



BRIN

BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

MODUL

**KESELAMATAN
DAN PROTEKSI
RADIASI :
KONSEP DAN
REGULASI**



Fungsi Layanan
Pengembangan Kompetensi
SDM Nasional

DIREKTORAT PENGEMBANGAN KOMPETENSI

**BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL**

2024



BRIN

BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

MODUL KONSEP DAN REGULASI



PELATIHAN KESELAMATAN DAN PROTEKSI RADIASI BAGI PEKERJA RADIASI

DIREKTORAT PENGEMBANGAN KOMPETENSI

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

TAHUN 2024

Penanggung Jawab:

1. Edy Giri Racman Putra, Ph.D.
2. Nining Setyowati Dwi Andayani, S.E., M.M.
3. Dr. Sasa Sofyan Munawar, S.Hut., M.P.
4. Alpha Fadila Juliana Rahman, S.Pd., M.Pd.

Tim Penyusun Modul:

1. Arie Budianti, M.K.K.K
2. Afida Ikawati, M.T
3. Mahrus Salam, S.Si, M.Eng
4. Nofriady Aziz, S.ST, M. Eng
5. Bisma Barron Patrianesha, S.T
6. Susi Susanti Sinedu, M.Pd
7. Dwi Indah Rahayu, M.Sc

Diterbitkan oleh:

Direktorat Pengembangan Kompetensi - BRIN
Gedung B.J. Habibie
Jl. M.H. Thamrin Nomor 8, Jakarta

Diterbitkan pertama kali tahun 2024

KATA PENGANTAR

Pengembangan kompetensi merupakan kebutuhan bagi setiap Sumber Daya Manusia (SDM) dalam menjalankan tugas dan fungsinya sesuai dengan penugasan yang diberikan. Pengembangan kompetensi bagi SDM harus mampu memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan kualitas hasil kerja secara berkesinambungan, lebih lanjutnya bagi kepentingan bangsa dan Negara Kesatuan Republik Indonesia. Pengembangan kompetensi menjadi bagian tidak terpisahkan dari pengembangan karier setiap SDM yang salah satunya dapat dilaksanakan melalui pelatihan-pelatihan teknis sesuai bidang tertentu.

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 78 Tahun 2021, Badan Riset dan Inovasi Nasional adalah lembaga pemerintah yang berada di bawah dan bertanggung jawab kepada Presiden dalam menyelenggarakan penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan, serta invensi dan inovasi, penyelenggaraan ketenaganukliran, dan penyelenggaraan keantariksaan yang terintegrasi. Dalam pengembangan kompetensi, Direktorat Pengembangan Kompetensi, Deputi Bidang Sumber Daya Manusia Iptek BRIN bertanggung jawab dalam penyelenggaraan pengembangan kompetensi melalui beberapa tahapan penyiapan pedoman pelatihan, fasilitator, modul, bahan ajar, learning management system (LMS) dan kelengkapan pelatihan lainnya.

Sejak Tahun 2024, Direktorat Pengembangan Kompetensi, Deputi Bidang Sumber Daya Manusia Iptek BRIN telah memberikan lisensi pedoman dan penyelenggaraan pelatihan kepada Lembaga Pelatihan Swasta (LPS) sesuai dengan ketentuan yang tertuang dalam perjanjian lisensi.

Direktorat Pengembangan Kompetensi atau Lembaga Pelatihan Swasta menggunakan modul sebagai salah satu dokumen penunjang dalam penyelenggaraan pelatihan. Modul ini berfungsi sebagai media transformasi pengetahuan, keterampilan, dan sikap kerja kepada peserta pelatihan untuk mencapai kompetensi tertentu.

Kami mengucapkan syukur ke hadirat Allah SWT, atas berkat rahmat-Nya, modul Pelatihan Teknis Ketenaganukliran yang berjudul “Keselamatan dan Proteksi Radiasi bagi Pekerja Radiasi: Konsep dan Regulasi” dapat diselesaikan tepat

waktu. Kami sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan modul ini.

Kami berharap modul ini dapat memberikan manfaat dan berkontribusi dalam meningkatkan dan mengembangkan kompetensi SDM secara luas. Kami terbuka atas segala saran dan masukan untuk peningkatan kualitas modul kedepan.

Jakarta, 20 Desember 2024

Deputi Bidang Sumber Daya Manusia Ilmu
Pengetahuan dan Teknologi
Badan Riset dan Inovasi Nasional

(Tanda tangan)

Edy Giri Rachman Putra, Ph.D.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
PENDAHULUAN.....	1
MATERI POKOK 1: DASAR HUKUM KESELAMATAN DAN PROTEKSI RADIASI.....	3
A. Peraturan Perundangan.....	4
B. Peraturan Pemerintah.....	4
C. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir.....	6
D. Rangkuman.....	9
E. Evaluasi	9
MATERI POKOK 2: PENGETAHUAN DASAR RADIASI	11
A. Jenis dan Sifat Radiasi	11
1. Jenis Peluruhan Radioaktif	12
2. Sumber Radiasi Pengion	14
B. Besaran dan Satuan Radiasi.....	17
1. Aktivitas Radiasi.....	17
2. Satuan Aktivitas	18
3. Waktu Paro	19
4. Besaran Fisik	20
5. Besaran Proteksi.....	21
C. Interaksi Radiasi dengan Materi	23
1. Interaksi Partikel Alpha.....	23
2. Interaksi Partikel Beta	25
3. Interaksi Sinar Gamma dan Sinar-X.....	25
4. Interaksi Radiasi Neutron	28
D. Alat Ukur Radiasi	30

1. Surveimeter.....	31
2. Monitor Kontaminasi	33
3. Dosimeter Perorangan	35
E. Efek Radiasi.....	37
1. Interaksi radiasi dengan materi biologi dalam tubuh manusia.....	37
2. Jenis dan Contoh Efek Radiasi	39
F. Rangkuman.....	42
G. Evaluasi	44
MATERI POKOK 3: UPAYA PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI.....	46
A. Paparan Radiasi dan Potensi Bahaya Radiasi.....	46
1. Sumber Radiasi Eksternal.....	47
2. Sumber Radiasi Internal.....	48
B. Persyaratan Proteksi Radiasi dan Penerapannya.....	50
1. Persyaratan Proteksi Radiasi.....	50
2. Penerapan Proteksi Radiasi.....	56
C. Hak dan Kewajiban Pekerja Radiasi.....	61
D. Pengelolaan Limbah Radioaktif	66
1. Klasifikasi Limbah Radioaktif	67
2. Tahapan Pengelolaan Limbah Radioaktif	68
E. Kesiapsiagaan dan Prosedur Penanggulangan Kedaruratan	74
1. Kesiapsiagaan & Penanggulangan Kedaruratan	74
2. Tindakan dan Prosedur Penanggulangan Keadaan Darurat.....	76
F. Budaya Keselamatan dan Budaya Keamanan.....	77
G. Sistem Manajemen Fasilitas dan Kegiatan.....	85
H. Rangkuman	92
I. Evaluasi.....	94
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN 1	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Aktivitas radioaktif sebagai fungsi waktu	18
Gambar 2. Aktivitas radioaktif setelah waktu paro.....	19
Gambar 3. Proses Ionisasi	24
Gambar 4. Proses Eksitasi.....	24
Gambar 5. Proses terbentuknya Sinar-X Bremstrahlung	25
Gambar 6. Probabilitas interaksi foton dengan materi.....	26
Gambar 7. Efek Fotolistrik	26
Gambar 8. Hamburan Compton	27
Gambar 9. Produksi Pasangan	27
Gambar 10. Peristiwa tumbukan elastik	28
Gambar 11. Peristiwa Tumbukan Non Elastik	29
Gambar 12. Peristiwa penangkapan neutron	30
Gambar 13. Konstruksi Surveimeter	31
Gambar 14. Surveimeter γ (Gamma) / Sinar-X	32
Gambar 15. Monitor Kontaminasi Permukaan.....	33
Gambar 16. Monitor kontaminasi perorangan	34
Gambar 17. Monitor kontaminasi udara	34
Gambar 18. Dosimeter perorangan dengan jenis detektor semikonduktor yang dewasa ini banyak digunakan	35
Gambar 19. (kiri) Proses Eksitasi; (kanan) Proses Luminesensi.....	37
Gambar 20. Interaksi radiasi dengan DNA secara langsung dan tak langsung ...	38
Gambar 21. Jenis-jenis Efek Radiasi	39
Gambar 22. Efek deterministik pada korban kecelakaan radiasi Goiania, Brasil..	40
Gambar 23. Jalur masuk zat radioaktif ke dalam tubuh	49
Gambar 24. Daya tembus radiasi untuk berbagai bahan penahan	58
Gambar 25. (a) contoh respirator tanpa supply udara, (b) alat pelindung tangan dan kaki, (c) berbagai jenis pakaian pelindung	61
Gambar 27. ZRTTD bidang medis	68
Gambar 26. ZRTTD bidang industri	68
Gambar 28. Bahan terkontaminasi zat radioaktif.....	68

Gambar 29. Wadah penampung limbah radioaktif padat	70
Gambar 30. Wadah penampung limbah radioaktif cair atau semi cair	70
Gambar 31. Komponen Budaya Keamanan.....	81
Gambar 32. Tahapan PDCA dalam sistem manajemen.....	86

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai faktor bobot radiasi untuk jenis radiasi yang berbeda.....	22
Tabel 2. Nilai faktor bobot jaringan pada tubuh manusia	23
Tabel 3. Dosis Ambang untuk Efek Deterministik.....	41
Tabel 4. Bahaya relatif radiasi eksternal berbagai jenis radiasi.....	48
Tabel 5. Bahaya relatif radiasi internal	49
Tabel 6. Organ kritis untuk sumber radiasi	50
Tabel 7. Bahan penahan yang direkomendasikan	58

PENDAHULUAN

A. Deskripsi Singkat

Keselamatan dan proteksi radiasi merupakan aspek penting dalam berbagai bidang, terutama di bidang kesehatan, industri, dan penelitian yang melibatkan sumber radiasi. Paparan radiasi yang tidak terkontrol dapat berdampak serius pada kesehatan manusia, lingkungan, dan keberlangsungan operasional sebuah organisasi. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai prinsip-prinsip keselamatan radiasi adalah hal yang wajib dimiliki oleh setiap individu yang bekerja atau berpotensi terpapar radiasi dalam hal ini adalah pekerja radiasi. Mata diklat ini menjelaskan tentang dasar hukum proteksi dan keselamatan radiasi, pengetahuan radiasi, serta upaya proteksi dan keselamatan radiasi.

B. Alokasi Waktu

8 Jam Pembelajaran @ 45 menit.

C. Tujuan Pembelajaran

1. Hasil Belajar

Peserta mampu menjelaskan upaya proteksi dan keselamatan radiasi sesuai peraturan yang berlaku.

2. Indikator Hasil Belajar

Setelah selesai pembelajaran diharapkan peserta mampu:

- a. Menjelaskan dasar hukum proteksi dan keselamatan radiasi sesuai peraturan yang berlaku.
- b. Menjelaskan pengetahuan radiasi dengan benar.
- c. Menjelaskan upaya proteksi dan keselamatan radiasi dengan benar.

D. Materi Pokok

Mata pelatihan ini terdiri dari 3 (tiga) Materi Pokok, yaitu:

1. Dasar Hukum Proteksi dan Keselamatan Radiasi
 - a. Peraturan Perundangan

- b. Peraturan Pemerintah
 - c. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir
2. Pengetahuan Dasar Radiasi
- a. Jenis dan Sifat Radiasi
 - b. Besaran dan Satuan Radiasi
 - c. Interaksi Radiasi dengan Materi
 - d. Alat Ukur Radiasi
 - e. Efek Radiasi
3. Upaya Proteksi dan Keselamatan Radiasi
- a. Paparan Radiasi dan Potensi Bahaya Radiasi
 - b. Persyaratan Proteksi Radiasi dan Penerapannya
 - c. Hak dan Kewajiban Pekerja Radiasi
 - d. Pengelolaan Limbah Radioaktif dan Transportasi Zat Radioaktif
 - e. Kesiapsiagaan dan Prosedur Penanggulangan Kedaruratan
 - f. Budaya Keselamatan dan Budaya Keamanan
 - g. Sistem Manajemen Fasilitas dan Kegiatan

MATERI POKOK 1:

DASAR HUKUM KESELAMATAN DAN PROTEKSI RADIASI

Indikator Hasil Belajar:

Peserta mampu menjelaskan dasar hukum keselamatan dan proteksi radiasi sesuai peraturan yang berlaku.

Perkembangan dan pemanfaatan tenaga nuklir di berbagai bidang kehidupan masyarakat untuk mengisi pembangunan nasional dalam mewujudkan kesejahteraan dan kemakmuran rakyat serta mencapai kemampuan penguasaan teknologi nuklir begitu pesat, maka sewajarnya potensi tenaga nuklir yang cukup besar tersebut dikembangkan dan dimanfaatkan sebesar-besarnya untuk kemakmuran rakyat. Di samping manfaatnya yang begitu besar, tenaga nuklir juga dapat menimbulkan bahaya radiasi terhadap pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup, maka setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan ketenaganukliran harus diatur melalui peraturan perundangan dan ketentuan keselamatan nuklir dan radiasi sehingga keselamatan kerja dapat tercapai. Dalam pelaksanaannya. Modul ini mempelajari peraturan perundangan ketenaganukliran di Indonesia dan ketentuan keselamatan dalam kegiatan pemanfaatan bahan nuklir dan sumber radiasi pengion lainnya.

Hirarki Peraturan Perundangan Ketenaganukliran, Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Indonesia mencakup Undang-undang, Peraturan Pemerintah dan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Perka BAPETEN). Perka BAPETEN dibedakan sesuai dengan bidang pemanfaatannya, yaitu: Instalasi Nuklir Reaktor (INR), Instalasi Nuklir Non Reaktor (INNR), Fasilitas Radiasi Pengion dan Zat Radioaktif baik untuk Industri, Medik, Penelitian dan Pengembangan. Pada modul ini akan disampaikan peraturan perundangan Fasilitas Radiasi Pengion dan Zat Radioaktif baik untuk Industri, Medik, Penelitian dan Pengembangan.

A. Peraturan Perundangan

Dengan perkembangan zaman dan makin majunya ilmu pengetahuan dan teknologi dalam pemanfaatan tenaga nuklir dan zat radioaktif, maka dianggap perlu membuat penyempurnaan pada Undang-Undang (UU). Hal tersebut dimaksudkan agar dapat mengikuti perkembangan pemanfaatan tenaga nuklir dan zat radioaktif di Indonesia di berbagai bidang sehingga dalam pemanfaatannya dapat menjamin keselamatan pekerja, masyarakat maupun lingkungan hidup.

Pada tahun 2020 disetujui UU No. 11 tahun 2020 tentang Cipta Kerja, kemudian diubah menjadi PERPU No. 2 tahun 2022 tentang Cipta Kerja. Pada tahun 2023 diubah lagi menjadi UU No. 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang.

Berdasarkan UU yang berlaku pemanfaatan tenaga nuklir harus memperhatikan Asas Pembangunan Nasional, keselamatan, keamanan, ketenteraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, perlindungan terhadap lingkungan hidup, serta pemanfaatan bagi sebesar-besarnya kemakmuran rakyat. Hal itu berarti bahwa pemanfaatan tenaga nuklir bagi kesejahteraan hidup rakyat banyak harus dilakukan dengan upaya-upaya untuk mencegah timbulnya bahaya radiasi terhadap pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup.

B. Peraturan Pemerintah

Sebagai pelaksanaan dari peraturan perundangan, Pemerintah mengeluarkan beberapa Peraturan Pemerintah, antara lain (berdasarkan tahun penerbitan):

1. Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 46 Tahun 2009 tentang Batas Pertanggungjawaban Kerugian Nuklir digantikan oleh Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 74 Tahun 2012 tentang Pertanggungjawaban Kerugian Nuklir. Perpres Nomor 74 Tahun 2012 mengatur mengenai batas pertanggungjawaban kerugian nuklir, termasuk:
 - a. Kerugian nuklir yang didefinisikan sebagai kerugian yang disebabkan oleh radiasi atau gabungan radiasi dengan sifat racun, mudah meledak, atau sifat bahaya lainnya.

- b. Besar batas pertanggungjawaban kerugian nuklir yang tercantum dalam lampiran peraturan presiden.
 - c. Tanggung jawab pengusaha instalasi nuklir yang diatur dalam Peraturan Kepala BAPETEN.
2. Peraturan Pemerintah No 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, mengatur secara lebih komprehensif mengenai pengelolaan limbah radioaktif yang berasal dari pemanfaatan tenaga nuklir. Limbah tingkat rendah, sedang dan tinggi apabila tidak dikelola secara tepat guna dan berhasil guna dengan cara dan metode yang akurat serta sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi berpotensi membahayakan keselamatan, keamanan, dan kesehatan pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup. Peraturan Pemerintah ini mencabut dan menyatakan tidak berlaku Peraturan Pemerintah Nomor 27 Tahun 2002 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif.
 3. Peraturan Pemerintah Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif, bertujuan untuk menata penatalaksanaan pengangkutan zat radioaktif meliputi persyaratan keselamatan radiasi dan Peraturan Kepala BAPETEN ini meliputi pengaturan tentang tingkat Klierens, termasuk tata cara penetapan Klierens untuk Zat Radioaktif Terbuka; Limbah Radioaktif; dan Material Terkontaminasi atau teraktivasi.
 4. Peraturan Pemerintah Nomor 5 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perizinan Berusaha Berbasis Risiko. Perizinan berusaha pada sektor ketenaganukliran terdiri atas sub sektor: pemanfaatan sumber radiasi pengion; instalasi nuklir dan bahan nuklir; pertambangan bahan galian nuklir; dan pendukung sektor ketenaganukliran.
 5. Peraturan Pemerintah Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif, mengatur keselamatan radiasi terhadap pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup, keamanan zat radioaktif, dan inspeksi dalam pemanfaatan tenaga nuklir. Peraturan Pemerintah ini mencabut dan menyatakan tidak berlaku Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif.

C. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir

Sebagai aturan pelaksana dari Peraturan Pemerintah, maka Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) mengeluarkan Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Peraturan BAPETEN yang bersifat umum antara lain:

1. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 tahun 2010 tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir.
2. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2010 tentang Pemantauan Kesehatan untuk Pekerja Radiasi.
3. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 16 tahun 2012 tentang Tingkat Klierens.
4. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.
5. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan.
6. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 16 Tahun 2014 tentang Surat Izin Bekerja Petugas Tertentu yang Bekerja di Instalasi yang Memanfaatkan Sumber Radiasi Pengion.
7. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 tahun 2015 tentang Keamanan Sumber Radioaktif.
8. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan Sedang.
9. Peraturan BAPETEN Nomor 7 tahun 2017 tentang Perubahan atas Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan.
10. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2020 tentang Ketentuan Keselamatan Untuk Pengangkutan Zat Radioaktif.
11. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 tahun 2022 tentang Pelaksanaan Perizinan Berusaha Berbasis Risiko Sektor Ketenaganukliran.

Sedangkan peraturan BAPETEN yang mengatur hal-hal teknis terkait fasilitas radiasi pengion dan zat radioaktif, antara lain:

1. Bidang Industri

- a. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 5 Tahun 2009 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Zat Radioaktif Untuk Well Logging.
- b. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2009 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Zat Radioaktif dan Pesawat Sinar-X Untuk Peralatan Gauging.
- c. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2009 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Peralatan Radiografi Industri.
- d. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 16 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material.
- e. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2014 tentang Perubahan atas Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2009 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Peralatan Radiografi Industri.
- f. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 15 Tahun 2014 tentang Keselamatan Radiasi dalam Produksi Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional.
- g. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 5 Tahun 2016 tentang Keselamatan Radiasi dalam Produksi Barang Konsumen.
- h. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3 Tahun 2020 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Iradiator untuk Iradiasi.
- i. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2020 tentang Keselamatan Radiasi dalam Produksi Radioisotop untuk Radiofarmaka.

2. Bidang Medik

- a. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2011

- tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Pesawat Sinar X Radiologi Diagnostik dan Intervensional.
- b. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir.
 - c. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Radioterapi.
 - d. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 15 Tahun 2014 tentang nilai batas dosis untuk pekerja radiasi dan masyarakat awam.
 - e. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2020 tentang keselamatan radiasi pada penggunaan pesawat sinar-X dalam radiologi diagnostik dan intervensional.
 - f. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2020: Mengatur tugas dan tanggung jawab petugas proteksi radiasi.
 - g. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 2 tahun 2022 tentang Perubahan atas Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 2 Tahun 2018 tentang Uji Kesesuaian Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional.
3. Bidang Litbang
- a. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2022 tentang Laboratorium Uji Bungkusan Zat Radioaktif.
 - b. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 Tahun 2006 tentang Laboratorium Dosimetri, Kalibrasi Alat Ukur Radiasi Dan Keluaran Sumber Radiasi Terapi, Dan Standardisasi Radionuklida.
 - c. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 11 Tahun 2015 tentang Laboratorium Dosimetri Eksternal.

D. Rangkuman

Hierarki peraturan perundangan terkait ketenaganukliran, proteksi, dan keselamatan radiasi di Indonesia meliputi tiga tingkatan utama, yaitu undang-undang, peraturan pemerintah, dan peraturan kepala BAPETEN. Salah satu Undang-Undang yang relevan adalah UU No. 6 Tahun 2023 yang menetapkan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi undang-undang. Pada tingkat peraturan pemerintah, beberapa regulasi penting tentang keselamatan dan proteksi radiasi mencakup PP Nomor 46 Tahun 2009, Nomor 61 Tahun 2013, Nomor 2 Tahun 2014, Nomor 58 Tahun 2015, Nomor 5 Tahun 2021, dan Nomor 45 Tahun 2023.

Peraturan kepala BAPETEN berperan mengatur lebih spesifik aspek keselamatan dan proteksi radiasi sesuai bidang tertentu, seperti bidang medik, industri dan litbang, serta regulasi yang berlaku secara umum. Aturan-aturan ini bertujuan memastikan penerapan keselamatan dan proteksi radiasi sesuai standar internasional dalam berbagai sektor penggunaan tenaga nuklir di Indonesia.

E. Evaluasi

1. Peraturan Pemerintah yang mengatur Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif adalah
 - A. Nomor 45 Tahun 2023
 - B. Nomor 54 Tahun 2012
 - C. Nomor 61 Tahun 2013
 - D. Nomor 46 Tahun 2009Jawaban: A

2. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 mengatur tentang
 - A. Pemantauan Kesehatan Pekerja Radiasi
 - B. Sistem Manajemen Operasi
 - C. Proteksi dan Keselamatan Radiasi
 - D. Pengelolaan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan SedangJawaban: C

3. Hirarki Peraturan Perundangan Ketenaganukliran di Indonesia mencakup:

- A. Undang-undang
- B. Peraturan Pemerintah
- C. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir
- D. Semua jawaban benar

Jawaban: D

MATERI POKOK 2:

PENGETAHUAN DASAR RADIASI

Indikator Hasil Belajar:

Peserta mampu menjelaskan pengetahuan dasar radiasi dengan benar.

Radiasi merupakan fenomena alam yang tak dapat dihindari dalam kehidupan sehari-hari. Dalam dunia industri, medis, dan penelitian, penggunaan radiasi semakin meluas. Pekerja radiasi adalah individu yang secara langsung atau tidak langsung terpapar radiasi dalam aktivitas pekerjaannya. Pengetahuan tentang fisika radiasi merupakan hal yang sangat penting bagi pekerja radiasi. Dengan memahami pengetahuan dasar radiasi, pekerja dapat bekerja secara selamat, efisien, dan bertanggung jawab.

A. Jenis dan Sifat Radiasi

Radiasi pengion dapat berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun buatan. Sumber alami termasuk radiasi kosmik dan radiasi dari unsur-unsur radioaktif dalam bumi (seperti radon). Sedangkan sumber buatan termasuk sinar-X, radiasi nuklir, dan beberapa jenis perangkat medis atau industri yang menggunakan radiasi.

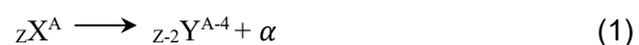
Unsur radioaktif memiliki inti atom yang tidak stabil akan secara spontan berubah menjadi inti yang lebih stabil melalui proses yang disebut peluruhan radioaktif. Radiasi akan dipancarkan selama proses ini. Jika ketidakstabilan terjadi akibat jumlah proton dan neutron dalam inti tidak seimbang, maka inti tersebut akan meluruh dengan memancarkan radiasi alpha (α) atau radiasi beta (β). Sementara itu, jika ketidakstabilan disebabkan oleh energi inti yang terlalu tinggi dan tidak berada dalam keadaan dasar, maka inti akan meluruh dengan memancarkan radiasi gamma (γ).

1. Jenis Peluruhan Radioaktif

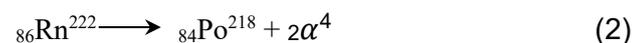
Ada tiga jenis peluruhan radioaktif yang terjadi secara alami: peluruhan alpha (α), peluruhan beta (β), dan peluruhan gamma (γ). Jenis peluruhan yang terjadi bergantung pada posisi inti atom yang tidak stabil yang bergantung pada jumlah neutron dan proton.

a. Peluruhan Alpha (α)

Peluruhan alpha biasanya terjadi pada inti atom yang berat, dengan nomor atom lebih besar dari 80. Proses ini melibatkan pelepasan partikel alpha, yang terdiri dari dua proton dan dua neutron, sehingga memiliki massa sebesar 4 satuan massa atom (sma) dan muatan positif dua. Partikel alpha dapat ditulis dengan simbol $2\alpha^4$.



Contoh peluruhan partikel Alpha adalah:



Dalam proses ini, inti atom kehilangan dua proton dan dua neutron, menghasilkan nuklida baru dengan nomor atom dan massa yang lebih kecil. Sifat radiasi alpha:

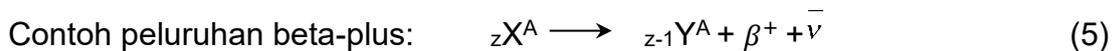
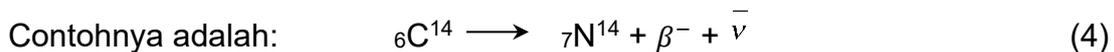
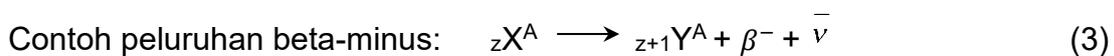
- 1) Partikel alpha memiliki daya ionisasi yang sangat besar, sekitar 100 kali lipat partikel beta dan 10.000 kali lipat radiasi gamma.
- 2) Jangkauan partikel alpha di udara sangat pendek, hanya beberapa milimeter, tergantung pada energinya.
- 3) Partikel alpha dapat dibelokkan oleh medan listrik dan magnet.
- 4) Kecepatan partikel alpha berkisar antara 1/100 hingga 1/10 kecepatan cahaya.

b. Peluruhan Beta (β)

Peluruhan beta terjadi pada inti atom yang relatif ringan. Proses ini melibatkan pelepasan partikel beta yang dapat berupa elektron (β^-) atau positron (β^+). Peluruhan beta terjadi pada inti atom yang tidak stabil dan relatif ringan. Dalam proses ini, dipancarkan partikel beta yang bisa bermuatan negatif (β^-) atau bermuatan positif (β^+). Partikel β^- identik dengan elektron, sementara partikel β^+ adalah positron, yaitu elektron yang bermuatan positif. Dalam diagram N-Z,

peluruhan β^- terjadi ketika nuklida tidak stabil terletak di atas kurva kestabilan, sementara peluruhan β^+ terjadi ketika nuklida berada di bawah kurva kestabilan. Pada peluruhan β^- , sebuah neutron dalam inti atom berubah menjadi proton, yang menyebabkan inti atom tersebut mengalami perubahan. Proses ini dapat digambarkan dengan persamaan inti berikut:

- 1) Beta-minus (β^-): terjadi jika neutron berubah menjadi proton, menghasilkan elektron dan antineutrino.
- 2) Beta-plus (β^+): terjadi jika proton berubah menjadi neutron, menghasilkan positron dan neutrino.



