden Radiasi

Pelaksanaan simulasi (*drill*) merupakan sarana efektif untuk menguji kesiapan sistem tanggap darurat yang telah disusun. Simulasi dapat berupa latihan evakuasi pasien dari ruang radiologi, penanganan tabung sinar-X yang rusak, atau penanganan personel yang terpapar radioaktif.

Melalui simulasi, dapat diketahui apakah jalur evakuasi sudah efisien, apakah peralatan darurat tersedia dan mudah diakses, serta bagaimana kemampuan personel dalam merespons sesuai prosedur. Setiap hasil simulasi harus dicatat dan dianalisis untuk menyusun rencana perbaikan.

Simulasi sebaiknya dilakukan secara berkala, minimal dua kali dalam setahun, dan melibatkan seluruh staf yang berisiko terpapar. Dengan pelatihan dan simulasi yang konsisten, kesiapsiagaan tidak hanya menjadi dokumen tertulis, tetapi menjadi bagian dari budaya kerja sehari-hari.

10.3 Prosedur Respons Terhadap Paparan dan Kontaminasi

Dalam lingkungan kerja yang melibatkan sumber radiasi, kemungkinan terjadinya insiden paparan berlebih atau kontaminasi tidak dapat diabaikan. Oleh karena itu, setiap fasilitas yang

menggunakan sumber radiasi wajib memiliki prosedur respons yang terstruktur untuk meminimalkan risiko kesehatan dan lingkungan, serta memenuhi standar keselamatan yang berlaku.

Respons cepat, sistematis, dan terdokumentasi dengan baik menjadi elemen penting dalam memastikan keselamatan personel, menghindari penyebaran kontaminasi, serta menjaga kepatuhan terhadap ketentuan dari badan pengawas seperti *Badan Pengawas Tenaga Nuklir* (BAPETEN) di Indonesia.

10.3.1 Isolasi dan Evakuasi

Langkah pertama yang dilakukan saat terjadi kontaminasi atau paparan berlebih adalah mengisolasi area terpapar. Ruangan, peralatan, atau jalur distribusi udara yang dicurigai terkontaminasi segera ditandai dan dibatasi aksesnya menggunakan pita peringatan atau sistem kunci otomatis. Tujuannya adalah mencegah penyebaran zat radioaktif ke area lain dan mengurangi jumlah individu yang berisiko terkena dampak tambahan.

Evakuasi individu dari area terkontaminasi dilakukan secara tertib dan diarahkan ke zona dekontaminasi. Petugas yang melakukan evakuasi harus mengenakan alat pelindung diri dan sudah terlatih dalam pengelolaan insiden radiasi. Dalam proses ini, penting untuk mencatat identitas orang yang berada di lokasi kejadian guna dilakukan pemantauan lebih lanjut (IAEA, 2006).

10.3.2 Pemantauan dan Penilaian Dosis Individu

Setelah evakuasi, seluruh individu yang dicurigai terpapar akan menjalani pemantauan dosis menggunakan perangkat seperti *whole-body counter*, detektor kontaminasi permukaan, atau

dosimeter tambahan. Data yang diperoleh menjadi dasar dalam menentukan tingkat paparan dan apakah intervensi medis diperlukan.

Jika seseorang menerima paparan melebihi batas tahunan, maka dilakukan observasi lanjutan, pemeriksaan laboratorium, dan jika dibutuhkan, penanganan medis seperti pemberian antidot spesifik atau terapi kelasi untuk mengikat zat radioaktif di tubuh (Martin & Harbison, 2018). Informasi ini juga digunakan untuk memperkirakan dosis efektif dan kemungkinan efek jangka panjang yang mungkin timbul.

10.3.3 Prosedur Dekontaminasi

Dekontaminasi dilakukan baik pada individu, peralatan, maupun lingkungan. Untuk individu, proses meliputi pelepasan pakaian, pembersihan kulit dengan air hangat dan sabun, serta pencukuran rambut jika partikel radioaktif menempel pada jaringan kepala.

Pada peralatan, dekontaminasi dilakukan menggunakan larutan kimia khusus atau penyemprotan dengan sistem tertutup. Area lingkungan kerja yang terpapar dibersihkan sesuai dengan prosedur yang ditetapkan dan diperiksa kembali menggunakan alat pemantau radiasi untuk memastikan kadar radiasi telah turun ke tingkat yang aman.

