



BRIN
BADAN RISET
SIPILIS NASIONAL

Eri Hiswara et al.

PROTEKSI RADIASI PADA TERAPI RADIONUKLIDA

PROTEKSI RADIASI

PADA TERAPI RADIONUKLIDA

Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Penerbit BRIN

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



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

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

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

Eri Hiswara et al.

PROTEKSI RADIASI PADA TERAPI RADIONUKLIDA

© 2025 Eri Hiswara, Nunung Nuraeni, Nur Rahmah Hidayati, Dewi Kartikasari, Hayu Tyas Utami, Syarifatul Ulya, Okky Agassy Firmansyah, dan Achmad Faturrahman Jundi

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Proteksi Radiasi Pada Terapi Radionuklida - Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

xv + 127 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-6303-62-2 (*e-book*)

1. Teknik nuklir

2. Proteksi radiasi

3. Kedokteran nuklir

4. Radionuklida

621.48

Editor Akuisisi : Apriwi Zulfitri

Copy editor : Anton Winarko

Proofreader : Emsa Ayudia Putri dan Prapti Sasiwi

Penata isi : Dyah Arum Kusumastuti dan S. Imam Setyawan

Desainer sampul : Dyah Arum Kusumastuti, Hilda Yunnita dan S. Imam Setyawan

Cetakan pertama : 2025



Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, anggota Ikapi

Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah Gedung B.

J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,

Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,

Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340

Whatsapp: +62 811-1064-6770

E-mail: penerbit@brin.go.id

Website: penerbit.brin.go.id



PenerbitBRIN



Penerbit_BRIN



[penerbit.brin](https://www.instagram.com/penerbit.brin)

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
KATA PENGANTAR	xi
PRAKATA	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
BAB 2 JENIS-JENIS TERAPI RADIONUKLIDA.....	7
A. Karakteristik Radionuklida	8
B. Terapi Radiasi Beta	11
C. Terapi Radiasi Beta dan Sinar Gamma	13
D. Terapi Radiasi Alfa	16
BAB 3 PROTEKSI RADIASI	21
A. Proteksi Radiasi Pada Paparan Medis	21
B. Proteksi Radiasi Pada Paparan Kerja	26
C. Proteksi Radiasi pada Paparan Masyarakat dan Lingkungan.....	37
D. Insiden Radiasi.....	38
BAB 4 PERTIMBANGAN RAWAT INAP ATAU DIPULANGKAN	45
A. Pertimbangan Umum.....	45
B. Kriteria Pemulangan	52
C. Dosis Radiasi Sekitar Pada Pemulangan.....	61
D. Pertimbangan Lain	64
BAB 5 ISU TERKAIT PASIEN DAN KESELAMATAN LAINNYA.....	67

A. Pasien Hamil dan Menyusui	67
B. Penanganan Pasien Meninggal.....	75
D. Keselamatan Pengangkutan Radiofarmaka.....	81
E. Perkembangan Pascapandemi Covid-19	81
BAB 6 PERSYARATAN DAN PANDUAN.....	85
A. Standar	86
B. Peraturan	89
C. Pedoman	95
BAB 7 PENUTUP.....	103
DAFTAR SINGKATAN	107
GLOSARIUM	109
DAFTAR PUSTAKA.....	111
TENTANG PENULIS.....	119
INDEKS	125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Pemberian Radionuklida dengan Jarum Suntik
Berpelindung28

Gambar 3.2 Contoh Ampul yang Berisi Bahan Radioaktif29

Gambar 3.3. Lemari Berpelindung Timbal30

Gambar 3.4 Cincin TLD34

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis dan karakteristik pemancar beta dalam terapi radionuklida	13
Tabel 2.2 Karakteristik beberapa pemancar alfa untuk terapi radionuklida	17
Tabel 3.1 Batas turunan untuk kontaminasi permukaan.....	32
Tabel 3.2 Nilai Keefektifan Perisai Radiasi untuk ^{131}I	36
Tabel 4.1 Pertimbangan untuk Rawat Inap atau Dipulangkan.....	47
Tabel 4.2 Aktivitas (MBq) untuk mengizinkan pasien pulang bergantung pada dosis eksternal yang diterima orang lain (mSv dosis efektif)	47
Tabel 4.3 Pertanyaan kuesioner bagi pasien terapi radionuklida untuk rawat inap atau dipulangkan	51
Tabel 4.4 Penggunaan Metode Pendekatan Bertingkat untuk Memulangkan Pasien	52
Tabel 4.5 Praktik Internasional untuk Pemulangan Pasien ^{131}I	53
Tabel 4.6 Rekomendasi bagi pasien radioiodin untuk membatasi dosis hanya 1 mSv pada orang di sekitarnya.	61
Tabel 4.7 Faktor Konversi Dosis (Sv/Bq) untuk Inhalasi dan Ingesi ^{131}I	64
Tabel 4.8 Aktivitas maksimum radionuklida sumber terbuka yang boleh diberikan pada pasien rawat jalan	65

Tabel 5.1 Dosis (Sv/Bq) pada bayi akibat pemberian ASI dari Seorang Ibu Setelah Satu Kali Menerima Terapi Radionuklida ¹³¹ I.....	70
Tabel 5.2 Rekomendasi untuk Berhenti Menyusui setelah Menerima Radionuklida.....	71
Tabel 5.3 Periode untuk Menghindari Kehamilan setelah Menjalani Terapi Radionuklida.....	74
Tabel 5.4 Butir-butir penting otopsi pada jenazah yang mengandung radioaktif	77
Tabel 5.5 Batas Aktivitas pada Jenazah.....	79
Tabel 5.6 Bagian Aktivitas yang Diberikan ke Pasien yang Dilepas ke Saluran Pembuangan	80
Tabel 6.1 Rekomendasi Jangka Waktu Penundaan Kehamilan setelah Terapi.....	92
Tabel 6.2 Rekomendasi penghentian pemberian Air Susu Ibu setelah pemberian radiofarmaka.....	92
Tabel 6.3 Fraksi Pemberian Aktivitas kepada Anak Dibandingkan dengan Orang Dewasa.....	97
Tabel 6.4 Rekomendasi Aktivitas Minimum yang Diberikan Pada Anak.....	98
Tabel 6.5 Aktivitas dan Laju Dosis untuk Rilis Pasien	100
Tabel 6.6 Kriteria Aktivitas dan Laju Dosis yang Mensyaratkan Instruksi untuk Pasien.....	101

PENGANTAR PENERBIT

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

Terapi radionuklida merupakan salah satu pemanfaatan sumber radiasi, yang juga disebut sebagai radionuklida, di bidang medis. Sumber radionuklida tersebut diikat kuat dengan suatu molekul biologi atau farmaka sehingga disebut sebagai radiofarmaka. Keuntungan terapi radionuklida adalah mampu memberikan dosis serap yang sangat terkonsentrasi pada tumor target dan tidak memberikan dosis ke jaringan sehat di sekitarnya. Sumber radionuklida yang digunakan umumnya merupakan pemancar beta atau alfa, dan sedikit pemancar gamma. Aktivitas radiasi yang digunakan juga cukup rendah.

Meski demikian, sebagai sumber radiasi, radiofarmaka juga memiliki potensi bahaya yang perlu dikelola dengan baik. Buku ini menguraikan pokok-pokok tindakan proteksi radiasi yang perlu dilakukan agar tindakan terapi radionuklida dapat berjalan dengan aman dan selamat. Tindakan proteksi radiasi perlu dilakukan sejak pasien dipersiapkan di rumah sakit untuk menerima radiofarmaka hingga pasien pulang ke rumah. Bahkan, tindakan proteksi radiasi perlu juga dilakukan jika pasien meninggal dalam perawatan dan kemudian akan dimakamkan, dikremasi, atau dibalsam untuk peng-

awetan jika akan dikirim dari satu lokasi ke lokasi lain dalam waktu yang agak lama.

Buku ini diharapkan dapat menjadi pedoman untuk berbagai pihak yang terlibat dalam tindakan terapi radionuklida, mulai dari para tenaga medis, fisikawan medis, perawat, petugas proteksi radiasi, hingga pendamping pasien dalam mengambil tindakan yang tepat dari sisi proteksi dan keselamatan radiasi.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat menjadi referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan bagi seluruh pembaca. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

KATA PENGANTAR

Peraturan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Nomor 6 Tahun 2022, antara lain, menetapkan bahwa Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN) mempunyai tugas melaksanakan tugas teknis penelitian, pengembangan, pengkajian dan penerapan, serta invensi dan inovasi, dan penyelenggaraan ketenaganukliran di bidang teknologi keselamatan, metrologi, dan mutu nuklir. Teknologi keselamatan yang menjadi tugas PRTKMMN meliputi keselamatan pada aplikasi radiasi di berbagai bidang, seperti medis, industri, pertanian, dan riset. Khusus untuk aplikasi radiasi di bidang medis, aplikasi ini terdiri atas radiologi diagnostik, radioterapi, dan kedokteran nuklir. Kedokteran nuklir sendiri sebenarnya bisa digunakan untuk keperluan diagnostik dan terapi. Dalam hal ini, kedokteran nuklir terapi memanfaatkan radionuklida terbuka yang berbeda dengan radioterapi yang memanfaatkan sumber radiasi atau radionuklida tertutup. Pemanfaatan radionuklida terbuka untuk keperluan terapi ini disebut pula sebagai terapi radionuklida.

Buku ini secara khusus membahas tentang aspek proteksi radiasi, yang maknanya sama dengan keselamatan radiasi, pada terapi radionuklida. Tema buku ini sesuai dengan tugas PRTKMMN sehingga dapat dikatakan bahwa buku merupakan salah satu bentuk kegiatan PRTKMMN sesuai dengan penugasannya.

Selaku Kepala PRTKMMN, kami mengucapkan penghargaan kepada para penulis yang telah mendedikasikan pikiran dan tenaganya untuk menyusun buku ini. Kami berharap di masa mendatang akan terbit lebih banyak lagi buku yang membahas aspek proteksi dan keselamatan radiasi dari berbagai pemanfaatan ketenaganukliran di Indonesia. Dengan cara ini, masyarakat luas akan makin mengenal iptek proteksi radiasi serta aspek proteksi dan keselamatan radiasi makin diperhatikan dan menjadi prioritas utama dalam pengembangan dan pemanfaatan teknologi nuklir di Indonesia.

Demikian, semoga buku ini dapat bermanfaat bagi tenaga medis, tenaga kesehatan, fisikawan medis, petugas proteksi radiasi, dan juga masyarakat umum, dalam memahami aspek proteksi dan keselamatan radiasi dari pemanfaatan sumber radionuklida untuk terapi ini secara komprehensif.

Selamat membaca.

Jakarta, Juli 2024

Kepala Pusat Riset Teknologi Keselamatan,
Metrologi dan Mutu Nuklir ORTN BRIN

Dr. rer. biol. hum. Heru Prasetyo, M.Si

PRAKATA

Teknologi nuklir dan radiasi telah lama dan banyak dimanfaatkan di berbagai bidang kehidupan, termasuk di bidang medis. Pemanfaatan di bidang medis ini sendiri dapat dibedakan atas radiologi diagnostik, radioterapi, dan kedokteran nuklir. Radiologi diagnostik menggunakan teknologi pencitraan seperti sinar-X untuk mendiagnosis atau menangani suatu penyakit, termasuk membantu pelaksanaan prosedur medis lainnya; radioterapi merupakan prosedur pengobatan kanker dengan menggunakan sumber radiasi pemancar sinar gamma atau sinar-X dan elektron berenergi tinggi; sedangkan kedokteran nuklir adalah prosedur medis yang memanfaatkan sejumlah kecil bahan radioaktif untuk tujuan diagnosis dan terapi suatu penyakit.

Berbeda dengan radioterapi yang menggunakan sumber radiasi yang berada di luar tubuh pasien, terapi dengan kedokteran nuklir dilakukan dengan memasukkan sumber radiasi ke dalam tubuh, baik melalui penyuntikan maupun dikonsumsi secara oral oleh pasien. Sumber radiasi untuk radioterapi bersifat tertutup, dalam arti bahan radioaktifnya secara permanen tertutup di dalam kapsul atau terikat kuat dalam satu bentuk padatan, sementara sumber radiasi pada terapi kedokteran nuklir merupakan sumber terbuka, yang berarti bahan radioaktifnya tidak permanen tertutup dalam kapsul atau tidak terikat kuat dalam satu bentuk padatan. Terapi kedokteran nuklir ini disebut pula sebagai terapi radionuklida.

Selama satu abad terakhir, penggunaan terapi radionuklida untuk mengobati berbagai penyakit telah menjadi hal yang umum di seluruh dunia. Komite Ilmiah PBB tentang Efek Radiasi Atom (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) memperkirakan 1,4 juta tindakan terapi radionuklida dilakukan setiap tahun dalam rentang periode 2009–2018, dan jumlah tersebut meningkat sekitar 60% dari periode 1997–2007. Peningkatan ini tidak lepas dari ditemukannya sejumlah teknik terapi baru yang kini telah tersedia di banyak negara.

Di Indonesia, pelayanan kedokteran nuklir secara umum dimulai tahun 1967 setelah dibangunnya reaktor riset pertama Indonesia di Bandung pada tahun 1965. Pelayanan awalnya dilakukan di lokasi reaktor yang diberi nama Pusat Reaktor Atom Bandung (PRAB), tetapi pada tahun 1971 dipindahkan ke RSUP dr. Hasan Sadikin yang juga terletak di kota Bandung. RSUP dr. Hasan Sadikin ini dengan demikian merupakan rumah sakit pertama di Indonesia yang memberikan pelayanan kedokteran nuklir.

Seperti halnya pemanfaatan teknologi nuklir di berbagai bidang yang lain, pemanfaatan teknologi nuklir di bidang medis juga memiliki potensi bahaya radiasi, baik bagi pasien itu sendiri, pekerja radiasi yang merupakan dokter atau perawat, masyarakat umum, maupun bagi lingkungan. Untuk itu, semua pemanfaatan teknologi nuklir dilaksanakan dengan pengawasan ketat dari sisi keselamatan dengan upaya proteksi radiasi, sementara dari sisi legal dikendalikan dengan berbagai peraturan keselamatan nuklir atau radiasi yang secara berkala dimutakhirkan sesuai dengan perkembangan pemanfaatan teknologi nuklir itu sendiri.

Di Indonesia, buku yang membahas tentang terapi radionuklida atau kedokteran nuklir secara umum masih sangat sedikit serta lebih menekankan pada teknologi yang digunakan dan tata laksana tindakan medis yang dilakukan. Berbeda dengan buku-buku tersebut, buku ini lebih menekankan pada aspek proteksi radiasi dari tindakan terapi radionuklida yang dilakukan. Selain itu, dari berbagai jenis radionuklida yang ada, ^{131}I (iodin-131) merupakan radionuklida yang

paling banyak digunakan pada terapi radionuklida. Oleh karena itu, buku ini lebih banyak membahas ^{131}I daripada radionuklida lainnya. Untuk memudahkan pembaca memahami uraian, beberapa istilah teknis telah dijelaskan pada “Glosarium”.

Buku ini diharapkan dapat membantu para praktisi medis di bidang kedokteran nuklir dan praktisi proteksi radiasi di bidang medis dalam memahami isu proteksi radiasi dalam terapi radionuklida secara komprehensif, juga untuk pendamping pasien dalam mengambil tindakan dari sisi proteksi dan keselamatan radiasi. Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada para pihak yang telah membaca buku ini sejak masih berupa naskah dan memberikan usulan perbaikan untuk menyempurnakannya. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Penerbit BRIN yang bersedia menerbitkan buku ini. Sebagai penutup, tim penulis mengharapkan penerbitan buku ini dapat mencapai tujuannya dan memberikan manfaat untuk kita bersama.

Tangerang Selatan, Juli 2024

Tim Penulis

BAB 1

GAMBARAN UMUM TERAPI RADIONUKLIDA

Pada dasarnya, terapi radionuklida adalah obat yang merupakan gabungan dari suatu sumber radiasi dalam bentuk radionuklida yang diikat kuat dengan suatu molekul biologi atau farmaka. Gabungan ini biasa pula disebut sebagai radiofarmaka atau radiofarmasi. Sumber radionuklida ^{99m}Tc -DTPA, misalnya gabungan radionuklida ^{99m}Tc dengan farmaka DTPA, dan biasa digunakan untuk pencitraan fungsi ginjal. Radiofarmaka yang sama, tetapi DTPA-nya dalam bentuk aerosol, yaitu ^{99m}Tc -DTPA (aerosol), berguna untuk pemeriksaan organ paru-paru.

Sejarah terapi radionuklida dapat ditelusuri ke awal tahun 1900-an, setelah penemuan radioaktivitas oleh Henri Becquerel dan Marie Curie. Tidak lama setelah itu, diketahui bahwa pajanan atau kontak dengan jaringan hidup mempunyai efek buruk pada jaringan, bergantung pada lamanya pajanan. Pengamatan ini, yaitu terjadinya luka bakar di dada para ilmuwan yang membawa zat radioaktivitas di kantong jaket mereka, dimanfaatkan untuk mengobati berbagai kondisi kulit dan berbagai tumor. Pengamatan ini juga melahirkan konsep bahwa radiasi mempunyai efek dan bahkan dapat menghancurkan tumor (Goldsmith, 2020).