Sifat radiasi beta:

- 1) Daya ionisasinya lebih kecil dibandingkan alpha, sekitar 1/100 dari partikel alpha.
- 2) Radiasi beta memiliki jarak jangkauan lebih jauh daripada alpha, dapat mencapai beberapa sentimeter di udara.
- 3) Kecepatannya mendekati kecepatan cahaya, antara 1/100 hingga 99/100 kecepatan cahaya.
- 4) Karena massanya ringan, partikel beta mudah dihamburkan oleh medium.
- 5) Partikel beta juga dapat dibelokkan oleh medan listrik dan magnet.
- 6) Energi rata-rata partikel beta sekitar 1/3 dari energi maksimumnya.

c. Peluruhan Gamma (γ)

Berbeda dengan peluruhan alpha dan beta, peluruhan gamma tidak mengubah jumlah proton atau neutron dalam inti atom, sehingga nomor atom dan massa inti tetap sama. Radiasi gamma berupa gelombang elektromagnetik berenergi tinggi yang dipancarkan oleh inti atom dalam keadaan tereksitasi (tidak stabil). Biasanya, peluruhan gamma terjadi setelah peluruhan alpha atau beta.

Peluruhan gamma terjadi ketika inti atom berada dalam keadaan tereksitasi, yaitu ketika energi inti atom tidak berada pada keadaan dasar (*ground state*). Dalam hal ini, inti atom tersebut disebut sebagai inti atom yang isomer. Peluruhan gamma dapat terjadi pada inti atom yang berat maupun ringan, baik yang berada di atas maupun di bawah kurva kestabilan. Biasanya, peluruhan gamma mengikuti peluruhan alpha (α) atau beta (β) sebelumnya, sebagai bagian dari proses menuju kestabilan inti. Peluruhan γ dapat dituliskan sebagai berikut.



Salah satu contoh peluruhan gamma yang mengikuti peluruhan β .



Sifat Radiasi Gamma:

- 1) Sinar gamma memiliki panjang gelombang sangat pendek, antara 0,005 Å hingga 0,5 Å.
- 2) Daya ionisasinya kecil, tetapi daya tembusnya jauh lebih besar dibandingkan alpha atau beta.
- 3) Karena tidak bermuatan, radiasi gamma tidak dipengaruhi oleh medan listrik maupun medan magnet.

2. Sumber Radiasi Pengion

Sumber radiasi dapat dibedakan berdasarkan asalnya yaitu sumber radiasi alam yang sudah ada di alam ini sejak terbentuknya, dan sumber radiasi buatan yang sengaja dibuat oleh manusia. Radiasi yang dipancarkan oleh sumber radiasi alam disebut radiasi latar belakang.

a. Sumber Radiasi Alam

Setiap hari manusia terkena radiasi dari alam dan radiasi dari alam ini merupakan bagian terbesar yang diterima oleh manusia yang tidak bekerja ditempat yang menggunakan radioaktif atau yang tidak menerima radiasi berkaitan dengan kedokteran atau kesehatan. Radiasi latar belakang yang diterima oleh seseorang dapat berasal dari tiga sumber utama berikut:

- 1) sumber radiasi kosmik yang berasal dari benda langit didalam dan luar tata surya kita, antara lain ^{14}C , ^7Be , ^{22}Na dan ^3H .
- 2) sumber radiasi terestrial yang berasal dari kerak bumi, atau sering disebut dengan *Naturally Occuring Radioactive Material* (NORM). Beberapa di antaranya adalah ^{235}U , ^{222}Ra , ^{220}Th .
- 3) sumber radiasi internal yang berasal dari dalam tubuh manusia sendiri, seperti misalnya ^{14}C , ^3H dan ^{40}K

b. Sumber Radiasi Buatan

Sumber radiasi buatan mulai diproduksi pada abad ke-20 diketemukannya sinar-X oleh W. Roentgent. Saat ini sudah banyak sekali jenis dari sumber radiasi buatan baik yang berupa zat radioaktif, pesawat pembangkit radiasi, dan reaktor nuklir.

1) Zat Radioaktif

Dewasa ini telah banyak sekali unsur radioaktif berhasil dibuat oleh manusia berdasarkan reaksi inti antara nuklida yang tidak radioaktif dengan neutron (reaksi fisi di dalam reaktor nuklir), aktivasi neutron, atau berdasarkan penembakan nuklida yang tidak radioaktif dengan partikel atau ion cepat (di dalam alat-alat pemercepat partikel, misalnya akselerator, siklotron). Radionuklida buatan ini bisa memancarkan jenis radiasi alpha, beta, gamma dan neutron.

Pemancar Alpha

Salah satu contoh pemancar alpha yang dapat digunakan untuk kedokteran nuklir adalah ^{225}Ac . ^{225}Ac dapat dibuat menggunakan siklotron dan reaktor nuklir. Pemancar alpha ini digunakan untuk menghancurkan sel kanker.

Pemancar Beta

Sebagian besar pemancar beta ini dihasilkan melalui penembakan partikel neutron pada nuklida stabil. Oleh karena itu di dalam reaktor nuklir didapatkan berbagai macam pemancar beta. Energi radiasi beta bersifat kontinu. Pemancar beta sering digunakan dalam kedokteran dan juga dalam industri untuk mengukur ketebalan materi. Pemancar beta yang sering digunakan dalam kedokteran misalnya ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{32}P , ^{188}Re , sedangkan untuk industri sering digunakan ^{90}Sr , ^{32}P , ^{208}Tl .

Pemancar Gamma

Sebenarnya jarang sekali sumber radioaktif yang hanya memancarkan radiasi gamma saja, karena radiasi gamma biasanya mengikuti proses peluruhan α atau β . Dalam pemakaiannya, pemancar gamma beraktivitas tinggi sering digunakan sebagai sumber radiasi di rumah sakit untuk alat terapi dan diagnostik dan industri untuk keperluan alat ukur atau gauging. Iradiator banyak digunakan di rumah sakit (iradiator ^{60}Co dan ^{137}Cs) dan dalam industri (iradiator ^{60}Co).

Pemancar Neutron

Radiasi neutron dapat dihasilkan melalui interaksi radiasi α dengan bahan yang dapat melangsungkan reaksi (α, n) seperti unsur Be. Sumber neutron ini merupakan campuran antara bahan radioaktif pemancar α dengan unsur Be. Salah satu contoh sumber neutron ini adalah serbuk Am-241 yang dicampur dengan serbuk Be, kemudian dibungkus dalam sebuah kapsul.

Zat radioaktif pemancar neutron lainnya berasal dari proses fisi spontan yang dialami oleh Californium-252 (^{252}Cf). ^{252}Cf di samping meluruh dengan memancarkan radiasi α juga mengalami proses fisi secara spontan. Pada proses fisi spontan tersebut 2 neutron atau lebih akan dipancarkan keluar dari inti ^{252}Cf .

2) Pesawat pembangkit radiasi

Pesawat pembangkit radiasi bekerja dengan menggunakan arus dan tegangan listrik. Radiasi yang dibangkitkan oleh alat ini sangat bervariasi seperti elektron, proton, neutron, dan sinar-X. Keuntungan dari alat ini adalah tidak

diperlukan penanganan khusus jika sedang tidak digunakan. Tidak seperti zat radioaktif, alat ini tidak memancarkan radiasi pada saat tidak dioperasikan.

Salah satu pesawat pembangkit radiasi adalah akselerator yaitu alat yang digunakan untuk mempercepat partikel bermuatan (elektron, proton, dan deuterium). Partikel bermuatan, misalnya elektron, dipercepat menggunakan medan listrik atau medan magnet sehingga mencapai kecepatan yang sangat tinggi. Beberapa contoh akselerator yang banyak digunakan adalah akselerator linier (LINAC = *linear accelerator*) yang mempunyai lintasan berbentuk lurus dan siklotron yang mempunyai lintasan berbentuk lingkaran. Di samping LINAC dan Siklotron, pesawat pembangkit radiasi lainnya adalah pesawat sinar-X, dan mesin berkas elektron (MBE).

3) Reaktor Nuklir

Salah satu sumber radiasi yang dapat digunakan untuk menghasilkan neutron adalah ^{235}U . ^{235}U digunakan di dalam reaktor nuklir yang akan menghasilkan neutron dengan jumlah yang sangat besar melalui reaksi fisi. Dalam reaksi fisi tersebut juga dilepaskan energi yang dapat digunakan untuk menghasilkan daya listrik.

B. Besaran dan Satuan Radiasi

1. Aktivitas Radiasi

Inti atom yang tidak stabil akan berubah menjadi inti yang lebih stabil dengan memancarkan radiasi melalui proses yang disebut peluruhan. Proses peluruhan ini diukur dengan laju peluruhan, yang mengacu pada jumlah peluruhan yang terjadi dalam satu satuan waktu ($\Delta N/\Delta t$), yang berhubungan langsung dengan jumlah inti atom yang tidak stabil (N) dan suatu nilai tetap yang disebut konstanta peluruhan (λ).

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (10)$$

Aktivitas radiasi merujuk pada jumlah peluruhan yang terjadi per detik, atau dengan kata lain, aktivitas ini adalah laju dari proses peluruhan itu sendiri..

$$A = -\lambda N \quad (11)$$

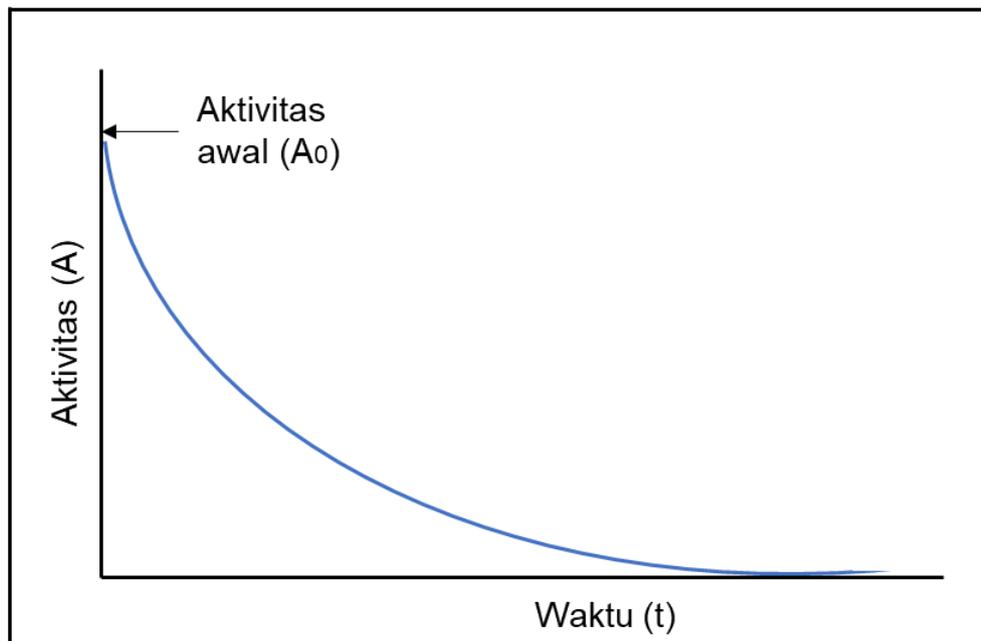
Berdasarkan Persamaan di atas, kita bisa mengungkapkan hukum peluruhan secara matematis, yang dirumuskan sebagai:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (12)$$

dengan N adalah jumlah inti atom yang tidak stabil pada waktu tertentu, N_0 adalah jumlah inti pada mula-mula, λ adalah konstanta peluruhan yang bersifat tetap, dan t adalah waktu yang berlalu sejak inti tersebut mulai meluruh. Persamaan di atas dapat diubah menjadi bentuk aktivitas sebagai berikut.

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (13)$$

dengan A adalah aktivitas pada saat t , dan A_0 adalah aktivitas mula-mula. Persamaan (13) di atas dapat digambarkan dalam grafik eksponensial yang menunjukkan hubungan antara aktivitas radioaktif terhadap waktu.



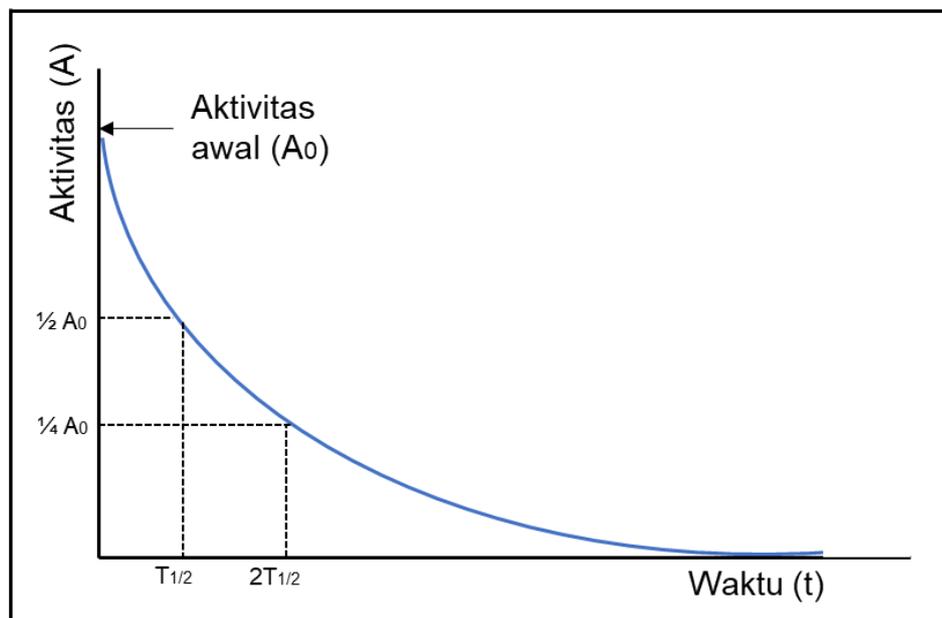
Gambar 1. Aktivitas radioaktif sebagai fungsi waktu

2. Satuan Aktivitas

Sejak tahun 1976, dalam sistem satuan internasional (SI), aktivitas radiasi diukur menggunakan satuan Becquerel (Bq), yang didefinisikan sebagai jumlah peluruhan per detik. Sebelumnya, aktivitas radiasi diukur dengan menggunakan satuan lama yaitu Curie (Ci), yang didefinisikan sebagai 3×10^{10} peluruhan per detik.

3. Waktu Paro

Waktu paro ($T_{1/2}$) diartikan sebagai periode waktu yang diperlukan agar aktivitas suatu zat radioaktif berkurang menjadi setengah dari nilai awalnya. Setiap radionuklida memiliki waktu paro yang bersifat unik dan tetap, yang berarti waktu yang dibutuhkan untuk mengurangi aktivitasnya hingga setengah tidak berubah, seperti ^{60}Co mempunyai waktu paro 5,24 tahun, ^{137}Cs memiliki waktu paroh 30 tahun, dan ^{192}Ir memiliki waktu paro 74 hari.



Gambar 2. Aktivitas radioaktif setelah waktu paro

Nilai waktu paro suatu radionuklida dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (14)$$

Konsep waktu paro sangat berguna dalam menghitung aktivitas suatu radionuklida, karena memudahkan perhitungan dibandingkan dengan menggunakan persamaan umum (Persamaan 14). Jika waktu yang telah berlalu sama dengan satu kali waktu paro ($T_{1/2}$), maka aktivitas radionuklida akan berkurang menjadi setengah dari nilai awalnya, atau 0,5 dari aktivitas awal. Jika waktu yang berlalu dua kali waktu paro, aktivitasnya akan berkurang menjadi seperempat dari nilai awal, atau 0,25. Proses ini berlanjut

seiring berjalannya waktu, dengan aktivitas terus berkurang menjadi setengah pada setiap kelipatan waktu paro.

Selain itu, hubungan matematis untuk perhitungan ini dapat digambarkan dengan persamaan berikut.

$$A_t = \left(\frac{1}{2}\right)^n A_0 \quad (15)$$

$$n = t / (T_{1/2}) \quad (16)$$

dimana t adalah selang waktu antara saat mula-mula sampai saat pengukuran, sedangkan $T_{1/2}$ adalah waktu paro radionuklida.

Contoh Soal :

1. Sumber ^{137}Cs mempunyai aktivitas 100 MBq pada tanggal 1 Januari 2000. Beberapa aktivitasnya pada tanggal 1 Januari 2030 jika ^{137}Cs mempunyai waktu paro ($T_{1/2}$) = 30 tahun ?

Jawab:

Selang waktu $t = 1 \text{ Januari } 2030 - 1 \text{ Januari } 2000 = 30 \text{ tahun}$

$$n = 30/30 = 1$$

$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^1 \cdot 100 \text{ MBq} \\ = 50 \text{ MBq}$$

Jadi aktivitas ^{137}Cs pada tanggal 1 Januari 2030 adalah 50 MBq.

2. Suatu bahan radioaktif mempunyai aktivitas 50 MBq pada pukul 09.00 WIB. Sedangkan pada pukul 12.00 WIB aktivitasnya tinggal 25 MBq. Berapa waktu paro ($T_{1/2}$) bahan radioaktif tersebut?

Jawab:

$A_0 = 50 \text{ MBq}$, $A(t) = 25 \text{ MBq}$, dan waktu $t = 3 \text{ jam}$

Setelah 3 jam aktivitasnya tinggal $50/25 = \frac{1}{2}$ kali yang berarti telah mencapai 1 kali $T_{1/2}$.

$1 \times T_{1/2} = 3 \text{ jam}$, maka $T_{1/2} = 3 \text{ jam}$.

4. Besaran Fisik

a. Paparan (X)

Paparan adalah besaran radiasi tradisional yang digunakan untuk menggambarkan level radiasi di lingkungan. Paparan merupakan jumlah ionisasi di udara yang dihasilkan oleh sinar gamma dan sinar-X (non-partikel

bermuatan). Satuan internasional paparan adalah C/Kg, dan satuan lamanya adalah R. Dalam transisi menggunakan besaran dan satuan internasional. Paparan digantikan dengan *air kerma*. Perbedaan antara paparan dan *air kerma* adalah paparan mengacu pada muatan yang terbentuk akibat ionisasi yang dihasilkan di udara, sementara *air kerma* mengacu pada jumlah energi kinetik yang dilepaskan di udara.

b. Kerma (K)

Kerma (*Kinetic Energy Released per Unit Mass*) adalah energi kinetik yang dilepaskan ke suatu media bermassa. Besaran ini adalah besaran yang berlaku untuk radiasi tidak langsung seperti gamma/x-ray dan neutron. Diperlukan kuantifikasi jumlah energi rata-rata yang ditransfer dari radiasi tidak langsung ke radiasi langsung tanpa memperdulikan apa yang terjadi setelah proses transfer tersebut. Untuk menggambarannya, sinar gamma memiliki energi kinetik tertentu mentransfer energi kinetiknya kepada partikel seperti elektron melalui interaksi foton (efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan). Satuan dari Kerma adalah (J/Kg) atau Gray (Gy).

c. Dosis serap (D)

Dosis serap adalah energi yang diberikan oleh suatu partikel per satuan massa medium volume tertentu melalui proses ionisasi dan eksitasi sepanjang lintasan elektron. Dosis serap juga dapat didefinisikan sebagai energi rata-rata radiasi yang diserap pada suatu bahan. Untuk menggambarannya, setelah proses kerma menghasilkan elektron, elektron tersebut akan mengionisasi atau mengeksitasi suatu medium. Satuan dosis serapnya sama dengan Kerma, yaitu J/Kg dan Gy.

5. Besaran Proteksi

a. Dosis serap organ (D_T)

Dosis serap organ merupakan dosis serap yang terjadi di jaringan atau organ. Hal ini dapat didefinisikan sebagai energi rata-rata radiasi yang diserap pada jaringan atau organ per satuan jaringan atau organ. Partikel bermuatan seperti elektron dapat mengionisasi atau mengeksitasi komponen

yang ada di dalam organ. Satuan internasionalnya adalah J/Kg dan Gy, dan satuan lamanya adalah Rad (1 Gy = 100 Rad).

b. Dosis ekuivalen (H_T)

Dosis ekuivalen merupakan besaran dosis yang digunakan untuk membedakan bahaya berdasarkan jenis radiasi. Apabila seorang manusia menerima dosis serap yang sama, namun berasal dari jenis radiasi yang berbeda yang memberikan efek berbeda pada (jaringan) tubuh manusia. Untuk dapat membedakan bahaya berdasarkan jenis radiasi dikenal sebuah istilah yang disebut sebagai faktor bobot radiasi. Nilai faktor bobot radiasi untuk setiap jenis radiasi adalah berbeda-beda. Tabel 1 merupakan nilai faktor bobot radiasi (w_r) untuk jenis radiasi yang berbeda berdasarkan ICRP 103 tahun 2007. Satuan internasionalnya adalah Sievert (Sv), satuan lamanya adalah Rem (1 Sv = 100 Rem).

Tabel 1. Nilai faktor bobot radiasi untuk jenis radiasi yang berbeda

Jenis radiasi	Faktor bobot radiasi, w_r
Sinar gamma dan Sinar -X	1
Elektron	1
Proton	2
Alfa	20
Neutron (bergantung energi)	5 - 20

c. Dosis efektif

Dosis efektif adalah besaran dosis yang digunakan dalam proteksi radiasi yang merupakan perkalian antara dosis ekuivalen yang diterima jaringan dan faktor bobot jaringan (w_T). Faktor bobot jaringan adalah suatu faktor perbandingan antara efek stokastik dari suatu jaringan tubuh terhadap efek stokastik seluruh tubuh. Setiap jaringan atau organ manusia memiliki tingkat sensitifitas terhadap radiasi yang berbeda. Tabel Y menunjukkan Nilai faktor bobot jaringan berdasarkan ICRP 107 Tahun 2007. Satuan internasional dosis efektif adalah Sv, sama seperti dosis ekuivalen.

Tabel 2. Nilai faktor bobot jaringan pada tubuh manusia

Jenis jaringan	w_T	Σw_T
Susunan tulang belakang, kolon, paru-paru, lambung, Payudara, Jaringan lainnya*	0.12	0.72
Gonad	0.08	0.08
Kandung kemih, kerongkongan, hati, tiroid	0.04	0.16
Permukaan tulang, otak, kelenjar ludah, kulit	0.01	0.04
	Total	1.00

Jaringan lainnya: Kelenjar adrenal, Daerah Ekstratoraks (ET), Kandung Empedu, Jantung, Ginjal, Kelenjar Getah Bening, Otot, Mukosa Mulut, Pankreas, Prostat, Usus Halus, Limpa, Timus, Rahim.

C. Interaksi Radiasi dengan Materi

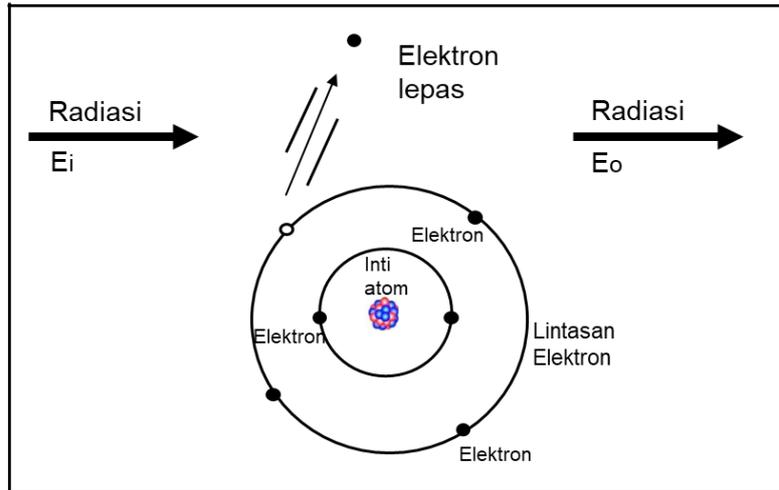
Secara umum interaksi radiasi dapat dibedakan atas tiga jenis radiasi yaitu radiasi partikel bermuatan, seperti radiasi α dan β ; radiasi partikel tidak bermuatan yaitu radiasi neutron; dan radiasi gelombang elektromagnetik seperti radiasi γ dan sinar-X.

1. Interaksi Partikel Alpha

Partikel Alpha bergerak relatif lambat dan memiliki masa yang relatif besar dibandingkan dengan jenis radiasi yang lain. Selama melintas di dalam bahan penyerap, partikel α ini sangat mempengaruhi elektron-elektron orbit dari atom-atom bahan penyerap karena adanya gaya Coulomb. Oleh karena itu, radiasi α sangat mudah diserap di dalam materi atau daya tembusnya sangat rendah.

a. Proses Ionisasi

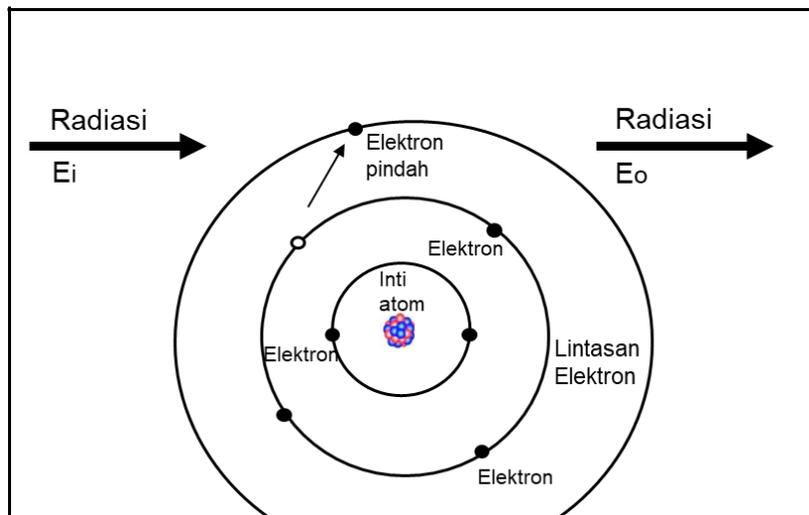
Ketika radiasi α (bermuatan positif; melalui materi maka terdapat beberapa elektron (bermuatan negatif) yang akan terlepas dari orbitnya karena adanya gaya tarik Coulomb. Proses terlepasnya elektron dari suatu atom dinamakan sebagai proses ionisasi.