Seluruh proses dekontaminasi didokumentasikan secara rinci, termasuk tanggal kejadian, lokasi, jenis radionuklida, serta hasil pemantauan sebelum dan sesudah dekontaminasi.

10.3.4 Pelaporan dan Investigasi

Setiap insiden paparan atau kontaminasi harus segera dilaporkan kepada otoritas pengawas nasional, seperti BAPETEN. Laporan mencakup kronologi kejadian, individu yang terdampak, hasil pemantauan, langkah mitigasi yang telah dilakukan, serta rencana tindak lanjut. Laporan ini penting sebagai bentuk transparansi dan tanggung jawab institusi terhadap keselamatan nuklir dan radiasi.

Selain itu, dilakukan investigasi internal untuk mengidentifikasi akar penyebab kejadian. Investigasi ini bertujuan untuk mencegah kejadian serupa di masa mendatang melalui pembaruan prosedur kerja, peningkatan pelatihan, atau perbaikan teknis terhadap peralatan yang digunakan.

Fasilitas yang tidak melaporkan kejadian atau gagal menindaklanjuti dengan benar dapat dikenai sanksi administratif atau hukum, sesuai dengan peraturan yang berlaku.

10.4 Pelaporan, Evaluasi, dan Perbaikan Sistem

Dalam sistem keselamatan radiasi, pelaporan insiden bukan hanya kewajiban administratif, tetapi merupakan bagian integral dari budaya keselamatan yang bertujuan mencegah terulangnya kejadian dan meningkatkan mutu layanan. Pelaporan yang akurat dan disertai evaluasi menyeluruh memberikan peluang untuk memperkuat sistem perlindungan melalui pembelajaran dari kegagalan.

10.4.1 Urgensi Pelaporan Insiden

Setiap kejadian yang berpotensi menimbulkan paparan radiasi di atas ambang batas atau yang menyimpang dari prosedur standar harus segera dilaporkan, baik oleh tenaga medis, teknisi, maupun staf pendukung. Pelaporan mencakup kejadian nyata (*actual incident*) dan hampir terjadi (*near miss*), yang meskipun tidak menimbulkan dampak langsung, tetap menyimpan potensi bahaya laten.

Sistem pelaporan harus dirancang agar mudah diakses, tidak menghukum (*non-punitive*), dan menjamin kerahasiaan pelapor. Tujuannya adalah mendorong partisipasi aktif tanpa rasa takut akan dampak personal atau profesional. Pelaporan juga dapat dilakukan melalui formulir digital yang secara otomatis tercatat dalam basis data manajemen risiko fasilitas.

Menurut *International Atomic Energy Agency* (IAEA), fasilitas pelayanan kesehatan harus memiliki prosedur tertulis untuk pelaporan, klasifikasi tingkat keparahan insiden, dan jalur eskalasi ke otoritas terkait bila diperlukan (IAEA, 2014).

10.4.2 Evaluasi Akar Masalah

Setelah laporan diterima, dilakukan evaluasi terhadap akar penyebab insiden (*root cause analysis*). Proses ini mencakup identifikasi semua faktor yang berkontribusi terhadap kejadian, baik teknis, sistemik, maupun perilaku. Tujuannya bukan untuk menyalahkan individu, melainkan untuk memahami kegagalan sistem secara komprehensif.

Langkah-langkah evaluasi meliputi:

1. Tinjauan dokumentasi dan rekam prosedur
2. Wawancara staf yang terlibat
3. Pemeriksaan alat dan lingkungan kerja
4. Analisis alur kerja dan titik lemah sistem

Evaluasi ini juga mencakup klasifikasi insiden berdasarkan tingkat risiko dan dampak potensial, misalnya menggunakan matriks risiko yang membandingkan probabilitas kejadian dengan tingkat keparahan dampaknya.