Keuntungan terapi radionuklida adalah mampu memberikan dosis serap yang sangat terkonsentrasi pada tumor target dan tidak

memberikan dosis ke jaringan di sekitarnya (Yeong et al., 2014). Selain itu, kemampuan selektif terapi radionuklida bermanfaat dalam pengobatan keganasan sistemik seperti pada metastasis tulang ketika penyinaran seluruh tubuh menggunakan radioterapi sinar eksternal tidak mungkin dilakukan. Karena pemberian radionuklida bersifat invasif minimal dan durasi pengobatan lebih singkat daripada kemoterapi, terapi radionuklida bertarget telah menjadi salah satu jenis terapi kanker yang disukai.

Pada tahun 1998, John Funkhouser dari AS memperkenalkan istilah “teranostik” untuk menguraikan pendekatan yang menggabungkan tindakan diagnosis dan pengobatan suatu penyakit. Pendekatan ini memungkinkan pemilihan subpopulasi pasien yang paling mungkin mendapatkan manfaat dari terapi bertarget (*targeted therapy*) sesuai dengan “profil molekuler” mereka pada titik waktu tertentu, atau pasien yang memiliki risiko efek samping lebih tinggi (Idée et al., 2013). Selain menghemat waktu dan biaya, teranostik juga dapat mem-*bypass* beberapa efek biologis yang tidak diinginkan yang mungkin muncul ketika kedua modalitas ini digunakan secara terpisah.

Terkait dengan teranostik, di Indonesia, kegiatan ini dimulai saat RSUP dr. Hasan Sadikin melakukan kolaborasi dengan Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)¹ untuk mempelajari biodistribusi dan dosimetri antigen membran spesifik prostat (PSMA) yang diberi tanda dengan ¹⁷⁷Lu untuk manajemen kanker prostat yang resisten terhadap kastrasi metastatik (Budiawan, 2018). Setelah BATAN digabung ke dalam BRIN, kerja sama RSUP dr. Hasan Sadikin dengan BRIN berlanjut dengan studi terkait estimasi dosis internal ¹⁷⁷Lu-DOTA Trastuzumab pada manusia berbasis uji biodistribusi pada mencit (Hidayati et al., 2015). Selain itu, riset terkait pemanfaatan ¹⁷⁷Lu di Indonesia juga dilakukan dalam bentuk ¹⁷⁷Lu-DOTATATE untuk mengevaluasi dosis ginjal pada pasien dengan tumor neroendokrin

¹ Saat ini, BATAN telah dilebur dan bergabung dengan beberapa lembaga penelitian lain menjadi BRIN sejak tahun 2021 berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 78 Tahun 2021 tentang Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

setelah menjalani terapi radionuklida reseptor peptida (Hidayati et al., 2019), dan dalam bentuk ^{177}Lu -PSMA-617 untuk pencitraan molekuler dan terapi radioligand bertarget pada kanker prostat (Ritawidya et al., 2023).

Istilah teranostik kemudian makin dikenal dan diakui keberadaannya sehingga perhimpunan para dokter spesialis kedokteran nuklir mengubah namanya dari Perhimpunan Kedokteran Nuklir Indonesia (PKNI) menjadi Perhimpunan Kedokteran Nuklir dan Teranostik Molekuler Indonesia (PKN-TMI). Sampai buku ini ditulis pada pertengahan tahun 2024, di Indonesia telah terdapat 20 rumah sakit (RS) yang menyelenggarakan pelayanan kedokteran nuklir, dengan 15 RS di antaranya berada di Pulau Jawa dan hanya 5 RS yang berada di luar Jawa. Dua puluh RS tersebut adalah RS Adam Malik di Medan, RS M. Djamil di Padang, RS Wahab Syahrani di Samarinda, RS Prof. Dr. R.D. Kandou di Manado, RS Khusus Daerah Dadi di Makassar, RS Dr. Sutomo di Surabaya, RS Indriati di Solo, RS Dr. Sardjito di Yogyakarta, RS Dr. Kariadi di Semarang, RS Hasan Sadikin di Bandung, RS Santosa di Bandung, RS Mandaya Royal di Tangerang, serta RS Cipto Mangunkusumo, RSPAD Gatot Subroto, RS Dharmas, RSJPD Harapan Kita, RS Pusat Pertamina, RS Gading Pluit, RS MRCCC Siloam, RSAL Mintohardjo, di Jakarta.

Radionuklida yang cocok untuk tujuan terapi adalah radionuklida yang dapat berikatan kuat dengan tumor, atau memiliki afinitas tumor yang tinggi. Radionuklida ini dapat mengirimkan dosis radiasi yang ditargetkan langsung ke tumor dan metastasisnya sehingga tidak merusak jaringan normal yang sehat. Pilihan molekul yang membawa radiasi ke tumor ditentukan oleh afinitasnya—atau kekuatan pengikatannya—terhadap struktur target tumor, seperti antigen atau reseptor. Radiasi pengion yang dipancarkan oleh radionuklida yang terkait dengan pembawanya membunuh sel kanker dengan merusak DNA kanker tersebut sehingga menyebabkan tumor menyusut.

Radionuklida yang ideal untuk tujuan terapi harus dapat bertindak hanya pada sel tumor ganas yang menjadi targetnya dan dapat menjangkau semua sel tumor ganas di mana pun berada. Selain itu,

penyinaran radionuklida harus mampu memberikan dosis radiasi maksimum dan membunuh sel kanker dengan efektif sambil tetap menjaga agar jaringan dan organ sehat di sekeliling sel kanker target tidak terganggu (International Atomic Energy Agency [IAEA], t.t.-b).

Buku ini menguraikan beberapa aspek dari proteksi radiasi pada terapi radionuklida. Secara umum, proteksi radiasi adalah tindakan yang dilakukan untuk melindungi makhluk hidup dan lingkungannya dari efek pajanan radiasi pengion yang berbahaya dan cara untuk mencapainya. Pada terapi radionuklida, proteksi radiasi dilakukan untuk melindungi pekerja—termasuk dokter, perawat, dan pasien, dari pajanan radiasi pengion yang dapat mengganggu kesehatannya.

Sebagai suatu ilmu, proteksi radiasi dikembangkan dari asumsi bahwa semua pajanan radiasi dari dosis yang sangat tinggi hingga sangat rendah memberikan risiko kesehatan bagi makhluk hidup yang menerimanya. Risiko kesehatan bisa berupa kematian langsung akibat terbunuhnya sel dan jaringan hidup dalam jumlah yang besar atau munculnya kanker akibat kerusakan DNA yang tidak dapat sepenuhnya digantikan. Asumsi dilakukan karena sampai saat ini manusia belum berhasil mengetahui mekanisme dan efek yang terjadi saat dosis radiasi tingkat rendah berinteraksi dengan organ atau jaringan tubuh.

Setelah pendahuluan pada Bab I ini, Bab II akan menguraikan jenis-jenis terapi radionuklida yang ada dan secara umum dibedakan dari jenis radiasi yang dipancarkan, yaitu radiasi beta, radiasi beta dan gamma, serta radiasi alfa. Selanjutnya pada Bab III akan dijelaskan tentang upaya proteksi radiasi yang dilakukan untuk pasien, pekerja, masyarakat atau masyarakat umum, dan lingkungan. Uraian tentang tindakan yang perlu dilakukan dalam situasi kedaruratan radiasi yang melibatkan sumber radiasi untuk terapi radionuklida ini juga diberikan pada Bab III ini.

Pasien yang menjalani terapi radionuklida memiliki pilihan untuk melakukan rawat inap atau pulang ke rumah masing-masing setelah menerima radionuklida dalam bentuk disuntik atau dikonsumsi secara oral. Namun, keputusan untuk memilih tersebut harus melalui

berbagai pertimbangan dari sisi keselamatan. Bab IV menguraikan berbagai pertimbangan yang perlu dilakukan sebelum pasien diputuskan untuk menjalani rawat inap atau boleh pulang.

Beberapa isu terkait dengan proteksi radiasi pada terapi radionuklida ini diberikan pada Bab V. Isu-isu tersebut meliputi isu yang terkait dengan hamil dan menyusui yang menjadi kodrat dari seorang pasien wanita, isu penanganan bagi pasien yang meninggal, pengelolaan limbah radioaktif yang terbentuk dari pemanfaatan sumber radiasi, dan upaya keselamatan saat melakukan pengangkutan sumber radiasi terbuka yang digunakan pada terapi radionuklida ini.

Berbagai standar, pedoman, dan peraturan telah banyak disusun agar terapi radionuklida ini berjalan dengan aman. Standar dan pedoman umumnya diberikan oleh lembaga internasional, sementara peraturan ditetapkan oleh instansi resmi pemerintahan suatu negara. Bab VI menjelaskan standar dan berbagai pedoman yang diberikan oleh lembaga internasional tersebut, termasuk yang diberikan oleh beberapa negara lain, dan peraturan yang berlaku saat ini di Indonesia.

Buku ditutup dengan Bab VII yang memberikan ringkasan dari semua uraian yang telah diberikan pada bab-bab sebelumnya, juga usulan untuk pengembangan pemanfaatan terapi radionuklida ini di Indonesia yang sampai buku ini ditulis masih agak tertinggal dibandingkan pemanfaatan nuklir dan radiasi di sektor radiologi diagnostik dan radioterapi.

BAB 2

JENIS-JENIS TERAPI RADIONUKLIDA

Radionuklida yang digunakan untuk tujuan terapi radionuklida adalah radiasi pemancar radiasi beta atau alfa yang memiliki waktu paruh cukup panjang dalam hitungan hari. Hal ini dimaksudkan untuk menyesuaikan dengan laju pergantian farmakokinetik dari molekul yang digunakan untuk menargetkan penyakit.

Selain pancaran partikel, radionuklida pemancar radiasi gamma juga sering digunakan. Pemanfaatan radiasi gamma memungkinkan untuk dilakukannya pengukuran menggunakan pencitraan kamera gamma (planar atau SPECT/CT). Dalam beberapa kasus, radionuklida pemancar positron juga digunakan sehingga memungkinkan dilakukannya pencitraan PET/CT.

Secara umum terapi radionuklida dilakukan dalam bentuk terapi sistemik dan terapi intrakaviter. Terapi sistemik dengan radionuklida terbuka merupakan terapi yang dilakukan dengan memasukkan cairan atau kapsul ke dalam tubuh secara oral atau intravena, sedangkan terapi intrakaviter adalah terapi yang dilakukan dengan pemberian suspensi koloid ke dalam rongga tubuh yang tertutup (International Commission on Radiological Protection [ICRP], 2004).

Pada Bab II ini akan diuraikan tentang penggunaan sumber radiasi beta, sumber radiasi beta dengan radiasi gamma, dan sumber radiasi alfa untuk terapi radionuklida. Namun, sebelumnya akan di-

uraikan terlebih dahulu karakteristik radionuklida yang memancarkan berbagai sumber radiasi tersebut.

A. Karakteristik Radionuklida

Karakteristik radionuklida yang penting untuk dapat digunakan pada terapi radionuklida dapat dibedakan atas dua kategori, yaitu karakteristik fisik dan karakteristik biokimia (Hoefnagel et al., 1987). Seperti dikutip Yeong et al. (2014), karakteristik fisik antara lain meliputi waktu paruh fisis, jenis pancaran, energi radiasi, anak luruh, cara produksi, dan kemurnian radionuklida. Sementara itu, karakteristik biokimia meliputi perunut, jaringan target, retensi radioaktivitas di tumor, stabilitas in vivo, dan toksisitas. Beberapa di antaranya akan diuraikan sebagai berikut.

1. Waktu Paruh

Karakteristik waktu paruh dapat dibagi atas waktu paruh fisis dan waktu paruh biologis. Waktu paruh fisis yang tepat untuk terapi radionuklida adalah antara 6 jam dan 7 hari (Qaim, 2001). Waktu paruh fisis yang sangat singkat akan tidak praktis dan membatasi fleksibilitas pemberian radionuklida, sedangkan waktu paruh yang panjang akan membuat dosis radiasi tertahan lebih lama pada tubuh pasien dan akan memberikan paparan pada orang-orang di sekitarnya untuk jangka waktu yang lebih panjang. Selain itu, jika waktu paruh fisis terlalu lama, pasien perlu dirawat di rumah sakit dan diisolasi dalam jangka waktu yang lebih lama pula sehingga meningkatkan biaya pengobatan (Yeong et al., 2014).

Di sisi lain, waktu paruh biologis bergantung pada perunut (*tracer*) yang digunakan. Jika perunut dirancang untuk dimasukkan ke dalam tubuh pasien secara permanen, waktu paruh fisisnya tidak boleh terlalu lama. Selain itu, perunut harus memiliki retensi yang cukup sehingga radiasi dapat diberikan ke tumor secara efisien. Jika waktu paruh biologis terlalu pendek, radionuklida akan dilepaskan dengan aktivitas yang sangat tinggi sehingga memerlukan pengelolaan limbah radioaktif yang ekstensif. Karena itu, untuk pemberian radiasi

yang efisien, waktu paruh biologis dan fisik harus seimbang sehingga menghasilkan waktu paruh efektif yang optimal.

Gabungan antara waktu paruh fisis dan waktu paruh biologis disebut sebagai waktu paruh efektif. Waktu paruh efektif menyatakan waktu yang dibutuhkan oleh suatu zat radioaktif untuk berkurang separuh dari jumlah semula dengan kombinasi pembuangan biologis dan peluruhan radioaktif. Secara matematis, waktu paruh efektif diberikan sebagai

$$T_e = \frac{T_p T_b}{T_p + T_b}; \quad (2.1)$$

dengan T_e adalah waktu paruh efektif, T_p adalah waktu paruh fisis, dan T_b adalah faktor paruh biologis.

Terkait dengan waktu paruh, mekanisme serapan radionuklida merupakan karakteristik yang juga perlu diperhatikan. Jika serapannya lambat, radionuklida dengan waktu paruh fisis yang relatif panjang harus digunakan agar radionuklida tidak meluruh sempurna sebelum mencapai tumor target (Yeong et al., 2014).

2. Jenis Pancaran dan Energi Radiasi

Untuk terapi radionuklida, radiasi dengan alih energi linier (LET) yang tinggi—seperti radiasi alfa dan beta—merupakan jenis radiasi yang dipilih. Jenis radiasi ini memiliki kemampuan untuk melakukan ionisasi per lintasan yang sangat tinggi. Per definisi, LET merupakan ukuran mengenai energi, sebagai fungsi jarak, dialihkan dari radiasi ke materi tersinar (Hiswara, 2023). Nilai LET yang tinggi menunjukkan bahwa energi yang diterima akan mengendap dalam jarak yang pendek. Keuntungan lain dari nilai LET yang tinggi adalah mengurangi kebutuhan akan tindakan proteksi radiasi tambahan karena radiasi tidak akan menembus keluar dari tubuh pasien.

Bergantung pada jenis tumornya, energi dan intensitas radiasi pemancar alfa dan beta yang dipilih harus lebih besar dibandingkan energi dan intensitas radiasi gamma, sinar-X atau elektron Auger yang

menyertainya. Hal ini terutama berguna untuk pengobatan tumor yang cukup besar. Namun, untuk pengobatan kelompok kecil sel kanker atau deposit tumor yang kecil, radionuklida yang memancarkan elektron Auger dianggap lebih bermanfaat karena sitotoksitas tingkat tinggi dan efektivitas biologis jangka pendeknya. (Ersahin dkk., 2011). Elektron Auger adalah elektron kedua yang terlepas dari orbit saat foton sinar-X karakteristik berinteraksi dengan elektron lain di orbit tempat asal foton karakteristik tersebut (Cember dan Johnson, 2009).

3. Anak Luruh

Karakteristik fisik lain yang penting adalah radionuklida harus dapat meluruh menjadi nuklida yang stabil. Meskipun sedikit tidak stabil, anak luruh setidaknya memiliki umur yang pendek sehingga dapat meluruh dalam hitungan jam menjadi nuklida stabil. Namun, jika nuklida anak luruh tidak stabil, nuklida dapat menambah jumlah total dosis radiasi yang diserap. Karena itu, persentase dosis radiasi yang diberikan anak luruh perlu diperhitungkan agar tidak memengaruhi rencana pengobatan (Yeong et al., 2014).

4. Perunut

Untuk karakteristik biokimia, perunut yang tepat secara klinis harus bisa memberikan konsentrasi selektif dan retensi jangka panjang pada tumor, sambil tetap menjaga agar serapan pada jaringan normal sekitar tetap minimal (Qaim, 2001). Selain itu, bergantung pula pada mekanisme serapan selektif tumor baik melalui deposisi tulang, pengikatan protein, atau serapan metabolik. Rasio konsentrasi radiofarmaka pada tumor terhadap organ atau jaringan lain harus setinggi mungkin sehingga radiasi dapat diberikan secara optimal dengan meminimalkan dosis radiasi yang diterima oleh jaringan normal di sekitar tumor.