Gambar 3. Proses Ionisasi

b. Proses Eksitasi

Proses ini mirip dengan proses ionisasi, perbedaannya dalam proses eksitasi, elektron tidak sampai lepas dari atomnya hanya berpindah ke lintasan yang lebih luar.

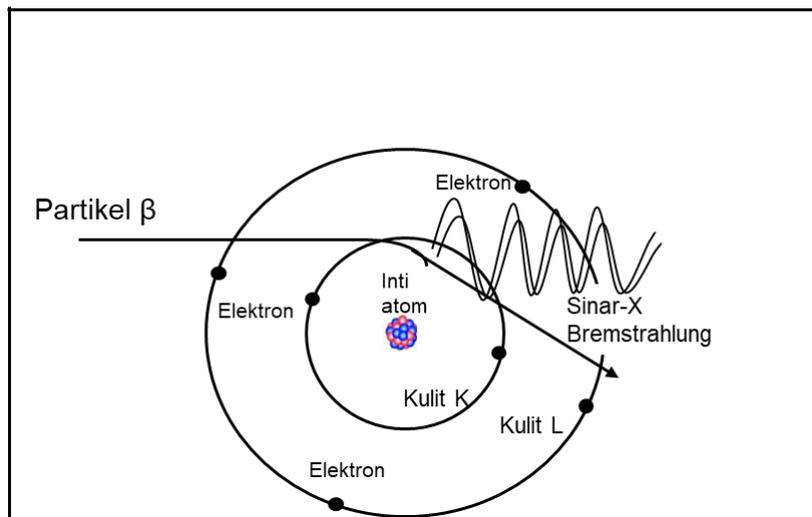


Gambar 4. Proses Eksitasi

Proses eksitasi ini selalu diikuti oleh proses de-eksitasi yaitu proses transisi elektron dari kulit yang lebih luar ke kulit yang lebih dalam dengan memancarkan radiasi sinar-X karakteristik.

2. Interaksi Partikel Beta

Dibandingkan dengan partikel alpha, massa dan muatan partikel beta lebih kecil sehingga kurang diserap oleh materi atau daya tembusnya lebih jauh. Interaksi radiasi β dengan materi adalah proses ionisasi dan eksitasi sebagaimana radiasi α serta proses bremsstrahlung, yaitu pemancaran radiasi gelombang elektromagnetik (sinar-X kontinyu) ketika radiasi β dibelokkan atau diperlambat oleh inti atom yang bermuatan positif.



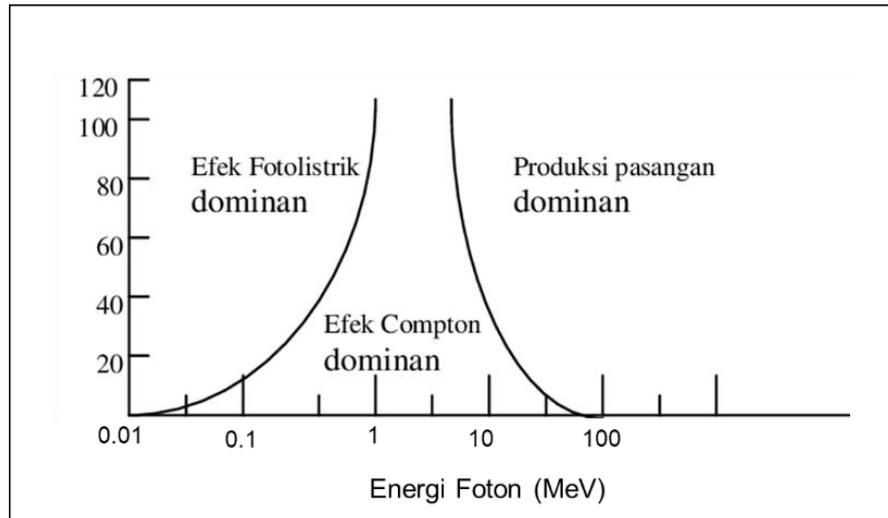
Gambar 5. Proses terbentuknya Sinar-X Bremsstrahlung

Energi partikel β yang lebih besar akan menghasilkan radiasi bremsstrahlung yang lebih besar. Semakin besar nomor atom bahan penyerap (semakin berat) akar menghasilkan radiasi sinar-X yang lebih besar.

3. Interaksi Sinar Gamma dan Sinar-X

Sinar γ dan sinar-X merupakan radiasi gelombang elektromagnetik yang berarti tidak mempunyai massa maupun muatan listrik. Oleh karena itu, sinar γ dan sinar-X sangat sukar untuk diserap oleh materi, atau daya tembusnya sangat besar.

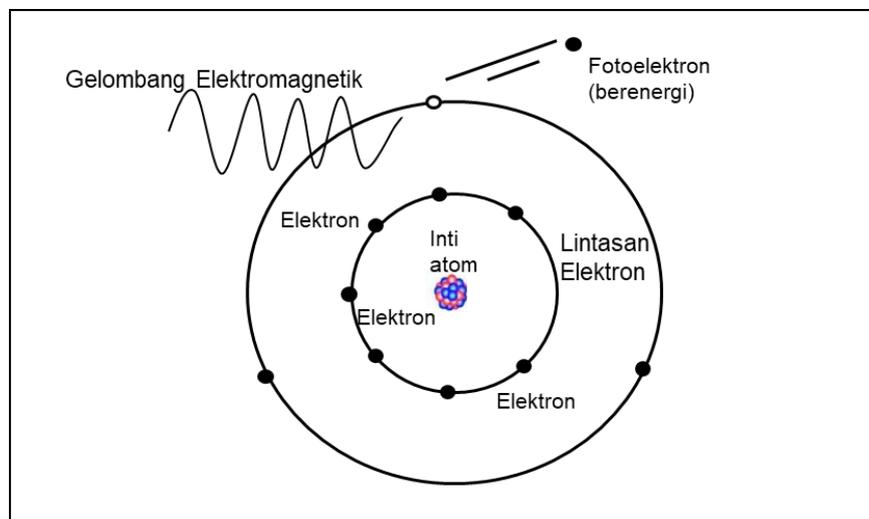
Proses interaksi antara sinar γ dan sinar-X dengan materi adalah efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan. Probabilitas terjadinya antara tiga proses tersebut sangat ditentukan oleh energi radiasi dan jenis materi (nomor atom) penyerapnya.



Gambar 6. Probabilitas interaksi foton dengan materi

1. Efek Fotolistrik

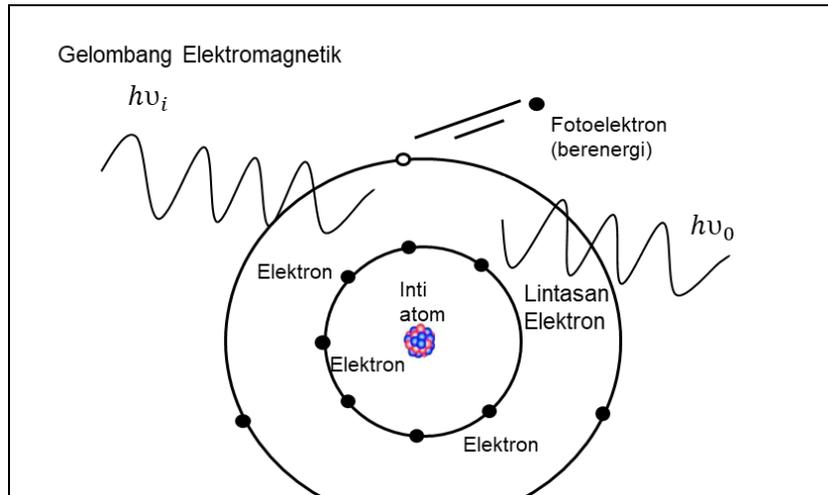
Pada efek fotolistrik, energi foton diserap seluruhnya oleh elektron orbit, sehingga elektron tersebut terlepas dari atom. Elektron yang dilepaskan dalam proses ini, disebut fotoelektron, mempunyai energi sebesar energi foton yang mengenainya.



Gambar 7. Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik sangat dominan terjadi bila foton berenergi rendah di bawah 0,5 MeV dan lebih banyak terjadi pada material dengan Z yang besar. Sebagai contoh efek fotolistrik lebih banyak terjadi pada timah hitam ($Z=82$) daripada tembaga ($Z=29$).

2. Hamburan Compton

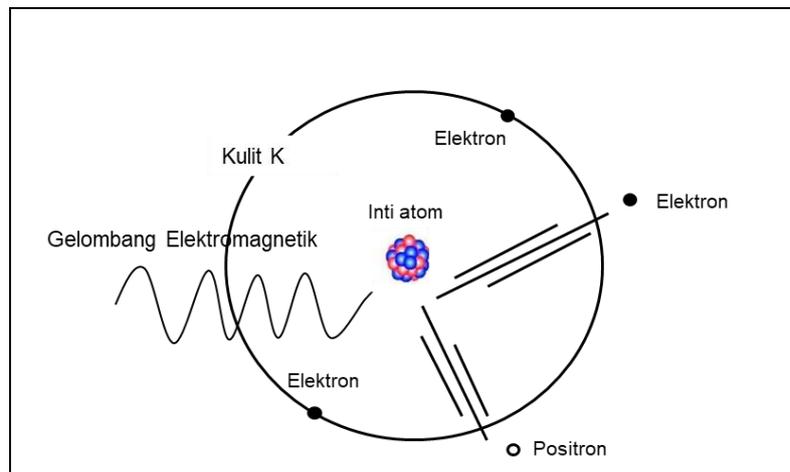


Gambar 8. Hamburan Compton

Hamburan Compton terjadi ketika foton (umumnya sinar-X atau sinar gamma) bertumbukan dengan elektron yang berada dalam keadaan bebas atau hampir bebas, menghasilkan perubahan arah dan energi foton yang terhambur, serta pelepasan energi ke elektron yang terlibat. Pada dasarnya, foton kehilangan sebagian energinya, yang kemudian diberikan kepada elektron yang dihantam.

3. Produksi Pasangan

Proses produksi pasangan hanya terjadi bila energi foton datang $h\nu_i$ lebih besar dari 1,02 MeV. Ketika foton "sampai" ke dekat inti atom maka foton tersebut akan lenyap dan berubah menjadi sepasang elektron-positron.



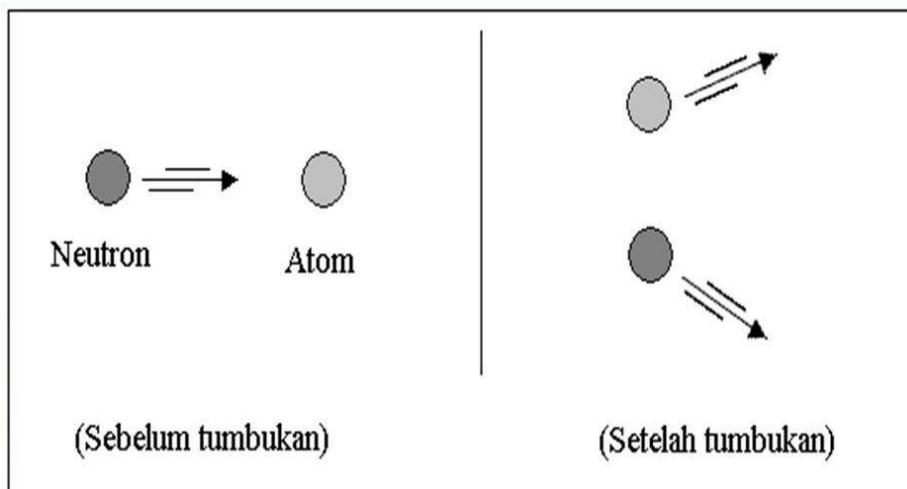
Gambar 9. Produksi Pasangan

4. Interaksi Radiasi Neutron

Neutron merupakan partikel yang mempunyai massa tetapi tidak bermuatan listrik sehingga interaksinya dengan materi lebih banyak bersifat mekanik, yaitu tumbukan antara neutron dengan atom (inti atom) bahan penyerap, baik secara elastik maupun tak elastik. Setiap tumbukan, materi akan menyerap energi neutron sehingga setelah beberapa kali tumbukan maka energy neutron akan "habis". Interaksi lain yang mungkin muncul, bila energi neutron sudah sangat rendah, adalah reaksi inti atau penangkapan neutron oleh inti atom bahan penyerap dan reaksi fisi atau pembelahan inti.

a. Tumbukan Elastik

Tumbukan elastik adalah tumbukan antara neutron cepat dengan inti atom pada saat energi kinetik total dan momentum partikel-partikel sebelum dan sesudah tumbukan tidak berubah. Dalam tumbukan elastik antara neutron cepat dan inti atom bahan penyerap, sebagian energi neutron diberikan kepada inti atom yang ditumbuknya sehingga inti atom tersebut terpental sedangkan neutronnya dibelokkan/dihamburkan.



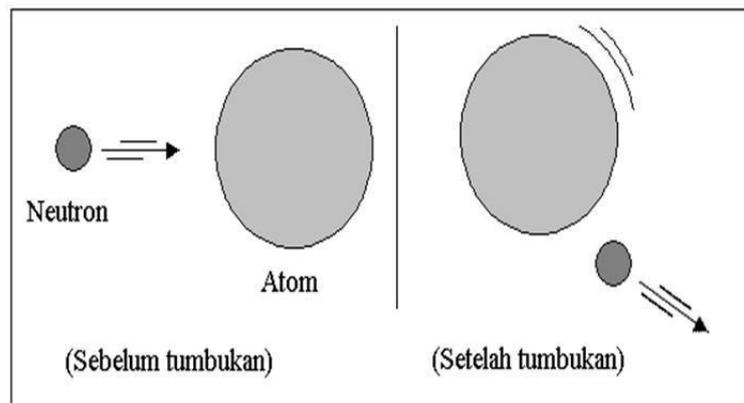
Gambar 10. Peristiwa tumbukan elastik

Tumbukan elastik terjadi bila atom yang ditumbuk oleh neutron cepat mempunyai massa yang sama, atau hampir sama dengan massa neutron (misalnya atom Hidrogen), sehingga fraksi energi neutron yang terserap atom tersebut cukup besar. Maka air, yang mengandung banyak atom Hidrogen, merupakan bahan yang efektif sebagai bahan moderasi neutron.

b. Tumbukan Tak Elastik

Proses tumbukan tak elastik sebenarnya sama saja dengan tumbukan elastik, tetapi energi kinetik sebelum dan sesudah tumbukan berbeda. Ini terjadi massa atom yang ditumbuk neutron jauh lebih besar dari massa neutron. Setelah tumbukan inti atom tersebut tidak terpental, tetapi inti atom tereksitasi, sedang neutronnya terhamburkan. Inti atom yang tereksitasi menuju kondisi normal dengan memancarkan radiasi γ .

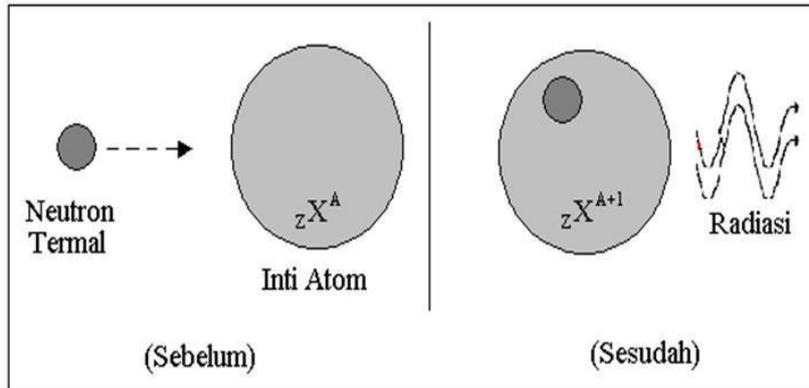
Dalam peristiwa ini, energi neutron yang diberikan ke atom yang ditumbuk tidak terlalu besar sehingga setelah tumbukan, energi neutron tidak banyak berkurang. Oleh karena itu, bahan yang mengandung atom-atom dengan nomor atom besar tidak efektif sebagai penahan radiasi neutron.



Gambar 11. Peristiwa Tumbukan Non Elastik

c. Reaksi Inti (Penangkapan Neutron)

Bila energi neutron sudah sangat rendah atau sering disebut sebagai neutron termal ($E_n < 0,025$ eV), maka terdapat kemungkinan bahwa neutron tersebut akan "ditangkap" oleh inti atom bahan penyerap sehingga membentuk inti atom baru, yang biasanya merupakan inti atom yang tidak stabil, yang memancarkan radiasi, misalnya α , β atau γ . Peristiwa ini yang disebut sebagai proses aktivasi neutron, yaitu mengubah bahan yang stabil menjadi bahan radioaktif.



Gambar 12. Peristiwa penangkapan neutron

Material penahan neutron yang efektif adalah material yang mengandung banyak unsur hidrogen (H) seperti parafin dan air. Neutron lambat (termal) akan berhenti setelah menempuh jarak ± 3 cm di dalam air. Akan tetapi perlu diperhatikan bahwa interaksi neutron dengan hidrogen di dalam air akan juga menghasilkan radiasi γ , meskipun probabilitasnya sangat kecil. Maka untuk menahan radiasi γ hasil interaksi tersebut, perlu dipasang Pb mengelilingi parafin atau air.

d. Reaksi inti

Reaksi inti akibat radiasi alfa memiliki kemungkinan terjadi yang sangat kecil. Produk dari reaksi ini adalah inti atom yang berbeda dari inti awal yang cenderung tidak stabil. Fenomena reaksi inti yang dipicu oleh radiasi alfa sering dimanfaatkan dalam pembuatan sumber radiasi buatan, seperti sumber radiasi neutron Am-Be untuk kegiatan penelitian dan kalibrasi.

D. Alat Ukur Radiasi

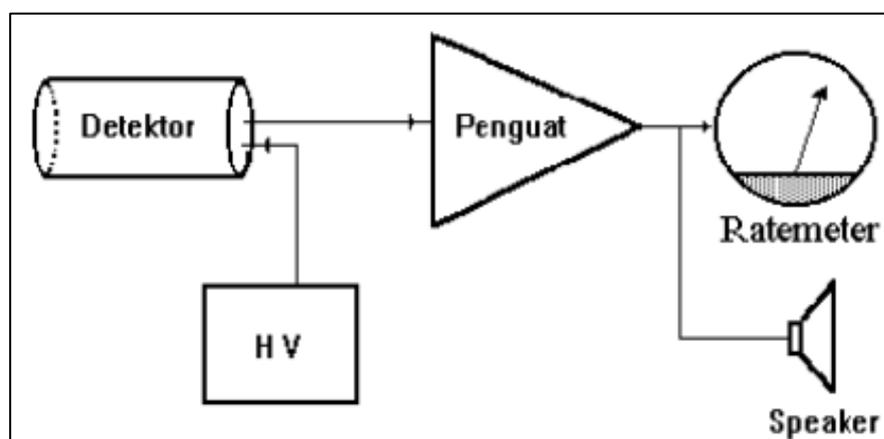
Alat ukur radiasi dapat memberi informasi mengenai dosis, laju dosis atau laju cacah. Berdasarkan fungsinya, alat ukur diklasifikasikan menjadi tiga yaitu: surveimeter, monitor kontaminasi dan dosimeter perorangan. Untuk alat ukur pembacaan langsung (dibaca langsung oleh pengguna), sebelum digunakan harus dikalibrasi oleh laboratorium dosimetri yang terakreditasi.

1. Surveimeter

Surveimeter digunakan untuk mengukur laju dosis di suatu lokasi secara langsung. Dengan adanya surveimeter seorang pekerja radiasi dapat memperkirakan dosis radiasi yang akan diterimanya bila akan bekerja di suatu lokasi selama waktu tertentu. Dengan informasi yang ditunjukkan surveimeter ini, setiap pekerja dapat menjaga diri agar tidak terkena paparan radiasi berlebih.

Surveimeter dapat dibedakan menjadi surveimeter yang bersifat portabel dan surveimeter yang bersifat menetap (*stationary*). Surveimeter yang bersifat menetap, yang disebut sebagai monitor area. Monitor area dapat digunakan untuk mengukur tingkat dosis radiasi suatu lokasi tertentu secara terus menerus, misalnya ruang kerja, laboratorium, tempat penyimpanan sumber, dan sebagainya. Hasil pengukuran alat ini biasanya dibandingkan dengan suatu nilai batas tertentu yang telah ditentukan sebelumnya. Apabila hasil pengukuran monitor area ini melebihi batas yang ditentukan maka alat ini harus dapat menghasilkan suatu informasi yang dapat dimengerti oleh pekerja radiasi, misalnya sirene atau alarm, sehingga dapat diambil langkah-langkah pengamanan.

Konstruksi surveimeter, sebagaimana sistem pengukur radiasi yang lain, terdiri atas detektor dan komponen penunjang seperti ditunjukkan pada Gambar 13. Detektor adalah bahan yang dapat berinteraksi dengan radiasi mengubah energi radiasi menjadi bentuk energi lain. Sedangkan komponen penunjang terdiri dari penguat, ratemeter atau speaker yang mengubah tanggapan detektor tersebut menjadi suatu informasi yang dapat diamati oleh indera manusia. Prinsip pengukuran radiasi adalah yang lebih mudah diamati.



Gambar 13. Konstruksi Surveimeter

(sumber: <https://www.slideshare.net/slideshow/proteksi-radiasi/28184357#34>)

Surveimeter γ (Gamma) / Sinar-X

Surveimeter gamma merupakan surveimeter yang umum digunakan dan pada prinsipnya juga dapat dimanfaatkan untuk mengukur sinar-X. Oleh karena itu surveimeter ini dapat dikalibrasi baik untuk radiasi gamma maupun sinar-X. Namun terdapat surveimeter sinar-X yang hanya dapat dipakai untuk keperluan radiodiagnostik karena memiliki kemampuan untuk mengukur paparan radiasi secara spontan.



Gambar 14. Surveimeter γ (Gamma) / Sinar-X
(sumber: <https://gammadata.se/product/radiation-detection/portable-instruments/dose-rate-instruments-with-external-probes/radiagem-2000/>)

Surveimeter β/γ (Beta/Gamma)

Berbeda dengan surveimeter gamma biasa, detektor surveimeter ini terletak di luar badan surveimeter dan mempunyai “jendela” yang dapat dibuka atau ditutup. Bila digunakan untuk mengukur radiasi beta maka jendelanya harus dibuka. Sebaliknya untuk mengukur radiasi gamma, jendelanya ditutup.

Surveimeter Neutron

Detektor yang digunakan pada surveimeter neutron adalah detektor proporsional yang diisi dengan gas BF_3 atau gas Helium. Oleh karena yang dapat berinteraksi dengan unsur boron atau helium adalah neutron lambat saja maka surveimeter neutron biasanya dilengkapi dengan moderator yang terbuat dari parafin atau polietilen yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron

cepat menjadi neutron lambat. Moderator ini hanya digunakan bila radiasi neutron yang akan diukur adalah neutron cepat.

2. Monitor Kontaminasi

Kontaminasi merupakan salah satu potensi bahaya dalam kegiatan pemanfaatan zat radioaktif. Kontaminasi sangat mudah terjadi apabila bekerja dengan sumber radiasi terbuka yang berbentuk cair, serbuk, atau gas.

Monitor kontaminasi digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi pada pekerja, alat, dan lingkungan. Hasil pengukuran dari monitor kontaminasi ini biasanya menunjukkan kuantitas radiasi (laju cacah) seperti cacah per menit / *count per minute* (cpm) atau cacah per detik / *count per second* (cps). Nilai ini harus dikonversikan menjadi satuan aktivitas radiasi, currie atau becquerel.

Monitor kontaminasi dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu:

a. monitor kontaminasi permukaan (*surface* monitor)

Monitor kontaminasi permukaan (*surface* monitor) digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi segala permukaan, misalnya meja kerja, lantai, alat ukur, ataupun baju kerja.



Gambar 15. Monitor Kontaminasi Permukaan
(sumber: <https://www.meditronixindia.com/RadiationMonitoringNM.html>)

b. monitor kontaminasi perorangan

Monitor kontaminasi perorangan digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi pada bagian-bagian tubuh dari pekerja radiasi. Bagian tubuh yang paling sering terkontaminasi adalah tangan dan kaki, sehingga terdapat monitor kontaminasi khusus untuk tangan dan kaki yaitu *hand and foot contamination* monitor. Suatu instalasi yang modern biasanya dilengkapi

dengan monitor kontaminasi seluruh tubuh (*whole body monitor*). Setiap pekerja yang akan meninggalkan tempat kerja harus diperiksa terlebih dahulu dengan monitor kontaminasi. Monitor kontaminasi udara digunakan untuk mengukur tingkat radioaktivitas udara di sekeliling instalasi nuklir yang mempunyai potensi untuk melepaskan zat radioaktif ke udara.



Gambar 16. Monitor kontaminasi perorangan
(sumber: <https://www.mirion.com/fast-effective-contamination-monitoring>)

c. monitor kontaminasi udara (*airborne*)

Monitor kontaminasi udara biasanya dilengkapi dengan suatu penyaring (filter) dan pompa penghisap udara untuk “menangkap” partikulat zat radioaktif yang bercampur dengan molekul-molekul udara.



Gambar 17. Monitor kontaminasi udara
(sumber: <https://www.mirion.com/products/technologies/radiation-monitoring-systems/camsys-radiation-monitors/particulate-monitors/icam-mobile-alpha-beta-particulate-monitor>)

Cara Menggunakan Surveimeter/Monitor Kontaminasi

Dalam menggunakan surveimeter perlu diperhatikan kesesuaian dengan jenis radiasi yang akan diukur. Langkah penting yang perlu dilakukan dalam menggunakan surveimeter adalah:

- a. memeriksa sertifikat kalibrasi
untuk memastikan surveimeter masih layak digunakan, dan mengidentifikasi nilai faktor kalibrasi
- b. memeriksa baterai
- c. mempelajari pengoperasian dan pembacaan meliputi tombol, skala, dan satuan

Perlu diperhatikan bahwa tiga langkah di atas harus dilakukan sebelum melakukan pengukuran dan masih berada di lokasi yang “aman”. Sebelum merasa yakin atas ketiga informasi pada langkah tersebut, janganlah memulai pekerjaan dengan radiasi. Untuk lebih meyakinkan bahwa surveimeter dalam kondisi siap untuk digunakan dapat pula dilakukan cek respon dengan menggunakan sumber radiasi yang diketahui.

3. Dosimeter Perorangan

a. Dosimeter Saku

Di era yang semakin maju, dosimeter saku sudah dibuat dengan komponen elektronika maju (*advanced components*). Komponen detektor dosimeter saku yang dewasa ini digunakan adalah berjenis Semikonduktor, biasanya berbahan dasar silicon. Dengan menambahkan peraga digital dan rangkaian elektronika tertentu, hasil pengukurannya dapat dilihat secara langsung tanpa membutuhkan peralatan eksternal tambahan. Dosimeter dengan pembacaan langsung ini dapat dikategorikan sebagai dosimeter aktif.