10.4.3 Tindakan Korektif dan Pencegahan

Hasil evaluasi menjadi dasar untuk menyusun tindakan korektif dan pencegahan (*corrective and preventive actions* atau CAPA). Tindakan ini harus spesifik, terukur, dan dapat diimplementasikan dalam waktu yang ditentukan. Misalnya, jika insiden terjadi akibat ketidaktahuan operator terhadap batas paparan, maka solusi yang tepat bisa berupa pelatihan tambahan dan revisi *standard operating procedure* (SOP) agar lebih mudah dipahami.

Tindakan korektif tidak cukup hanya dilakukan sekali. Dibutuhkan mekanisme untuk memantau efektivitas tindakan tersebut dalam jangka waktu tertentu, misalnya melalui audit ulang, simulasi darurat, atau survei persepsi keselamatan dari tenaga kerja.

Penting pula untuk melibatkan seluruh unit terkait agar solusi yang diterapkan bersifat menyeluruh dan tidak hanya fokus pada satu bagian saja. Prinsip kolaboratif ini membantu menciptakan sistem yang lebih adaptif terhadap perubahan.

10.4.4 Pembaruan Prosedur Operasional

Insiden yang signifikan sering kali mengindikasikan perlunya pembaruan SOP, protokol kerja, atau bahkan kebijakan keselamatan secara umum. Pembaruan ini mencakup penyesuaian instruksi kerja, revisi alur tanggung jawab, atau integrasi teknologi baru yang mendukung keselamatan.

Sebagai contoh, temuan dari sebuah insiden paparan dapat mendorong pengembangan sistem alarm otomatis atau pengingat digital dalam sistem radiologi untuk mencegah kesalahan pengaturan dosis. Prosedur yang baru harus disosialisasikan secara merata dan disertai pelatihan agar seluruh staf memahami perubahan yang diterapkan.

Sistem manajemen mutu yang baik juga mengintegrasikan siklus perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) dengan prinsip *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) untuk memastikan bahwa pembaruan tidak berhenti pada satu titik, melainkan terus dikaji dan disempurnakan.

Profil Penulis



Santa Mareta, A.Md.Rad., SKM., M.Kes., lahir di Pasar Siulak Gedang pada 19 Maret 1989. Ia menempuh pendidikan Diploma III Teknik Radiodiagnostik dan Radioterapi di Universitas Baiturrahmah, kemudian melanjutkan studi S1 Ilmu Kesehatan Masyarakat di Stikes Syedza Saintika

Padang, serta menyelesaikan pendidikan S2 Kesehatan Masyarakat di Universitas Andalas Padang. Latar belakang akademiknya mencerminkan perpaduan antara keterampilan teknis di bidang radiologi dan pemahaman komprehensif tentang kesehatan masyarakat. Saat ini, Santa mengabdikan diri sebagai dosen pada Program Studi DIII Radiologi, Fakultas Vokasi Universitas Baiturrahmah Padang. Dalam perannya, ia tidak hanya berfokus pada transfer ilmu, tetapi juga berusaha menanamkan nilai-nilai profesionalisme dan semangat belajar berkelanjutan kepada mahasiswa. Melalui buku ini, ia menyampaikan pesan penuh makna kepada para pembaca. *“Apresiasiilah keberadaan buku sebagai ladang pengetahuan dan nilai-nilai yang bermanfaat, semoga semangat membaca terus membara dan menginspirasi kita semua untuk belajar dan berkembang.”* Pesan tersebut menjadi ajakan

untuk terus menjadikan literasi sebagai jalan menuju pengembangan diri dan kemajuan bersama.



Mirfauddin, A.Md.Rad., S.Si., M.Si., lahir di Bulukumba pada 14 September 1975 dan saat ini menetap di Perumahan Berlian Indah, Pallangga, Gowa, Sulawesi Selatan. Ia menempuh pendidikan hingga jenjang magister di bidang Fisika Medik (Magister Sains), yang memperkuat kompetensinya dalam ranah radiologi, khususnya terkait aspek proteksi radiasi dan aplikasinya dalam dunia kesehatan. Saat ini, ia mengabdikan diri sebagai dosen pada Program Studi D-3 Radiologi serta D-4 Teknik Radiologi Pencitraan di Politeknik Muhammadiyah Makassar. Dalam perannya sebagai pendidik, Mirfauddin berkomitmen untuk menanamkan dasar-dasar pengetahuan radiologi sekaligus membekali mahasiswa dengan keterampilan praktis yang relevan dengan kebutuhan profesi, agar tercipta tenaga kesehatan yang kompeten, profesional, dan beretika. Melalui karya ini, ia menyampaikan pesan penuh rasa syukur sekaligus harapan. *“Dengan penuh rasa syukur, saya persembahkan buku Dasar-Dasar Proteksi Radiasi dalam Radiologi ini kepada para pembaca yang terus haus akan pengetahuan dan peningkatan kompetensi dalam dunia radiologi. Buku ini ditulis sebagai bentuk kontribusi kecil saya untuk mendukung praktik radiografi yang aman, akurat, dan profesional.”*