Jika dari jenis berprotein (*proteinaceous*), perunut harus dapat dipastikan cukup stabil selama pemberian radionuklida dan dipertahankan cukup lama secara *in vivo* agar radiasi yang diberikan ke

dalam tubuh pasien telah sesuai sebelum dimetabolisme dan akhirnya diekskresikan. Faktor lain yang perlu dipertimbangkan adalah ukuran partikel perunut. Dalam radioembolisasi tumor hati menggunakan mikrosfer ^{90}Y , misalnya, partikelnya harus cukup besar sehingga tidak melewati dasar kapiler dan pindah ke organ lain, terutama paru-paru, dan pada saat yang sama cukup kecil agar dapat menembus jauh ke dalam vaskularitas tumor. Ukuran tipikal partikel radioembolisasi ^{90}Y adalah antara 20 dan 40 μm (Yeong et al., 2014). Karakteristik biokimia lain yang perlu dipertimbangkan adalah toksisitas rendah, gravitas spesifik untuk aliran dan distribusi optimal selama pemberian radionuklida, pH yang tepat, serta laju klirens yang optimal (kecuali untuk perunut permanen) (Yeong et al., 2014).

B. Terapi Radiasi Beta

Radiasi beta memiliki daya tembus jaringan yang cukup rendah sehingga dapat dipastikan bahwa penggunaan radiasi beta pada terapi radionuklida tidak memberikan paparan radiasi bagi pekerja (yang dalam hal ini adalah dokter dan perawat), masyarakat, atau orang lain di sekitarnya. Beberapa jenis radionuklida pemancar beta dan pemanfaatannya akan diberikan pada bagian ini.

1. Radionuklida ^{32}P (Fosfor)

Radionuklida ^{32}P dengan waktu paruh fisis sebesar 14,3 hari biasanya tersedia dalam bentuk natrium fosfat. Terapi dengan ^{32}P merupakan terapi intrakaviter dalam bentuk ^{32}P kromik fosfat yang digunakan untuk pengobatan keganasan rongga pleura dan peritoneum serta pemberian intra-artikular untuk sinovektomi. ^{32}P juga digunakan untuk mengobati polisitemia (Bly, 2020).

Radionuklida ^{32}P telah diterima sebagai pengobatan untuk penyakit mieloproliferatif refrakter selama lebih dari 30 tahun. Penyakit mieloproliferatif termasuk polisitemia rubra vera dan trombositemia esensial dan merupakan kelompok kelainan yang ditandai dengan peningkatan produksi sel darah (IAEA, t.t.-c). Namun, penggunaan ^{32}P untuk pengobatan penyakit ini telah menurun seiring dengan

berkembangnya agen kemoterapi baru. Pengobatan dengan ^{32}P umumnya diperuntukkan bagi pasien yang berusia di atas 70 tahun.

2. Radionuklida ^{89}Sr (Strontium)

Radionuklida ^{89}Sr dengan waktu paruh 50,5 hari umumnya berbentuk strontium klorida dan digunakan untuk metastasis tulang. Metastasis tulang terjadi akibat berbagai keganasan (sel kanker) dan pasien yang menderitanya banyak yang menurun kualitas hidupnya akibat nyeri dan morbiditas dari berbagai obat yang digunakan untuk mengobati rasa nyeri tersebut. Dalam hal ini, strontium bersifat sebagai pengganti kalsium pada matriks tulang (IAEA, t.t.-c).

3. Radionuklida ^{90}Y (Itrium)

Radionuklida ^{90}Y memiliki waktu paruh fisis 2,7 hari. Pengobatan yang umum dilakukan dengan radionuklida ini adalah terapi ^{90}Y -SIRT (*selective internal radiation therapy*), yaitu pengobatan kanker dan tumor yang terletak di dalam hati (Bly, 2020). Terapi ini melibatkan embolisasi mikrosfer radioaktif ^{90}Y ke dalam suplai arteri hati sebagai alternatif dari lipiodol ^{131}I . Terapi ini juga dapat digunakan pada karsinoma kolorektal metastatik pada keganasan yang lebih jarang, seperti tumor neuroendokrin metastatik, dengan hasil yang baik (IAEA, t.t.-c). Efek terapi diduga tidak hanya disebabkan oleh radiasi beta, tetapi juga karena efek oklusif pada pohon arteri hepatic.

Selain itu, radionuklida ^{90}Y dalam bentuk koloid digunakan untuk sinovektomi radiasi (t.t.-c). Teknik ini digunakan untuk menghentikan perkembangan penyakit radang sendi sekaligus meningkatkan fungsi sendi. Suntikan intra-artikular silikat ^{90}Y untuk sendi lutut, koloid sulfur ^{186}Re (rhenium) untuk sendi berukuran sedang, dan koloid sitrat ^{169}Er (erbium) untuk sendi kecil menghasilkan perbaikan gejala dan fungsi pada sekitar 60–80% pasien yang dirawat.

Selain ketiga radionuklida yang telah disebutkan, beberapa radionuklida pemancar radiasi beta yang lain juga telah dikembangkan dan digunakan pada terapi radionuklida. Tabel 2.1 memperlihatkan karakteristik beberapa radionuklida pemancar beta tersebut. Nomor

CID yang diberikan pada Tabel 2.1 merupakan pengidentifikasi akses ke pangkalan data PubChem (Public Chemical) untuk *compound ID* (CID).

Tabel 2.1 Jenis dan Karakteristik Pemancar Beta dalam Terapi Radionuklida

Radionu- klida	Nomor CID	Waktu paruh (jam)	Radiasi β maks. (keV)	Radiasi Y maks. (keV)	Daya tembus maksimum di jaringan (mm)
¹⁷⁷ Lu	161046	168	490	113	0,673
¹⁶⁶ Ho	161007	26,8	1850	81	8,7
¹⁸⁶ Re	161105	90	1070	137	4,5
¹⁸⁸ Re	167082	17	2120	155	10
⁶⁷ Cu	167395	61,83	400	184,5	2,1
¹⁴⁹ Pm	161149	53,08	1070	286	4,8
¹⁹⁹ Au	167085	75,36	462	159,6	3,9
⁷⁷ Br	177674	57,036	342,4	521	t/t
¹⁵³ Sm	114941	46,7	810	103	3,1
¹⁰⁵ Rh	167192	35,36	190	319	t/t
⁸⁹ Sr	5388880	1212	1460	t/t	2,4
⁹⁰ Y	104760	64,2	2280	t/t	11,3
¹³¹ I	24855	192	606	364	2

Keterangan: t/t: tidak tersedia

Sumber: Asadian et al. (2020)

C. Terapi Radiasi Beta dan Sinar Gamma

Selain memancarkan radiasi beta murni, beberapa radionuklida juga memancarkan radiasi beta yang diikuti dengan sinar gamma. Keberadaan sinar gamma ini dapat bermanfaat jika energi dan intensitasnya berada dalam rentang diagnostik sehingga dapat memberikan kemampuan tambahan untuk memvisualisasikan distribusi radiofarmaka dalam tubuh pasien dengan menggunakan metode skintigrafi gamma (Yeong et al., 2014).

1. Radionuklida ^{131}I (Iodin)

Radionuklida ^{131}I adalah pemancar beta dan gamma dengan energi beta dan gamma rata-rata masing-masing adalah 192 keV dan 364 keV. Waktu paruhnya adalah 8 hari. Radionuklida ^{131}I yang diberi tanda dengan sodium iodida, $^{131}\text{I-NaI}$, dalam bentuk kapsul gelatin dan cairan merupakan terapi radionuklida yang paling banyak digunakan sampai saat ini. Pengobatan ini dikenal sebagai terapi iodin radioaktif (RAI) dan menggunakan ^{131}I untuk mengobati beberapa penyakit terkait tiroid, seperti penyakit Graves, nodul hiper-fungsi soliter, dan gondok (*goiter*) multinodular toksik (Yeong et al., 2014).

Radionuklida ^{131}I juga merupakan terapi lipiodol, yang digunakan untuk mengobati karsinoma hepatoselular primer (HCC). Dalam hal ini, lipiodol ^{131}I disuntikkan intra-arterial. Terapi ini dilakukan untuk dua skenario klinis: pertama, terapi untuk HCC yang tidak dapat dioperasi, dan kemudian sebagai terapi tambahan setelah reseksi HCC (IAEA, t.t.-c).

Ada juga terapi lain seperti ^{131}I MIBG yang digunakan untuk mengobati tumor neuroendokrin, yang relatif jarang terjadi pada orang dewasa dan terutama terdiri atas feokromositoma, tumor karsinoid, paraganglioma, neuroblastoma, dan kanker tiroid meduler. Pada populasi anak-anak, neuroblastoma adalah tumor padat yang paling umum terjadi pada bayi berusia kurang dari satu tahun (IAEA, t.t.-c).

2. ^{153}Sm (Samarium)

Radionuklida ^{153}Sm memiliki waktu paruh selama 1,9 hari dan merupakan pemancar beta dan gamma. ^{153}Sm berbentuk EDTMP telah digunakan untuk sinovetomi radiasi (Bly, 2020). Sama seperti ^{89}Sr , radionuklida ^{153}Sm telah digunakan untuk mengobati metastasis tulang dan berfungsi sebagai substitusi kalsium pada matriks tulang (IAEA, t.t.-c).

3. ^{166}Ho (Holmium)

Radionuklida ^{166}Ho adalah pemancar beta dan gamma dengan waktu paruh 26,8 jam. ^{166}Ho diproduksi melalui aktivasi neutron secara

langsung dari ^{165}Ho kemurnian tinggi atau dari ^{164}Dy dengan dua neutron (generator $^{166}\text{Dy}/^{166}\text{Ho}$) (Bly, 2020).

Beberapa pemanfaatan ^{166}Ho , antara lain adalah penggunaan ^{166}Ho -mikrosfer dan ^{166}Ho -RE untuk pengobatan intra-arteri di hati, ^{166}Ho -mikrosfer (HoMS) untuk kekambuhan karsinoma sel skuamosa di kepala dan leher, ^{166}Ho -chitosan untuk karsinoma hepatoselular (HCC), dan ^{166}Ho -DOTMP untuk metastasis tulang (Klaassen et al., 2019).

Pemanfaatan lain adalah dalam bentuk ^{166}Ho -radioembolisasi untuk mengobati kanker hati. Prosedur ini didasarkan pada prinsip bahwa tumor hepatik dipasok terutama melalui arteri hepatik. Sebagian besar mikrosfer radioaktif dengan demikian akan menempel di dalam dan sekitar jaringan tumor, sementara jaringan hati yang sehat tetap utuh (Stella et al., 2022).

4. ^{177}Lu (Lutetium)

Radionuklida ^{177}Lu adalah pemancar radiasi beta dengan energi maksimum 490 keV dan radiasi gamma dengan energi 113 keV dan 208 keV. Waktu paruh ^{177}Lu cukup panjang, yaitu 160 jam. Dengan karakteristik fisik ini ^{177}Lu dapat berfungsi dengan baik sebagai radionuklida teranostik.

Salah satu aplikasi ^{177}Lu yang banyak digunakan adalah dalam terapi radionuklida reseptor peptida (PRRT) untuk tumor neuroendokrin (NET). PRRT dengan analog somatostatin berlabel ^{177}Lu sebagai modalitas pengobatan baru yang menargetkan NET metastatik atau tidak dapat dioperasi yang mengekspresikan SSTR2 (somatostatin receptor subtype 2), telah dikembangkan dan berhasil digunakan selama dua dekade terakhir (Kim & Kim, 2018).

Radionuklida ^{177}Lu juga dikenal sebagai radioimunoterapi untuk kanker payudara dan ovarian epitelial. Pendekatan radioimunoterapi, yang menggunakan kombinasi trastuzumab dan pertuzumab sebagai agen HER2 (*human epidermal growth factor receptor 2*) yang diberi tanda dengan ^{177}Lu telah terbukti manjur secara klinis dengan potensi yang menjanjikan. Untuk mencapai hal ini, formulasi dosis klinis

^{177}Lu -DOTA pertuzumab telah dioptimalkan menggunakan aktivitas spesifik sedang ($0,81 \text{ GBq}/\mu\text{g}$) ^{177}Lu sebagai LuCl_3 (Menon et al., 2022). Selain itu, ^{177}Lu -DOTA-0-Tyr3-Octreotate (DOTATATE) PRTT juga dikenal sebagai modalitas pengobatan yang efektif untuk tumor neuroendokrin gastroenteropankreatik stadium lanjut (Burkett et al., 2021).

5. ^{188}Re (Rhenium)

Radionuklida ^{188}Re adalah pemancar beta dengan waktu paruh 16,9 jam, energi rata-rata 784 keV dan energi maksimum 2,12 MeV. Dengan energi beta yang dimilikinya, ^{188}Re mampu menembus dan menghancurkan target jaringan abnormal. Energi gamma sebesar 155 keV yang menyertainya cukup untuk pencitraan dan perhitungan dosimetri.

^{188}Re -hydroxyethylidine difosfonat (^{188}Re -HEDP) merupakan radiofarmaka yang dapat mengendalikan nyeri pada pasien dengan keganasan stadium lanjut akibat metastasis tulang. Pereda nyeri tulang secara cepat dan signifikan terjadi pada sejumlah besar pasien tanpa efek samping atau toksisitas hematopoietik yang signifikan (IAEA, t.t.-c).

Keberhasilan penerapan radiofarmaka terapi bertanda ^{188}Re juga telah dilaporkan dalam beberapa uji klinis fase awal untuk pengobatan berbagai tumor primer, metastasis tulang, artritis reumatoid, dan intervensi endokoroner (Lepareur et al. 2019).

D. Terapi Radiasi Alfa

Radiasi alfa memiliki LET yang tinggi ($80 \text{ keV}/\mu\text{m}$) dan rentang jangkauan cukup pendek ($50\text{--}100 \mu\text{m}$) sehingga memberikan rentang efektif kurang dari 10 diameter sel. Karakteristik ini membuatnya cocok untuk ditargetkan ke sel tumor mikroskopis, tetapi tidak merusak organ normal dan jaringan sehat di sekitarnya. Yang penting lagi, tingkat kematian radiasi alfa tidak bergantung pada siklus sel atau oksigenasi, dan kerusakan DNA sering kali terjadi melalui putusannya untai ganda dan gugus DNA sehingga lebih sulit diperbaiki dibandingkan kerusakan oleh radiasi beta (Nelson, et al., 2021).

1. ²²⁵Ac (Aktinium)

Radionuklida ²²⁵Ac memancarkan partikel alfa dengan waktu paruh 10 hari. ²²⁵Ac memiliki anak luruh ²¹³Bi yang juga merupakan pemancar alfa dan beta dengan waktu paruh lebih pendek, yaitu 46 menit. ²²⁵Ac digunakan dalam bentuk ²²⁵Ac-PSMA-617 untuk pengobatan kanker prostat yang tahan terhadap kastrasi metastatik yang tidak bisa diobati dengan terapi radiasi beta dengan ¹⁷⁷Lu-PSMA-617 (Nelson et al., 2021).

2. ²²⁷Th (Torium)

Radionuklida ²²⁷Th adalah pemancar alfa dengan anak luruh ²²³Ra, dan masing-masing memiliki waktu paruh 19 hari dan 11 hari. Torium dianggap sebagai bahan nuklir, tetapi sebenarnya hanya ²³²Th yang memiliki sifat sebagai bahan nuklir. Beberapa contoh pengobatan dengan ²²⁷Th, antara lain, ²²⁷Th-konjugasi untuk limfoma non-Hodgkin positif CD22, ²²⁷Th-antibodi untuk kanker ovarium dan mesothelioma, serta ²²⁷Th-PSMA antobodi untuk kanker prostat yang resistan terhadap kastrasi metastatik (Bly, 2020).

Tabel 2.2 memperlihatkan karakteristik kedua radionuklida yang telah disebutkan dan beberapa radionuklida lain yang digunakan pada terapi radionuklida dengan pemancar alfa.