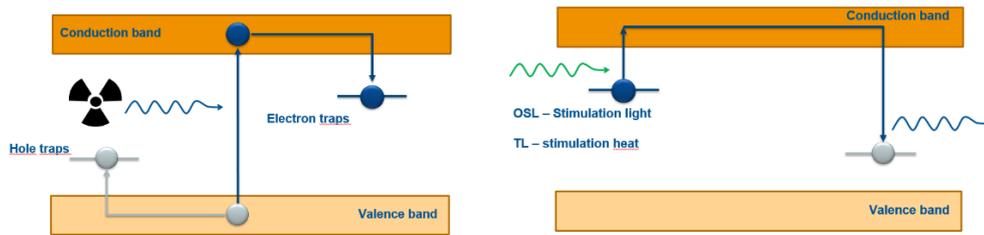
Gambar 18. Dosimeter perorangan dengan jenis detektor semikonduktor yang dewasa ini banyak digunakan
(Sumber: <https://preparecenter.org/wp-content/uploads/2021/03/JRCS-NDR-Basic-dosimeter-PPE.pdf>)

b. Dosimeter Luminesensi

Dosimeter perorangan jenis *thermoluminescence dosemeter* (TLD) atau *optically stimulated luminescence* (OSL) memerlukan suatu proses tertentu agar hasil pengukuran dosisnya dapat diketahui. Dosimeter saku digunakan untuk mengetahui dosis yang telah diterima secara langsung sedangkan, TLD atau OSL digunakan untuk “mencatat” dosis yang telah diterima selama periode waktu tertentu. *Chip* dosimeter pada TLD dibuat menggunakan kristal anorganik, misalnya bahan LiF atau CaSO₄ dan *Chip* dosimeter OSL dibuat dari bahan Al₂O₃:C. Bahan-bahan tersebut diolah sedemikian rupa sehingga tercipta kristal yang memiliki kemampuan untuk menjebak elektron.

Bila material tersebut dikenai radiasi, maka energi radiasi akan diserahkan kepada elektron yang berada di pita valensi dan membuatnya bergerak ke pita konduksi. Elektron yang berada di pita konduksi akan berusaha kembali menuju ke keadaan dasarnya di pita valensi. Namun, pada saat proses menuju ke keadaan dasar, elektron tersebut terjebak di suatu daerah. Proses terjebaknya elektron dapat digambarkan pada Gambar 19 (kiri). Semakin banyak radiasi yang mengenai detektor, maka semakin banyak elektron yang terjebak. Elektron yang terjebak ini adalah informasi yang dapat digunakan untuk mengkuantifikasi dosis radiasi. Informasi tersebut akan tetap tersimpan sampai ada keadaan pemicu yang dapat mengembalikan elektron ke keadaan dasarnya di pita valensi.

Dalam proses pembacaannya dengan menggunakan alat pembaca masing-masing, kristal TLD atau OSL diberi pemicu berupa energi dari luar agar elektron yang terjebak dapat terlepas dan kembali ke keadaan dasar. Saat elektron kembali ke keadaan dasar, keluarlah percikan cahaya. Proses ini yang dikenal sebagai proses luminesensi, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 19 (kanan). Sumber energi dari luar yang digunakan berupa panas yang untuk TLD dan cahaya tampak (hijau) untuk OSL. Percikan cahaya yang sangat sedikit tersebut perlu dilipat gandakan dengan menggunakan *photomultiplier* (PMT) dan selanjutnya dibaca dengan menggunakan sensor yang sensitif terhadap cahaya. Dosimeter perorangan yang memerlukan energi dari luar untuk proses pembacaannya dikategorikan sebagai dosimeter pasif. Periode pemakaian yang direkomendasikan untuk TLD dan OSL adalah 3 bulan.



Gambar 19. (kiri) Proses Eksitasi; (kanan) Proses Luminesensi
 (sumber: <https://www.landauer.eu/knowledge-center/learn-more/osl-technology-principle/#:~:text=OSL%20readout%20processes,in%20POSL%20mode%20improving%20accuracy>)

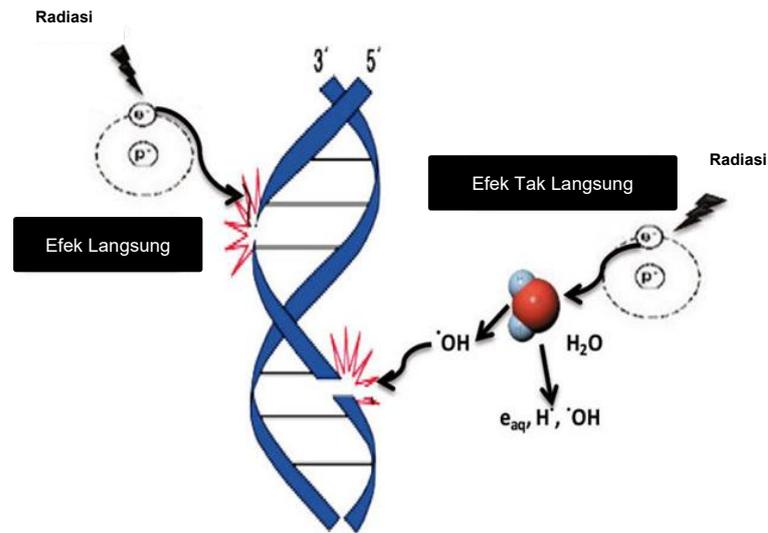
E. Efek Radiasi

Radiasi, meskipun memiliki banyak aplikasi bermanfaat dalam bidang medis, industri, dan penelitian, juga dapat menimbulkan risiko yang signifikan jika tidak dikelola dengan baik. Namun demikian, selain aplikasi radiasi buatan manusia, dalam kehidupan sehari-hari, kita juga berinteraksi dengan radiasi pengion yang ada di alam, sebagai contoh radiasi sinar kosmik dan radiasi dari bebatuan. Kita tidak merasakan adanya dampak yang merusak dari paparan radiasi alam. Pemahaman yang mendalam mengenai efek radiasi, baik yang bersifat langsung maupun tidak langsung, sangat penting bagi pekerja radiasi untuk melindungi diri sendiri dan rekan kerja. Pengetahuan mengenai efek radiasi diharapkan dapat menumbuhkan kesadaran dalam diri pekerja radiasi untuk menerapkan prinsip proteksi radiasi dalam bekerja.

1. Interaksi radiasi dengan materi biologi dalam tubuh manusia

Radiasi pengion adalah radiasi yang menyebabkan terjadinya proses ionisasi pada materi yang dilewatinya, termasuk saat radiasi memajani tubuh manusia. Radiasi berinteraksi dengan bagian tubuh terkecil manusia, yaitu sel, yang di dalamnya terdapat protein *deoksiribonukleat acid* (DNA). Protein ini merupakan pembawa informasi genetik dari tubuh manusia. Radiasi dapat secara langsung mengenai struktur DNA. Radiasi juga dapat berinteraksi dengan komponen air di dalam sel, sehingga menyebabkan molekul air pecah dan terbentuklah radikal bebas. Radikal bebas ini yang selanjutnya mengenai DNA. Interaksi radiasi dengan DNA mengakibatkan kerusakan DNA berupa :

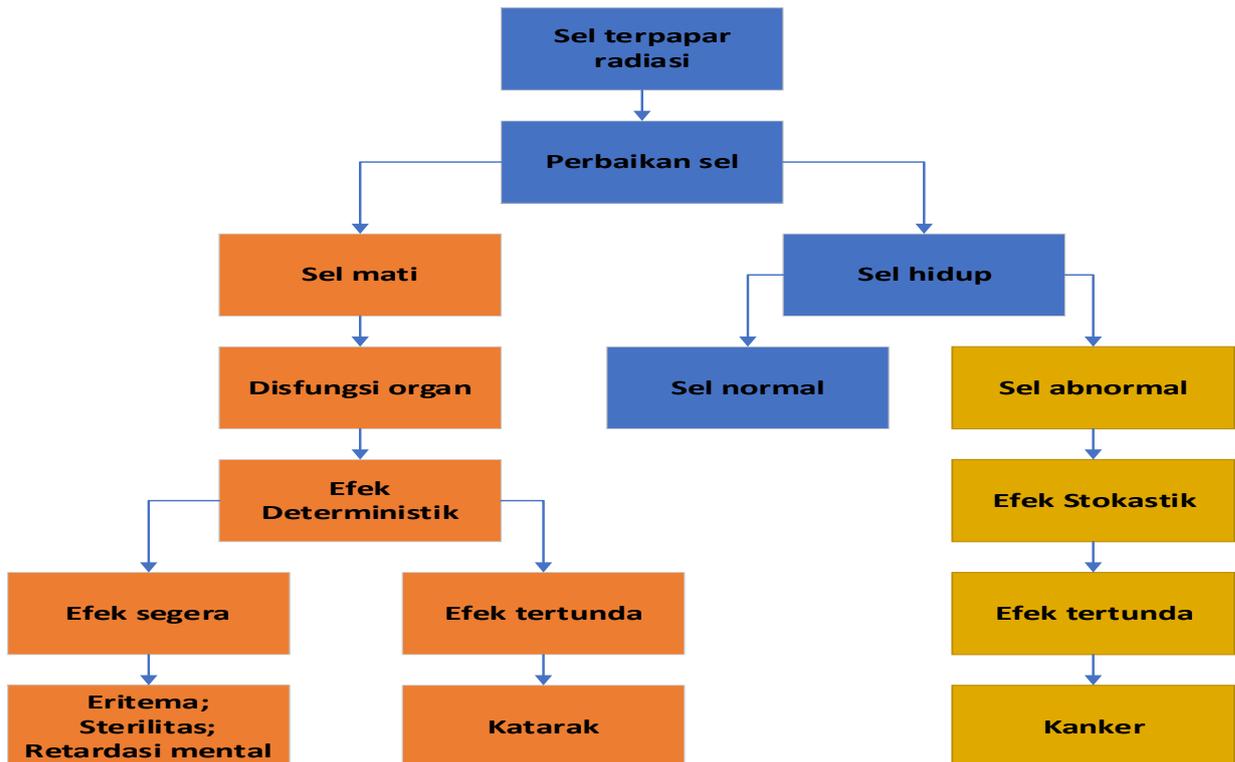
- perubahan molekul basa
- hilangnya basa
- putusnya ikatan hidrogen
- single strand break*
- double strand break*



Gambar 20. Interaksi radiasi dengan DNA secara langsung dan tak langsung

Kerusakan DNA dalam sel terjadi berakibat pada kerusakan sel. Ketika sel rusak, terdapat beberapa kemungkinan :

- sel berhasil memperbaiki diri dan kembali normal
- sel memperbaiki diri namun mengalami perubahan sifat
- sel gagal memperbaiki diri dan mati. Kematian pada banyak sel, dapat berakibat pada kematian jaringan



Gambar 21. Jenis-jenis Efek Radiasi

2. Jenis dan Contoh Efek Radiasi

Berdasarkan Gambar 20 radiasi pengion berpotensi untuk menimbulkan efek deterministik dan efek stokastik. Efek deterministik adalah efek yang terjadi akibat paparan radiasi pada dosis tertentu yang mengakibatkan kematian pada sejumlah sel sehingga menimbulkan kerusakan pada jaringan atau sistem pada tubuh manusia. Efek deterministik memiliki ciri-ciri sebagai berikut :

- a. terdapat dosis ambang
- b. keparahan bergantung pada besar dosis radiasi yang diterima
- c. efeknya dapat langsung terlihat dalam hitungan jam, hari atau bulan

Efek stokastik merujuk pada jenis efek biologis atau kesehatan yang terjadi akibat paparan radiasi yang sifatnya acak dan tidak dapat diprediksi secara pasti, tetapi memiliki kemungkinan untuk terjadi tergantung pada jumlah paparan. Dalam konteks radiasi pengion, efek stokastik berarti bahwa kemungkinan terjadinya efek tersebut (seperti kanker atau mutasi genetik) meningkat dengan bertambahnya dosis radiasi yang diterima, tetapi tanpa dosis ambang batas yang jelas, artinya bahkan paparan radiasi yang sangat rendah pun tetap dapat menyebabkan efek ini, meskipun dengan kemungkinan yang sangat kecil. Efek stokastik terjadi karena sel

yang terkena radiasi mengalami perbaikan yang tidak sempurna sehingga mengakibatkan perubahan sifat pada sel. Ciri-ciri efek stokastik adalah :

- a. bersifat acak
- b. tidak ada dosis ambang
- c. peluang kejadian meningkat seiring bertambahnya dosis yang diterima

Kecelakaan yang melibatkan zat radioaktif pernah terjadi di beberapa negara. Salah satu kecelakaan radiasi yang memberikan dampak cukup parah adalah kasus kecelakaan radiasi di Goiania yang terletak di negara bagian Goiás, Brasil pada tahun 1987. Kecelakaan ini melibatkan paparan radiasi dari sumber **cesium-137** (^{137}Cs). Kecelakaan ini mengakibatkan 4 orang meninggal dunia, 249 orang dan area seluas kurang lebih 25 hektar menjadi terkontaminasi. Kecelakaan Goiania dan beberapa kecelakaan radiasi/nuklir lainnya memberikan pembelajaran dan informasi terkait dengan efek yang ditimbulkan radiasi pengion.



Gambar 22. Efek deterministik pada korban kecelakaan radiasi Goiania, Brasil (Sumber : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub815_web.pdf)

Salah satu karakteristik dari efek deterministik adalah adanya dosis ambang untuk bisa memunculkan suatu kerusakan pada jaringan atau sistem tubuh seperti contoh pada Tabel 3.

Tabel 3. Dosis Ambang untuk Efek Deterministik

Kelainan	Jaringan/Organ	Masa inkubasi	Nilai dosis ambang (Gy)
Sterilitas sementara	Testis	3-9 minggu	Kurang lebih 0,1
Sterilitas permanen	Testis	3 minggu	Kurang lebih 6
Penurunan kapasitas pembentukan darah	Sumsum tulang	3-7 hari	Kurang lebih 0,5
Eritema (kulit kemerahan)	Kulit (dengan area luas)	1-4 minggu	3-6
Kulit terbakar	Kulit (dengan area luas)	2-3 minggu	5-10
Kerontokan rambut sementara	Kulit	2-3 minggu	Kurang lebih 4
Katarak	Mata	20 tahun	Kurang lebih 0,5

F. Rangkuman

Radiasi pengion adalah radiasi berenergi tinggi yang mampu menyebabkan ionisasi pada materi dan dapat berasal dari sumber alami maupun buatan. Radiasi pengion terjadi akibat peluruhan inti atom yang tidak stabil melalui tiga jenis utama: peluruhan alpha (α), beta (β), dan gamma (γ). Radiasi pengion ini memiliki berbagai aplikasi dalam kedokteran, industri, dan penelitian, termasuk untuk terapi, diagnosis, pengukuran material, serta analisis bahan. Sumber radiasi dibedakan berdasarkan asalnya yaitu sumber radiasi alam yang sudah ada di alam ini sejak terbentuknya, dan sumber radiasi buatan yang sengaja dibuat oleh manusia. Sumber alami mencakup radiasi kosmik, radiasi terestrial dari kerak bumi (NORM), dan radiasi internal dari tubuh manusia. Sementara itu, sumber buatan meliputi sinar-X, perangkat medis atau industri, zat radioaktif (pemancar α , β , γ , dan neutron), pesawat pembangkit radiasi (seperti akselerator dan mesin sinar-X), serta reaktor nuklir.

Aktivitas radiasi adalah laju peluruhan inti atom yang tidak stabil, diukur sebagai jumlah peluruhan per detik, dengan satuan internasionalnya adalah Becquerel (Bq), setara dengan satu peluruhan per detik. Sebelum tahun 1976, aktivitas diukur dalam Curie (Ci), dengan 1 Ci sama dengan $3,7 \times 10^{10}$ peluruhan per detik. Aktivitas radiasi bergantung pada jumlah inti tidak stabil (N), konstanta peluruhan (λ), dan waktu (t), yang dirumuskan secara matematis dalam hukum peluruhan eksponensial. Salah satu konsep penting dalam aktivitas radiasi adalah waktu paro ($T_{1/2}$), yaitu waktu yang diperlukan agar aktivitas radionuklida berkurang menjadi setengah dari nilai awalnya. Waktu paro bersifat tetap untuk setiap radionuklida, seperti ^{60}Co (5,24 tahun), ^{137}Cs (30 tahun), dan ^{192}Ir (74 hari), sehingga memudahkan perhitungan perubahan aktivitas seiring waktu. Setiap kelipatan waktu paro mengurangi aktivitas menjadi setengah dari nilai sebelumnya, yang dapat dihitung menggunakan hubungan matematis sederhana.

Interaksi radiasi dengan materi dibedakan berdasarkan jenis radiasi, yaitu partikel bermuatan (α dan β), partikel tidak bermuatan (neutron), dan gelombang elektromagnetik (γ dan sinar-X). Radiasi α , karena massanya yang besar, memiliki daya tembus rendah dan mendominasi proses ionisasi dan eksitasi. Radiasi β memiliki daya tembus lebih tinggi dan selain ionisasi serta eksitasi, juga dapat menghasilkan radiasi bremsstrahlung saat dibelokkan oleh inti atom. Radiasi γ dan sinar-X, dengan daya tembus tinggi, berinteraksi melalui efek fotolistrik, hamburan

Compton, dan produksi pasangan, tergantung energi fotonnya dan nomor atom material penyerap. Radiasi neutron, meski tidak bermuatan, berinteraksi melalui tumbukan elastik dan tak elastik dengan inti atom, menyerap energi neutron hingga habis, atau menghasilkan reaksi inti seperti aktivasi neutron. Material dengan atom ringan seperti hidrogen efektif sebagai moderator neutron, sementara bahan berat seperti timah hitam digunakan untuk menahan radiasi γ yang dihasilkan. Besaran fisik terdiri dari paparan (X), kerma (K), dan dosis serap (D). Sedangkan besaran proteksi terdiri dari dosis serap organ (D_T), dosis ekuivalen (H_T), dan dosis efektif.

Alat Ukur Radiasi memberi informasi mengenai dosis atau laju dosis atau laju cacah dan diklasifikasikan menjadi tiga yaitu monitor area, monitor kontaminasi dan dosimeter perorangan. Monitor area dibedakan menjadi monitor area yang bersifat portabel, disebut Surveimeter dan monitor area yang bersifat menetap (*stationary*). Surveimeter digunakan untuk mengukur tingkat radiasi (laju dosis/laju paparan) di tempat kerja, sedangkan monitor area yang bersifat menetap (*stationary*) untuk mengukur tingkat dosis radiasi suatu lokasi tertentu secara terus menerus. Langkah penting dalam menggunakan surveimeter meliputi: a. Memeriksa sertifikat kalibrasi; b. Memeriksa baterai; dan c. Mempelajari pengoperasian dan pembacaan. Dosimeter perorangan berfungsi untuk “mencatat” dosis radiasi yang telah mengenai seorang pekerja radiasi secara akumulasi. Berdasarkan jenis, sumber energi yang digunakan untuk membaca dosimeter dibagi menjadi dua yaitu dapat berupa panas yang disebut *thermoluminescence dosemeter* (TLD) atau ultraviolet yang disebut *radiophotoluminescence dosemeter* (RPLD).

Radiasi pengion berpotensi memberikan efek stokastik dan efek deterministik terhadap manusia. efek stokastik adalah efek yang muncul akibat perubahan sifat dari sel, contohnya kanker. efek deterministik adalah efek yang muncul akibat paparan radiasi akut dengan sejumlah dosis sehingga menimbulkan kematian sel. contoh dari efek deterministik adalah sterilitas sementara atau permanen, luka bakar pada kulit dan katarak.

G. Evaluasi

1. Pernyataan yang benar untuk surveimeter yang digunakan untuk pemantauan daerah kerja adalah
 - A. Dapat memantau segala jenis radiasi yang datang secara akurat
 - B. Respon energi harus sesuai dengan energi peralatan sumber radiasi yang digunakan
 - C. Tidak perlu dikalibrasi apabila peralatan tidak menunjukkan kerusakan/ masih baru
 - D. Tidak diperlukan, apabila pekerja radiasi sudah menggunakan pemantauan dosis perorangan

Jawaban: B

2. Memilih alat pemantau dosis perorangan tidak mudah Persyaratan yang harus dipenuhi agar alat tersebut dapat berfungsi optimal adalah
 - A. Respon dosis tergantung pada energi radiasi
 - B. Harus mampu mengukur dosis dari 10 mSv hingga 5 Sv
 - C. Respon dosis tidak tergantung pada energi radiasi
 - D. Responnya dapat dipengaruhi oleh bahan kimia, temperatur, kelembaban dan lain-lain

Jawaban: C

3. Langkah yang harus dilakukan sebelum menggunakan surveimeter, KECUALI:
 - A. Memeriksa sertifikat kalibrasi
 - B. Memeriksa baterai dan cek respon
 - C. Memeriksa merk surveimeter
 - D. Mempelajari pengoperasian dan pembacaannya

Jawaban: C

5. Pengukuran intensitas percikan cahaya untuk mengukur dosis radiasi yang diterima oleh seorang pekerja radiasi, dilakukan pada monitor perorangan jenis
 - A. TLD
 - B. Surveimeter

C. Dosimeter saku

D. Jawaban a, b dan c benar

Jawaban: A

MATERI POKOK 3:

UPAYA PROTEKSI DAN KESELAMATAN RADIASI

Indikator Hasil Belajar:

Peserta mampu menjelaskan upaya proteksi dan keselamatan radiasi dengan benar.

Tindakan proteksi radiasi dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi pengaruh radiasi yang merusak akibat Paparan Radiasi. Dimana paparan radiasi ini memiliki potensi bahaya yang harus dikendalikan. Paparan radiasi sesuai dengan peraturan dikelompokkan menjadi beberapa jenis.

A. Paparan Radiasi dan Potensi Bahaya Radiasi

Secara umum radiasi dikelompokkan menjadi 2 jenis yaitu radiasi pengion dan radiasi non-pengion. Radiasi pengion merupakan radiasi yang dapat menimbulkan efek terhadap peronel karena kemampuan radiasi tersebut untuk merusak sel atau jaringan tubuh. Radiasi pengion tersebut dapat menimbulkan paparan radiasi yaitu penyinaran radiasi yang diterima oleh manusia atau materi, baik disengaja atau tidak, yang berasal dari radiasi internal maupun eksternal. Di dalam pemanfaatan radiasi pengion paparan radiasi dikelompokkan menjadi beberapa jenis. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 45 tahun 2023 jenis paparan radiasi antara lain sebagai berikut:

1. Paparan Terencana adalah kondisi adanya paparan dari Sumber Radiasi Pengion yang berasal dari pengoperasian atau kegiatan yang telah direncanakan sebelumnya.
2. Paparan Darurat adalah kondisi adanya paparan dari Sumber Radiasi Pengion sebagai akibat kecelakaan, tindak kejahatan, atau kejadian lain yang tidak direncanakan yang mengakibatkan paparan berlebih.
3. Paparan Eksisting adalah kondisi adanya paparan Radiasi Pengion yang telah ada sebelum dan pada saat ditetapkan tindakan pengendalian.

4. Paparan Kerja adalah paparan Radiasi Pengion yang diterima oleh pekerja selama menjalankan pekerjaannya.
5. Paparan Medik adalah paparan yang diterima oleh pasien akibat diagnosis atau pengobatan medik, pendamping pasien, dan sukarelawan uji klinis dalam program penelitian biomedik.
6. Paparan Publik adalah paparan yang diterima oleh anggota masyarakat dari Sumber Radiasi Pengion dalam Paparan Terencana, Paparan Darurat, dan Paparan Eksisting.

Paparan radiasi diatas dapat memberikan potensi bahaya radiasi baik potensi bahaya eksternal maupun potensi bahaya internal berdasarkan jenis sumber radiasinya. Penggolongan jenis sumber radiasi eksternal dan internal sebagai berikut:

1. Sumber Radiasi Eksternal

Sumber radiasi eksternal mempunyai potensi bahaya radiasi yang tergantung pada jenis radiasi yang mempunyai daya ionisasi dan daya tembusnya yang berbeda-beda. Untuk sumber radiasi eksternal, daya tembus radiasi memiliki peranan yang menentukan potensi bahaya radiasi eksternal. Sumber radiasi alpha memiliki daya tembus relatif kecil sehingga jangkauannya di udara sangat pendek (beberapa cm) dan dianggap tidak memiliki potensi bahaya eksternal arena tidak dapat menembus lapisan kulit luar manusia.

Sumber radiasi beta memiliki daya tembus relatif besar daripada alpha. Radiasi beta yang berenergi tinggi mampu menjangkau beberapa meter di udara dan dapat menembus lapisan kulit sedalam beberapa mm. Sebagai contoh sumber radiasi beta berenergi sekitar 1 MeV mampu menembus kulit sampai 5 mm. Oleh karena itu, sumber radiasi beta memiliki potensi bahaya radiasi eksternal relatif kecil.

Radiasi sinar-X dan sinar gamma memiliki daya tembus sangat besar sehingga bisa mencapai kulit dan bahkan menembus tubuh manusia sehingga mempunyai potensi bahaya radiasi eksternal yang signifikan.

Neutron juga memiliki daya tembus yang sangat besar seperti sinar-X dan sinar gamma. Selain itu neutron melepaskan energi secara efektif di dalam tubuh, sehingga neutron memiliki potensi bahaya radiasi eksternal yang tinggi. Tabel 4 menunjukkan tingkat bahaya radiasi eksternal berbagai jenis radiasi.

Tabel 4. Bahaya relatif radiasi eksternal berbagai jenis radiasi

Jenis Radiasi	Bahaya Relatif Radiasi Eksternal
Alpha	Sangat Kecil
Beta	Kecil
Sinar-X	Besar
Gamma	Besar
Neutron	Sangat Besar

(sumber: <https://chem.libretexts.org>)

2. Sumber Radiasi Internal

Sumber radiasi internal mempunyai potensi bahaya apabila sumber radiasi terbuka dan terbungkus menimbulkan kontaminasi. Dimana kontaminasi merupakan keberadaan suatu zat radioaktif pada tempat atau daerah yang tidak seharusnya dan dapat menimbulkan bahaya radiasi eksternal dan internal.

Kontaminasi dapat terjadi pada peralatan, ruang kerja (meja, lantai, dinding, dll), dan pada pekerja. Kontaminan (bahan pengkontaminasi) ada yang dapat melekat kuat pada permukaan tertentu (*fixed contamination*) atau mudah berpindah (*removable contamination*). Kontaminan yang mudah berpindah baik sebagai kontaminan permukaan atau kontaminan udara mempunyai potensi bahaya radiasi internal lebih tinggi karena zat radioaktif tersebut lebih mudah masuk ke dalam tubuh.

Potensi bahaya radiasi internal tergantung pada daya ionisasi radiasi yang dipancarkan oleh zat radioaktif dalam tubuh. Sumber radiasi alpha mempunyai potensi bahaya radiasi internal yang besar karena radiasi alpha mempunyai daya ionisasi besar sehingga dapat memindahkan sejumlah besar energi dalam volume yang sangat kecil dari jaringan tubuh dan mengakibatkan kerusakan jaringan di sekitar zat radioaktif.