Delfi Iskardyani, S.Pd., M.Si., lahir di Bonjol pada 23 September 1991 dan saat ini berdomisili di Yogyakarta. Sebagai seorang akademisi yang menaruh perhatian besar pada bidang radiologi, ia berkomitmen untuk menghadirkan karya ilmiah yang dapat memperkaya pengetahuan sekaligus meningkatkan kesadaran akan pentingnya keselamatan dalam penggunaan radiasi. Latar belakang pendidikannya yang kuat serta dedikasinya di dunia pendidikan menjadikannya sosok yang konsisten dalam mengembangkan kompetensi mahasiswa maupun praktisi kesehatan. Di sela aktivitas profesionalnya, Delfi memiliki hobi *camping* yang membantunya menjaga keseimbangan hidup, memperluas perspektif, serta menumbuhkan inspirasi baru. Aktivitas ini sekaligus mencerminkan kecintaannya terhadap alam dan nilai-nilai kesederhanaan yang ia bawa dalam setiap langkah kehidupan maupun karya. Melalui buku ini, ia menyampaikan pesan yang mendalam kepada pembaca. *“Terima kasih atas kepercayaan Anda memilih Buku Ajar Dasar-Dasar Proteksi Radiasi dalam Radiologi sebagai referensi dan panduan belajar. Buku ini disusun dengan tujuan memberikan pemahaman yang mendalam dan komprehensif mengenai prinsip-prinsip dasar proteksi radiasi, khususnya dalam bidang radiologi. Sebagai profesi yang berkaitan erat dengan penggunaan radiasi, penting bagi kita untuk selalu mengutamakan keselamatan pasien, tenaga kesehatan, dan lingkungan sekitar. Melalui buku ini, saya berharap Anda dapat*

memahami konsep-konsep dasar, prinsip ALARA (As Low As Reasonably Achievable), langkah-langkah praktis untuk meminimalkan risiko paparan radiasi, serta membantu meningkatkan kompetensi dan kesadaran dalam praktik radiologi yang aman dan bertanggung jawab.”



Dr. Farida Wahyuni, S.Si., M.Si., lahir di Jombang pada 22 Agustus 1987 dan kini berdomisili di Perumahan Griya Indah Permai, Jalan Adi Waluyo, Kepanjen, Kabupaten Malang. Ia dikenal sebagai akademisi yang memiliki kepedulian tinggi terhadap dunia pendidikan dan

pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang sains. Melalui dedikasinya sebagai pendidik dan peneliti, Farida senantiasa berupaya menghadirkan kontribusi nyata yang dapat bermanfaat bagi mahasiswa dan masyarakat luas. Di luar kesibukan akademiknya, ia menekuni hobi *travelling* dan membaca. Kedua aktivitas tersebut tidak hanya memperkaya wawasannya, tetapi juga memberikan inspirasi untuk terus menulis dan berkarya. Membaca menjadi sarana untuk memperdalam ilmu, sementara travelling menghadirkan pengalaman berharga yang memperluas pandangan terhadap kehidupan dan keberagaman. Melalui karyanya, Farida menyampaikan pesan yang sederhana namun penuh makna. *“Buku merupakan harta yang tak ternilai, dengan membaca buku maka ilmu pengetahuan akan bertambah.”* Pesan ini menjadi cerminan keyakinannya bahwa literasi adalah kunci untuk membuka cakrawala baru dan meraih kemajuan.