Tabel 2.2 Karakteristik Beberapa Pemancar Alfa untuk Terapi Radionuklida

Induk	Anak luruh	Waktu paruh	Energi alfa (MeV)	Pancaran lain	Radiokimia	Akumulasi
²²¹ At		7,2 jam	5,87		Prekursor timah, kelompok prostetik	Tiroid, lambung, limpa, paru-paru
	²¹¹ Po	0,52 detik	7,45	Sinar-X K_{∞} (77-92 keV)		

Induk	Anak luruh	Waktu paruh	Energi alfa (MeV)	Pancaran lain	Radiokimia	Akumulasi
	²⁰⁷ Bi	38 tahun		Tang- kapan elektron 100%		
	²⁰⁷ Po	stabil				
²²⁵ Ac		9,9 hari	5,94		DOTA, DO3A kelator	Hati, tulang
	²²¹ Fr	4,9 menit	6,45	Y 218 keV		Ginjal, urine
	²¹⁷ At	32,3 ms	7,20			
	²¹³ Bi	45,6 menit	5,87	β^{-} 492 keV Y 440 keV	CHX-A''-DTPA, DOTA, NETA	Ginjal, urine
	²¹³ Po	3,72 μ s	8,38			
	²⁰⁹ Tl	2,16 menit		β^{-} 660 keV		
	²⁰⁹ Pb	3,23 jam		β^{-} 198 keV		
	²⁰⁹ Bi	Stabil				
²²⁷ Th		18,7 hari	6,14	Y 50 dan 236 keV	DOTA, Me-3, 2-HOPO	
	²²³ Ra	11,4 hari	5,71	Y 269 keV		Permukaan tulang
	²¹⁹ Rn	3,96 detik	6,82	Y 271 keV		Permukaan tulang
	²¹⁵ Po	1,78 mdtk	7,39			
	²¹¹ Pb	36,1 menit		β^{-} 471 keV; Y 404 keV		Darah, hati, tulang rangka, ginjal

Induk	Anak luruh	Waktu paruh	Energi alfa (MeV)	Pancaran lain	Radiokimia	Akumulasi
	^{211}Bi	2,14 menit	6,62	β^{-} 172 keV;Y 351 keV		Ginjal, urine
	^{207}Tl	4,77 menit		β^{-} 492 keV		
	^{207}Pb	Stabil				
	^{224}Ra	3,63 hari	5,69	Y 241 keV		Permukaan tulang
	^{220}Rn	55,6 detik	6,29			
	^{216}Po	0,15 detik	6,78			
	^{212}Pb	10,6 jam		β^{-} 93,5 keV; Y 238 dan 300 keV	TCMC	Darah, hati, tulang rangka, ginjal
	^{212}Bi	60,6 menit	6,05	β^{-} 834 keV; Y 727 dan 1620 keV	CHX-A"-DTPA, DOTA, NETA	Ginjal, urine
	^{212}Po	0,30 us	8,78			
	^{208}Tl	3,1 menit		β^{-} 342, 441, 535 dan 649 keV; Y 2,614 keV		
	^{208}Pb	Stabil				

Sumber: Poty et al., (2018).

BAB 3

PROTEKSI RADIASI

Selain memberikan manfaat yang besar bagi peningkatan kesejahteraan manusia, penggunaan energi nuklir diketahui memiliki risiko bahaya yang juga cukup besar. Risiko bahaya tidak hanya dihadapi oleh pekerja radiasi, tetapi juga oleh pasien dalam hal pemanfaatan radiasi di bidang medis, dan anggota masyarakat umum serta lingkungan hidup yang berada dekat pasien.

Dalam beberapa kasus, pasien sering kali ditemani oleh keluarga atau kerabatnya untuk memberi kenyamanan dan ketenangan. Orang yang menemani pasien ini disebut sebagai pendamping pasien, dan pajanan yang diterima oleh pendamping pasien ini dikategorikan sebagai pajanan medis.

Karena menggunakan radionuklida yang aktivitasnya relatif kecil, sebenarnya risiko bahaya dari terapi radionuklida juga kecil. Namun, sekecil-kecilnya risiko bahaya radiasi, risiko tersebut perlu dikelola dengan baik agar tidak terjadi. Karena itu, tindakan proteksi radiasi pada pelaksanaan terapi radionuklida serta tindakan pencegahan dan mitigasi insiden radiasi perlu diketahui dan dilaksanakan dengan baik dan bersungguh-sungguh.

A. Proteksi Radiasi Pada Pajanan Medis

Pajanan medis adalah pajanan yang diterima oleh pasien untuk tujuan diagnosis atau pengobatan medis atau gigi, oleh pendamping

pasien, dan oleh relawan sebagai bagian dari program riset biomedis (Hiswara, 2023). Dalam terapi radionuklida, pasien adalah orang yang menjalani terapi radionuklida atau yang menerima secara disuntik atau dikonsumsi secara oral sumber radionuklida untuk tujuan terapi. Hal ini berarti pasien berinteraksi langsung dengan sumber radioaktif. Dengan posisinya yang seperti ini, pasien harus memahami dengan baik potensi bahaya radiasi dan mengetahui cara yang aman agar tidak menerima risiko radiasi dari terapi radionuklida yang dijalannya.

Proteksi radiasi pada pajanan medis dilakukan, antara lain, dengan penerapan prinsip justifikasi, optimisasi, dan petunjuk keselamatan bagi pasien. Pendamping pasien juga perlu mendapatkan tindakan proteksi radiasi yang sama dengan tindakan yang diterima oleh pasien.

1. Justifikasi

Justifikasi adalah salah satu prinsip dalam proteksi radiasi yang menyatakan bahwa pemanfaatan suatu sumber radiasi harus lebih besar dari bahaya, termasuk kerusakan, akibat pemanfaatan radiasi tersebut. Prinsip justifikasi dalam terapi radionuklida merupakan bagian dari proses medis untuk menentukan pendekatan pengobatan terbaik.

Ketika seorang pasien disarankan oleh dokter rujukan untuk melakukan pengobatan, penentuan apakah pengobatan dilakukan dengan terapi radionuklida, jenis terapi dengan modalitas yang lain, diobati dengan pendekatan terapi kombinasi (berurutan atau bersamaan), atau bahkan tidak perlu dilakukan terapi sama sekali, harus dilakukan oleh suatu tim yang multidisiplin. Anggota tim paling tidak harus mengandung unsur spesialis onkologi radiasi dan ahli endokrinologi (IAEA, 2018).

Semua hasil diskusi tim harus direkam dengan baik. Pasien kemudian harus diberitahukan mengenai manfaat dari pengobatan yang diharapkan, risiko dan keterbatasan tindakan yang akan dilakukan, termasuk konsekuensi dari tidak dilakukannya tindakan.

Untuk pendamping pasien, termasuk juga perawat yang terlibat langsung menangani pasien, tenaga medis harus memastikan bahwa keduanya mendapat informasi yang benar tentang proteksi radiasi dan risiko radiasi yang ada. Informasi biasanya diberikan sebelum tindakan dilakukan, dan baik pendamping pasien maupun perawat kemudian setuju untuk melakukan perannya dalam memberikan kenyamanan bagi pasien selama tindakan dilakukan.

2. Optimisasi

Optimisasi dalam pajanan medis adalah manajemen dosis radiasi pada pasien yang sesuai dengan tujuan medis. Optimisasi dilakukan sejak tahap desain dari alat yang digunakan seperti kamera gamma, SPECT/CT, PET/CT, dan semua aksesorisnya untuk memastikan semua alat dapat menjaga agar dosis pada pasien serendah mungkin tanpa menurunkan kualitas informasi yang dihasilkan.

Sesaat sebelum radionuklida diberikan, informasi berikut harus diverifikasi paling sedikit oleh dua orang, yaitu (IAEA, 2018)

- 1) dosis pada label radionuklida sesuai dengan permintaan dokter spesialis,
- 2) identitas pasien dengan dua cara berbeda dan independen,
- 3) identitas radionuklida,
- 4) identitas radiofarmaka,
- 5) total aktivitas, dan
- 6) tanggal dan waktu kalibrasi, baik kalibrasi sumber maupun kalibrasi instrumen.

Protokol atau prosedur standar operasi (SOP) setiap jenis terapi radionuklida yang dilakukan di fasilitas harus dibuat secara tertulis. SOP sedapat mungkin dikembangkan dengan berpedoman pada SOP yang dibuat oleh organisasi profesi nasional atau internasional untuk memastikan SOP tersebut mencerminkan praktik terbaik yang ada. SOP juga harus ditinjau secara berkala untuk memenuhi persyaratan penjaminan mutu dan kajian radiologis (IAEA, 2018).

3. Petunjuk bagi Pasien

Tenaga medis yang menangani pasien perlu memberikan petunjuk keselamatan kepada pasien yang menjalani perawatan mengenai kondisi medis dan prosedur perawatan yang akan dijalani. Kandungan petunjuk keselamatan ini perlu dibahas dan disetujui pula oleh fisikawan medis atau petugas proteksi radiasi yang terkait.

Petunjuk keselamatan harus berisi, antara lain jenis, bentuk, dan aktivitas radionuklida yang akan diberikan ke pasien; dirancang sesuai kebutuhan perjalanan dan pengaturan domestik yang spesifik untuk masing-masing pasien; didasarkan pada kebutuhan untuk meminimalkan dosis radiasi ke orang sekitar; dan mempertimbangkan biaya ekonomi dan sosial yang relevan (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency [ARPANSA], 2002). Petunjuk keselamatan harus diberikan ke pasien secara lisan dan tertulis. Secara umum, kandungan petunjuk keselamatan bagi pasien mencakup

- 1) pentingnya menjaga jarak dengan orang lain, terutama anak-anak, remaja, dan wanita hamil yang tinggal di rumah jika pasien diperbolehkan pulang,
- 2) pentingnya menjaga kebersihan pribadi untuk mencegah penyebaran kontaminasi,
- 3) tanggal kapan pasien bisa bekerja atau memulai kegiatan sosialnya kembali, dan
- 4) tindakan pencegahan yang harus diikuti jika terjadi kedaruratan medis.

Dimulainya kembali pekerjaan normal harus mempertimbangkan lama dan jarak interaksi dengan orang lain di tempat kerja. Demikian pula aktivitas sosial yang melibatkan kedekatan dengan orang lain dalam jangka waktu lama, seperti pergi ke bioskop atau melakukan perjalanan jauh dengan kendaraan umum, harus dibedakan dari aktivitas seperti berbelanja, yang hanya terjadi pertemuan singkat dengan orang lain.

Pada hari tindakan pemberian radionuklida, catatan tertulis mengenai tindakan harus diberikan kepada dokter rujukan dan kepada pendamping pasien. Catatan harus mencakup informasi berikut:

- 1) jenis dan aktivitas radionuklida yang diberikan serta tanggal pemberian,
- 2) nama dan nomor kontak dokter rujukan dan/atau petugas proteksi radiasi atau fisikawan medis yang bisa dihubungi jika terjadi keadaan darurat atau kejadian terkait radiasi lainnya saat rawat inap, dan
- 3) lama pembatasan kegiatan lainnya yang terkait dengan proteksi radiasi.

Catatan informasi tersebut juga diberikan kepada pasien dalam bentuk kartu atau bentuk lain yang dapat dibuka dan dibaca dengan praktis. Catatan harus disimpan dan mudah diambil setiap saat hingga tanggal tertentu yang ditetapkan dokter atau tenaga medis yang menangani pasien (ARPANSA, 2002).

4. Petunjuk bagi Pendamping Pasien

Potensi risiko keselamatan bagi pendamping pasien berasal dari pajanan eksternal dan kontaminasi. Risiko keselamatan ini terutama dari penggunaan ^{131}I yang diekskresi pasien melalui ginjal, yang kemudian didorong dengan konsumsi air minum dalam jumlah yang besar agar cepat keluar dari dalam tubuh melalui urine.

Jalur risiko lain adalah melalui kelenjar ludah yang dapat mengakibatkan kontaminasi pada peralatan makan dan minum, juga seprai serta sarung bantal dan guling. Jalur kontaminasi lain yang relatif lebih kecil adalah melalui keringat dan feses.

Sehubungan dengan adanya risiko pajanan eksternal dan kontaminasi ini, tenaga medis atau tenaga kesehatan juga perlu memberikan petunjuk keselamatan bagi pendamping pasien. Petunjuk keselamatan diberikan secara lisan dan tertulis serta berisi antara lain, pentingnya memperhatikan dan menjaga kondisi kebersihan pasien serta menjaga jarak saat pasien akan buang air kecil atau batuk.

Pendamping pasien juga perlu memberitahukan perawat atau petugas lain dengan segera jika pasien muntah atau bahkan barangkali terjatuh saat berjalan menuju toilet.

Penerimaan dosis radiasi oleh pendamping pasien juga ada kemungkinan cukup tinggi. Suatu riset yang dilakukan di India menunjukkan bahwa dosis radiasi yang diterima pendamping pasien mencapai sekitar 9,7–24,2 mSv (Kheruka et al., 2021). Pendamping pasien ini umumnya menemani setiap hari dalam minggu pertama dalam pemberian oral radioiodin dan setelah keluar dari rumah sakit bepergian pada kendaraan yang sama, makan, dan tidur di kamar yang sama, termasuk juga menyediakan makanan dan obat yang dibutuhkan si pasien.

B. Proteksi Radiasi Pada Pajanan Kerja

Pajanan kerja adalah pajanan yang diterima pekerja radiasi saat melaksanakan pekerjaannya (Hiswara, 2023). Dalam terapi radionuklida, yang dimaksud dengan pekerja radiasi adalah dokter spesialis kedokteran nuklir, fisikawan medis, petugas proteksi radiasi, radiofarmasis, dan perawat.

Pada terapi radionuklida, pajanan kerja terbesar diperoleh dari ^{131}I yang memancarkan foton 364 keV. Atenuasi dengan apron timbal pada energi ini bersifat minimal (hanya mengurangi separuhnya), tidak mengakibatkan pengurangan dosis yang signifikan, penambahan berat timbal tidak ada gunanya dan hanya membuat ketidaknyamanan menggunakan apron tersebut (ICRP, 2019).

Penggunaan apron timbal untuk melindungi diri dari ^{131}I sebenarnya bahkan dapat meningkatkan pajanan secara keseluruhan jika pekerja menduga bahwa mereka terlindungi dan berada dekat dengan pasien untuk jangka waktu yang lebih lama. Namun, tidak dapat dimungkiri bahwa apron timbal diperlukan dalam situasi tertentu. Karena itu, petugas proteksi radiasi atau fisikawan medis harus menentukan kebutuhan dan jenis pelindung yang diperlukan untuk setiap situasi.

Seperti pada pemanfaatan teknologi nuklir lainnya, penerimaan dosis radiasi pada pekerja radiasi dikendalikan secara legal melalui nilai batas dosis (NBD) dan penghambat dosis. Agar NBD tidak dilampaui, beberapa upaya kemudian dibuat, seperti pembagian daerah kerja, penetapan aturan dan prosedur setempat, penggunaan perisai radiasi, dan penggunaan alat pemantauan dosis radiasi perorangan.

1. Nilai Batas Dosis dan Penghambat Dosis

Nilai batas dosis (NBD) adalah nilai dosis efektif atau dosis ekuivalen bagi individual yang tidak boleh dilampaui. Untuk pekerja radiasi, NBD yang ditetapkan adalah 20 mSv/tahun. Sementara itu, penghambat dosis adalah nilai dosis individual yang bersifat prospektif sebagai parameter untuk optimisasi dan menjadi batas dalam menetapkan rentang pilihan dalam optimisasi. Secara praktis, penghambat dosis ditentukan oleh pelaku usaha atau pemegang izin ketenaganukliran yang berfungsi untuk memberi peringatan bahwa NBD dapat dicapai jika tidak dilakukan evaluasi untuk menurunkan besar dosis radiasi yang diterima. Dengan demikian, nilai penghambat dosis selalu ditetapkan di bawah nilai batas dosis.

2. Pembagian Daerah Kerja

Daerah kerja radiasi dapat dibedakan atas daerah pengendalian dan daerah supervisi. Daerah pengendalian dimaksudkan sebagai daerah tempat tindakan proteksi khusus dan ketentuan keselamatan telah dan dapat diperlukan untuk mengendalikan pajanan atau mencegah penyebaran kontaminasi dalam kondisi kerja normal serta mencegah atau membatasi luasan pajanan potensial. Sementara itu, daerah supervisi adalah daerah yang tidak ditetapkan sebagai daerah pengendalian, tetapi pajanan kerja yang ada tetap ditinjau atau dikaji meskipun tidak ada tindakan protektif yang spesifik atau biasanya tidak diperlukan tindakan keselamatan (Hiswara, 2023).

Secara praktis, daerah kerja radiasi dapat ditetapkan sebagai daerah pengendalian jika potensi penerimaan pajanan radiasi melebihi 3/10 dari nilai batas dosis pekerja radiasi, dan/atau ada potensi kon-

taminasi di di daerah kerja tersebut. Mengingat potensi kontaminasi selalu ada di ruang penyiapan radiofarmaka, di ruang tindakan, dan lorong antara ruang penyiapan dengan ruang tindakan; ketiga daerah kerja ini dapat dikategorikan sebagai daerah pengendalian, sementara daerah supervisi dapat ditetapkan pada ruang administrasi dan ruang tunggu pasien.

3. Aturan dan Prosedur Setempat

Pemberian radiofarmaka biasanya dilakukan dengan cara oral, injeksi intravena (sistemik), injeksi intra-arteri (lokoregional) atau penanaman pada sendi tertutup (intra-artikular/radiosynoviorthesis) atau rongga tubuh (intrakaviter). Untuk masing-masing cara pemberian, beberapa tindakan proteksi terkait yang perlu diketahui adalah sebagai berikut (IAEA, 2018).