Sumber radiasi beta mempunyai potensi bahaya radiasi internal yang tingkatnya lebih rendah dibandingkan dengan alpha. Pada umumnya, sumber radiasi beta memiliki jangkauan yang lebih panjang daripada sumber radiasi alpha di dalam tubuh. Oleh karena itu energinya dipindahkan dalam volume jaringan yang lebih besar. Kondisi ini mengurangi keseluruhan efek radiasi pada organ dan jaringan di sekitarnya.

Radiasi gamma mempunyai potensi bahaya radiasi internal yang lebih kecil dibandingkan dengan radiasi beta atau alpha. Hal ini berkaitan dengan daya ionisasi yang rendah dan daya jangkauan yang panjang. Radiasi neutron mempunyai potensi bahaya radiasi internal yang lebih besar dibandingkan dengan radiasi gamma. Hal ini berkaitan dengan pelepasan energi yang lebih besar dalam jaringan. Tabel 5 menunjukkan tingkat bahaya radiasi internal berbagai jenis radiasi.

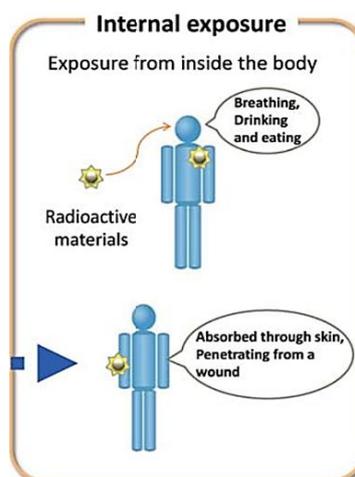
Tabel 5. Bahaya relatif radiasi internal

Jenis Radiasi	Bahaya Relatif Radiasi Internal
Alpha	Tinggi
Beta	Sedang
Gamma	Rendah
Neutron	Sedang - Tinggi

(sumber: <https://chem.libretexts.org>)

Potensi bahaya radiasi internal ini sangat erat kaitannya dengan cara masuknya zat radioaktif ke dalam tubuh. Secara umum cara masuknya zat radioaktif ke dalam tubuh digolongkan menjadi 3 antara lain:

- inhalasi : jalur pernafasan (menghisap udara terkontaminasi)
- ingesti : jalur pencernaan (air atau makanan yang terkontaminasi)
- penyerapan : serapan melalui kulit atau luka terbuka



Gambar 23. Jalur masuk zat radioaktif ke dalam tubuh

(sumber: <https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/2021/02-01-01.html>)

Selain itu hal yang perlu diperhatikan untuk zat radioaktif yang masuk ke dalam tubuh apabila zat radioaktif tersebut mempunyai sifat kimia yang mirip dengan unsur yang diperlukan oleh tubuh, maka zat radioaktif tersebut akan berperilaku sama di dalam tubuh. Misalnya, ^{90}Sr memiliki sifat kimia yang mirip dengan kalsium, sehingga ^{90}Sr dapat terakumulasi di dalam tulang sebagai organ kritis. Dimana organ kritis merupakan organ yang paling banyak mengakumulasi zat radioaktif tertentu. Tabel 6 menyajikan contoh organ kritis untuk berbagai jenis sumber radiasi.

Untuk mempercepat pengeluaran zat radioaktif yang ada di dalam tubuh, dibantu dengan suatu bahan yang dapat menyerap dan mempercepat pengeluaran zat radioaktif sehingga waktu paro biologinya menjadi relative lebih singkat, yang disebut prinsip decorporasi.

Tabel 6. Organ kritis untuk sumber radiasi

Radionuklida (sumber radiasi)	Organ kritis
^{131}I	Tiroid
^{90}Sr	Tulang
^{137}Cs	Otot
^{192}Ir	Jaringan lunak

(sumber: <https://www.britannica.com/science/radiation/Accumulation-in-critical-organs>)

B. Persyaratan Proteksi Radiasi dan Penerapannya

1. Persyaratan Proteksi Radiasi

Dengan adanya potensi bahaya yang ditimbulkan oleh sumber radiasi baik eksternal maupun internal maka perlu dilakukan upaya perlindungan terhadap personel pekerja radiasi, masyarakat maupun lingkungan dengan melakukan usaha proteksi radiasi untuk mewujudkan keselamatan radiasi. Adapun tujuan keselamatan radiasi adalah mencegah terjadinya efek deterministik (tertentu) dari radiasi yang membahayakan seseorang dan membatasi peluang terjadinya efek stokastik atau risiko akibat pemakaian radiasi yang dapat diterima oleh seseorang atau masyarakat. Adapun persyaratan proteksi radiasi meliputi justifikasi, limitasi dan optimisasi.

a. Justifikasi

Berdasarkan peraturan kepala BAPETEN No. 4 tahun 2013 tentang proteksi dan keselamatan radiasi dalam pemanfaatan radiasi pengion, setiap orang atau badan yang melaksanakan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memenuhi prinsip justifikasi pemanfaatan tenaga nuklir. Justifikasi harus didasarkan pada manfaat yang diperoleh lebih besar daripada risiko yang ditimbulkan. Justifikasi diberlakukan dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang meliputi:

- 1) adanya penerapan teknologi lain dimana risiko yang ditimbulkan lebih kecil daripada jenis pemanfaatan tenaga nuklir yang sudah ada sebelumnya;
- 2) ekonomi dan sosial;
- 3) kesehatan dan keselamatan; dan
- 4) pengelolaan limbah radioaktif dan proses dekomisioning

b. Limitasi

Adapun penerapan limitasi dalam proteksi radiasi dilakukan dengan memenuhi ketentuan nilai batas dosis (NBD) yang telah ditetapkan di Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 tahun 2013. Nilai Batas Dosis adalah dosis terbesar yang diizinkan oleh BAPETEN yang dapat diterima oleh pekerja radiasi dan anggota Masyarakat dalam jangka waktu tertentu tanpa menimbulkan efek genetik dan somatik yang berarti akibat pemanfaatan tenaga nuklir. Limitasi dosis wajib diberlakukan untuk paparan kerja dan paparan masyarakat melalui penerapan nilai batas dosis (NBD) yang ditetapkan oleh Bapeten dan tidak boleh dilampaui, kecuali dalam kondisi khusus. Limitasi dosis tidak berlaku untuk paparan medik dan paparan yang berasal dari alam. NBD yang ditetapkan meliputi penyinaran seluruh tubuh dan penyinaran terhadap organ atau jaringan tubuh tertentu. NBD pekerja radiasi untuk penyinaran seluruh tubuh ditetapkan dengan ketentuan :

- 1) dosis efektif rata-rata sebesar 20 mSv pertahun dalam periode 5 tahun, sehingga dosis yang terakumulasi dalam 5 tahun tidak boleh melebihi 100 mSv;
- 2) dosis efektif sebesar 50 mSv dalam 1 tahun tertentu.

NBD pekerja radiasi untuk penyinaran terhadap organ atau jaringan tubuh tertentu ditetapkan dengan ketentuan:

- a) dosis ekuivalen untuk lensa mata sebesar 20 mSv pertahun dalam periode 5 tahun, dan 50 mSv dalam satu tahun tertentu;
- b) dosis ekuivalen untuk kulit sebesar 500 mSv pertahun.; dan
- c) dosis ekuivalen untuk tangan atau kaki sebesar 500 mSv pertahun.

Dalam hal Pekerja Radiasi menerima dosis melebihi 20 mSv dalam 1 tahun maka Pemegang Izin harus mengkaji ulang Paparan Radiasi dan mengambil langkah korektif yang perlu dan melaporkan kejadian tersebut kepada BAPETEN.

NBD bagi magang untuk pelatihan kerja, pelajar, atau mahasiswa yang berumur 16 (enam belas) tahun sampai dengan 18 (delapan belas) tahun untuk penyinaran seluruh tubuh ditetapkan dengan ketentuan dosis efektif sebesar 6 mSv (enam milisievert) pertahun, sedang untuk penyinaran terhadap organ atau jaringan tubuh tertentu ditetapkan dengan ketentuan:

- a) dosis ekuivalen untuk lensa mata sebesar 50 mSv (limapuluh milisievert) pertahun;
- b) dosis ekuivalen untuk kulit sebesar 150 mSv (seratus lima puluh milisievert) pertahun.; dan
- c) dosis ekuivalen untuk tangan atau kaki sebesar 150 mSv (seratus limapuluh milisievert) pertahun.

Dalam hal magang untuk pelatihan kerja, pelajar, atau mahasiswa yang berumur di atas 18 (delapanbelas) tahun, diberlakukan Nilai Batas Dosis sama dengan Nilai Batas Dosis yang ditetapkan untuk Pekerja Radiasi. NBD masyarakat untuk penyinaran seluruh tubuh ditetapkan dengan ketentuan dosis efektif sebesar 1 mSv (satu milisievert) pertahun, sedang untuk penyinaran terhadap organ atau jaringan tubuh tertentu ditetapkan dengan ketentuan:

- a) dosis ekuivalen untuk lensa mata sebesar 15 mSv (lima belas milisievert) pertahun;
- b) dosis ekuivalen untuk kulit sebesar 50 mSv (lima puluh milisievert) pertahun.

Setiap pemegang izin harus menjamin kontribusi penyinaran yang berasal dari instalasinya pada anggota masyarakat secara keseluruhan serendah

mungkin dan harus dikaji ulang dan dilaporkan secara teratur pada instansi yang berwenang (BAPETEN). Nilai batas dosis seperti yang telah ditetapkan dengan Perka Bapeten No. 4 Tahun 2013 tersebut mencakup dosis eksternal dan dosis internal. Untuk memastikan NBD bagi pekerja dan masyarakat tidak terlampaui, pemegang izin wajib melakukan:

- a) pembagian daerah kerja;
- b) pemantauan paparan radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja;
- c) pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas atau instalasi; dan
- d) pemantauan dosis yang diterima pekerja.

Pembagian daerah kerja harus berdasarkan tingkat radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif dan harus dicantumkan secara jelas di dalam Program Proteksi Radiasi yang berlaku di fasilitas atau instalasi Pemegang Izin. Berdasarkan Peraturan Kepala Bapeten No. 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir, pembagian daerah kerja terdiri atas :

- a) daerah pengendalian adalah daerah kerja yang memiliki potensi penerimaan radiasi melebihi 3/10 NBD pekerja radiasi dan adanya potensi kontaminasi sehingga memerlukan tindakan proteksi ketentuan keselamatan khusus untuk mengendalikan Paparan Normal atau mencegah penyebaran kontaminasi selama kondisi kerja normal dan untuk mencegah atau membatasi tingkat Paparan Potensial.
- b) daerah supervisi, adalah daerah kerja di luar Daerah Pengendalian yang memiliki potensi penerimaan radiasi kurang dari 3/10 NBD pekerja radiasi dan bebas kontaminasi memerlukan peninjauan terhadap Paparan Kerja dan tidak memerlukan tindakan proteksi atau ketentuan keselamatan khusus.

Dalam menetapkan daerah pengendalian harus mempertimbangkan besarnya paparan normal serta probabilitas dan besarnya paparan potensial, sehingga dapat menentukan tindakan proteksi dan keselamatan khusus yang diperlukan untuk bekerja di daerah pengendalian. Sedang dalam menetapkan daerah supervisi harus mempertimbangkan sifat dan besarnya

bahaya radiasi. Tindakan proteksi dan keselamatan khusus di daerah pengendalian meliputi:

- a) menandai dan membatasi daerah pengendalian yang ditetapkan dengan tanda fisik yang jelas atau tanda lain yang sesuai dengan kondisi Daerah Pengendalian yang ditetapkan;
- b) memasang atau menempatkan tanda peringatan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia atau standar internasional dan petunjuk pada titik akses dan lokasi lain yang dianggap perlu di dalam daerah pengendalian;
- c) membatasi akses ke daerah pengendalian hanya untuk pekerja radiasi dan melakukan pendampingan terhadap pengunjung oleh Petugas Proteksi Radiasi;
- d) menyediakan peralatan pemantauan, peralatan protektif radiasi, dan tempat penyimpanan pakaian di pintu masuk daerah pengendalian;
- e) menyediakan sarana pada pintu keluar daerah pengendalian, yang meliputi: peralatan pemantauan kontaminasi kulit dan pakaian serta peralatan pemantau kontaminasi terhadap benda atau zat yang dipindahkan dari daerah pengendalian;
- f) melakukan kaji ulang radiologik secara berkala sesuai dengan pemanfaatan tenaga nuklir apabila ada indikasi perlunya perubahan terhadap: Tindakan proteksi dan keselamatan khusus atau batas daerah pengendalian.

Adapun tindakan proteksi radiasi di daerah supervisi dilakukan dengan:

- a) menandai dan membatasi daerah supervisi yang ditetapkan dengan tanda yang jelas;
- b) memasang tanda di titik akses masuk daerah supervisi; dan
- c) melakukan kaji ulang radiologik secara berkala sesuai dengan pemanfaatan tenaga nuklir apabila ada indikasi perlunya perubahan terhadap: tindakan proteksi dan keselamatan; atau batas daerah supervisi.

Pemegang Izin wajib melaksanakan pemantauan paparan radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja maupun radioaktivitas lingkungan secara terus menerus, berkala dan/atau sewaktu-waktu sesuai dengan jenis sumber yang digunakan dan dituangkan dalam program proteksi radiasi.

Tingkat radioaktivitas lingkungan tidak boleh melebihi nilai batas radioaktivitas lingkungan yang ditentukan oleh BAPETEN. Zat radioaktif yang berasal dari fasilitas atau instalasinya dapat langsung dilepas ke lingkungan, jika telah mencapai tingkat aman (klirens).

Pemegang izin wajib melaksanakan pemantauan dosis pekerja. Hasil pemantauan dosis tersebut harus dievaluasi oleh laboratorium dosimetri yang terakreditasi, kemudian disampaikan kepada pemegang izin dan BAPETEN.

Pemegang izin wajib memberitahukan kepada pekerja mengenai hasil evaluasi pemantauan dosis tersebut dan bila menunjukkan dosis yang signifikan atau melebihi NBD maka pemegang izin wajib melakukan tindak lanjut. Hasil pemantauan dosis pekerja harus disimpan dan dipelihara paling singkat sampai pekerja radiasi berusia 75 (tujuh puluh lima) tahun dan paling singkat 30 (tiga puluh) tahun terhitung sejak pekerja radiasi yang bersangkutan berhenti bekerja.

Pemegang izin wajib menyediakan perlengkapan proteksi radiasi yang meliputi:

- a) peralatan pemantau tingkat radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja;
- b) peralatan pemantau dosis perorangan;
- c) peralatan pemantau radioaktivitas lingkungan; dan/atau
- d) peralatan protektif radiasi.

Perlengkapan proteksi radiasi tersebut harus berfungsi dengan baik sesuai dengan jenis sumber dan energi yang digunakan. Agar perlengkapan tersebut mempunyai unjuk kerja yang baik maka pemegang izin wajib melakukan kalibrasi terhadap perlengkapan proteksi radiasi. Kalibrasi perlengkapan proteksi radiasi dan peralatan dilaksanakan secara berkala dan/atau sewaktu-waktu oleh laboratorium kalibrasi yang terakreditasi.

c. Optimisasi

Optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi penyinaran harus diusahakan serendah-rendahnya yang memenuhi kelayakan dengan prinsip *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA), dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial. Kegiatan harus direncanakan dan sumber radiasi harus

dirancang dan dioperasikan dengan menjamin penyinaran radiasi yang serendah-rendahnya. Besarnya dosis harus lebih kecil dari nilai batas dosis (NBD). Penerapan optimisasi dilaksanakan melalui penetapan :

- 1) pembatas dosis dan/ atau
- 2) tingkat panduan untuk paparan medik.

Penetapan Pembatas Dosis ditentukan oleh pemegang izin setelah mendapat persetujuan dari Kepala BAPETEN dan dilaksanakan pada:

- 1) tahap konstruksi untuk fasilitas atau instalasi baru; dan/atau
- 2) tahap operasi, dan dekomisioning atau penutupan untuk fasilitas atau instalasi yang sudah beroperasi.

Penentuan pembatas dosis tidak boleh melampaui NBD, dan diberlakukan apabila :

- 1) terdapat lebih dari satu fasilitas atau instalasi di satu Kawasan
- 2) personil bekerja lebih dari satu fasilitas atau instalasi.

Nilai pembatas dosis untuk anggota Masyarakat ditentukan oleh BAPETEN yaitu sebesar 0,3 mSv dalam satu tahun.

Untuk pemanfaatan radiasi di bidang medis, optimisasi dilakukan dengan penetapan tingkat panduan hanya diperuntukkan bagi paparan medik dalam radiologi diagnostik dan intervensional, serta kedokteran nuklir. Tidak diperuntukkan bagi paparan medik dalam radioterapi. Tingkat panduan untuk paparan medik ditetapkan oleh Kepala BAPETEN berdasarkan Standar Nasional Indonesia yang berlaku. Bila Standar Nasional Indonesia belum tersedia, BAPETEN dapat menetapkan tingkat panduan berdasarkan standar internasional.

2. Penerapan Proteksi Radiasi

Penerapan proteksi radiasi berdasarkan potensi bahaya radiasi yang ada dikelompokkan menjadi 2 antara lain proteksi radiasi eksternal dan proteksi radiasi internal.

a. Proteksi Radiasi Eksternal

Dalam pemanfaatan sumber radiasi untuk meminimalkan bahaya radiasi perlu dilakukan pemilihan jenis dan aktivitas sumber radiasi yang memadai, pengendalian arah berkas sumber radiasi, dan penyimpanan sumber radiasi pada saat tidak digunakan, yang disebut juga pengendalian sumber radiasi.

Pengendalian radiasi eksternal dapat dilakukan dengan memperhatikan waktu, jarak, dan penahan radiasi.

1) Waktu

Waktu adalah salah satu faktor untuk mengurangi penerimaan dosis. Dengan mengurangi waktu bekerja dengan radiasi, dosis yang diterima dapat diminimalkan, apabila waktu penyinaran lebih singkat, maka dosis total yang diterima semakin kecil.

$$D = \dot{D} \times t \quad (17)$$

D adalah dosis serap yang diterima, \dot{D} adalah laju dosis serap, t adalah waktu penyinaran.

2) Jarak

Laju dosis berbanding terbalik dengan kuadrat jarak (hukum kuadrat terbalik). Semakin besar jarak dari sumber radiasi, laju dosis di tempat tersebut semakin berkurang.

$$\dot{D}_1 \cdot r_1^2 = \dot{D}_2 \cdot r_2^2 \quad (18)$$

\dot{D} adalah laju dosis serap pada jarak tertentu, dan r adalah jarak pengukuran terhadap sumber.

3) Penahan

Laju dosis dapat dikurangi dengan memasang penahan radiasi di antara sumber radiasi dengan pekerja radiasi. Dengan cara ini maka pekerja radiasi dapat bekerja pada jarak yang tidak terlalu jauh dari sumber radiasi dengan dosis yang tidak melebihi batas yang ditetapkan. Laju dosis sinar-X atau gamma setelah melalui perisai dinyatakan sebagai :

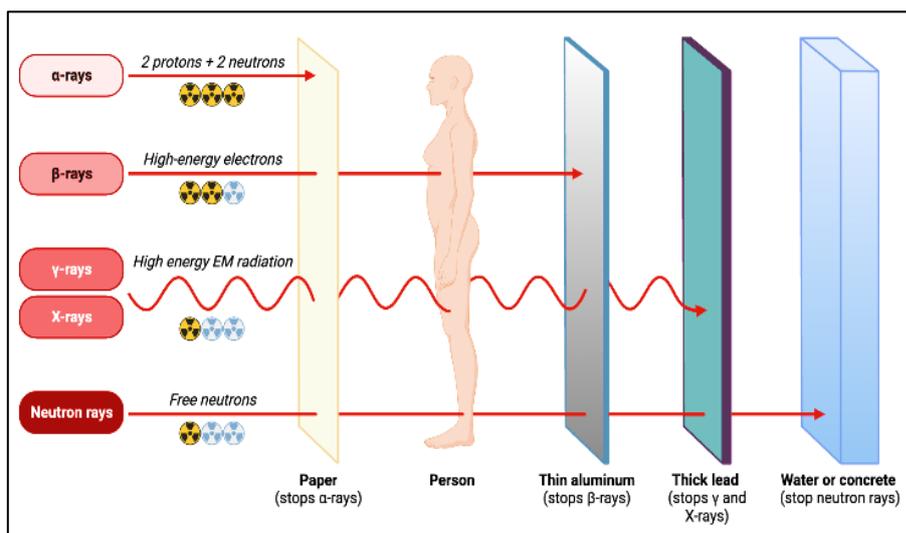
$$I_t = I_0 e^{-\mu t} \quad (19)$$

Dengan I_0 adalah laju dosis serap tanpa penahan dan I_t adalah laju dosis setelah melalui perisai setebal t , μ (mm^{-1}) adalah koefisien absorpsi linier dari bahan perisai, x adalah tebal penahan.

Tebal dan jenis bahan penahan yang diperlukan tergantung pada:

- a) jenis dan energi radiasi,
- b) aktivitas sumber,
- c) laju dosis yang diinginkan setelah radiasi menembus penahan.

Gambar 23 mendiskripsikan daya tembus radiasi terhadap berbagai bahan yang dapat digunakan sebagai referensi untuk menentukan jenis bahan yang akan digunakan sebagai penahan radiasi pengion.



Gambar 24. Daya tembus radiasi untuk berbagai bahan penahan (sumber: <https://www.biorender.com/template/penetrating-power-of-radiations>)

Tabel 7 menyajikan beberapa bahan yang direkomendasikan untuk digunakan sebagai penahan berdasarkan jenis radiasi.

Tabel 7. Bahan penahan yang direkomendasikan

Jenis radiasi	Bahan yang direkomendasikan
Sumber radiasi alpha	Tidak perlu penahan
Sumber radiasi beta energi rendah	Bahan bernomor atom rendah (perspeks, alumunium)
Sumber radiasi beta energi tinggi	Bahan bernomor atom rendah dan tinggi (Perspeks dikelilingi timbal)
Sinar-X dan sinar gamma	Bahan bernomor atom tinggi (Beton, besi, dan timbal)
Neutron	Bahan dengan kandungan Hidrogen tinggi (Beton, air, polietilen, parafin dikombinasikan dengan boron)

(sumber: radiation shielding, Office for Nuclear Regulation - ONR)

b. Proteksi Radiasi Internal

Berdasarkan potensi jalur masuknya zat radioaktif ke dalam tubuh melalui inhalasi, ingesti dan penyerapan, maka pengendalian bahaya radiasi internal dilakukan dengan cara memblokir ketiga jalan masuk zat radioaktif ke dalam

tubuh dan membatasi penyebaran zat radioaktif dari sumber kepada pekerja. Penerapan proteksi radiasi internal dapat dilakukan melalui upaya sebagai berikut:

- 1) Pengendalian Sumber Radiasi;
- 2) Pengendalian Lingkungan Kerja; dan
- 3) Pengendalian Pekerja Radiasi: Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD).

Pengendalian Sumber Radiasi

Dengan cara menutup dan mengungkung sumber radiasi, misalnya:

- 1) pembatasan zat radioaktif yang akan ditangani sesuai kebutuhan
- 2) pembatasan penyebaran sumber radiasi (kontaminasi), misalnya menggunakan nampan atau wadah, lemari asam atau *glove box*.

Pengendalian Lingkungan Kerja

Pengendalian lingkungan terhadap bahaya kontaminasi radioaktif secara awal dapat dilakukan dengan mendesain gedung, ruangan, atau fasilitas fisik, pemantauan kontaminasi, dan dekontaminasi.

- 1) Desain gedung, ruangan atau fasilitas fisik

Desain gedung, ruangan atau fasilitas fisik harus mempertimbangkan potensi terjadinya kontaminasi, oleh karena itu harus dilakukan pembagian daerah kerja. Permukaan tempat kerja, lantai, dinding harus mudah didekontaminasi. Selain itu sistem ventilasi, sanitasi, dan fasilitas pendukung seperti penyimpanan limbah radioaktif, fasilitas penyimpanan zat radioaktif, ruang ganti, dan *shower* harus disesuaikan dengan persyaratan fasilitas atau laboratorium.

- 2) Pemantauan kontaminasi

Pemantauan kontaminasi dilakukan untuk memastikan Tingkat kontaminasi tidak melebihi nilai batas yang ditentukan. Pemantauan kontaminasi dapat dilakukan dengan 2 (dua) metode, yaitu metode langsung dan tidak langsung. Pemantauan secara langsung dapat diterapkan dalam medan radiasi rendah, biasanya untuk mengetahui kontaminasi permukaan bahan, pakaian, dan kulit.

Pemantauan secara tidak langsung dengan cara uji usap diterapkan apabila laju dosis latar belakang tinggi, akan mengidentifikasi

kontaminasi radioaktif secara akurat, geometri pengukuran tidak cocok, memantau kontaminasi beta energi rendah, dan permukaan yang akan dipantau tidak dapat diakses dengan *probe* pemantau kontaminasi.

3) Dekontaminasi

Dekontaminasi merupakan proses menghilangkan atau mengurangi kontaminasi zat radioaktif dalam bahan menggunakan cara fisika dan atau kimia. dekontaminasi cara fisika dapat dilakukan dengan proses pencucian, penyemprotan, pengerokan, dan pengelupasan. Dekontaminasi secara kimia dapat dilakukan dengan proses kimia antara lain pengendapan dan pelarutan.

Proses dekontaminasi dikelompokkan menjadi dekontaminasi daerah kerja, peralatan, dan personil. Dekontaminasi personil dilakukan dengan proses decorporasi. Sebagai contoh pemakaian *Prussian Blue* untuk mempercepat pengeluaran Cesium di dalam tubuh, atau meminum air sebanyak mungkin untuk mengeluarkan kontaminan Tritium (HTO), atau meminum Potassium Iodid (KI), atau larutan Lugol untuk memblokir pengendapan Iodin radioaktif (^{131}I) pada tiroid.

Proses dekontaminasi dilakukan dengan mempertimbangkan jenis kontaminan dan bahan yang terkontaminasi. Proses dekontaminasi dilakukan dengan prinsip tidak terjadi penyebaran kontaminasi. Adapun tujuan proses dekontaminasi adalah:

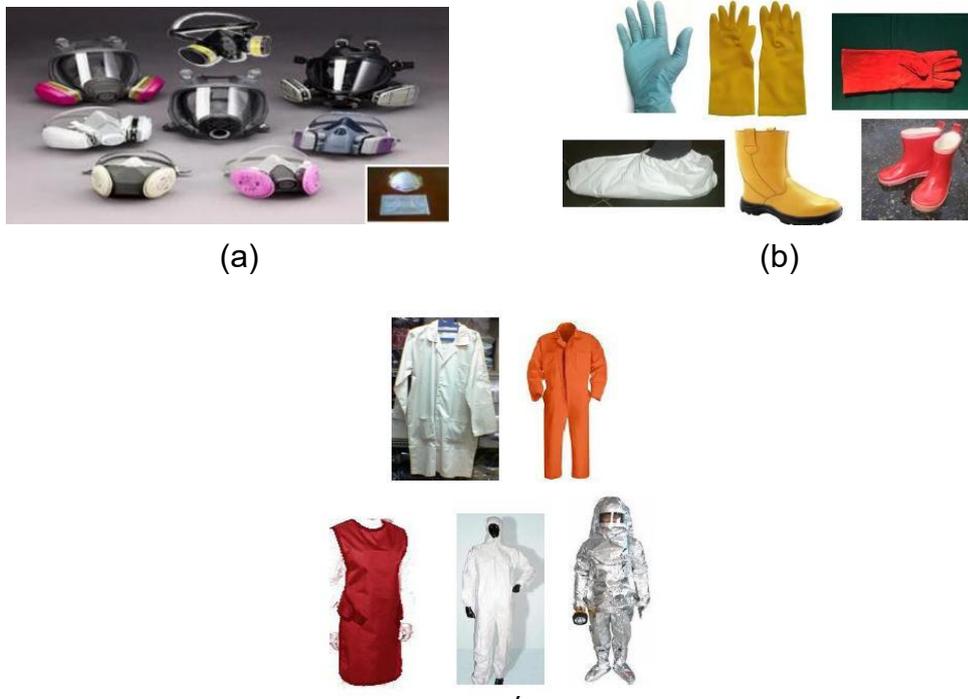
- a) faktor keselamatan dan kesehatan;
- b) mengurangi interferensi pencacahan peralatan tertentu sehingga didapat hasil pencacahan yang baik;
- c) memperkecil tingkat kontaminasi suatu alat sehingga layak dipakai lagi.