Oktavia Puspita Sari, Dipl.Rad., S.Si., M.Kes., lahir di Semarang pada 10 Oktober 1977 dan saat ini berdomisili di Padang, Sumatera Barat. Ia merupakan akademisi yang berkiprah di bidang ilmu radiologi, fisika radiologi, serta kesehatan dan keselamatan kerja radiologi. Semangatnya dalam mengembangkan keilmuan tercermin dari perjalanan pendidikan yang ia tempuh sejak D3 Radiodiagnostik dan Radioterapi di Poltekkes Kemenkes Semarang, S1 Fisika Medik di Universitas Diponegoro Semarang, Magister Kesehatan Masyarakat di Universitas Andalas Padang, hingga melanjutkan studi doktoralnya di universitas yang sama. Dalam kariernya, Oktavia pernah menjadi staf litbang di Universitas Wahid Hasyim Semarang sebelum bergabung dengan Universitas Baiturrahmah Padang sejak 2006 hingga kini. Di kampus tersebut, ia telah mengemban berbagai amanah, mulai dari Sekretaris Prodi D3 Radiologi, Ketua Prodi, Ketua Jurusan, Wakil Dekan I Fakultas Vokasi, hingga saat ini menjabat sebagai Dekan Fakultas Vokasi. Selain kiprah akademiknya, ia juga pernah mengabdikan sebagai radiografer di RS Islam Siti Rahmah Padang. Selain dikenal sebagai dosen, ia juga seorang petugas proteksi radiasi sekaligus radiografer yang berkomitmen pada praktik profesional yang aman dan bertanggung jawab. Di balik kesibukan akademik dan profesionalnya, Oktavia menekuni hobi memasak dan menyanyi yang menjadi penyeimbang kehidupannya.



Sarika Setya Putri, S.Tr.Kes(Rad)., M.Eng., lahir di Semarang pada 27 Mei 1997 dan saat ini berdomisili di JL. Karang Kadempel, Bendosari, Madurejo, Prambanan, Sleman, D.I. Yogyakarta. Ia menempuh pendidikan Sarjana Terapan Teknik Radiologi di Politeknik Kesehatan Kemenkes Semarang dan melanjutkan studi Magister Teknik Fisika pada Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada. Perjalanan akademiknya menunjukkan komitmen yang kuat untuk mengembangkan kompetensi dalam bidang radiologi dan fisika medis. Saat ini, Sarika mengabdikan diri sebagai dosen tetap di STIKES Guna Bangsa Yogyakarta. Dalam perannya, ia tidak hanya berfokus pada pengajaran, tetapi juga berusaha menanamkan semangat profesionalisme, inovasi, dan kepekaan terhadap perkembangan ilmu pengetahuan di bidang radiologi dan teknik fisika. Dedikasinya dalam dunia pendidikan mencerminkan tekad untuk membekali generasi muda dengan keterampilan, ilmu, serta nilai-nilai yang relevan dengan tantangan dunia kesehatan modern.



Rini Hatma Rusli, S.ST., M.Adm.Kes., lahir di Palopo pada 30 Desember 1984 dan saat ini berdomisili di Kota Makassar. Ia merupakan seorang akademisi dan praktisi di bidang kesehatan yang memiliki perhatian besar terhadap pengembangan ilmu serta penerapan

praktik profesional yang aman dan bertanggung jawab, khususnya dalam lingkup proteksi radiasi. Hobi yang ia tekuni, yaitu belajar dan mengajar, menjadi cerminan semangatnya untuk terus menimba ilmu sekaligus berbagi pengetahuan. Bagi Rini, belajar adalah proses sepanjang hayat, sementara mengajar merupakan panggilan hati untuk menebar manfaat dan melahirkan generasi yang lebih baik. Melalui buku ajar ini, ia menyampaikan pesan penuh makna bagi para pembaca. *“Semoga buku ajar ini dapat memperkuat pemahaman dan kesadaran kita akan pentingnya proteksi radiasi dalam praktik profesional. Mari kita wujudkan keselamatan radiasi demi kesehatan pasien, pekerja, dan lingkungan.”*