- 1) jarum suntik berpelindung (*shielded syringes*) harus digunakan selama pemberian radiofarmaka secara intravena atau intra-arteri jika diperlukan untuk memastikan dosis ekstremitas masih tetap di bawah penghambat dosis. Bahan atau bantalan penyerap harus ditempatkan di bawah tempat suntikan atau infus. Untuk terapi radionuklida lainnya, kebutuhan peralatan pelindung lainnya, seperti penutup sepatu, perlu dikonsultasikan dengan petugas proteksi radiasi. Gambar 3.1 memperlihatkan contoh pemberian radionuklida dengan jarum suntik berpelindung.



Sumber: IAEA (t.t.-b)

Gambar 3.1 Pemberian Radionuklida dengan Jarum Suntik Berpelindung

- 2) Untuk pemberian intravena atau intra-arteri dengan injeksi bolus yang memerlukan laju dosis tertentu, alat suntik harus ditempatkan di dalam pelindung jarum suntik (biasanya pelindung plastik untuk radionuklida pemancar beta untuk meminimalkan *bremssstrahlung* atau perisai radiasi dengan bahan bernomor atom tinggi untuk radionuklida pemancar foton) dengan jendela transparan agar bahan radioaktif di dalam alat suntik dapat terlihat. Untuk pemberian intravena melalui tetesan atau infus yang lebih lambat, wadah yang berisi bahan radioaktif harus ditempatkan dalam pelindung yang sesuai. Untuk foton berenergi tinggi perlu digunakan timbal dengan ketebalan yang signifikan atau bahan dengan nomor atom tinggi lainnya.
- 3) Untuk pemberian radiofarmaka terapi secara oral, bahan radioaktif harus ditempatkan dalam wadah berpelindung dan anti tumpah. Perlu diperhatikan kemungkinan terjadinya percikan cairan atau kapsul terjatuh. Alat penjepit bergagang panjang harus digunakan ketika menangani bahan radioaktif yang tidak memiliki perisai radiasi. Gambar 3.2 memperlihatkan contoh ampul berisi bahan radioaktif yang akan diberikan secara oral.



Sumber: Pharmavision (t.t.)

Gambar 3.2 Contoh Ampul yang Berisi Bahan Radioaktif

4. Penggunaan Perisai Radiasi

Perisai radiasi umumnya digunakan pada saat penyiapan sumber radiofarmaka yang akan diberikan kepada pasien. Dalam hal ini, perisai radiasi dipasang di antara pekerja dengan sumber radiofarmakanya. Beberapa bahan dapat digunakan untuk sebagai perisai radiasi seperti timbal, tungsten, kaca timbal, dan komposit timbal. Perisai yang menggunakan akrilik biasanya lebih cocok untuk sumber radionuklida pemancar beta karena menurunkan jumlah *bremstrahlung* yang dihasilkan. Penggunaan timbal perisai harus dilapisi agar permukaannya dapat dibersihkan (IAEA, 2018). Gambar 3.3 memperlihatkan contoh lemari berpelindung timbal yang digunakan untuk menyiapkan radiofarmaka.



Sumber: Escopharma (t.t.)

Gambar 3.3 Lemari Berpelindung Timbal

Atenuasi apron timbal pada energi gamma yang biasa digunakan dalam terapi radionuklida tidak cukup besar dan bahkan lebih kecil lagi untuk apron perisai berbahan dasar nontimbal. Cara yang lebih efektif untuk mengurangi dosis adalah dispenser dan injektor otomatis serta perisai bergerak (*mobile*).

Untuk penyiapan dan *dispensing* radiofarmaka, bekerja di balik perisai meja kaca timbal, menggunakan vial dan alat suntik berpelindung, dan mengenakan sarung tangan sekali pakai dapat mengurangi pajanan kerja pada pekerja radiasi. Selain itu, jika jarak ke pasien cukup dekat selama pemeriksaan, penggunaan perisai transparan bergerak juga dapat mengurangi pajanan kerja (IAEA, 2018).

5. Pemantauan Daerah Kerja dan Dosis Perorangan

Pemantauan daerah kerja meliputi tidak hanya tingkat dosis radiasi di daerah kerja, tetapi juga kemungkinan terjadinya kontaminasi. Tingkat dosis radiasi di daerah kerja diukur dengan alat ukur radiasi yang dirancang dan dikalibrasi khusus sesuai dengan jenis radiasi yang digunakan di fasilitas. Sementara itu, pemantauan kontaminasi perlu dilakukan pada

- 1) seluruh permukaan kerja (termasuk bagian dalam meja), peralatan, perlengkapan dan perangkat (termasuk sistem dosimetri, komputer dan aksesorisnya, serta unit uji tekanan), lantai, dan semua benda yang dipindahkan dari area ini;
- 2) tempat kerja, sistem ventilasi dan saluran pembuangan apabila salah satu dari peralatan ini disentuh untuk keperluan pemeliharaan;
- 3) pakaian pelindung dan pribadi serta sepatu, terutama ketika pemakainya meninggalkan daerah pengendalian (alat pemantau kontaminasi harus tersedia di dekat pintu keluar); dan
- 4) pakaian, perlengkapan tidur, dan peralatan yang digunakan oleh pasien terapi radionuklida (IAEA, 2018).

Dalam hal pemantauan dosis perorangan, sesuai peraturan keselamatan yang berlaku, semua pekerja radiasi harus menggunakan alat pemantau dosis perorangan. Alat pemantau yang digunakan harus memiliki kemampuan pengukuran untuk jenis sumber radionuklida yang digunakan, yang umumnya hanya merupakan pemancar beta. Dengan kata lain, alat pemantau yang dirancang untuk mengukur radiasi neutron atau sinar gamma energi tinggi tidak boleh digunakan pada fasilitas terapi radionuklida ini.

6. Batas Kontaminasi Permukaan

Kontaminasi permukaan dengan radioaktivitas dapat menyebabkan kontaminasi pada pekerja radiasi dan/atau penyinaran eksternal pada kulit pekerja. Kontaminasi internal dapat timbul dari penghirupan dan/atau konsumsi radionuklida. Batas kontaminasi permukaan yang diberikan pada Tabel 3.1 diperoleh berdasarkan batas dosis efektif sebesar 20 mSv/tahun dan model untuk inhalasi dan konsumsi diberikan dalam beberapa publikasi ICRP 30, 60, dan 61 (Smart, 2014).

Tabel 3.1 Batas Turunan untuk Kontaminasi Permukaan

Nuklida	Permukaan di daerah pengen-dalian, termasuk pakaian pelindung (Bq/cm ²)	Bagian dalam <i>glove box</i> dan lemari asap (<i>fume cupboards</i>) (Bq/cm ²)	Permukaan di daerah supervisi, termasuk pakaian pelindung (Bq/cm ²)
¹⁸ F	100	1000	5
³² P	100	1000	5
⁵¹ Cr	1000	10.000	50
⁶⁷ Ga	1000	10.000	50
⁸⁹ Sr	100	1000	5
⁹⁰ Y	100	1000	5
^{99m} Tc	1000	10.000	50
¹¹¹ In	1000	10.000	50
¹²³ I	1000	10.000	50
¹²⁵ I	100	1000	5

Nuklida	Permukaan di daerah pengen-dalian, termasuk pakaian pelindung (Bq/cm ²)	Bagian dalam <i>glove box</i> dan lemari asap (<i>fume cupboards</i>) (Bq/cm ²)	Permukaan di daerah supervisi, termasuk pakaian pelindung (Bq/cm ²)
¹³¹ I	100	1000	5
¹⁷⁷ Lu	1000	10.000	50
²⁰¹ Tl	1000	10.000	50

Sumber: Smart (2014)

7. Pemantauan Dosis Jari Pekerja selama Dispensing

Nilai batas dosis (NBD) untuk mencegah terjadinya efek reaksi jaringan atau efek deterministik pada ekstremitas ditetapkan sebesar 500 mSv (IAEA, 2014a). Pekerja radiofarmasi diperkirakan dapat menerima dosis radiasi yang mendekati NBD ini, terutama pada ujung jari telunjuk dan jari tengahnya, serta ibu jari dari tangan yang dominan. Dalam kaitan ini, ICRP telah merekomendasikan bahwa pemantauan dosis jari perlu dilakukan pada pekerja yang menangani radionuklida lebih dari 2 GBq/hari dan pemantauan reguler dilakukan jika dosis pada bagian jari yang paling mendapat pajanan melebihi 6 mSv/bulan (Smart, 2014).

Meski dosis tertinggi dijumpai di ujung jari, cincin pemantau dosis dianjurkan untuk dipakai di pangkal jari. Cincin pemantau dosis yang umum digunakan adalah cincin TLD, yang harus terpasang erat agar tidak terlepas secara tidak sengaja saat sarung tangan dilepas. ICRP merekomendasikan agar cincin monitor dipakai di jari tengah dengan elemen TLD diposisikan di sisi telapak tangan. Dosis pada ujung jari kemudian dapat diperkirakan sebesar tiga kali dari dosis yang terbaca. Gambar 3.4 memperlihatkan contoh cincin TLD yang digunakan untuk memantau dosis radiasi yang diterima pekerja radiasi.



Sumber: Laurus Systems Inc (t.t.)

Gambar 3.4 Cincin TLD

Dosis pada jari sangat bergantung pada teknik *dispensing* yang digunakan dan keterampilan operator. Karena itu, operator sebaiknya melatih keterampilannya dalam teknik *dispensing* dengan larutan nonradioaktif secara ekstensif sebelum melakukan *dispensing* radiofarmaka untuk pertama kalinya. Hal ini sangat penting pada radiofarmaka PET karena konstanta laju dosis spesifiknya jauh lebih tinggi untuk pemancar positron dibandingkan radionuklida yang digunakan untuk pencitraan foton tunggal (Smart, 2014).

8. Sistem Manajemen Mutu

Sistem manajemen mutu (SMM) merupakan bagian integral untuk mencapai efektivitas, keselamatan dan efisiensi dalam layanan kedokteran nuklir, termasuk terapi radionuklida. Sistem ini juga memungkinkan para profesional terapi radionuklida untuk memberikan layanan berkualitas tinggi yang memuaskan pelanggan dan meningkatkan profesionalisme dalam pekerjaannya. Audit manajemen mutu secara berkala merupakan alat penting untuk membantu peningkatan layanan terapi radionuklida.

Dalam rancangan dan penerapannya, SMM dipengaruhi oleh berbagai kebutuhan dan kendala, tujuan, sifat layanan yang diberikan, proses yang digunakan, serta ukuran dan struktur layanan. Layanan

terapi radionuklida harus menerapkan, mendokumentasikan, dan memelihara SMM yang dinilai sesuai dengan konteksnya, harus terus ditingkatkan sesuai dengan persyaratan profesionalisme, badan pengawasan, akreditasi atau standardisasi. SMM bertujuan untuk memungkinkan layanan mencapai target yang ditetapkan dalam kebijakan mutu dan memuaskan pelanggannya (pasien dan dokter rujukan).

Dokumentasi SMM pada layanan kedokteran nuklir, termasuk layanan terapi radionuklida, biasanya mencakup

- 1) semua informasi tentang perizinan yang berlaku,
- 2) panduan atau manual mutu yang harus secara jelas memerinci misi, visi, strategi, kebijakan dan tujuan mutu, serta deskripsi organisasi dan strukturnya,
- 3) prosedur operasi standar (SOP) tertulis (dalam bentuk cetak atau elektronik) untuk proses manajemen primer dan kegiatan pendukungnya,
- 4) dokumen eksternal/acuan,
- 5) rekaman indikator dan parameter,
- 6) rekaman ketidaksesuaian, tindakan pencegahan/perbaikan,
- 7) rekaman kepuasan pelanggan (pasien, dokter rujukan; perusahaan asuransi dan organisasi manajemen kesehatan lainnya),
- 8) evaluasi risiko,
- 9) pencatatan insiden dan sistem pelaporan keluhan pelanggan,
- 10) inventaris peralatan, termasuk masa pelihara dokumen dan rekaman QA/QC, dan
- 11) rekaman pertemuan atau rapat yang mudah diambil untuk dipelajari (IAEA, 2021).

Secara keseluruhan, SMM menstandarkan proses untuk menjamin konsistensi dalam memberikan layanan tingkat tinggi kepada pasien, dokter rujukan, dan pemangku kepentingan lainnya dalam lingkungan kerja yang aman. Dengan menerapkan SMM yang baik, pihak manajemen layanan terapi radionuklida dapat memastikan ketersediaan sumber daya, kompetensi, dan informasi yang diperlukan

untuk mendukung operasi dan memantau proses. Manajemen juga dapat memastikan efektivitas layanan melalui pemantauan, verifikasi, analisis data, kajian manajerial, dan audit.

9. Ruang Rawat Inap

Ruang rawat inap untuk pasien dengan aktivitas radiasi tinggi biasanya harus memiliki toilet dan fasilitas cuci terpisah. Lantai dan permukaan lainnya harus ditutup dengan permukaan yang halus, rata, dan tidak menyerap air sehingga mudah dibersihkan dan didekontaminasi. Area aman harus dilengkapi dengan tempat penyimpanan sementara linen dan limbah yang terkontaminasi zat radioaktif.

Sumber radiasi yang digunakan dalam terapi radionuklida berpotensi memberikan kontribusi dosis yang signifikan kepada tenaga medis dan orang lain yang mungkin dalam waktu yang lama berada di dalam atau berdekatan dengan ruangan yang mengandung sumber radiasi. Untuk itu, sejak perancangannya, dinding ruangan perlu dipertimbangkan untuk dilapisi dengan bahan perisai radiasi yang bisa melindungi orang yang berada di sekitar ruangan rawat inap dari paparan yang terpancar dari tubuh pasien yang sedang dirawat inap

Tabel 3.2 memberikan nilai keefektifan perisai radiasi yang terbuat dari bahan timbal atau beton. Nilai keefektifan diberikan dalam lapisan nilai paruh (HVL), yang berarti akan memperlemah berkas radiasi menjadi separuh dari nilai semula dan dalam lapisan nilai sepersepuluh (TVL), yang berarti akan memperlemah berkas menjadi sepersepuluh dari nilai semula.

Tabel 3.2 Nilai Keefektifan Perisai Radiasi untuk ¹³¹I

Bahan	Lapisan nilai paruh	Lapisan nilai sepersepuluh
Timbal	3,0 mm	11 mm
Beton	5,5 mm	18 cm

Sumber: Dauer (2014)

Ruang perawatan pasien sebaiknya diperuntukkan bagi pasien individual dan berdekatan satu sama lain. Jika hal ini tidak memungkinkan, perlu dipasang perisai radiasi antara satu pasien dan pasien lainnya. Bila diperlukan, perisai radiasi yang bergerak (*movable shields*) harus tersedia untuk memberi perlindungan bagi perawat yang bekerja atau pengunjung pasien.

Perisai radiasi bergerak juga diperlukan sebelum pemberian radionuklida kepada pasien dan dipasang dekat dengan tempat tidur pasien sedemikian rupa sehingga pajanan pada perawat yang bertugas dapat ditekan serendah mungkin. Pemasangan perisai radiasi disesuaikan posisi dan pergerakan perawat di seluruh ruangan.

C. Proteksi Radiasi pada Pajanan Masyarakat dan Lingkungan

Masyarakat merupakan istilah yang cukup luas pengertiannya walaupun yang dimaksud secara umum adalah orang yang tidak terlibat secara langsung dalam kegiatan yang menggunakan sumber radiasi atau sumber radionuklida. Namun, pasien yang akan menjalani tindakan dengan sumber radiasi atau radiofarmaka dan masih duduk di ruang tunggu juga dikategorikan sebagai anggota masyarakat. Demikian pula halnya dengan pengunjung, petugas kebersihan, petugas pengantar barang, petugas penjualan, dan pasien lain yang kebetulan berpapasan, dapat dikategorikan sebagai anggota masyarakat.

Pajanan masyarakat adalah pajanan radiasi yang diterima oleh anggota masyarakat yang bukan berasal dari pajanan medis dan/atau pajanan kerja. Seperti halnya pendamping pasien, anggota masyarakat juga memiliki risiko terpajan radiasi secara eksternal atau terkontaminasi dari pasien terapi radionuklida yang masih mengandung radiasi di tubuhnya, yang sedang dalam perjalanan pulang ke rumah kediamannya dengan menggunakan kendaraan umum.

Pengunjung juga dilarang untuk masuk ke daerah pengendalian. Dalam hal tertentu, pengunjung mungkin diizinkan untuk masuk, tetapi dia harus selalu didampingi oleh petugas yang memahami tindakan proteksi dan keselamatan di daerah pengendalian tersebut.

Prosedur tertulis harus dibuat dengan menyebutkan kapan pengecualian tersebut dapat dilakukan dan siapa yang harus menemani pengunjung tersebut.