Dalam pengelolaan daerah kontaminasi harus diterapkan prinsip ALARA, dengan melakukan dekontaminasi sampai diperoleh tingkat kontaminasi serendah mungkin yang secara ekonomis bisa dilakukan.

Pengendalian Pekerja Radiasi: Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)

Alat pelindung diri digunakan untuk menutup jalan masuk zat radioaktif ke dalam tubuh, yang terdiri dari peralatan pelindung pernafasan dan pakaian pelindung.

Peralatan pelindung pernafasan digunakan untuk mencegah masuknya udara yang terkontaminasi, meliputi *air purifying respiratory (half face mask, full face mask, hood mask)* dan *air supplying respiratory*. Pakaian pelindung digunakan untuk mencegah kontaminasi pada kulit, meliputi baju laboratorium, *coveralls*, penutup kepala, sarung tangan, alas kaki khusus, atau *shoe cover*.



Gambar 25. (a) contoh respirator tanpa supply udara, (b) alat pelindung tangan dan kaki, (c) berbagai jenis pakaian pelindung

(Sumber SB 016 BATAN, Proteksi dan Keselamatan Radiasi, 2014)

C. Hak dan Kewajiban Pekerja Radiasi

Sesuai dengan ketentuan Peraturan Pemerintah Nomor 45 tahun 2023, pekerja radiasi adalah setiap orang yang bekerja dengan sumber radiasi pengion dan diperkirakan dapat menerima dosis tahunan melebihi Nilai Batas Dosis (NBD) untuk anggota masyarakat serta menerima upah atau imbalan dalam bentuk lain. Di dalam pemanfaatan tenaga nuklir pekerja radiasi memiliki hak dan kewajiban

terkait dengan pekerjaannya. Pemegang ijin wajib memenuhi hak pekerja radiasi antara lain pemenuhan alat dan perlengkapan keselamatan dan proteksi radiasi, pemantauan dosis radiasi, kompensasi sesuai kemampuan organisasi, Pendidikan dan pelatihan serta pemeriksaan Kesehatan rutin sebagaimana diatur dalam Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2010. Selain hak tersebut Pekerja Radiasi memiliki tanggung jawab dan kewajiban terkait keselamatan radiasi di daerah kerjanya antara lain sebagai berikut:

1. mematuhi prosedur operasi;
2. mengikuti pemantauan kesehatan dan pemantauan dosis perorangan;
3. mengikuti pendidikan dan pelatihan untuk meningkatkan kemampuan dan pemahaman dalam Proteksi dan Keselamatan Radiasi;
4. menggunakan peralatan pemantau dosis perorangan dan peralatan protektif radiasi sesuai dengan Pemanfaatan Tenaga Nuklir;
5. menginformasikan kepada Pemegang Izin tentang riwayat pekerjaan terdahulu dan terkini yang berhubungan dengan radiasi; dan
6. menyampaikan masukan kepada Petugas Proteksi Radiasi mengenai kendala dan situasi yang mempengaruhi pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi.

Selain kewajiban pekerja radiasi tersebut Pemegang Ijin wajib melakukan pemantauan dosis personel, penyelenggaraan Pendidikan dan Pelatihan serta Pemantauan Kesehatan pekerja radiasi dengan ketentuan sebagai berikut:

Pemantauan dosis personel (Pekerja Radiasi)

Pemegang Izin wajib melakukan pemantauan dosis terhadap seluruh Pekerja Radiasi yang bekerja di daerah kerja. Hasil pemantauan dosis wajib dievaluasi oleh Laboratorium Dosimetri yang telah memperoleh penunjukan dari Kepala Badan atau Laboratorium Dosimetri yang terakreditasi oleh Lembaga Akreditasi negara lain yang telah menjadi penanda tangan perjanjian saling pengakuan (*Mutual Recognition Arrangement*) di tingkat regional atau internasional, dimana Laboratorium Dosimetri harus menyampaikan hasil evaluasi pemantauan dosis kepada Pemegang Izin dan Kepala Badan (BAPETEN).

Pemegang Izin wajib menyimpan dan memelihara rekaman hasil pemantauan dosis dengan ketentuan:

1. paling singkat sampai pekerja radiasi mencapai umur 75 (tujuh puluh lima) tahun; dan
2. paling singkat untuk jangka waktu 30 (tiga puluh) tahun terhitung sejak pekerja radiasi berhenti bekerja.

Pendidikan dan Pelatihan

Pemegang Izin wajib meningkatkan kemampuan personil yang bekerja di fasilitas atau instalasi melalui pendidikan dan pelatihan (Diklat) untuk menumbuhkan pemahaman yang memadai tentang tanggung jawab dalam Keselamatan Radiasi dan pentingnya penerapan proteksi radiasi dalam melaksanakan pekerjaan yang terkait dengan radiasi. Diklat tersebut harus disesuaikan dengan:

1. potensi paparan kerja;
2. tingkat pengawasan yang diperlukan;
3. kerumitan pekerjaan yang akan dilaksanakan; dan
4. tingkat pelatihan yang telah diikuti.

Berdasarkan Perka BAPETEN No. 4 Tahun 2013, materi Diklat paling kurang meliputi:

1. peraturan perundang-undangan di bidang ketenaganukliran;
2. Sumber radiasi yang digunakan di daerah kerja;
3. efek biologi radiasi;
4. besaran dan satuan dosis radiasi (dosimetri);
5. prinsip proteksi dan keselamatan radiasi;
6. pemantauan paparan radiasi daerah kerja; dan
7. tindakan dalam keadaan darurat.

Pemantauan Kesehatan

Pemegang izin wajib menyelenggarakan pemantauan kesehatan untuk seluruh pekerja radiasi. Biaya pemantauan kesehatan merupakan tanggungjawab pemegang izin. Pemantauan kesehatan harus dilaksanakan untuk tujuan:

1. menilai kesehatan pekerja radiasi baik dari aspek fisik maupun psikologis;
2. memastikan kesesuaian antara kesehatan pekerja dan kondisi pekerjaannya;

3. memberikan pertimbangan dalam menangani kejadian kontaminasi atau paparan radiasi berlebih pada pekerja radiasi;
4. menyediakan rekaman yang dapat memberikan informasi untuk:
 - a. penanganan kasus paparan kecelakaan atau penyakit akibat kerja;
 - b. evaluasi statistik mengenai penyakit yang mungkin berhubungan dengan kondisi kerja;
 - c. data *medico legal*; dan
 - d. kajian terhadap manajemen proteksi radiasi.

Pemantauan kesehatan dilaksanakan melalui pemeriksaan kesehatan; konseling; dan/ atau penatalaksanaan kesehatan pekerja radiasi yang mendapatkan paparan radiasi berlebih.

Pemeriksaan Kesehatan

Pemeriksaan kesehatan meliputi pemeriksaan kesehatan umum dan pemeriksaan kesehatan khusus. Pemeriksaan kesehatan pekerja radiasi dilakukan minimal 1 (satu) kali dalam 1 (satu) tahun. Pemeriksaan kesehatan umum dilaksanakan pada saat sebelum bekerja, selama bekerja, dan pada saat akan memutuskan hubungan kerja. Pemeriksaan kesehatan umum pada saat sebelum bekerja harus dilaksanakan untuk tujuan:

1. memastikan bahwa kondisi atau status kesehatan pekerja mampu untuk melaksanakan tugas sebagai pekerja radiasi yang dibebankan kepadanya;
2. memberikan informasi tentang data dasar status kesehatan pekerja radiasi sebelum menjalankan tugasnya terkait dengan sumber radiasi; dan
3. mengklasifikasi status kesehatan pekerja radiasi dalam kategori sehat untuk bekerja, sehat untuk bekerja dalam kondisi tertentu dan tidak sehat untuk bekerja.

Pemeriksaan kesehatan umum selama bekerja harus dilaksanakan untuk tujuan memantau kondisi kesehatan pekerja radiasi apakah pekerja tersebut berada dalam kondisi yang sehat untuk tetap melaksanakan tugasnya. Pemeriksaan kesehatan umum pada saat akan memutuskan hubungan kerja harus dilaksanakan untuk tujuan menentukan kondisi kesehatan pekerja radiasi pada saat berhenti bekerja. Pemeriksaan kesehatan umum meliputi :

1. anamnesis;
2. riwayat penyakit dan keluarga;
3. pemeriksaan fisik; dan
4. pemeriksaan laboratorium.

Adapun pemeriksaan kesehatan khusus dilaksanakan pada saat:

1. pekerja radiasi mengalami atau diduga mengalami gejala sakit akibat radiasi (penyakit akibat kerja); dan
2. penatalaksanaan kesehatan pekerja yang mendapatkan paparan radiasi berlebih.

Pemeriksaan kesehatan khusus meliputi:

1. pemeriksaan darah lengkap;
2. pemeriksaan sperma; dan/atau
3. pemeriksaan aberasi kromosom.

Konseling

Konseling dilaksanakan melalui pemeriksaan psikologi; dan/atau konsultasi.

Konseling dapat diberikan kepada pekerja radiasi dengan ketentuan:

1. pekerja wanita yang sedang hamil atau diduga hamil;
2. pekerja wanita yang sedang menyusui;
3. pekerja yang menerima paparan radiasi berlebih; dan
4. pekerja yang berkehendak mengetahui tentang paparan radiasi yang diterimanya.

Penatalaksanaan Kesehatan

Penatalaksanaan kesehatan pekerja radiasi yang mendapatkan paparan radiasi berlebih dilaksanakan melalui:

1. kajian terhadap dosis yang diterima melalui pembacaan dosimeter personel dan/atau evaluasi pemantauan daerah kerja atau rekonstruksi dosis;
2. konseling; dan
3. pemeriksaan kesehatan dan tindak lanjut.

Dalam hal pekerja mendapatkan paparan radiasi berlebih melalui paparan radiasi internal, kajian terhadap dosis yang diterima juga harus dilakukan melalui metode *in vivo* dan *in vitro*. Jika hasil kajian terhadap dosis yang diterima pekerja radiasi menunjukkan nilai dosis melampaui 0,2 Sv (nol koma dua sievert), pekerja radiasi harus mendapatkan pemeriksaan dosimetri biologi yang meliputi:

1. aberasi kromosom pada sel darah;
2. pemeriksaan limfosit absolut; dan
3. pemeriksaan sel darah lengkap.

Pemeriksaan dosimetri biologi harus dilakukan oleh laboratorium yang terakreditasi. Jika hasil kajian terhadap dosis yang diterima pekerja radiasi menunjukkan nilai dosis di atas nilai dosis ambang untuk efek deterministik, Pekerja radiasi harus mendapatkan pemeriksaan dosimetri biologi dan pemeriksaan kesehatan khusus. Pemeriksaan kesehatan dan tindak lanjut dilaksanakan melalui:

1. pemeriksaan kesehatan umum dan pemeriksaan kesehatan khusus; serta
2. tindakan medis yang disesuaikan dengan efek deterministik yang ditimbulkan oleh paparan radiasi berlebih.

Pekerja radiasi yang mendapatkan paparan radiasi berlebih dapat bekerja kembali setelah dinyatakan sehat dalam sertifikat medis. Sertifikat medis paling kurang harus meliputi resume hasil pemeriksaan kesehatan. Pemegang Izin harus membuat rekaman hasil pemantauan kesehatan yang meliputi:

1. hasil pemeriksaan kesehatan;
2. hasil Konseling;
3. hasil kajian terhadap dosis yang diterima;
4. hasil pemeriksaan aberasi kromosom;
5. hasil tindak lanjut; dan/atau
6. sertifikat medis.

Rekaman hasil pemantauan kesehatan harus disimpan dan dipelihara oleh Pemegang Izin hingga 30 tahun sejak tanggal pemberhentian Pekerja Radiasi yang bersangkutan.

D. Pengelolaan Limbah Radioaktif

Pemanfaatan teknologi nuklir tidak dapat lepas dari potensi timbulnya limbah radioaktif. Pengelolaan limbah radioaktif merupakan bagian penting dalam memastikan keselamatan dan kesehatan pekerja radiasi serta melindungi lingkungan dari potensi bahaya radiasi. Oleh karena itu, pengelolaan limbah ini memerlukan prosedur yang ketat, meliputi pengumpulan, penyimpanan, pengolahan, dan pembuangan yang aman sesuai dengan peraturan dan standar yang berlaku.

1. Klasifikasi Limbah Radioaktif

Pemanfaatan zat radioaktif baik di bidang industri, medis dan litbang bergantung pada jenis, sifat dan kondisi zat radioaktif yang digunakan. Pada kondisi tertentu, zat radioaktif tidak dapat digunakan kembali sesuai dengan tujuan awal dari pemanfaatan sumber radiasi tersebut sehingga menjadi limbah radioaktif. Berdasarkan PP 61 tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, limbah radioaktif didefinisikan sebagai zat radioaktif dan bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena pengoperasian instalasi nuklir yang tidak dapat digunakan lagi.

Limbah radioaktif dihasilkan di berbagai jenis fasilitas dan dapat muncul dalam berbagai konsentrasi radionuklida serta dalam berbagai bentuk fisik dan kimia. Perbedaan-perbedaan ini menghasilkan beragam pilihan untuk pengelolaan limbah. Terdapat berbagai alternatif untuk memproses limbah dan untuk penyimpanan jangka pendek atau jangka panjang sebelum pembuangan.

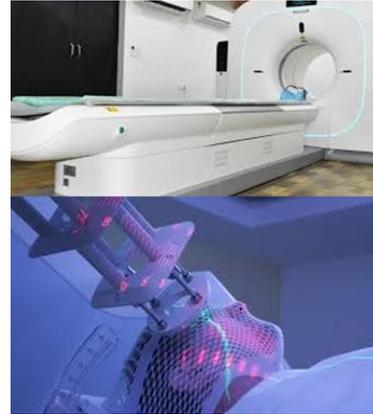
Klasifikasi limbah radioaktif mempertimbangkan sifat fisik, kimia dan sifat radiologik dari limbah yang terkait dengan faktor keselamatan dalam metode pengelolaan limbah radioaktif yang digunakan. Berdasarkan sifat radiologik, klasifikasi limbah radioaktif di Indonesia adalah sebagai berikut :

- a. Limbah radioaktif tingkat rendah
- b. Limbah radioaktif limbah radioaktif tingkat sedang
- c. Limbah radioaktif tingkat tinggi

Limbah radioaktif tingkat rendah dan sedang dapat berupa zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan (ZRTTD), zat radioaktif terbuka yang tidak digunakan dan/atau bahan dan peralatan terkontaminasi dan/atau teraktivasi yang tidak digunakan. Limbah radioaktif yang potensial dihasilkan dari kegiatan di bidang industri dan medis antara lain ZRTTD dan bahan terkontaminasi (misalnya kertas merang, shoe cover, headcover, sarung tangan nitril/lateks, jarum suntik, urin dan lain-lain). Sedangkan yang tergolong dalam limbah radioaktif aktivitas tinggi adalah bahan bakar nuklir bekas (BBNB).



Gambar 27. ZRTTD bidang industri



Gambar 26. ZRTTD bidang medis



Gambar 28. Bahan terkontaminasi zat radioaktif

2. Tahapan Pengelolaan Limbah Radioaktif

Pengelolaan limbah radioaktif bertujuan untuk melindungi keselamatan dan kesehatan pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup dari bahaya radiasi dan kontaminasi. Pengelolaan limbah radioaktif dilakukan dengan mempertimbangkan :

- a. aspek keselamatan yakni untuk mengantisipasi terjadinya kontaminasi ke lingkungan selama kegiatan pengelolaan.
- b. aspek teknis yaitu pengurangan volume dan aktivitas limbah radioaktif dengan pemilihan material dan metode pengolahan yang sesuai dengan karakteristik limbah.
- c. aspek ekonomis, berkaitan dengan biaya yang dibutuhkan untuk kegiatan pengelolaan serta biaya sosial terkait dampak yang mungkin timbul dari pengelolaan limbah radioaktif terhadap masyarakat dan lingkungan.

Pengelolaan limbah radioaktif merupakan kegiatan yang meliputi pengumpulan, pengelompokan, pengolahan, pengangkutan, penyimpanan, dan/atau pembuangan limbah radioaktif. Pengelolaan limbah radioaktif merupakan tanggung jawab penghasil limbah dan badan pelaksana yang ditunjuk oleh Pemerintah Republik Indonesia.

a. Pengumpulan dan pengelompokan

Penghasil limbah radioaktif wajib melaksanakan pengumpulan dan pengelompokan limbah radioaktif berdasarkan asal limbah, sifat fisik, kimia dan radiologi. Berdasarkan asal limbah, limbah dikumpulkan dan dikelompokkan berdasarkan dari asal timbulan limbah, misalnya :

- 1) NORM (*Normally Occuring Radioactive Material*, contohnya bijih monasit atau bijih uranium)
- 2) TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material*), terkonsentrasinya unsur radioaktif alamiah pada limbah yang dihasilkan oleh industri
- 3) bahan atau peralatan terkontaminasi zat radioaktif
- 4) zat radioaktif terbuka atau terbungkur yang tidak digunakan lagi
- 5) Sifat fisik, kimia dan radiologi

Pengelompokkan limbah radioaktif berdasarkan sifat fisik, kimia dan radiologi adalah untuk mengupayakan tindakan penanganan termasuk metode pengolahan limbah radioaktif yang selamat dengan mempertimbangkan potensi bahaya yang dapat muncul. Pengelompokkan berdasarkan sifat fisik limbah dalam hal ini adalah bentuk/fasa yaitu padat, cair, semi cair atau gas. Pengelompokkan berdasarkan sifat kimia limbah radioaktif antara lain dengan melihat karakteristik senyawa radioaktif tersebut seperti misalnya reaktif, mudah terbakar, kelarutan dalam air.

Pengelompokkan limbah radioaktif berdasarkan sifat radiologi misalnya dengan melihat aktivitas radionuklida (rendah, sedang, tinggi), jenis radiasi yang dipancarkan (alpha, beta, gamma, neutron) dan waktu paruh.

Setelah pengumpulan dan pengelompokkan, limbah harus dimasukkan ke dalam wadah untuk menunggu proses pengelolaan berikutnya. Wadah yang digunakan untuk menampung limbah radioaktif harus memiliki karakteristik berikut:

- 1) terbuat dari bahan yang tidak mudah rusak
- 2) sesuai dengan karakteristik fisik dan kimia dari zat radioaktif
- 3) dapat mengungkung dengan memadai

4) memberi proteksi yang memadai dari bahaya radiasi dan nonradiasi

Contoh wadah untuk limbah radioaktif yang berupa material padat terkontaminasi adalah drum *stainless steel*. Wadah limbah radioaktif cair bisa menggunakan jerigen yang dimasukkan ke dalam drum HDPE. Drum HDPE tersebut berfungsi sebagai *secondary containment*. peralatan yang runcing dan tajam yang terkontaminasi zat radioaktif juga dapat dimasukkan ke dalam jerigen agar tidak membahayakan pekerja radiasi saat menangani bungkusan limbah.



Gambar 29. Wadah penampung limbah radioaktif padat
(sumber: <https://www.kompas.id/baca/utama/2019/06/10/menggunakan-kembali-limbah-radioaktif>)



Gambar 30. Wadah penampung limbah radioaktif cair atau semi cair
(sumber: <https://eswis.doe.gov.my/WasteContainerType.aspx>)

Limbah radioaktif yang berupa ZRTTD dikemas untuk keperluan pengangkutan menuju badan pelaksana. Kemasan bisa menggunakan peti kayu maupun box lainnya yang merupakan kelengkapan ZRTTD pada saat pembelian. Wadah atau kemasan limbah radioaktif harus dilengkapi dengan label yang dapat memberikan informasi mengenai isi wadah kepada pekerja radiasi yang menanganinya. Informasi tersebut minimal terdiri dari :

- 1) Nomor wadah atau kemasan
- 2) Asal limbah
- 3) Tanggal pengukuran
- 4) Laju dosis radiasi pada kontak dan 1m
- 5) Nama unsur radioaktif
- 6) Berat atau volume limbah

Limbah yang akan dikirim ke badan pelaksana untuk pengelolaan lebih lanjut, harus sesuai dengan syarat keberterimaan (*waste acceptance criteria*) yang telah ditetapkan oleh badan pelaksana. Pekerja radiasi yang menangani limbah radioaktif harus dilengkapi dengan alat pelindung diri (APD) yang sesuai dengan potensi bahaya radiasi maupun nonradiasi dari limbah radioaktif.

b. Pengolahan

Menurut Peraturan Kepala BAPETEN no 8 tahun 2016, Penghasil limbah radioaktif berupa ZRTTD tidak diperbolehkan untuk melakukan pengolahan ZRTTD. Pemilik ZRTTD hanya diijinkan untuk mengemas dan mengirimkan ZRTTD ke badan pelaksana untuk pengolahan selanjutnya.

Berbeda kondisinya untuk limbah radioaktif berupa zat radioaktif terbuka dan/atau bahan dan/atau peralatan yang terkontaminasi atau teriradiasi. Penghasil limbah semacam ini diwajibkan untuk mengolah limbah radioaktif hingga mencapai batas klirens. Klirens adalah pembebasan dari pengawasan BAPETEN terhadap Zat Radioaktif Terbuka, Limbah Radioaktif, atau Material Terkontaminasi atau Teraktivasi. Metode yang dapat digunakan untuk limbah berupa zat radioaktif terbuka dan/atau bahan dan/atau peralatan yang terkontaminasi adalah :

- 1) Peluruhan aktivitas; 71paya ini dapat dilakukann untuk limbah yang mengandung zat radioaktif umur paruh pendek, dengan disimpan beberapa waktu dalam ruang penyimpanan limbah. Metode ini juga dapat digunakan untuk ZRTTD.
- 2) reduksi volume; 71paya ini dilakukan untuk dapat mengurangi volume limbah secara fisika, melalui beberapa cara yaitu kompaksi, evaporasi atau insinerasi.
- 3) pengubahan komposisi; 71paya ini dilakukan untuk dapat mengurangi

volume limbah secara kimia, misalnya melalui proses koagulasi atau pengendapan.

- 4) pengondisian; metode ini adalah 72paya untuk mengungkung limbah radioaktif dengan matriks seperti semen (sementasi), gelas (vitrifikasi), polimer atau diwadahkan ulang. Prinsip ini diterapkan untuk semua bentuk limbah radioaktif.

Pemilihan metode disesuaikan dengan karakteristik limbah radioaktif. Hasil pengolahan limbah dengan nilai konsentrasi di atas batas klirens, wajib dikirim ke Badan Pelaksana, untuk pengolahan lebih lanjut.

c. Pengangkutan

Perpindahan zat radioaktif termasuk di dalamnya adalah limbah **radioaktif, dengan menggunakan sarana angkutan darat, air dan/atau udara**, memiliki potensi bahaya tidak hanya bagi pengangkut namun juga masyarakat di sekitar jalur pengangkutan yang dilalui, sehingga BAPETEN mengatur pengangkutan zat radioaktif dengan Peraturan pemerintah Nomor 58 tahun 2015 tentang Pengangkutan Zat Radioaktif. Pengangkutan zat radioaktif melibatkan Pengirim (Pemegang Izin), Pengangkut (Pengirim boleh menjadi Pengangkut untuk zat radioaktif yang dimilikinya) dan Penerima. dalam proses pengangkutan, tidak jarang melibatkan pekerja radiasi dan Petugas Proteksi Radiasi (PPR) dari pihak Pengirim. Beberapa hal yang harus diketahui oleh pekerja radiasi dalam kegiatan pengangkutan antara lain :

- 1) kelengkapan dokumen yang harus dibawa dalam pengangkutan (persetujuan pengangkutan dari BAPETEN dan kelengkapan dokumen kendaraan, seperti KIR, STNK, SIM pengemudi dalam masa berlaku, dokumen rencana pengangkutan);
- 2) bungkusan dan pembungkus luar telah diberi label; data yang digunakan dalam pelabelan disediakan oleh PPR;
- 3) memastikan bungkusan zat radioaktif dalam wadah (pembungkus luar) yang terikat dengan kuat di dalam kendaraan pengangkut;
- 4) apabila pekerja radiasi ikut dalam perjalanan pengangkutan, pekerja radiasi wajib memastikan bahwa kendaraan pengangkut mengikuti rute

pengangkutan yang telah ditetapkan dalam dokumen rencana pengangkutan;

- 5) berkomunikasi aktif dengan Pengirim maupun Penerima terkait proses pengangkutan;
- 6) menggunakan APD yang sesuai saat menangani bungkusan;
- 7) mengetahui prosedur tanggap darurat apabila terjadi kedaruratan dalam proses pengangkutan;
- 8) memastikan serah terima zat radioaktif terdokumentasi (dengan berita acara serah terima).

d. Penyimpanan sementara

Penyimpanan limbah radioaktif dalam waktu tertentu dapat dilakukan oleh penghasil limbah sebelum limbah diolah lanjut atau dikirimkan ke badan pelaksana. Pada limbah radioaktif dengan umur paro pendek, penyimpanan sementara bertujuan untuk proses peluruhan aktivitas hingga limbah dapat mencapai tingkat klirens. Pekerja radiasi dari pihak penghasil limbah baik pada sektor industri maupun sektor medis, banyak terlibat dalam kegiatan penyimpanan limbah radioaktif. Beberapa hal yang harus diketahui oleh pekerja radiasi dalam kegiatan penyimpanan limbah antara lain :

- 1) limbah telah dikemas sesuai dengan karakteristik limbah
- 2) kemasan limbah telah diberi label dan memastikan label terpasang dengan baik (mudah diidentifikasi)
- 3) untuk limbah radioaktif cair, kemasan limbah harus dilengkapi dengan pengemasan sekunder (*secondary containment*) untuk menahan bocoran.
- 4) ruang penyimpanan limbah harus mempertimbangkan kondisi lingkungan, termasuk suhu, kelembapan, dan ventilasi yang memadai untuk menghindari reaksi kimia yang dapat meningkatkan risiko kebocoran wadah limbah.

e. Pembuangan

Menurut regulasi pengelolaan limbah radioaktif, Penghasil Limbah tidak boleh melakukan pembuangan limbah radioaktif. Pembuangan limbah radioaktif baik yang berupa ZRTTD maupun material terkontaminasi zat radioaktif hanya boleh dilakukan oleh badan pelaksana.