Linda Armitasari, M.Sc., lahir di Lamenta pada 10 Februari 1992 dan kini berdomisili di Yogyakarta. Dengan latar belakang pendidikan magister di bidang sains, ia menaruh perhatian besar pada isu-isu kesehatan, khususnya terkait proteksi radiasi dalam bidang radiologi. Komitmennya untuk terus belajar dan berbagi ilmu tercermin dalam karya tulis yang ia hadirkan sebagai sarana memperluas wawasan serta memperkuat praktik yang profesional dan aman. Di luar aktivitas akademik, Linda memiliki hobi *reading* dan *travelling*. Kegiatan membaca memberinya ruang untuk memperdalam pengetahuan, sementara travelling menjadi sarana untuk memperkaya pengalaman hidup dan membuka perspektif baru. Kedua hobi tersebut senantiasa menjadi sumber inspirasi dalam perjalanan akademik maupun profesionalnya. Melalui karya ini, ia menyampaikan pesan yang penuh semangat kepada pembaca. *“Semoga Buku Ajar Dasar-Dasar Proteksi Radiasi dalam Radiologi dapat menambah wawasan dan meningkatkan praktik yang lebih aman dalam pengelolaan radiasi. Have fun reading.”*



Ayu Wita Sari, S.Si., M.Sc., lahir di Jambi pada 2 Agustus 1989 dan kini menetap di Yogyakarta. Dengan latar belakang pendidikan sains hingga jenjang magister, ia terus menekuni dunia akademik dan penelitian, sekaligus aktif berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Dedikasinya mencerminkan komitmen untuk menghadirkan karya yang bermanfaat bagi mahasiswa, tenaga profesional, maupun masyarakat luas. Selain aktivitas akademisnya, Ayu Wita Sari memiliki hobi bernyanyi dan membaca buku. Bernyanyi menjadi ruang ekspresi yang menumbuhkan semangat dan kebahagiaan, sedangkan membaca buku memberinya kesempatan untuk memperkaya wawasan serta menumbuhkan inspirasi baru dalam perjalanan hidup maupun profesinya. Melalui buku ini, ia menyampaikan pesan berharga kepada pembaca. *“Belajarliah dari siapa pun, tanpa memandang usia dan orangnya.”* Pesan sederhana namun penuh makna ini menjadi pengingat bahwa ilmu dapat datang dari berbagai sumber, dan kerendahan hati dalam belajar adalah kunci menuju kebijaksanaan.



Ali Roo'in Mas'uul, AMR., S.Si., M.K.M., lahir di Sleman pada 10 September 1990 dan saat ini berdomisili di Sleman, Yogyakarta. Latar belakang akademiknya yang kuat di bidang ilmu kesehatan masyarakat menjadikannya sosok yang berkomitmen dalam mengembangkan pengetahuan sekaligus berkontribusi pada peningkatan kualitas pendidikan dan praktik kesehatan di tanah air. Kiprahnya di dunia akademik terus diarahkan untuk memberikan manfaat nyata, baik bagi mahasiswa maupun masyarakat luas. Di luar aktivitas profesionalnya, Ali memiliki hobi berlari. Aktivitas ini bukan hanya sarana menjaga kesehatan fisik, tetapi juga menjadi media refleksi untuk menumbuhkan ketekunan, semangat, dan keseimbangan dalam menjalani kehidupan sehari-hari. Melalui buku ini, ia menitipkan pesan berharga kepada pembaca. *“Investasi terbaik untuk masa depan, memperkaya jiwa dan pikiran, serta membantu menjadi pribadi yang lebih baik adalah dengan membaca.”* Pesan tersebut mencerminkan keyakinannya bahwa literasi adalah kunci penting dalam membentuk karakter dan membuka jalan menuju masa depan yang lebih cerah.

Daftar Pustaka

- Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). (2021). *Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 Tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir untuk Kepentingan Medis*. Jakarta: BAPETEN.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. (2021). *Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2021 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi*. Jakarta: BAPETEN.
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt Jr., E. M., & Boone, J. M. (2012). *The essential physics of medical imaging* (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Bushong, S. C. (2020). *Radiologic science for technologists: Physics, biology, and protection* (11th ed.). Elsevier.
- Bushong, S. C. (2021). *Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection* (12th ed.). St. Louis, MO: Elsevier.
- European Commission. (2014). *Radiation protection No. 172: Guidelines on radiation protection education and training of medical professionals in the European Union*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2018). *Radiobiology for the Radiologist* (8th ed.). Philadelphia, PA: Wolters Kluwer.
- Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2019). *Radiobiology for the radiologist* (8th ed.). Wolters Kluwer.