Untuk lingkungan selain manusia, diperkirakan tidak akan ada risiko bahaya dari pasien yang menjalani terapi radionuklida. Tindakan proteksi radiasi yang dilakukan pada pasien, pekerja, dan anggota masyarakat sudah cukup untuk memberikan proteksi pada lingkungan hidup.

D. Insiden Radiasi

Kecelakaan radiasi dengan konsekuensi kesehatan yang berat dapat dikatakan tidak akan terjadi sebagai akibat dari tindakan terapi radionuklida. Hal ini disebabkan karena jenis sumber radiasi pemancar beta dan alfa yang digunakan hanya memiliki aktivitas yang relatif kecil. Meski demikian, kecelakaan radiasi kecil yang juga dikenal sebagai insiden radiasi kemungkinan bisa saja terjadi.

Seperti telah disinggung secara singkat pada Pendahuluan, paparan radiasi sekecil apa pun dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi individu yang menerima paparan. Karena itu, insiden radiasi sedapat mungkin harus dapat dicegah sejak awal. Selain itu, tindakan mitigasi yang dapat dilakukan jika insiden benar-benar terjadi juga harus diketahui dan dipahami dengan baik.

1. Penyebab Insiden Radiasi

Di Amerika Serikat, suatu insiden radiasi pada terapi radionuklida dapat terjadi jika dosis radiasi total yang diberikan ke pasien berbeda 20% atau lebih dibandingkan dosis radiasi yang ditetapkan oleh dokter, atau jika dosis radiasi pada pasien melebihi dosis efektif 50 mSv, atau dosis ekuivalen pada organ, jaringan, atau kulit sebesar 500 mSv akibat kesalahan aktivitas radionuklida, kesalahan radionuklida, kesalahan radiofarmaka, administrasi yang tidak lengkap, salah pasien, salah rute pemberian radiofarmaka, suntikan subkutan, dan kontaminasi pada pasien, staf, atau fasilitas (Thomadsen, 2020).

Thomadsen (2020) juga mengutip data dari Komisi Pengawas Nuklir (Nuclear Regulatory Commission, NRC) AS bahwa selama 6 tahun (2013–2019) NRC telah menerima laporan insiden radiasi yang dapat dikelompokkan sebagai berikut.

- 1) Sebanyak 8 insiden terjadi akibat pemberian dosis radiasi yang hanya setengah dari yang diminta oleh dokter.
- 2) Sebanyak 6 insiden akibat dosis radiasi diberikan kepada pasien yang salah.
- 3) Sebanyak 5 insiden akibat kesalahan dalam penulisan permintaan atau pemesanan dosis radiasi.
- 4) Sebanyak 2 atau 3 insiden akibat pemberian dosis radiasi ke jaringan yang salah.
- 5) Sebanyak 2 insiden akibat kesalahan dokumentasi.
- 6) Sebanyak 1 insiden akibat dua dosis radiasi diberikan kepada satu pasien, dan pasiennya juga salah.

Di Australia, badan pengawas setempat juga telah mengidentifikasi penyebab insiden radiasi yang mungkin terjadi. Penyebab-penyebab yang dimaksud adalah sebagai berikut (ARPANSA, 2008).

- 1) Prosedur dilakukan pada pasien yang salah.
- 2) Prosedur yang salah dilakukan pada pasien yang benar.
- 3) Aktivitas radionuklida yang salah diberikan pada pasien dengan prosedur yang benar.
- 4) Pasien wanita hamil atau menyusui menerima pajanan yang tidak disengaja atau tidak wajar.
- 5) Perolehan atau pemrosesan citra yang salah atau gagal, sehingga perlu diulang.
- 6) Penggunaan perisai radiasi atau pelindung diri yang tidak tepat.
- 7) Terjadi kontaminasi radioaktif terhadap lingkungan.

2. Kajian Keselamatan Pajanan Potensial

Berdasarkan Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), pelaku usaha atau pemegang izin pemanfaatan ketenaganukliran harus melakukan kajian keselamatan pada semua tahap dan operasi fasilitas kedokteran nuklir serta menyampaikannya ke badan pengawas untuk ditinjau dan dikaji (IAEA, 2014a). Kajian keselamatan mengandung, antara lain, rencana tindak untuk mencegah terjadinya insiden dan mitigasi konsekuensi dari insiden jika memang terjadi.

Untuk keselamatan sumber radiasi yang digunakan, pengkajian keselamatan dilakukan pada kegiatan yang meliputi

- 1) pemesanan, pengangkutan, dan penerimaan radionuklida dan/atau radiofarmaka;
- 2) pembukaan bungkusan, penyimpanan, persiapan dan pemberian radionuklida dan/atau radiofarmaka kepada pasien;
- 3) pengobatan dan perawatan pasien terapi;
- 4) pengoperasian peralatan kedokteran nuklir; dan
- 5) penyimpanan dan pengolahan limbah radioaktif (Perka BAP-ETEN 17, 2012).

Kajian keselamatan harus sistematis, dapat mengidentifikasi insiden yang tidak diharapkan yang dapat mengarah pada pajanan potensial, dan melihat kemungkinan konsekuensi potensial yang dapat terjadi.

Kajian keselamatan harus direvisi jika prosedur tindakan akan menggunakan radiofarmaka, peralatan atau aksesorinya yang baru. Revisi juga harus dilakukan jika terjadi perubahan operasional, termasuk perubahan beban kerja, dan jika pengalaman operasional menunjukkan bahwa kajian keselamatan harus ditinjau.

3. Pencegahan Insiden

Pencegahan insiden merupakan cara terbaik dalam menghindari pajanan potensial. Hal ini dapat dicapai dengan melaksanakan persyaratan praktik kerja yang baik, menerapkan pertahanan berlapis,

dan menyusun prosedur kerja fasilitas yang baik sesuai tahapannya. Contoh pertahanan berlapis, antara lain adalah dengan menyimpan sumber radionuklida di dalam wadah seperti brankas di dalam ruangan yang terkunci, dilengkapi dengan TV pemantau, dan akses masuk ke ruangan dibatasi serta dilakukan patroli di sekitar ruangan secara rutin (IAEA, 2018).

Hal lain yang dapat dilakukan untuk mencegah insiden adalah dengan mempelajari dan memahami pengalaman operasi dan pelajaran dari insiden yang pernah ada. Informasi semacam ini harus dimasukkan ke dalam materi pelatihan, pemeliharaan, dan program jaminan mutu.

4. Mitigasi konsekuensi insiden

Berdasarkan kejadian yang telah diidentifikasi dalam kajian keselamatan, prosedur mitigasi harus disiapkan untuk kejadian yang berkaitan dengan pajanan potensial, termasuk pembagian tanggung jawab, pengembangan dan penerapan prosedur, dan ketentuan dalam pelatihan dan penyegaran bagi staf yang relevan dalam melaksanakan tindakan mitigasi.

Prosedur mitigasi memuat beberapa informasi yang relevan, antara lain,

- 1) identifikasi mengenai potensi insiden, termasuk yang kemungkinannya cukup rendah, dan tindakan yang harus diambil untuk mengatasinya;
- 2) identifikasi petugas yang bertanggung jawab untuk melakukan tindakan jika terjadi insiden, dengan perincian nomor kontak yang bisa dihubungi;
- 3) perincian tanggung jawab individual petugas dalam menerapkan prosedur mitigasi dan kedaruratan (misalnya, dokter spesialis, fisikawan medis, teknisi dan petugas proteksi radiasi);
- 4) peralatan dan perlengkapan yang diperlukan untuk melakukan prosedur mitigasi dan kedaruratan;

- 5) jadwal pelatihan dan gladi secara berkala;
- 6) sistem pencatatan dan pelaporan;
- 7) tindakan langsung yang dilakukan untuk menghindari dosis radiasi yang tak perlu kepada pasien, staf, dan anggota masyarakat;
- 8) tindakan untuk mencegah akses orang yang tidak berkepentingan ke daerah insiden; dan
- 9) tindakan untuk mencegah penyebaran kontaminasi, termasuk kebocoran dari lemari asap dan sistem ventilasi ruangan (IAEA, 2018).

Pelaksanaan mitigasi harus ditunjang dengan peralatan yang baik dan harus selalu tersedia setiap waktu. Peralatan tersebut mencakup, antara lain pakaian pelindung (termasuk sepatu luar dan sarung tangan); bahan dekontaminasi untuk daerah yang terkena dampak, termasuk bahan penyerap untuk menyeka tumpahan; bahan dekontaminasi manusia; tanda peringatan dan pita pembatas; peralatan pemantauan daerah kerja yang portabel; serta kantong sampah, beserta selotip, label, dan alat tulis.

5. Penyelidikan dan Pelaporan

Semua insiden harus diselidiki, termasuk yang “nyaris celaka” untuk meminimalkan kemungkinan terulangnya insiden serupa. Penyelidikan terhadap pajanan yang tidak disengaja, tidak normal, atau tidak direncanakan yang timbul dari prosedur terapi radionuklida harus ditujukan untuk memastikan apa yang terjadi; mengidentifikasi kegagalan; menentukan tindakan perbaikan yang perlu diambil untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya kegagalan serupa; dan memperkirakan kemungkinan dosis radiasi yang diterima oleh pasien dan staf (ARPANSA, 2008).

Sebagai praktik yang baik, setiap pasien yang menerima pajanan radiasi secara sengaja atau tidak sengaja harus diberi tahu mengenai kejadian tersebut dan mengenai kemungkinan dampak dari paparan yang tidak diinginkan tersebut. Jika pasien tidak dapat memahami informasi yang diberikan, informasi yang sama harus disampaikan

ke orang tua, perwakilan keluarga, atau pendamping pasien untuk kemudian disampaikan dengan lebih sabar ke pasien.

Penyelidikan biasanya akan dilakukan oleh petugas proteksi radiasi bersama dengan penanggung jawab daerah tempat insiden terjadi. Laporan tertulis harus disiapkan, yang menjelaskan mengenai kejadian, penyebab dan dampaknya, dosis radiasi yang diterima, dan rekomendasi semua tindakan perbaikan dan pencegahan yang diperlukan.

Pelaku usaha atau pemegang izin pemanfaatan ketenaganukliran harus diberi tahu sesegera mungkin jika insiden tersebut mengakibatkan pasien atau anggota masyarakat menerima dosis radiasi lebih dari 1 mSv atau anggota staf menerima lebih dari 2 mSv (ARPANSA, 2008). Sesuai dengan peraturan yang berlaku, informasi yang sama juga harus disampaikan ke BAPETEN sebagai badan pengawas.

BAB 4

PERTIMBANGAN RAWAT INAP ATAU DIPULANGKAN

Keputusan untuk rawat inap atau memulangkan pasien harus ditentukan secara individual, yang artinya berbeda antara satu pasien dan pasien lain. Keputusan tidak boleh dikaitkan hanya dengan besarnya aktivitas yang masih ada di pasien, tetapi juga harus mempertimbangkan banyak faktor, termasuk pola kontak pasien dengan orang lain, keinginan pasien, paparan di tempat kerja dan di tempat umum, pertimbangan keluarga, biaya, dan faktor-faktor lingkungan lainnya.

A. Pertimbangan Umum

Rekomendasi untuk meminta pasien untuk menjalani rawat inap atau diizinkan pulang ke tempat tinggal pribadinya sangat bervariasi pada saat ini. Beberapa parameter yang digunakan sebagai kriteria adalah sebagai berikut (IAEA, 2009a).

- 1) Persyaratan untuk memenuhi peraturan, didasarkan pada
 - a) nilai batas dosis atau penghambat dosis dari ICRP,
 - b) aktivitas sisa pada pasien, dan
 - c) laju dosis pada jarak tertentu dari pasien.
- 2) Isolasi pasien untuk mengurangi dosis ke masyarakat dan keluarga.
- 3) Isu terkait pasien:
 - a) kondisi medis yang memerlukan rawat inap,

- b) kondisi mental yang dapat mengurangi kepatuhan pada saran dokter, dan
 - c) suasana atau kondisi rumah.
- 4) Pengumpulan dan penyimpanan urine untuk mengurangi pembuangan radioaktif ke saluran pembuangan dan/atau dampak inkontinensia (tidak dapat menahan buang air kecil).

Keputusan untuk rawat inap atau pulang ke rumah berdasarkan satu atau lebih dari pertimbangan tersebut terkadang diterapkan pada semua pasien di suatu fasilitas atau bahkan suatu negara. Namun, keputusan untuk memulangkan pasien dari rumah sakit atau fasilitas medis lainnya akan lebih baik jika ditentukan secara individual untuk setiap pasien. Faktor-faktor terkait pasien yang harus dipertimbangkan dalam memutuskan untuk rawat inap atau pulang meliputi

- 1) kebutuhan medis pasien,
- 2) keinginan pasien,
- 3) pola kontak pasien dengan orang lain,
- 4) usia pasien,
- 5) lingkungan keluarga/rumah pasien,
- 6) pajanan kerja dan masyarakat,
- 7) faktor biaya dan lingkungan, dan
- 8) pengaturan sosial dan infrastruktur setempat (IAEA, 2009a).

Tabel 4.1 memperlihatkan beberapa pertimbangan lain dari IAEA selain dari sisi pasien antara harus rawat inap atau dipulangkan. Masing-masing pertimbangan dapat memiliki dampak ataupun implikasi tersendiri. ICRP juga memberikan perhatian pada beban psikologis dan biaya psikososial yang tidak dapat dihindari bagi pasien dan keluarga mereka (terutama anak kecil) akibat rawat inap, terutama jika hal ini melibatkan isolasi (ICRP, 2004).

Tabel 4.1 Pertimbangan untuk Rawat Inap atau Dipulangkan

Pertimbangan	Rawat Inap	Dipulangkan
Pengawasan lingkungan pasien	Tinggi	Rendah
Potensi dosis pekerja	Ada	Minimal
Potensi dosis keluarga	Minimal	Ada
Potensi pajanan masyarakat	Minimal	Ada
Metode pembuangan limbah	Dibuang atau disimpan	Dibuang
Pajanan masyarakat dari limbah	Ada kecuali disimpan	Ada kecuali disimpan
Biaya keuangan	Potensi tinggi	Minimal
Psikologis	Signifikan karena isolasi	Minimal
Perilaku tak terduga	Dapat dikendalikan	Mungkin terjadi

Sumber: IAEA (2009a)

Dalam hal aktivitas sisa pada pasien, ICRP memberikan perkiraan aktivitas pada beberapa radionuklida yang dapat memberikan dosis eksternal pada orang lain sebesar 5 mSv dan 1 mSv (Tabel 4.2). Dosis 5 mSv adalah nilai penghambat dosis untuk anggota keluarga dan pendamping pasien, sedangkan nilai 1 mSv adalah nilai batas dosis untuk anggota masyarakat.

Tabel 4.2 Aktivitas (MBq) untuk mengizinkan pasien pulang bergantung pada dosis eksternal yang diterima orang lain (mSv dosis efektif).

Radionuklida	Waktu paruh	MBq untuk 5 mSv	MBq untuk 1 mSv
¹¹¹ Ag	8 hari	19.000	3800
¹⁹⁸ Au	65 jam	3500	690
⁵¹ Cr	28 hari	4800	960
⁶⁴ Cu	13 jam	8400	1700
⁶⁷ Cu	61 jam	14.000	2900

⁶⁷ Ga	78 jam	8700	1700
¹²³ I	13 jam	6000	1200
¹²⁵ I	60 hari	250	50
¹³¹ I	8 hari	1200	240
¹¹¹ In	67 jam	2400	470
³² P	14 hari	a	a
¹⁸⁶ Re	90 jam	28.000	5700
¹⁸⁸ Re	17 jam	29.000	5800
⁴⁷ Sc	80 jam	11.000	2300
⁷⁵ Se	120 hari	89	18
¹⁵³ Sm	47 jam	26.000	5200
^{117m} Sn	14 hari	1100	210
⁸⁹ Sr	51 hari	a	a
^{90m} Tc	6 jam	28.000	5600
²⁰¹ Tl	74 jam	16.000	3100
⁹⁰ Y	64 jam	a	a
¹⁶⁹ Yb	31 hari	370	73

Keterangan: Simbol ^a menunjukkan bahwa tidak ada nilai yang diberikan karena pajanan ke anggota masyarakat sangat minimal.

Sumber: ICRP (2004)

Jika pasien akan menjalani rawat inap, ICRP memberikan pertimbangan khusus alasan rawat inap selayaknya dilakukan. Beberapa pertimbangan tersebut adalah sebagai berikut (ICRP, 2004).

- 1) Isolasi pasien akan mengurangi dosis untuk masyarakat dan kerabatnya meskipun akan meningkatkan dosis kerja untuk staf medis. Namun, isu ini hanya berkaitan dengan pemberian ¹³¹I yang selain memancarkan radiasi beta juga memancarkan radiasi gamma. Pasien yang diobati dengan pemancar beta murni tidak perlu dirawat di rumah sakit.
- 2) Di rumah sakit, urine dapat dikumpulkan dan disimpan untuk mengurangi pembuangan radioaktif ke sistem pembuangan

limbah. Namun, beberapa rumah sakit yang mengisolasi pasien masih ada yang tidak mengumpulkan dan menyimpan urine pasien karena praktik ini dianggap tidak praktis, mahal, meningkatkan dosis staf, dan tidak perlu mengingat umumnya hasil pengukuran dosis radiasi dari urine cukup rendah. Pengumpulan dan penyimpanan feses juga dapat dilakukan meskipun hal ini umumnya tidak dilakukan karena jalur ekskresi ini tidak signifikan.