E. Kesiapsiagaan dan Prosedur Penanggulangan Kedaruratan

Kecelakaan radiasi adalah kejadian yang tidak direncanakan, kesalahan operasi, kerusakan atau kegagalan fungsi alat, atau kejadian lain yang menjurus pada timbulnya dampak radiasi, kondisi paparan radiasi dan/atau kontaminasi yang melampaui batas ketentuan. Kecelakaan dapat terjadi disebabkan oleh tiga faktor utama, yaitu faktor manusia, instalasi/peralatan teknis, dan sarana/lingkungan kerja. Penyebab kecelakaan yang berkaitan dengan ketiga faktor tersebut secara umum dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu kondisi tidak selamat (*unsafe condition*) dan tindakan tidak selamat (*unsafe action*).

Kecelakaan radiasi dapat meningkat hingga ke kedaruratan atau kecelakaan tersebut dapat ditanggulangi dengan baik. Kedaruratan adalah keadaan bahaya yang mengancam keselamatan manusia, kerugian harta benda atau kerusakan lingkungan hidup, yang timbul sebagai akibat kecelakaan nuklir atau kecelakaan radiasi. Kecelakaan hingga kedaruratan yang dapat terjadi saat menggunakan, menyimpan bahkan saat pengangkutan. Contoh kedaruratannya antara lain: peristiwa yang melibatkan kehilangan sumber radioaktif, pencurian sumber radioaktif, penemuan sumber radioaktif yang tidak diketahui pemiliknya pada fasilitas daur ulang logam, kerusakan sistem / keamanan kontrol / prosedur operasi.

Kemungkinan kecelakaan dapat terjadi kapan saja dan dimana saja. Kondisi ini memerlukan kesiapan semua infrastruktur (kesiapsiagaan) dan kemampuan penanggulangan yang siap di komando dan dioperasionalkan berdasarkan sistem nasional terpadu, yang dilengkapi dengan pedoman pelaksanaan.

1. Kesiapsiagaan & Penanggulangan Kedaruratan

Kesiapsiagaan adalah kemampuan siaga untuk melakukan tindakan yang efektif untuk memitigasi konsekuensi kedaruratan nuklir dan/atau radiologik terhadap manusia, kesehatan, harta benda, dan lingkungan hidup. Penanggulangan Kedaruratan adalah serangkaian kegiatan yang dilakukan pada saat terjadi

ke daruratan nuklir untuk mengurangi dampak serius yang ditimbulkan terhadap manusia, kesehatan, harta benda, dan lingkungan hidup.

Pada awal kecelakaan, pelaksanaan tanggap darurat segera untuk menanggulangi ke daruratan radiologi tidak boleh ditunda karena alasan apapun, hal ini untuk menjamin perlindungan bagi masyarakat dan untuk mengontrol dosis pada pekerja ke daruratan. Keandalan kemampuan untuk menanggulangi ke daruratan radiologi tersebut membutuhkan perencanaan kesiapan yang saling mendukung dan terintegrasi pada semua tingkatan serta keandalan respon yang dipandu dengan pedoman dan prosedur yang memadai, dalam kasus ke daruratan radiologi tindakan segera dilakukan untuk:

- a. Mengendalikan situasi
- b. Mencegah atau mengurangi dampak di lokasi kecelakaan
- c. Mencegah timbulnya efek deterministik terhadap pekerja dan masyarakat
- d. Memberikan pertolongan pertama dan penanganan korban radiasi
- e. Mencegah timbulnya efek stokastik pada masyarakat
- f. Mencegah timbulnya dampak non radiologi yang tidak diharapkan
- g. Mencegah terjadinya kerusakan alam dan lingkungan

Penanggulangan keadaan darurat adalah serangkaian kegiatan yang dilakukan dengan segera pada saat terjadi ke daruratan radiologi untuk mengurangi dampak serius yang ditimbulkan terhadap manusia, harta benda atau lingkungan hidup. Agar dapat dilakukukan penanggulangan yang baik, diperlukan kesiapsiagaan atau penyediaan infrastruktur.

Penyediaan infrastruktur merupakan bagian dari kesiapsiagaan yang bertujuan untuk memastikan tersedianya kesiapan dan kemampuan penanggulangan ke daruratan nuklir untuk menanggulangi ke daruratan secara tepat waktu, terkelola, terkendali, dan terkoordinasi. Infrastruktur kesiapsiagaan terdiri dari organisasi, koordinasi, fasilitas dan peralatan, prosedur penanggulangan, pelatihan dan gladi ke daruratan.

Pemegang izin wajib membentuk organisasi penanggulangan ke daruratan yang paling sedikit terdiri atas pemegang izin / ketua penanggulangan ke daruratan, pelaksana operasi / operator dan pengkaji radiologi / Petugas Proteksi Radiasi (PPR).

2. Tindakan dan Prosedur Penanggulangan Keadaan Darurat

Tindakan penanggulangan yang harus dilakukan dalam keadaan darurat radiologi antara lain tindakan mitigasi. Tindakan penanggulangan tersebut dilaksanakan sesuai dengan skala prioritas tergantung dari skenario keadaan darurat yang terjadi. Tindakan mitigasi adalah tindakan untuk membatasi dan mengurangi paparan radiasi jika terjadi peristiwa yang dapat menyebabkan atau meningkatkan paparan radiasi. Tindakan mitigasi bertujuan untuk:

- a. mencegah eskalasi bahaya radiologi;
- b. mengembalikan fasilitas atau instalasi ke keadaan selamat dan stabil.

Tindakan mitigasi diwujudkan dalam bentuk prosedur yang sesuai dengan hasil analisis potensi keadaan darurat radiologi yang mungkin terjadi. Berikut ini beberapa contoh tindakan penanggulangan keadaan darurat sesuai dengan hasil analisis potensi keadaan darurat radiologi yang mungkin terjadi. Contoh tindakan penanggulangan keadaan darurat radiologi pesawat sinar-X sebagai berikut:

- a. Matikan aliran listrik
- b. Evakuasi korban (jika ada)
- c. Identifikasi personal yang potensial untuk terpapar
- d. Pemonitoran radiasi untuk memastikan pesawat sudah tidak beroperasi
- e. Pemberian tanda pada pesawat sesuai dengan kegagalan alat yang terjadi
- f. Penghitungan penerimaan dosis pada petugas
- g. Pembuatan laporan

Contoh tindakan penanggulangan keadaan darurat radiologi sumber radiasi hilang sebagai berikut:

- a. Pelaporan kondisi awal kepada PPR
- b. Pencarian sumber:
 - 1) Evakuasi korban,
 - 2) Isolasi daerah radiasi,
 - 3) Penentuan posisi sumber, dan
 - 4) Pengamanan sumber (pemasukan sumber ke dalam kontainer)
- c. Pemonitoran adanya kontaminasi di daerah sekitar sumber dan melakukan tindakan dekontaminasi
- d. Identifikasi dan menangani orang-orang yang berpotensi mendapat paparan atau kontaminasi

- e. Pemeriksaan keutuhan sumber
- f. Pemberian label yang sesuai pada kontainer
- g. Penghitungan penerimaan dosis pada petugas
- h. Pembuatan laporan

Semua tindakan mitigasi dilakukan dibawah koordinasi Petugas Proteksi Radiasi. Apabila keadaan darurat melibatkan zat radioaktif yang menyebabkan kontaminasi eksternal pada korban, maka stabilitas kondisi korban menjadi pertimbangan utama. Stabilitas korban tidak boleh terganggu saat melakukan dekontaminasi dan penggantian pakaian korban dapat menurunkan kontaminasi sampai dengan 90%. Untuk menjamin terselenggaranya tanggap darurat yang cepat dan tepat maka seluruh rangkaian tahapan dipandu dengan:

1. prosedur inisiasi tanggap darurat
2. prosedur tanggap darurat
3. prosedur penanggap awal
4. prosedur pengkaji radiologi (jika diperlukan)
5. prosedur kajian dosis

Keadaan darurat akan dilaporkan segera ke BAPETEN dalam waktu 1 (satu) jam melalui telepon, faksimili, atau surat elektronik, dan secara tertulis paling lama 2 (dua) hari setelah terjadi kecelakaan.

Pada tahun 2009, BAPETEN telah menerbitkan Pedoman Penanggulangan Kedaruratan Radiologi untuk Pelaksana Tanggap Darurat yang dapat digunakan sebagai dasar pelaksanaan tindakan dan prosedur penanggulangan keadaan darurat lebih detail dan teknis.

F. Budaya Keselamatan dan Budaya Keamanan

Salah satu kecelakaan yang bersifat katastropik adalah kecelakaan nuklir Chernobyl. Hasil investigasi kecelakaan nuklir Chernobyl pada tahun 1986 mengungkapkan isu budaya keselamatan yang lemah yang menjadi salah satu penyebab kecelakaan. Terminologi budaya keselamatan pertama kali muncul dalam laporan hasil investigasi yang dilakukan *International Atomic Energy Agency* (IAEA) ats kejadian kecelakaan Chernobyl. Kecelakaan di Chernobyl pada tahun 1986 menjadi titik balik yang menyadarkan dunia akan pentingnya budaya

keselamatan. Sejak saat itu, budaya keselamatan mulai didefinisikan sebagai seperangkat nilai, sikap, dan perilaku yang menempatkan keselamatan sebagai prioritas utama (IAEA). Budaya keselamatan yang kuat tidak hanya berfokus pada kepatuhan terhadap peraturan, tetapi juga pada proaktivitas dalam mengidentifikasi dan mengatasi potensi bahaya. Konsep ini terus berkembang dan menjadi bagian integral dari sistem manajemen keselamatan di berbagai industri, termasuk industri yang menggunakan sumber radiasi pengion.

Budaya keselamatan yang kuat menurut IAEA, memiliki 5 karakteristik yaitu :

1. Keselamatan sebagai nilai yang diakui dan dipahami
2. Kepemimpinan yang jelas untuk keselamatan
3. Akuntabilitas keselamatan yang jelas
4. Keselamatan terintegrasi dalam setiap kegiatan
5. Keselamatan adalah penggerak pembelajaran

Pentingnya budaya keselamatan dalam pemanfaatan sumber radiasi pengion ini menjadi alasan adanya pasal yang mengatur mengenai budaya keselamatan di dalam PP nomor 45 tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif. Regulasi tersebut menyatakan bahwa Pemegang Izin wajib menumbuhkembangkan budaya keselamatan dan pekerja radiasi wajib turut serta dalam upaya tersebut.

Penguatan budaya keselamatan tidak dapat lepas dari sinergi peran dari setiap elemen dalam organisasi yaitu manajemen puncak, manajer dan supervisor dan pekerja. Pekerja radiasi di bidang industri dan medik memiliki peran yang sangat penting dalam memanfaatkan teknologi nuklir. Namun, pekerjaan ini juga diiringi dengan risiko paparan radiasi. Untuk itu, penting bagi setiap pekerja untuk memahami dan menerapkan budaya keselamatan. Peran individu sebagai pekerja radiasi dalam penguatan budaya keselamatan antara lain :

1. memahami tugas, kewajiban dan tanggung jawabnya;
2. mempunyai kompetensi dalam melaksanakan tugas, kewajiban dan tanggung jawabnya;
3. mengetahui tanggung jawab rekan kerja;
4. mengetahui persyaratan keselamatan pada organisasinya;
5. mengetahui aturan keselamatan yang didasarkan pada peraturan, pedoman, prosedur dan instruksi kerja;

6. melaksanakan tugas secara teliti, jelas, transparan, obyektif dan independen;
7. memiliki sifat jujur, bersahabat dan memberikan informasi yg bermanfaat bagi orang lain;
8. memiliki sifat kritis yang dapat mendukung pelaksanaan pekerjaan dengan selamat;
9. melaporkan dan mendokumentasikan hasil tugas dan tanggung jawabnya; dan
10. berkoordinasi dalam tim dan pihak terkait

Sama halnya dengan Budaya Keselamatan, Budaya Keamanan juga merupakan seni bagaimana mengelola perilaku manusia (*security behaviour*) dengan norma-norma positif dalam bentuk pengetahuan keamanan (*security knowledge*) yang secara universal dapat diterima dan diterapkan dalam suatu organisasi. Budaya Keamanan dapat berkembang mengikuti kemajuan zaman (khususnya kemajuan teknologi) dan didukung dengan perilaku yang positif/baik, tetapi dapat juga melemah karena perilaku negatif/buruk dan dapat diukur tingkat kesadarannya. Keduanya (Budaya Keselamatan dan Budaya Keamanan) kini sedang giat dipromosikan dan diterapkan di fasilitas nuklir/radiasi dengan tujuan utamanya yang sama, tetapi dengan konsep penerapan yang berbeda.

Budaya Keamanan dalam Peraturan Pemerintah nomor 45 tahun 2023 tentang keselamatan radiasi pengion dan keamanan zat radioaktif, didefinisikan sebagai paduan karakter, sikap dan perilaku individu, organisasi dan institusi yang menjadi cara untuk mendukung, meningkatkan, dan memelihara Keamanan Zat Radioaktif.. Keamanan merupakan ketahanan terhadap adanya suatu ancaman dan gangguan dari tindakan yang disengaja oleh pihak tidak berwenang (musuh, oposisi, dsb) yang mengakibatkan kerusakan atau ketidakstabilan situasi. Adapun keamanan nuklir merupakan upaya untuk mencegah, mendeteksi dan merespon (tanggap) terhadap gangguan yang disengaja oleh pihak yang tidak bertanggung jawab (musuh, lawan, oposisi) untuk menimbulkan kondisi bahaya (tidak stabil) yang melibatkan bahan radioaktif/nuklir dan fasilitas terkait, seperti tindakan: pencurian, sabotase, akses yang tidak sah (*illegal*), transfer yang illegal atau tindakan berbahaya lainnya. Implementasi keamanan nuklir diwujudkan dalam bentuk

manajemen proteksi fisik fasilitas nuklir/radiasi untuk melindungi fasilitas (termasuk bahan radioaktif/nuklir) tersebut dari kemungkinan terjadinya tindakan berbahaya.

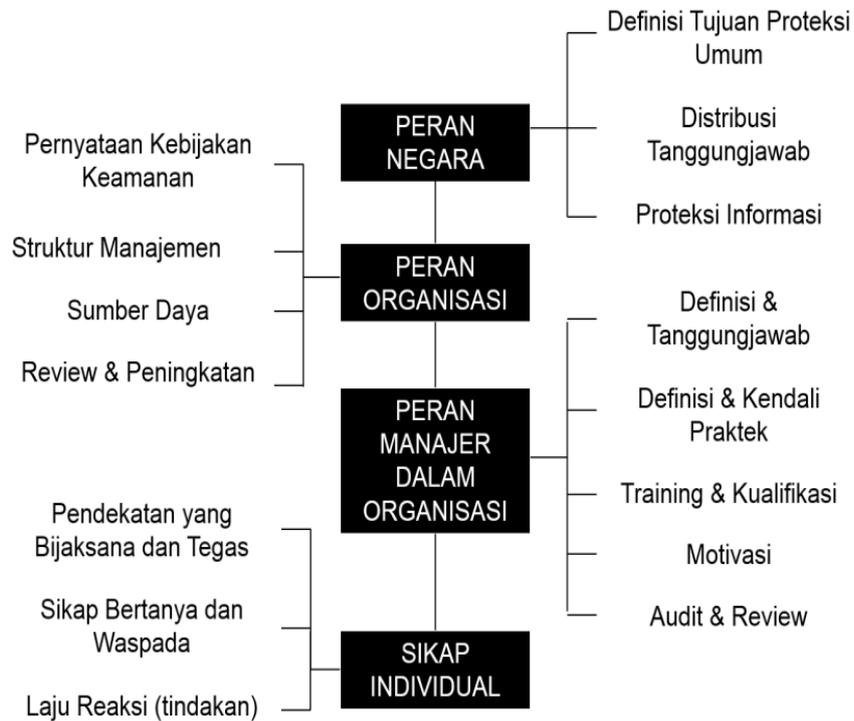
Peran dan Tanggungjawab Individu dan Institusi/Lembaga

Dalam dokumen IAEA Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources (Prinsip Dasar No.7) dijelaskan bahwa untuk tujuan melindungi individu, masyarakat dan lingkungan maka setiap negara harus:

1. Menjamin bahan radioaktif/ nuklir di dalam teritorialnya dalam keadaan terkendali, selamat dan aman selama digunakan dan akhir pemakaian (limbah).
2. Mempromosikan Budaya Keselamatan dan Budaya Keamanan terkait dengan pengelolaan bahan radioaktif/ nuklir.

Sehubungan dengan hal tersebut, dalam pengelolaan bahan radioaktif/nuklir terdapat peran dan tanggungjawab individu dan organisasi untuk menjamin bahwa fasilitas nuklir/radiasi dan segala isinya (bahan radioaktif/nuklir) dalam kondisi terkendali, selamat dan aman. Untuk lingkup peran dan tanggungjawab yang lebih luas, negara (sebagai pengguna tenaga nuklir dari sudut pandang internasional) juga ikut menjamin keselamatan dan keamanan bahan radioaktif/nuklir yang ada di dalam wilayah/otoritas negara. Negara bersama organisasi (termasuk individu) yang mengelola bahan radioaktif/nuklir harus juga mempromosikan, menerapkan dan mengembangkan Budaya Keselamatan dan Budaya Keamanan. Untuk maksud tersebut, Indonesia telah menerbitkan PP No. 54 tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir yang menjadi payung hukum dalam keselamatan dan keamanan pengelolaan bahan radioaktif/nuklir.

Gambar 30 adalah peran dan tanggungjawab individu dan organisasi serta lembaga (negara) dalam keamanan pemanfaatan bahan radioaktif/nuklir. Ada tiga komponen utama yang berperan dan bertanggungjawab pada keamanan nuklir, yaitu: negara, organisasi dan individu.



Gambar 31. Komponen Budaya Keamanan

a. Peran Negara

Negara bertanggung jawab untuk mendefinisikan tujuan dari proteksi secara umum. Sebagai contoh adalah proteksi/melindungi masyarakat dan lingkungan terkait adanya potensi bahaya dari pemanfaatan bahan radioaktif/nuklir. Negara juga mengatur tanggung jawab tersebut dengan mendistribusikan tanggung jawab kepada lembaga/institusi terkait untuk melaksanakan tanggung jawab tersebut, dalam hal ini BAPETEN berperan sebagai institusi pengawas dari kegiatan nuklir di Indonesia, sedangkan pelaksana (pemerintah/BATAN dan swasta) harus mengikuti peraturan pemerintah (negara) dan mendapat pengawasan dari BAPETEN selama memanfaatkan bahan radioaktif/nuklir. Negara (BAPETEN) bertanggung jawab memproteksi informasi yang terkait dengan keamanan nuklir.

b. Peran Organisasi

Dalam komponen kedua ini, peran organisasi dibedakan antara peran manajemen dan peran manajerial dalam organisasi. Manajemen organisasi bertanggung jawab untuk membuat kebijakan keamanan nuklir yang merupakan maksud dan arah keseluruhan dari organisasi terhadap kerangka kerja untuk mengendalikan proses dan kegiatan pengamanan nuklir agar

tetap konsisten dan memenuhi persyaratan/peraturan perundang-undangan pemerintah/negara. Manajemen bertanggung jawab untuk membuat struktur manajemen dalam organisasi untuk hal yang terkait dengan pengamanan nuklir dan memberdayakannya dengan menyediakan sumber daya (orang, fasilitas, pengetahuan, dokumen/prosedur, dsb.). Manajemen juga bertanggung jawab untuk melakukan review terhadap semua kegiatan keamanan dan mengembangkan keamanan (fasilitas nuklir/radiasi) untuk mendapat sistem pengamanan yang efektif dan efisien berdasarkan perkembangan teknologi sistem keamanan.

Tanggungjawab manajer keamanan dalam manajemen adalah:

- 1) Mendefinisikan kegiatan keamanan nuklir dalam struktur manajemen dan memberikan/mendistribusikan tanggung jawab kegiatan keamanan kepada individu/personil petugas pengamanan.
- 2) Mendefinisikan dan mengendalikan praktek (implementasi) dari kegiatan pengamanan agar sesuai dengan prosedur yang dibuat.
- 3) Memfasilitasi dan mengkualifikasi kegiatan pelatihan untuk meningkatkan pengetahuan individu yang terkait dengan tugas pengamanan.
- 4) Memberikan motivasi kepada semua individu dalam manajemen (mencegah munculnya ketidakpuasan bekerja/insider).
- 5) Mengaudit dan mereviu semua kegiatan pengamanan nuklir.

c. Peran Individu:

Individu dalam manajemen harus bersikap bijaksana namun tegas (berwibawa) dalam menerapkan sistem keamanan di fasilitas nuklir/radiasi. Dalam prosedur pengamanan sudah ditentukan aturan/rambu keamanan jelas. Sikap berwibawa (disegani) akan membuat rasa hormat (respect) orang lain terhadap organisasi dan dapat membatalkan niat buruk seseorang. Setiap individu harus memiliki sikap bertanya (ingin tahu sesuai keperluan/ proporsional) dan selalu waspada, namun tidak curiga. Setiap individu (khususnya personil pengamanan) harus memiliki sikap tanggap (responsif) terhadap hal yang diduga mengganggu keamanan. Bereaksi cepat, tepat, dan terkendali dapat mengurangi risiko gangguan keamanan.

Hubungan antara Budaya Keamanan dengan Budaya Keselamatan

Penerapan Budaya Keselamatan dan Budaya Keamanan pada organisasi yang mengelola fasilitas nuklir/radiasi mempunyai tujuan utama yang sama, yaitu membatasi risiko yang ditimbulkan dari bahan radioaktif (termasuk bahan nuklir) dan fasilitas nuklir/radiasi. Keduanya mempertimbangkan risiko dari tindakan kurang hati-hati atau kesalahan manusia, tetapi pada Budaya Keamanan menekankan pada “tindakan disengaja” dari manusia untuk maksud menimbulkan bahaya atau kerusakan. Dengan demikian sudut pandang (cara) penerapan keduanya juga berbeda, dimana pada Budaya Keselamatan, individu atau organisasi dapat secara terbuka menyebarkan informasi kepada yang lain (bahkan masyarakat) karena masalah terkait keselamatan harus disampaikan secara transparan dan membuka ruang untuk didiskusikan (dialog). Sebaliknya, pada Budaya Keamanan, informasi terkait keamanan fasilitas nuklir/radiasi harus ditutupi (dirahasiakan) oleh individu dan organisasi untuk mencegah kemungkinan timbulnya niat jahat (pencurian, sabotase, dsb). Hanya individu yang berkepentingan/berwenang (authorized person) saja yang boleh mengetahui strategi keamanan di fasilitas.

Selain melalui pengembangan dan penguatan budaya keamanan, untuk mencegah tindak kejahatan yang melibatkan zat radioaktif, maka perlu dilakukan upaya pengamanan dalam kegiatan ekspor, impor, Penggunaan, produksi radioisotop, dan pengelolaan limbah radioaktif dengan fungsi-fungsi berikut :

a. Pencegahan

Upaya Keamanan Sumber Radioaktif yang memenuhi fungsi pencegahan meliputi: organisasi Keamanan Sumber Radioaktif, pelatihan, pemeriksaan latar belakang, sistem keamanan informasi, dan kendali akses. Upaya Keamanan Sumber Radioaktif yang memenuhi fungsi pencegahan berlaku untuk tingkat keamanan A, tingkat keamanan B, dan tingkat keamanan C. Organisasi Keamanan Sumber Radioaktif paling kurang terdiri dari Pemegang Izin dan Petugas Keamanan Sumber Radioaktif. Petugas Keamanan Sumber Radioaktif dapat dirangkap oleh Petugas Proteksi Radiasi (PPR) atau kepala satuan pengamanan fasilitas.

Organisasi Keamanan Sumber Radioaktif harus sesuai dengan tingkat Keamanan Sumber Radioaktif, jumlah Sumber Radioaktif, dan potensi

ancaman terhadap Sumber Radioaktif. Organisasi Keamanan Sumber Radioaktif juga dapat terintegrasi dengan organisasi keamanan fasilitas.

b. Deteksi

Upaya Keamanan Sumber Radioaktif yang memenuhi fungsi deteksi meliputi peralatan deteksi, dan pemantauan secara terus menerus oleh petugas keamanan fasilitas. Upaya Keamanan Sumber Radioaktif yang memenuhi fungsi deteksi berlaku untuk tingkat keamanan A, tingkat keamanan B, dan tingkat keamanan C.

Untuk tingkat keamanan A, meliputi handy talky, telepon terpasang tetap dan telepon selular, alarm dengan sirene, detektor gerak, *closed circuit television* (CCTV), sensor inframerah, dan *balance magnetic switch*

Pada tingkat keamanan B, meliputi handy talky, telepon terpasang tetap atau telepon selular, alarm dengan sirene, dan *closed circuit television* (CCTV). Alarm dengan sirene dan *closed circuit television* (CCTV) untuk kegiatan radiografi industri dipasang di fasilitas penyimpanan.

Sedangkan tingkat keamanan C, meliputi telepon terpasang tetap atau telepon selular, dan alarm dengan sirene.

Jumlah peralatan deteksi disesuaikan dengan fasilitas, dan jumlah Petugas Keamanan Sumber Radioaktif dan satuan pengamanan fasilitas.

c. Penundaan

Upaya Keamanan Sumber Radioaktif yang memenuhi fungsi penundaan untuk tingkat keamanan A, tingkat keamanan B, dan tingkat keamanan C.

Fungsi Penundaan meliputi:

1) fasilitas Sumber Radioaktif

Fasilitas Sumber Radioaktif. menggunakan material yang kuat dan tidak mudah dirusak serta didesain tanpa jendela. Fasilitas penyimpanan yang berada ditempat terbuka, selain memenuhi persyaratan fasilitas sumber radioaktif, juga harus dilengkapi pagar.

2) kendali kunci,

Kendali kunci dilaksanakan dengan membuat dan memelihara rekaman penggunaan, penyimpanan, dan pemeriksaan kunci, antara lain meliputi nama personil, tanggal pelaksanaan, waktu pelaksanaan, dan tanda tangan

Pemeriksaan keberadaan kunci dilakukan secara berkala untuk menghindari usaha penggandaan. Penetapan 2 (dua) personil untuk menyimpan dan menggunakan masing-masing 1 (satu) kunci manual yang berbeda dan digunakan secara bersamaan saat membuka dan menutup fasilitas. Kemudian mengubah kombinasi Personal Identification Number (PIN) atau sandi kunci elektronik secara berkala atau jika terdapat personil yang kewenangannya

3) peralatan penundaan

Tingkat keamanan A paling kurang meliputi 1 kunci elektronik, dan 2 (dua) kunci manual

Tingkat keamanan B paling kurang meliputi 1 (satu) kunci manual yang dipasang pada pintu masuk Fasilitas Tetap atau fasilitas penyimpanan sedangkan pada tingkat keamanan C paling kurang meliputi 1 (satu) kunci manual yang dipasang pada pintu gerbang menuju atau pintu masuk Fasilitas Tetap, dan fasilitas penyimpanan.

d. Respon

Upaya Keamanan Sumber Radioaktif yang memenuhi fungsi respon meliputi peralatan yang memenuhi fungsi respon, dan penanggulangan keadaan darurat Keamanan Sumber Radioaktif. Upaya Keamanan Sumber Radioaktif yang memenuhi fungsi respon berlaku untuk tingkat keamanan A, tingkat keamanan B, dan tingkat keamanan C.