- International Atomic Energy Agency. (2006). *Management of radioactive waste from the use of radionuclides in medicine* (Technical Reports Series No. 473). Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2006). *The radiological accident in Goiânia*. IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2008). *Radiation protection in nuclear medicine* (Safety Reports Series No. 58). Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards* (GSR Part 3). Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation Protection of Patients: Requirements and Guidance*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation* (Safety Standards Series No. SSG-46). IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards* (GSR Part 3). Vienna: IAEA.

- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation* (Safety Standards Series No. SSG-46). IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards* (GSR Part 3). Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency* (General Safety Requirements Part 7). IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency: General Safety Requirements*. Vienna: IAEA Publications.
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Quality Assurance for Diagnostic Radiology Equipment and Practices*. Vienna: IAEA Publications.
- International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation biology: A handbook for teachers and students*. IAEA.
<https://www.iaea.org/publications/12392>

International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards (GSR Part 3)*. IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards (GSR Part 3)*. IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation protection in diagnostic and interventional radiology (Training Course Series No. 58)*. IAEA.
<https://www.iaea.org/publications/11098>

International Atomic Energy Agency. (2018). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2018). *Safety report series no. 40: Applying radiation safety standards in nuclear medicine*. IAEA.

International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103.

- International Commission on Radiological Protection. (2007). *The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (ICRP Publication 103). Elsevier.
- International Commission on Radiological Protection. (2007). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (ICRP Publication 103). Oxford: Elsevier.
- International Commission on Radiological Protection. (2012). *ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context* (ICRP Publication 118). Elsevier.
- Martin, A., & Harbison, S. (2018). *An introduction to radiation protection* (7th ed.). CRC Press.
- McEwen, M., & Nies, M. A. (2019). *Community/Public Health Nursing: Promoting the Health of Populations* (7th ed.). St. Louis, MO: Elsevier.
- Mettler, F. A., & Upton, A. C. (2008). *Medical Effects of Ionizing Radiation* (3rd ed.). Philadelphia, PA: Saunders.
- Miller, D. L., Vano, E., Bartal, G., Balter, S., Dixon, R. G., Padovani, R., ... & Nikolic, B. (2010). Occupational radiation protection in interventional radiology: A joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. *CardioVascular and Interventional Radiology*, 33(2), 230–239.

- Undang-Undang Republik Indonesia. (1997). *Undang-Undang No. 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1997 Nomor 23.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2020). *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. New York, NY: United Nations.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2020). *Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2019 report*. United Nations.
- World Health Organization. (2016). *Communicating radiation risks in paediatric imaging: Information to support healthcare discussions about benefit and risk*. WHO Press.
- World Health Organization. (2017). *Radiation Emergency Medical Preparedness and Response*. Geneva: WHO.

Buku referensi berjudul **Dasar-Dasar Proteksi Radiasi dalam Radiologi** adalah buku yang membahas prinsip-prinsip utama perlindungan radiasi yang digunakan dalam bidang radiologi. Buku ini menguraikan konsep dasar radiasi, sumber-sumber paparan, serta dampak radiasi terhadap kesehatan. Selain itu, dijelaskan pula prinsip proteksi radiasi yang meliputi justifikasi, optimisasi, dan pembatasan dosis.

Buku ini ditujukan untuk masyarakat umum, agar pembaca dapat memahami bagaimana radiologi dapat dimanfaatkan secara aman melalui penerapan standar keselamatan. Di dalamnya juga dibahas peran tenaga radiologi, regulasi keselamatan kerja, serta inovasi teknologi yang mendukung pengurangan paparan radiasi tanpa mengurangi kualitas layanan kesehatan.

Disajikan secara runtut dan ramah pembaca, buku ini menjadi panduan yang membantu masyarakat mengenal lebih dekat pentingnya proteksi radiasi, sekaligus menyadari bahwa keselamatan adalah prioritas utama dalam setiap penggunaan teknologi medis berbasis radiasi.