- 3) Pasien dengan penyakit serius yang menjalani terapi radionuklida sumber terbuka (seperti ^{32}P di rongga peritoneum pasien dengan metastasis yang telah meluas).
- 4) Pasien dengan gangguan jiwa yang tidak bisa mengendalikan dan tidak mampu mengikuti instruksi dan tindakan untuk keselamatan radiasi.
- 5) Situasi rumah tempat anak-anak akan melakukan kontak jarak dekat karena kendala fisik dan sosial. Jika urine tidak akan dikumpulkan dan disimpan di rumah sakit, alternatif yang biasanya luput dari perhatian adalah pasien tinggal di fasilitas tempat tinggal nonrumah sakit, seperti hotel, selama beberapa hari. Tindakan ini lebih murah dibandingkan tinggal di rumah sakit. Namun, kondisi ini hanya dapat terjadi di beberapa negara dan tidak terjadi di negara lain.

Dengan memberikan beberapa pertimbangan tersebut, tidak berarti bahwa ICRP merekomendasikan pasien terapi radionuklida harus menjalani rawat inap. IAEA justru yang pernah menyatakan bahwa pasien yang menjalani terapi radioiodin tidak direkomendasikan untuk langsung pulang (IAEA, 1996a) meskipun rekomendasi ini kemudian tidak lagi diberikan pada publikasi berikutnya (IAEA, 2014a).

Pandangan bahwa rawat inap tidak perlu dilakukan pada terapi radionuklida ^{131}I juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Barrington et al. (1999). Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa laju klirens radioiodin yang cepat pada pasien menyebabkan terapi dapat

dilakukan di rumah pada beberapa pasien dengan kondisi rumah tertentu. Selain itu, Saenger dan Kereiakes (1980) melaporkan bahwa rawat inap berbasis aktivitas dapat menyebabkan dokter memberikan aktivitas radionuklida lebih sedikit dari yang seharusnya agar pasien dapat segera dipulangkan. Penggunaan aktivitas sebagai satu-satunya kriteria untuk memutuskan boleh pulangnya pasien mempunyai masalah karena tidak mempertimbangkan perilaku pasien selanjutnya di rumah dan besar dosis radiasi yang mungkin diterima keluarga dan masyarakat.

Potensi bahaya rawat inap lainnya yang jarang disebutkan, tetapi bisa menjadi masalah yang cukup besar adalah penempatan pasien yang relatif sehat di lingkungan yang mungkin menjadi tempat terjadinya infeksi yang resistan terhadap antibiotik. Beberapa peneliti berpendapat bahwa keuntungan rawat inap adalah seseorang dapat menghitung biokinetika ^{131}I dan mengevaluasi dosis serap secara akurat. Hal ini saja tampaknya tidak membenarkan rawat inap karena studi biokinetik dapat dilakukan walaupun pasiennya menjalani prosedur rawat jalan (ICRP, 2004).

Cara lain untuk memutuskan apakah pasien harus menjalani rawat inap atau boleh pulang adalah dengan metode pendekatan bertingkat (Lassen et al., 2023). Metode ini mengukur tingkat tindakan pencegahan dan aturan hidup, yang diputuskan berdasarkan kondisi setiap pasien setelah mengisi serangkaian parameter evaluasi. Tabel 4.3 memberikan contoh kuesioner yang harus diisi setiap pasien terapi radionuklida untuk menentukan status apakah harus rawat inap atau dipulangkan, sedangkan kesimpulan status pasien berdasarkan hasil evaluasi kuesioner diberikan pada Tabel 4.4. Secara tradisional, kuesioner bisa diisi secara tertulis, tetapi saat ini kuesioner bisa juga dilakukan secara daring dengan Google Forms.

Tabel 4.3 Pertanyaan Kuesioner bagi Pasien Terapi Radionuklida untuk Rawat Inap atau Dipulangkan

Personal:

1. Apakah Anda sedang mengandung?
2. Apakah Anda sedang menyusui?
3. Apakah Anda mengalami kesulitan dalam menahan urine atau BAB?
4. Apakah Anda menderita sembelit/konstipasi?
5. Apakah Anda sedang menstruasi?
6. Apakah Anda sedang menjalani perawatan medis, seperti cuci darah

Kondisi rumah:

7. Apakah Anda tinggal bersama orang dewasa?
8. Apakah Anda tinggal bersama anak-anak?
9. Apakah Anda tinggal bersama seseorang yang bergantung pada bantuan Anda?
10. Apakah Anda bergantung pada bantuan rutin dari orang lain?
11. Apakah Anda berbagi tempat tidur dengan orang lain?

Kondisi kerja:

12. Apa profesi anda?
13. Apakah Anda bekerja dengan anak-anak?
14. Bagaimana cara Anda mulai bekerja?
15. Apakah waktu tempuh Anda ke tempat kerja lebih dari dua jam?
16. Berapa jam sehari Anda berada di dekat rekan terdekat Anda?
17. Berapa jarak ke rekan terdekat Anda?

Rencana liburan/perjalanan/hiburan:

18. Apakah Anda merencanakan perjalanan panjang atau liburan dalam waktu dekat?
19. Apakah Anda merencanakan mencari hiburan dalam waktu dekat? Misalnya, menonton bioskop, pertunjukan musik, teater, atau pergi ke pesta.

Anak-anak dan wanita hamil:

20. Bisakah Anda menghindari kontak dekat yang berkepanjangan dengan anak-anak atau wanita hamil dalam beberapa minggu ke depan?

Pengaturan perjalanan dari rumah sakit:

21. Bagaimana cara Anda pulang dari rumah sakit?
22. Apakah waktu perjalanan pulang dari rumah sakit lebih dari satu jam?

Sumber: Lassen et al. (2023)

Tabel 4.4 Penggunaan Metode Pendekatan Bertingkat untuk Memulangkan Pasien

Parameter evaluasi pasien	Tingkat keparahan setelah evaluasi individu pasien	Berdasarkan kajian individu, pertimbangan tindakan berikut	Instruksi tipikal pada kegiatan
Radionuklida, penghitungan dosis, kesehatan pasien seperti inkontinensia, kondisi mental, masalah perilaku lainnya, situasi keluarga (anak-anak, kehamilan)		Tetap di rumah sakit	Aturan rumah sakit
		Dapat dipulangkan, tapi dengan banyak pembatasan kegiatan	Isolasi di rumah tinggal
		Dapat dipulangkan dengan beberapa pembatasan kegiatan	Pembatasan penggunaan kendaraan umum dan kegiatan sosial
		Dapat dipulangkan dengan sedikit pembatasan kegiatan	Hindari kontak dengan bayi
		Dapat dipulangkan tanpa ada pembatasan kegiatan	Hidup normal

Keterangan: Warna merah berarti sangat parah dan warna hijau berarti paling ringan.

Sumber: Lassen et al. (2023)

B. Kriteria Pemulangan

Kriteria pemulangan yang dimaksudkan di sini adalah kriteria yang langsung menetapkan nilai aktivitas yang digunakan untuk memutuskan bahwa seorang pasien terapi radionuklida boleh dipulangkan. Kriteria ini adalah kriteria nasional yang berlaku di Indonesia dan pedoman internasional yang merupakan kriteria, baik yang ditetapkan oleh organisasi internasional maupun oleh otoritas nasional di beberapa negara.

1. Kriteria Nasional

Berdasarkan Pasal 51 Perka BAPETEN No. 17 Tahun 2012, tingkat panduan aktivitas maksimum radionuklida untuk pasien terapi yang akan keluar dari rumah sakit ditetapkan sebesar 1.100 MBq untuk

pemberian ¹³¹I. Tingkat panduan ini berlaku juga bagi pasien yang meninggal saat pemberian ¹³¹I (Perka BAPETEN 17, 2012).

2. Pedoman Internasional

Nilai aktivitas yang dapat mengizinkan pasien terapi radionuklida ¹³¹I untuk pulang ke rumah di beberapa organisasi dan negara cukup bervariasi. Pada standar keselamatan yang diterbitkan tahun 1996, IAEA memberikan kriteria aktivitas sebesar 1.100 MBq sebagai batas untuk pasien yang dapat dipulangkan (IAEA, 1996b). Namun, pada standar keselamatan penggantinya yang terbit tahun 2014, IAEA mengubah pandangannya dengan tidak lagi menetapkan suatu nilai aktivitas tertentu sebagai kriteria kepulangan seorang pasien terapi radionuklida. Dalam standar terakhir ini IAEA menyatakan bahwa pasien terapi radionuklida dapat dipulangkan setelah fisikawan medis atau petugas proteksi radiasi menyatakan bahwa aktivitas radionuklida pada pasien sedemikian rupa sehingga dosis yang dapat diterima anggota masyarakat dan pihak keluarga telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh otoritas yang berwenang (IAEA, 2014a).

Di India, pasien yang menerima <1,1 GBq (30 mCi) tidak perlu rawat inap dan dapat diperlakukan sebagai rawat jalan (Kheruka et al., 2021). Selain itu, dosis radiasi pada anggota keluarga selain pendamping pasien tidak boleh melampaui 1 mSv/tahun.

Di AS, Komisi Pengaturan Nuklir (NRC) telah mengeluarkan informasi terkait praktik internasional dalam mengizinkan seorang pasien untuk diizinkan meninggalkan rumah sakit setelah menjalani terapi dengan ¹³¹I (NRC Memorandum, t.t.). Tabel 4.5 memberikan informasi tersebut seperti yang dilaporkan oleh NRC.

Tabel 4.5 Praktik Internasional untuk Pemulangan Pasien ¹³¹I

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Australia	Laju dosis pasien harus < 25 μSv/jam pada 1 m untuk boleh pulang.		Aktivitas yang biasa diberikan

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Bangladesh	Aktivitas pada pasien harus <1100 MBq untuk boleh pulang.		555 MBq atau 25 μ Sv/jam untuk tiroid toksik, 1850–7400 MBq (rata2 3700 MBq) untuk Ca-tiroid
Kanada	Pasien yang diberikan >1100 MBq diminta tetap tinggal selama beberapa jam untuk memastikan kapsul tertelan dengan benar. Diizinkan pulang jika memenuhi kriteria pemulangan yang aman (misalnya, tidak ada anak di rumah, kamar mandi terpisah untuk pasien dan perawat). Petunjuk keselamatan juga diberikan saat diizinkan pulang.	Komisi Keselamatan Nuklir Kanada (CNSC) tidak merekomendasikan tinggal di hotel	
Tiongkok	Aktivitas pada pasien harus <400 MBq untuk boleh pulang.	Pasien ditempatkan ruang klinis terpisah sampai aktivitas <400 MBq	185–1073 MBq (rata2 370–555 MBq) untuk hipertiroid, 1110–9250 MBq (rata2 3700 MBq) untuk ablasi

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Prancis	Rawat inap pasien jika aktivitas >800 MBq. Dokter harus memberikan petunjuk tertulis untuk membatasi pajanan pada orang yang melakukan kontak dengan pasien.	Rawat inap pasien ketika aktivitas >800 MBq selama minimal 48 jam hingga laju dosis <40 μ Sv /jam pada jarak 1 m. Urine disimpan dalam tangki khusus selama >80 hari dan hingga aktivitas <100 Bq/L Faeces dikirim ke tangki hanya untuk menunggu eliminasi ke sistem pembuangan.	Bervariasi sesuai dengan kebutuhan pasien.
Jerman	Rawat inap setidaknya 48 jam pasca pemberian radionuklida. Laju dosis lokal harus <3,5 μ Sv/h pada jarak 2 m atau aktivitas seluruh tubuh harus <250 MBq (6,8 mCi) untuk boleh pulang.	Rawat inap setidaknya 48 jam setelah pengobatan karsinoma tiroid. Bangsal dilengkapi dengan instalasi pengolahan air limbah terpisah.	200 MBq–1 GBq untuk hipertiroid, 1,1 GBq, 3,7 GBq atau 5,5 GBq untuk kanker tiroid

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Jepang		<p>Pemegang izin tidak diperbolehkan mengisolasi pasien di hotel atau fasilitas nonmedis lainnya. Untuk mengurangi radiasi pasien ke tingkat pasien diizinkan pulang (pasien dapat diizinkan pulang jika aktivitas turun di bawah 500 MBq pada 1m), pasien diisolasi di ruangan yang dirancang untuk terapi radiasi atau ruangan di mana pasien diberikan radio-nuklida selama di rumah sakit.</p>	

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Lithuania	Aktivitas pada pasien harus <400 MBq untuk boleh pulang.	Rawat inap selama tiga hari	Dokter yang bertanggung jawab atas pasien harus memutuskan aktivitas radionuklida yang akan diberikan. Pedoman kanker tiroid yang dikeluarkan oleh Japanese Society of Nuclear Medicine dan Japanese Society of of Nuclear Medicine in Oncology and Immunology mencatat aktivitas standar yang diberikan kepada pasien kanker tiroid adalah 3.700–7.400 MBq.
Malaysia	Aktivitas pada pasien harus <1100 MBq untuk boleh pulang.	Pasien yang diberi aktivitas <1100 MBq bisa langsung pulang. Tidak ada pengaturan khusus untuk bepergian. Pasien yang diberi >1100 MBq berada di bangsal isolasi sampai aktivitasnya berada di bawah nilai legal.	200–300 MBq untuk hipertiroid, 1,6–3,2 GBq untuk kanker tiroid.

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Selandia Baru	Pasien yang diberi >800 MBq harus rawat inap (biasanya hanya ablasi tiroid). Anak-anak dan wanita hamil tidak boleh berkunjung. Laju dosis ambiens harus <0,05 mGy/jam pada 1 m untuk boleh pulang.	Pasien yang diberi >800 MBq berada di ruang isolasi dengan kamar mandi sendiri. Tidak boleh bepergian dengan kendaraan umum sampai aktivitas <400 MBq. Tidak bisa kembali bekerja sampai aktivitas <250 MBq. Tidak boleh berada dekat anak-anak sampai aktivitas <50 MBq.	370–740 MBq untuk hipertiroid, 2960–5550 MBq untuk kanker tiroid.
Filipina	Dosis efektif total harus <3 mSv untuk boleh pulang. Pasien dan pedampingnya memerlukan petunjuk tertulis. Pasien rawat inap harus memiliki fasilitas sanitasi tersendiri.		
Polandia	Aktivitas pada pasien harus <800 MBq untuk boleh pulang.	Wanita hamil setelah 8 minggu kehamilan tidak boleh diberikan ¹³¹ I. Pemberian ¹³¹ I tunggal untuk rawat jalan harus <8 MBq. Petunjuk tertulis harus disediakan.	111–1110 MBq untuk hipertiroid, 185–9250 MBq untuk kanker tiroid.

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Portugal	Laju dosis pada 1 m tidak bisa melampaui nilai batas dosis untuk anggota masyarakat	Pasien yang diberikan aktivitas 140–500 MBq langsung dipulangkan. Pasien rawat inap (diberi aktivitas 5000–11100 MBq harus ditempatkan di ruang isolasi rumah sakit dengan kamar mandi sendiri. Semua kotorannya disalurkan ke tangki peluruhan terpisah sampai dapat dibuang ke lingkungan.	
Afrika Selatan	Laju dosis pasien harus <2,5 mSv/jam untuk boleh pulang. Kamar mandi tersendiri. Anak-anak diberi MIBG harus memiliki aktivitas <550 MBq untuk boleh pulang.	Ruang isolasi rumah sakit. Kotoran dibuang ke sistem pembuangan sebagai limbah non-radiasi dan tidak perlu disimpan.	140–500 MBq untuk prosedur tipikal, 5000–11100 MBq untuk prosedur khusus.
Spanyol	Aktivitas pada pasien harus <800 MBq atau laju dosis <40 mSv/jam untuk boleh pulang	Dokter harus memberikan petunjuk lisan dan tertulis. Pasien boleh pulang setelah memahami petunjuk.	Bervariasi sesuai dengan kebutuhan pasien.