Tingkat keamanan A meliputi handy talky, telepon terpasang tetap dan telepon selular, dan senter bertegangan paling rendah 6 (enam) volt

Pada tingkat keamanan B meliputi handy talky, telepon terpasang tetap atau telepon selular, dan senter bertegangan paling rendah 6 (enam) volt.

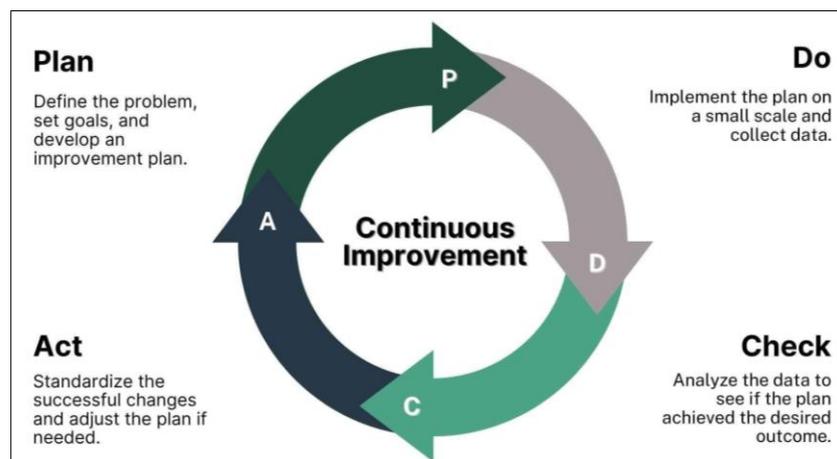
Sedangkan tingkat keamanan C meliputi telepon terpasang tetap atau telepon selular, dan senter bertegangan paling rendah 6 (enam) volt.

G. Sistem Manajemen Fasilitas dan Kegiatan

Tenaga nuklir mempunyai manfaat yang signifikan di berbagai aspek, akan tetapi juga memiliki potensi bahaya radiasi. Oleh karena itu, dalam pemanfaatannya harus mengikuti ketentuan keselamatan radiasi. Untuk memastikan penerapan pengelolaan pemanfaatan tenaga nuklir memenuhi aspek keselamatan maka perlu suatu manajemen yang baik. Berdasarkan peraturan BAPETEN No. 6 tahun 2023,

dimana pemanfaatan tenaga nuklir yang mencakup instalasi nuklir, pertambangan dan galian nuklir serta pemanfaatan sumber radiasi pengion wajib menerapkan sistem manajemen. Sistem Manajemen merupakan sekumpulan unsur yang saling terkait atau berinteraksi untuk menetapkan kebijakan dan sasaran, serta memungkinkan sasaran tersebut tercapai secara efisien dan efektif, dengan memadukan semua unsur organisasi yang meliputi struktur, sumber daya, dan proses.

Pemegang Izin harus menyusun, menetapkan, mengembangkan, menerapkan, mengevaluasi, dan meningkatkan Sistem Manajemen secara berkelanjutan untuk memastikan tujuan keselamatan tercapai. Secara umum tahapan sistem manajemen mencakup perencanaan (*Plan*), pelaksanaan rencana (*Do*), evaluasi pelaksanaan (*Check*), dan tindak lanjut evaluasi (*Act*) untuk mencapai peningkatan yang berkelanjutan. Gambar 28 menguraikan rangkaian garis besar pengelolaan sistem manajemen.



Gambar 32. Tahapan PDCA dalam sistem manajemen (sumber: <https://goaudits.com/blog/pdca-lean-methodology/>)

Penerapan sistem manajemen dalam pemanfaatan tenaga nuklir harus mempertimbangkan ketentuan peraturan perundang – undangan yang berlaku, persyaratan yang disetujui oleh pihak yang berkepentingan serta standar yang ditetapkan dalam suatu organisasi. Sistem Manajemen sebagaimana dimaksud mencakup:

- a. budaya keselamatan dan budaya keamanan;
- b. penerapan pendekatan bertingkat persyaratan sistem manajemen;
- c. Dokumentasi sistem manajemen;

- d. kebijakan dan perencanaan;
- e. tanggung jawab manajemen;
- f. manajemen sumber daya;
- g. pelaksanaan Proses; dan
- h. pengukuran efektivitas, penilaian, dan peluang perbaikan.

1. Penerapan Pendekatan Bertingkat Persyaratan Sistem Manajemen

Penerapan pendekatan bertingkat persyaratan sistem manajemen perlu dilakukan untuk memastikan pemenuhan sumber daya secara efektif dan efisien. Pendekatan bertingkat persyaratan sistem manajemen dilakukan dengan pertimbangan sebagai berikut:

- a. signifikansi keselamatan, keamanan dan kompleksitas dari organisasi, pengoperasian instalasi/fasilitas, atau pelaksanaan kegiatan;
- b. potensi bahaya dan besarnya dampak risiko keselamatan, kesehatan, lingkungan, keamanan, mutu, dan ekonomi dari setiap instalasi/fasilitas, atau kegiatan; dan
- c. konsekuensi keselamatan dan/atau keamanan yang dapat terjadi jika terdapat kegagalan, kejadian yang tidak diantisipasi, kegiatan yang tidak direncanakan secara memadai, atau kegiatan yang dilakukan dengan tidak semestinya.

2. Dokumentasi Sistem Manajemen

Dokumentasi sistem manajemen harus ditetapkan dan dilaksanakan khususnya yang penting untuk keselamatan. Dokumentasi dilakukan secara sistematis dengan mencerminkan ciri dan kegiatan organisasi serta kerumitan dan interaksi proses. Dokumen tersebut harus mudah dibaca, mudah dipahami, dapat diidentifikasi dengan segera, dan tersedia pada saat digunakan. Dokumentasi Sistem Manajemen sebagaimana dimaksud berupa dokumen dan rekaman yang terkendali. Pengendalian dokumen mencakup kegiatan persiapan, peninjauan, pengesahan, distribusi, penarikan, dan/atau perubahan termasuk pemusnahan dokumen. Kegiatan kaji ulang dokumen dilakukan paling sedikit 1 (satu) kali dalam setahun, untuk mengevaluasi kemutakhiran dokumen sesuai dengan persyaratan – persyaratan yang diacu oleh organisasi.

3. Kebijakan dan Perencanaan

Pemegang ijin wajib menetapkan kebijakan keselamatan dan/atau keamanan dalam organisasi yang harus dilaksanakan oleh semua unsur organisasi. Kebijakan keselamatan mencakup keselamatan nuklir dan/atau keselamatan radiasi, sedangkan kebijakan keamanan mencakup keamanan sumber radiasi pengion. Kebijakan tersebut dievaluasi secara berkala paling sedikit 1 (satu) kali dalam 1 (satu) tahun. Selain penetapan kebijakan Pemegang Izin juga harus melakukan perencanaan dengan menetapkan tujuan, strategi, dan sasaran organisasi secara terpadu dan sesuai dengan kebijakan kepemimpinan untuk keselamatan dan keamanan. Pemegang Izin meninjau pelaksanaan terhadap perencanaan secara berkala paling sedikit 1 (satu) kali dalam 1 (satu) tahun, jika terdapat ketidaksesuaian maka dapat dilakukan tindakan perbaikan.

4. Tanggung Jawab Manajemen

Pemegang Ijin memiliki kewajiban untuk melaksanakan tanggung jawab manajemen. Adapun pelaksanaan tanggung jawab manajemen oleh Pemegang Ijin dilakukan dengan:

- a. penetapan, penerapan yang berkelanjutan, pertahanan, dan peningkatan Sistem Manajemen secara berkesinambungan untuk menjamin keselamatan;
- b. pembentukan organisasi yang mengelola Sistem Manajemen;
- c. pelaksanaan kegiatan sesuai dengan perencanaan;
- d. pelaksanaan inspeksi, prosedur, pengujian, verifikasi dan validasi sesuai dengan prosedur atau ketentuan yang ditetapkan;
- e. kegiatan manufaktur atau layanan yang dilakukan oleh kontraktor, subkontraktor dan/atau pihak ketiga sesuai dengan kontrak;
- f. validitas data dan informasi yang digunakan dalam penyusunan Dokumen, termasuk yang berasal dari kontraktor, subkontraktor dan/atau pihak ketiga;
- g. pelaksanaan surveilan terhadap pemenuhan ketentuan keselamatan yang dilaksanakan oleh kontraktor, subkontraktor dan/atau pihak ketiga;
- h. manajemen proyek termasuk penentuan titik tunda selama pelaksanaan konstruksi;
- i. pengawasan terhadap perubahan desain, ketidakpatuhan dan insiden;
- j. pelaksanaan uji fungsi dan akuntabilitasnya terhadap Sistem Manajemen;

k. waktu dan cara pengambilan keputusan, serta personel yang mengambil keputusan dalam Sistem Manajemen; dan

l. audit internal dan eksternal terhadap pelaksanaan Sistem Manajemen.

Pelaksanaan tanggung jawab manajemen ini untuk mencapai kepuasan pihak yang berkepentingan dengan melakukan komunikasi, koordinasi, kerja sama dan kolaborasi dengan pihak berkepentingan. Selain itu Kebutuhan dan harapan Pihak Berkepentingan dievaluasi secara berkala paling sedikit 1 (satu) kali dalam 1 (satu) tahun.

5. Manajemen Sumber Daya

Pemegang Izin melakukan manajemen sumber daya dengan menentukan dan menyediakan sumber daya yang memadai untuk melaksanakan kegiatan organisasi sesuai dengan tujuan keselamatan dan keamanan. Sumber daya tersebut berupa sumber daya manusia, sarana, prasarana, dan lingkungan kerja, informasi dan pengetahuan serta pendanaan. Manajemen Sumber daya manusia dilakukan dengan:

a. Peningkatan kompetensi sumber daya manusia melalui:

- penetapan persyaratan kompetensi untuk setiap personel pada semua tingkatan organisasi;
- pelatihan atau mengambil tindakan lainnya untuk mencapai tingkat kompetensi yang dipersyaratkan;
- mengevaluasi efektivitas tindakan yang diambil;
- memastikan keterampilan yang sesuai dicapai dan dipertahankan.

b. Jaminan setiap personel memiliki kompetensi untuk melaksanakan pekerjaan yang ditugaskan dan memahami pengaruh pekerjaannya terhadap keselamatan dan keamanan.

c. Jaminan setiap personel telah memperoleh pendidikan dan pelatihan yang tepat, dan telah memperoleh keterampilan, pengetahuan, dan pengalaman yang sesuai untuk mencapai kompetensi yang diperlukan.

d. Jaminan pendidikan dan pelatihan dapat menumbuhkan kesadaran setiap personel akan pentingnya pengaruh kegiatannya pada keselamatan dalam mencapai sasaran organisasi.

Manajemen Prasarana dan lingkungan kerja dilakukan dengan Penetapan, penyediaan, perawatan, dan evaluasi ulang prasarana dan lingkungan kerja diperlukan agar pekerjaan dilaksanakan sesuai dengan persyaratan keselamatan dan keamanan.

Manajemen informasi dan pengetahuan dilakukan untuk memastikan pengetahuan keselamatan dan pengetahuan kritis selalu dipertahankan dalam organisasi dan personel. Pengelolaan pengetahuan dapat dilakukan melalui berbagai kegiatan antara lain pembentukan pengetahuan, pertukaran pengetahuan, pengumpulan pengetahuan, pelestarian pengetahuan dan transfer pengetahuan.

Manajemen pendanaan dilakukan untuk memastikan pendanaan memadai untuk pelaksanaan kegiatan organisasi. Pendanaan termasuk pendanaan jangka panjang untuk pengelolaan limbah radioaktif, dekomisioning atau penutupan untuk memberikan perlindungan terhadap generasi mendatang.

6. Pelaksanaan Proses

Pelaksanaan proses dilakukan dengan memastikan Sistem Manajemen diidentifikasi, ditetapkan, dikembangkan, dan dikelola secara efektif untuk mencapai tujuan organisasi tanpa mengorbankan keselamatan. Adapun secara garis besar pelaksanaan proses mencakup:

- a. Sistem manajemen umum: pengendalian dokumen, pengendalian produk dan layanan, pengendalian rekaman, pembelian, komunikasi, pengelolaan perubahan organisasi;
- b. Pengembangan proses untuk memastikan pencapaian tujuan organisasi dan menghasilkan produk dan layanan yang sesuai dengan persyaratan.
- c. Manajemen proses, dimana Pemegang Ijin menetapkan seorang Manajer untuk memastikan setiap proses dilakukan dalam kondisi terkendali sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh organisasi.

7. Penilaian Efektifitas Sistem Manajemen

Dalam pelaksanaan Sistem Manajemen perlu dilakukan evaluasi efektifitas untuk menentukan tindakan perbaikan yang berkesinambungan (*continuous improvement*). Pemantauan dan Pengukuran efektifitas sistem manajemen untuk mengkonfirmasi kemampuan proses dalam mencapai hasil yang

diinginkan dan untuk mengidentifikasi peluang perbaikan. Penilaian Diri dilakukan secara internal, rutin, dan berkesinambungan, Penilaian Mandiri dilakukan oleh organisasi eksternal, secara berkala. Tinjauan Sistem Manajemen dilakukan secara berkala paling sedikit 1 (satu) kali dalam 1 (satu) tahun dan menyampaikan hasil tinjauan kepada Kepala BAPETEN.

H. Rangkuman

Paparan radiasi yaitu penyinaran radiasi yang diterima oleh manusia atau materi, baik disengaja atau tidak, yang berasal dari radiasi internal maupun eksternal. Tujuan keselamatan radiasi adalah mencegah terjadinya efek deterministik (tertentu) dari radiasi yang membahayakan seseorang dan membatasi peluang terjadinya efek stokastik atau risiko akibat pemakaian radiasi yang dapat diterima oleh seseorang atau masyarakat.

Persyaratan proteksi radiasi terdiri dari justifikasi, limitasi dosis dan optimisasi. Pengendalian radiasi eksternal meliputi perhitungan waktu, jarak, dan penggunaan penahan radiasi. Pengendalian bahaya radiasi internal dilakukan dengan menerapkan pengendalian sumber radioaktif, pengendalian daerah kerja dan penggunaan alat pelindung diri dimana prinsip pengendalian bahaya radiasi internal adalah dengan menutup jalur masuk zat radioaktif ke dalam tubuh dan membatasi penyebaran zat radioaktif.

Pemegang ijin wajib memenuhi hak pekerja radiasi antara lain pemenuhan alat dan perlengkapan keselamatan dan proteksi radiasi, pemantauan dosis radiasi, kompensasi sesuai kemampuan organisasi, Pendidikan dan pelatihan serta pemeriksaan Kesehatan rutin. Kewajiban pekerja radiasi antara lain mematuhi prosedur operasi, mengikuti pemantauan kesehatan dan pemantauan dosis, mengikuti pendidikan dan pelatihan, menggunakan peralatan pemantau dosis perorangan dan peralatan protektif radiasi, menginformasikan kepada Pemegang Izin tentang riwayat pekerjaan terkait dengan radiasi, dan menyampaikan masukan kepada Petugas Proteksi Radiasi mengenai kendala dan situasi yang mempengaruhi pelaksanaan program proteksi.

Pengelolaan limbah radioaktif bertujuan melindungi keselamatan pekerja, masyarakat, dan lingkungan dari bahaya radiasi dengan menerapkan prosedur ketat yang mencakup pengumpulan, pengelompokan, pengolahan, pengangkutan, penyimpanan sementara, dan pembuangan limbah. Limbah radioaktif diklasifikasikan berdasarkan sifat fisik, kimia, dan radiologisnya menjadi limbah aktivitas rendah, sedang, dan tinggi, termasuk ZRTTD, bahan terkontaminasi, dan bahan bakar nuklir bekas (BBNB). Proses pengolahan melibatkan metode seperti peluruhan aktivitas, reduksi volume, perubahan komposisi, dan pengondisian, sementara pengangkutan limbah memerlukan izin, rencana rute, serta penggunaan alat pelindung diri (APD). Limbah radioaktif dengan umur paruh pendek dapat

disimpan sementara untuk peluruhan aktivitas hingga mencapai tingkat klirens sebelum diserahkan kepada badan pelaksana yang bertanggung jawab untuk pembuangan akhir.

Penanggulangan keadaan darurat adalah serangkaian kegiatan yang dilakukan dengan segera pada saat terjadi kedaruratan radiologi untuk mengurangi dampak serius yang ditimbulkan terhadap manusia, harta benda atau lingkungan hidup. Organisasi penanggulangan keadaan darurat terdiri dari ketua, pengendali operasi, pengkaji radiologi dan pelaksana operasi. Pelaksana Operasi meliputi tim proteksi, tim medis, tim pemadam kebakaran dan satuan pengamanan. Tindakan penanggulangan yang harus dilakukan dalam keadaan darurat radiologi meliputi tindakan mitigasi, tindakan perlindungan segera; tindakan perlindungan untuk petugas penanggulangan, pekerja dan masyarakat; dan/atau pemberian informasi dan instruksi kepada Masyarakat. Tindakan mitigasi adalah tindakan untuk membatasi dan mengurangi paparan radiasi jika terjadi peristiwa yang dapat menyebabkan atau meningkatkan paparan radiasi. Tindakan mitigasi diwujudkan dalam bentuk prosedur yang sesuai dengan hasil analisis potensi kecelakaan radiasi

Budaya keselamatan dalam pemanfaatan sumber radiasi penganon, sebagaimana diatur dalam PP No. 45 Tahun 2023, mewajibkan pemegang izin dan pekerja radiasi untuk menumbuhkan dan menerapkannya melalui sinergi seluruh elemen organisasi. Pekerja radiasi di industri dan medik memiliki peran penting, termasuk memahami tanggung jawab, mematuhi aturan keselamatan, bersikap kritis, serta melaksanakan tugas dengan teliti, transparan, dan berkoordinasi dengan tim untuk memitigasi risiko paparan radiasi. Hal ini bertujuan untuk memastikan keselamatan menjadi prioritas utama dalam setiap aktivitas. Budaya keamanan, sebagaimana diatur dalam PP No. 45 Tahun 2023, melibatkan pengelolaan perilaku, karakter, dan sikap individu serta organisasi untuk mendukung keamanan zat radioaktif dari ancaman yang disengaja, seperti pencurian atau sabotase. Keamanan nuklir mencakup pencegahan, deteksi, dan respons melalui manajemen proteksi fisik guna menjaga stabilitas fasilitas nuklir dan bahan radioaktif.

Sistem Manajemen dalam pemanfaatan tenaga nuklir, sesuai Peraturan BAPETEN No. 6 Tahun 2023, bertujuan memastikan keselamatan melalui pengelolaan yang efisien dan efektif dengan menerapkan siklus PDCA (Plan-Do-

Check-Act). Sistem Manajemen sebagaimana dimaksud mencakup: a. budaya keselamatan dan budaya keamanan; b. penerapan pendekatan bertingkat persyaratan sistem manajemen; c. dokumentasi sistem manajemen; d. kebijakan dan perencanaan; e. tanggung jawab manajemen; f. manajemen sumber daya; g. pelaksanaan Proses; dan h. pengukuran efektivitas, penilaian, dan peluang perbaikan.

I. Evaluasi

1. Penerapan Proteksi radiasi eksternal dilakukan dengan cara sebagai berikut,

kecuali:

- a. Penggunaan Alat Pelindung Diri yang disesuaikan dengan medan radiasi
- b. Pengaturan waktu saat melakukan pekerjaan penanganan radiasi
- c. Penggunaan penahan radiasi sesuai dengan jenis radiasi
- d. Pengaturan jarak aman saat bekerja dengan sumber radiasi

Jawaban: A

2. Pernyataan yang benar terkait dengan Nilai Batas Dosis (NBD) adalah:

- a. Merupakan nilai yang membatasi antara dosis-dosis radiasi yang dapat menimbulkan efek biologi dengan yang tidak menimbulkan efek biologi
- b. Tidak memperhitungkan penerimaan dosis dari penyinaran medik dan penyinaran alam
- c. Untuk pekerja radiasi nilainya 20 kali lebih tinggi daripada untuk masyarakat karena pekerja radiasi lebih tahan terhadap radiasi
- d. Jika tidak dilampaui dijamin tidak akan terjadi efek stokastik maupun deterministik

Jawaban: B

3. Berikut merupakan hak pekerja radiasi antara lain sebagai berikut, **kecuali:**

- a. Pemantauan Kesehatan rutin
- b. Pemantauan Dosis Radiasi Personel selama bekerja
- c. Memperoleh Pendidikan dan Pelatihan Terkait Proteksi Radiasi
- d. Tunjangan Kinerja Personel

Jawaban: D

4. Serangkaian kegiatan yang dilakukan dengan segera pada saat terjadi kedaruratan radiologi untuk mengurangi dampak serius yang ditimbulkan terhadap manusia, harta benda atau lingkungan hidup merupakan pengertian dari:
- Kecelakaan radiasi
 - Kecelakaan nuklir
 - Kedaruratan nuklir
 - Penanggulangan kedaruratan

Jawaban: D

6. Pelaksana operasi minimal yang harus ada dalam organisasi penanggulangan kedaruratan adalah....
- Pengkaji Radiologi, Pengendali Operasi, tim proteksi radiasi
 - Pengkaji Radiologi, Pengendali Operasi, tim medis dan tim proteksi radiasi
 - Tim medis, pemadam kebakaran, pengamanan dan tim proteksi radiasi
 - Ketua PKD, Pengendali Operasi dan Pengkaji Radiologi

Jawaban: C

7. Berdasarkan skala INES, skala 4 dari 7 memiliki arti...
- Insiden serius
 - Kejadian kecelakaan dengan dampak terbatas
 - Kejadian kecelakaan dengan dampak lebih luas
 - Kecelakaan serius

Jawaban: B

8. Berdasarkan peraturan BAPETEN No. 6 tahun 2023, berikut lingkup kegiatan yang harus menerapkan Sistem Manajemen Fasilitas:
- Instalasi nuklir, pertambangan dan galian nuklir serta pemanfaatan sumber radiasi pengion
 - Intansi Riset dan Pengembangan
 - Instansi Pendidikan dan Pelatihan
 - Semua Jawaban tidak benar

Jawaban: A

9. Tahapan Penerapan Sistem Manajemen secara umum antara lain sebagai berikut:

- a. *Plan, Do, Act, and Check*
- b. *Plan, Do, Check, and Act*
- c. *Plan, Do, Check and Correction*
- d. *Plan, Check, Do and Recommendation*

Jawaban: B

DAFTAR PUSTAKA

- CDC. *Health effect of radiation*. <https://www.cdc.gov/radiation-health/about/health-effects-of-radiation.html>.
- Herman Cember. (1996). *Introduction to Health Physics*. 3rd ed. McGraw-Hill. Inc.
- IAEA. (1988). *The Radiological Accident in Goiania*. Vienna.
- Indonesia. (2013). *Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif*. Jakarta.
- Indonesia. (2015). *Peraturan Pemerintah Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif*. Jakarta.
- Indonesia. (2023). *Peraturan Pemerintah Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif*. Jakarta.
- Indonesia. (2010). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2010 tentang Pemantauan Kesehatan untuk Pekerja Radiasi*. Jakarta.
- Indonesia. (2013). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*. Jakarta.
- Indonesia. (2016). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan Tingkat Sedang*. Jakarta.
- Indonesia. (2023). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2023 tentang Sistem Manajemen Fasilitas dan Kegiatan Pemanfaatan Tenaga Nuklir*. Jakarta.
- Standar BATAN 016. (2014). *Proteksi dan Keselamatan Radiasi*. Jakarta.
- University of Maryland. (1994). *Radiation Protection Training Manual and Study Guide*. Department of Environmental safety, sustainability and risk.

LAMPIRAN-LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Kategori Sumber Radiasi dan Tingkat Keamanan

Kategori Sumber Radioaktif	Rasio A/D (aktivitas/ nilai D)	Tingkat Keamanan	Kegiatan
1	A/D \geq 1000	Tingkat Keamanan A	<ol style="list-style-type: none">1. ekspor dan impor:<ol style="list-style-type: none">a. Sumber Radioaktif untuk iradiatorb. Sumber Radioaktif untuk radioterapi jenis terapi eksternal2. Penggunaan:<ol style="list-style-type: none">a. iradiatorb. radioterapi jenis terapi eksternal3. produksi radioisotop4. pengelolaan limbah radioaktif

Kategori Sumber Radioaktif	Rasio A/D (aktivitas/ nilai D)	Tingkat Keamanan	Kegiatan
2	$1000 > A/D \geq 10$	Tingkat Keamanan B	1. ekspor dan impor: <ol style="list-style-type: none"> a. Sumber Radioaktif untuk radiografi industri b. Sumber Radioaktif untuk radioterapi jenis brakhiterapi 2. Penggunaan: <ol style="list-style-type: none"> a. radiografi industri b. radioterapi jenis brakhiterapi 3. Penyimpanan* Sumber Radioaktif untuk <i>well logging</i> , dan gauging industri dengan Sumber Radioaktif aktivitas tinggi dengan jumlah paling kurang 10 (sepuluh) Sumber Radioaktif.
3	$10 > A/D \geq 1$	Tingkat Keamanan C	Penggunaan: <ol style="list-style-type: none"> a. gauging industri dengan Sumber Radioaktif aktivitas tinggi (Cs- 137, Co-60, dan Am-241Be dengan rentang aktivitas antara 0,4 MBq - 40 GBq) b. <i>well logging</i> c. otofluorografi
4	$1 > A/D \geq 0.01$	Cukup memenuhi persyaratan keselamatan Sumber Radioaktif	Penggunaan: gauging industri dengan Sumber Radioaktif aktivitas rendah (Pm-147, Tl-204, Kr-85, Sr-90, Am-241, Fe-55, Cd-109, Ni-63, dengan rentang aktivitas antara 0,4 MBq-40 GBq)

Kategori Sumber Radioaktif	Rasio A/D (aktivitas/ nilai D)	Tingkat Keamanan	Kegiatan
5	0.01 > A/D dan A > tingkat pengecualian	Cukup memenuhi persyaratan keselamatan Sumber Radioaktif	Penggunaan: <ol style="list-style-type: none"> a. Sumber Radioaktif untuk tujuan pendidikan, penelitian dan pengembangan b. <i>check-sources</i> c. Sumber Radioaktif untuk kalibrasi d. Sumber Radioaktif untuk e. standardisasi

Catatan:

* Penyimpanan: merupakan bagian dari kegiatan penggunaan *well logging*, dan gauging industri dengan Sumber Radioaktif aktivitas tinggi



BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

DIREKTORAT PENGEMBANGAN KOMPETENSI
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
2024