Negara	Persyaratan	Praktik standar	Aktivitas yang biasa diberikan
Taiwan	Tidak ada petunjuk tertulis.	Masyarakat medis memutuskan jika pasien diberikan >1100 MBq akan menjalani rawat inap. Pasien tinggal di rumah sakit umumnya selama 3 hari. Laju dosis harus <70 μ Sv/jam pada 1 m untuk boleh pulang. Pasien kembali ke rumah sakit secara menjalani pemin- daian seluruh tu- buh dan pemerik- saan tindak lanjut memeriksa.	
Inggris	Pasien yang diberi <800 MBq boleh pulang di hari yang sama dengan petun- juk tertulis. Jika diberi >800 MBq, pasien menjalani rawat inap di ruang terapi khusus yang diberi pelindung radiasi.	Tidak ada rumah sakit yang diketahui akan memulangkan pasien ke hotel. Namun, jika pasien dipindahkan ke rumah sakit lain atau griya lansia, rumah sakit yang merawat harus memberikan petunjuk me- ngenai tindakan pencegahan keselamatan radiasi (seperti halnya hotel).	400–600 MBq untuk hipertiroid; 1,1 GBq untuk pasien dengan pT1-2; 3,7-5,5 GBq untuk pasien dengan penyakit lokal yang masih ada menyusul ablasi sisa radiasi atau metastasis jauh.

Sumber: NRC Memorandum (t.t.)

C. Dosis Radiasi Sekitar pada Pemulangan

Setelah menjalani tindakan terapi radionuklida, seorang pasien berpotensi memberikan pajanan radiasi kepada orang di sekitarnya. Jalur pajanan yang dapat terjadi adalah melalui penyinaran eksternal kepada orang yang berada di dekatnya dan melalui kontaminasi internal dari ekskresi radionuklida atau napas yang diembuskan.

1. Penyinaran Eksternal

Penyinaran eksternal pada orang yang berada dekat dengan pasien berhubungan dengan radionuklida yang digunakan, pancarannya, waktu paruh, dan biokinetiknya, yang mungkin penting pada beberapa radionuklida (IAEA, 2009a). Untuk pasien karsinoma tiroid dan hipertiroid yang menerima penyinaran radioiodin, pembatasan kontak dengan orang sekitar yang direkomendasikan diberikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Rekomendasi bagi pasien radioiodin untuk membatasi dosis hanya 1 mSv pada orang di sekitarnya.

Aktivitas yang diberikan pada pasien (MBq)	Jenis kelainan	Cuti bekerja (hari)	Tidur terpisah dan membatasi kontak dengan pasangan (hari)*	Membatasi kontak dengan anak-anak usia <2 tahun	Membatasi kontak dengan anak-anak usia 2–5 tahun (hari)	Membatasi kontak dengan anak-anak usia 5–11 tahun (hari)
200	Hipertiroid	0	15	15	11	5
400	Hipertiroid	3	20	21	16	11
600	Hipertiroid	6	24	24	20	14
800	Hipertiroid	8	26	27	22	16
1850	Kanker	1,3	3,16	4,16	3,13	2,10
3700	Kanker	2,7	4,20	4,20	4,17	3,13

Aktivitas yang diberikan pada pasien (MBq)	Jenis kelainan	Cuti bekerja (hari)	Tidur terpisah dan membatasi kontak dengan pasangan (hari)*	Membatasi kontak dengan anak-anak usia <2 tahun	Membatasi kontak dengan anak-anak usia 2–5 tahun (hari)	Membatasi kontak dengan anak-anak usia 5–11 tahun (hari)
5550	Kanker	2,10	4,22	5,22	4,19	3,16
7400	Kanker	2,12	5,23	5,24	4,21	4,17

* Asumsi tidur terpisah 1 meter selama 8 jam

Sumber: IAEA (2009)

Pada banyak perhitungan dosis serap dari pasien radioaktif yang diterima orang lain, distribusi aktivitas diasumsikan sebagai sumber titik tidak dilemahkan. Perkiraan dosis eksternal untuk orang-orang terdekat biasanya dilakukan dengan menggunakan hukum kuadrat terbalik. Hal ini umumnya berlaku untuk pasien hipertiroid atau pasien kanker tiroid dengan metastasis lokal ketika iodin terkonsentrasi (ICRP, 2004).

Namun, jika aktivitas tersebut terdistribusi secara luas pada pasien, penggunaan model sumber titik tidak dilemahkan akan memberikan perkiraan dosis yang terlalu tinggi kepada orang-orang terdekat. Untuk hal ini, model koreksi atenuasi sumber garis akan lebih akurat dan dapat diterapkan secara rutin. Model ini akan lebih baik bagi pasien yang telah menerima pengobatan paliatif metastasis tulang atau radioimunoterapi.

2. Kontaminasi Internal

Data terbanyak yang tersedia mengenai kontaminasi adalah dari radioiodin, yang umumnya diberikan secara oral sebagai ^{131}I -natrium iodida dalam bentuk cair atau kapsul. Radioiodin dengan cepat diserap dari saluran pencernaan ke dalam aliran darah, mengendap serta difungsikan oleh jaringan tiroid fungsional. Hormon tiroid berlabel radioiodin beredar pada protein pengikat plasma yang dimetabolisme oleh hati dan otot. Iodin radioaktif akhirnya diekskresikan, terutama

melalui urine, dengan jumlah yang lebih kecil melalui air liur, keringat dan feses, dan sejumlah kecil diembuskan. Risiko kontaminasi terhadap orang lain berasal dari proses ini (IAEA, 2009a).

Kontaminasi dari pasien kanker tiroid paling tinggi terjadi sekitar 24 jam setelah pemberian radioiodin dan lebih tinggi jika dibandingkan pasien hipertiroid. Pasien yang sering mandi memiliki jumlah kontaminasi lepasan yang jauh lebih rendah. Kontaminasi yang dapat dihilangkan pada permukaan yang disentuh pasien sangat bervariasi. Aktivitas lepasan dari tepi toilet selama 48 jam pertama pascaperawatan jauh lebih besar pada pria dibandingkan wanita. Aktivitas air liur sebanding dengan aktivitas yang diberikan dan tertinggi 24 jam pascaterapi.

Pada orang dewasa, kontaminasi sebenarnya tidak terlalu bahaya dibandingkan pajanan eksternal. Namun, upaya untuk menghindari terjadinya kontaminasi pada anak-anak dan wanita hamil sangat penting karena janin dan kelenjar tiroid anak sangat peka terhadap induksi kanker tiroid. Selain itu, menyusui harus segera dihentikan oleh seorang ibu setelah menjalani terapi radioiodin (ICRP, 2004).

Tabel 4.7 memperlihatkan faktor konversi dosis dari ingesi dan inhalasi ^{131}I oleh manusia dari beberapa kelompok usia. Data pada tabel ini berguna untuk menghitung dosis potensial secara prospektif. Namun, pengukuran langsung aktivitas radionuklida pada cairan tubuh dan pada orang selain pasien akan lebih akurat.

Koefisien dosis pada Tabel 4.7 memperhitungkan perubahan terkait usia dalam penyerapan usus (f_1), massa tubuh dan organ, serta laju ekskresi dari kandung kemih, tetapi tidak pada biokinetika retensi dan ekskresi organ setelah penyerapan menjadi darah (ICRP, 2012). Untuk ingesi, nilai f_1 yang digunakan adalah 1, sedangkan untuk inhalasi nilai f_1 bergantung pada laju serapan. Untuk laju serapan yang cepat (diberi notasi F) nilainya 1, yang menengah (notasi M) nilainya 0,2, dan yang lambat (S) nilainya 0,02.

Tabel 4.7 Faktor Konversi Dosis (Sv/Bq) untuk Inhalasi dan Ingesi ¹³¹I

Kelompok usia (tahun)	Ingesi	Inhalasi		
		F	M	S
Bayi	$4,8 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$8,8 \times 10^{-9}$
1 tahun	$1,8 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$6,2 \times 10^{-9}$
5 tahun	$1,0 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-8}$	$8,2 \times 10^{-9}$	$3,5 \times 10^{-9}$
10 tahun	$5,2 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-9}$
15 tahun	$3,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-9}$
Dewasa	$2,2 \times 10^{-8}$	$7,4 \times 10^{-9}$	$2,4 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$

Sumber: ICRP (2012)

D. Pertimbangan Lain

Beberapa pertimbangan lain dalam memutuskan kepulangan seorang pasien yang telah menjalani terapi radionuklida untuk suatu kondisi tertentu juga perlu diperhatikan. Kondisi tersebut, antara lain, jika ada penangguhan pemulangan, pasien dipindah ke tempat lain—dalam pengertian dari rumah sakit tidak langsung pulang ke rumah—dan pasien pulang dengan kendaraan umum.

1. Penangguhan Pemulangan

Seorang pasien yang pada awalnya telah diizinkan untuk pulang ke tempat tinggal pribadi bisa saja ditangguhkan pemulangannya tersebut. Dalam konteks terapi radionuklida, alasan untuk penangguhannya adalah salah satu atau dua hal berikut (ARPANSA, 2002).

- 1) Terjadi penyebaran kontaminasi akibat ekskresi sumber radionuklida.
- 2) Pasien muntah tidak lama setelah dilakukan pemberian oral sumber radionuklida.

2. Pasien Dipindah ke Lokasi Lain

Jika pasien akan dipindahkan ke institusi atau tempat perawatan selain tempat tinggal pribadi, misalnya ke panti wreda atau panti lansia,

status radioaktif pasien harus diberitahukan dan dikirimkan ke tempat perawatan tersebut pada saat pemindahan (ARPANSA, 2002). Pemberitahuan harus mencakup perincian bentuk dan aktivitas radionuklida, waktu dan tanggal pemberian radionuklida kepada pasien, karakteristik radiasi radionuklida yang relevan, dan tindakan yang harus diperhatikan selama waktu tertentu oleh petugas yang akan merawat pasien tersebut. Nama rumah sakit atau klinik tempat asal pasien dipindahkan juga harus dicantumkan bersama dengan nama dan nomor kontak petugas yang dapat dihubungi untuk mendapatkan informasi lebih lanjut mengenai masalah proteksi radiasi atau saran jika terjadi keadaan darurat medis pada pasien.

3. Pulang dengan Kendaraan Umum

Jika pasien dipulangkan dengan masih memancarkan laju dosis ekui-valen ambiens sebesar 25 $\mu\text{Sv/jam}$ pada jarak 1 m, waktu perjalanan dengan kendaraan umum tidak boleh lebih dari 2 jam (ARPANSA, 2002). Waktu perjalanan maksimum 2 jam juga harus dipenuhi jika radionuklida yang dipancarkan memiliki aktivitas maksimum seperti yang diberikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Aktivitas Maksimum Radionuklida Sumber Terbuka yang Boleh Diberikan pada Pasien Rawat Jalan

Radionuklida	Waktu paruh fisis	Aktivitas (MBq)	Catatan
¹¹¹ I (iodin)	2,81 hari	400	a
¹³¹ I (iodin)	8,02 hari	600	b
³² P (fosfor)	14,3 hari	1200	c
¹⁸⁸ Rh (rhenium)	17,0 jam	4000	a,d
¹⁵³ Sm (samarium)	1,93 hari	4000	a,d
⁸⁹ Sr (strontium)	50,5 hari	300	b,d
⁹⁰ Y (itrium)	2,67 hari	4000	b,d

Keterangan:

Catatan ini tidak berlaku untuk radionuklida dalam bentuk radiofarmaka yang tidak larut atau tertahan seluruhnya di dalam tubuh, misalnya mikrosfer atau koloid bertanda.

- (a) Pasien yang mengalami inkontinensia tidak boleh dipulangkan ke tempat tinggal pribadi atau tempat lain yang tidak diawasi dalam 2 hari pertama setelah pemberian radionuklida ini kecuali jika pemantauan terhadap pasien atau aktivitas yang dikeluarkan menunjukkan bahwa tanggal pemulangan yang lebih awal adalah tindakan yang tepat dilakukan.
- (b) Pasien yang mengalami inkontinensia tidak boleh dipulangkan ke tempat tinggal pribadi atau tempat lain yang tidak diawasi pada minggu pertama setelah pemberian radionuklida ini kecuali jika pemantauan terhadap pasien atau aktivitas yang dikeluarkan menunjukkan bahwa tanggal pemulangan yang lebih awal adalah tindakan yang tepat dilakukan.
- (c) Pasien yang mengalami inkontinensia tidak boleh dipulangkan ke tempat tinggal pribadi atau tempat lain yang tidak diawasi dalam 2 minggu pertama setelah pemberian radionuklida ini kecuali jika pemantauan terhadap pasien atau aktivitas yang dikeluarkan menunjukkan bahwa tanggal pemulangan yang lebih awal adalah tepat.
- (d) Untuk radiofarmaka dengan ekskresi aktivitas ginjal yang cepat, pasien harus tetap di rumah sakit atau di klinik sampai urine satu atau dua kali dikeluarkan. Pemantauan pasien atau aktivitas radiasi yang dikeluarkannya dapat menunjukkan bahwa waktu pulang yang lebih awal atau lebih lambat adalah waktu yang tepat. Pasien harus menerima instruksi yang tepat untuk meminimalkan penyebaran kontaminasi dari ekskreta setidaknya selama 24 jam berikutnya setelah keluar dari rumah sakit atau klinik.

Sumber: ARPANSA (2002)

Jika perjalanan akan memakan waktu lebih lama dan pasien bermaksud menggunakan kendaraan umum, pasien harus tetap berada di rumah sakit atau di lokasi tertentu setelah keluar dari rumah sakit sehingga perjalanan dapat ditunda sampai laju dosis ekuivalen ambians eksternal telah turun ke tingkat yang dapat diterima. Alternatif lain, setelah menghitung kemungkinan dosis yang dapat diterima perawat atau pendamping pasien, pasien mungkin disarankan untuk pulang dengan sarana lain selain kendaraan umum. Hal ini sangat penting terutama jika kendaraan umum memiliki tempat duduk berdekatan dengan jarak kurang dari 1 meter.

BAB 5

ISU TERKAIT PASIEN DAN KESELAMATAN LAINNYA

Selain isu proteksi radiasi, beberapa isu lain juga memerlukan pertimbangan khusus, baik yang terkait dengan kondisi pasien itu sendiri maupun dengan risiko bahaya yang ditimbulkan dari kegiatan penanganan sumber radionuklida. Bahaya yang terkait dengan kondisi pasien meliputi kondisi pasien yang sedang hamil/menyusui dan kondisi jika pasiennya meninggal dunia saat menjalani terapi. Adapun risiko bahaya lain yang relevan adalah pengelolaan limbah radioaktif dan keselamatan pengangkutan zat radiofarmaka sebagai zat radioaktif yang dimanfaatkan pada terapi radionuklida.

A. Pasien Hamil dan Menyusui

Pasien wanita yang sedang hamil dan menyusui perlu mendapatkan penanganan khusus jika diindikasikan perlu menjalani terapi radionuklida. Selain itu, pertimbangan lain yang perlu mendapat perhatian adalah jika seorang wanita ingin hamil setelah menjalani terapi radionuklida. Pada subbagian ini akan dibahas isu yang terkait dengan kondisi khusus tersebut dalam kaitannya dengan terapi radionuklida.

1. Pasien Hamil

Pasien yang hamil memerlukan penanganan atau tindakan khusus terkait dengan proteksi radiasi. Untuk itu pihak fasilitas atau rumah sakit harus dapat memastikan status seorang pasien wanita sedang hamil atau tidak.

Salah satu cara untuk mengetahui status kehamilan pasien wanita adalah dengan memintanya untuk menjawab pertanyaan yang tertulis pada suatu poster yang dipasang di dinding ruang tunggu. Poster berisi tulisan besar, “Apakah Anda sedang hamil atau merasa hamil?” dan di bawahnya dengan tulisan agak kecil “Jika ya, beri tahu petugas atau perawat”. Cara yang lain adalah menanyakan langsung ke pasien meskipun barangkali cara seperti ini kadang-kadang dipandang kurang sopan.

Terapi radionuklida pada pasien hamil pada dasarnya tidak boleh dilakukan, kecuali terapi tersebut bersifat menyelamatkan nyawa. Pelarangan ini menjadi lebih valid untuk terapi radioiodin dan radionuklida lain yang berpotensi memberikan dosis radiasi pada janin dalam kisaran beberapa milisievert (IAEA, 2009a). Radioiodin diketahui akan dengan mudah bergerak melewati plasenta dan tiroid janin mulai mengumpulkan iodin pada usia kehamilan sekitar sepuluh minggu.

Ketika janin berusia lebih dari 8 minggu pascapembuahan, tiroid dapat mengakumulasi iodin dan nantinya dapat memberikan risiko terjadinya induksi kanker dan ablasi. Jika kehamilan diketahui dalam waktu 12 jam setelah pemberian iodin, pemberian 60–130 mg kalium iodida stabil (KI) akan menghambat sebagian tiroid janin dan mengurangi dosis. Namun, intervensi dengan KI tidak akan efektif jika diberikan 12 jam setelah pemberian radioiodin (IAEA, 2009a).

Dalam kaitannya dengan janin, ICRP menyatakan bahwa batas dosis untuk janin secara umum sebanding dengan batas dosis untuk masyarakat umum, yaitu 1 mSv per tahun (IAEA, 2018). Hal ini berarti setelah kehamilan dinyatakan, dosis pada embrio/janin tidak boleh melebihi sekitar 1 mSv selama sisa kehamilan. Pembatasan ini berkaitan dengan proteksi terhadap organ tubuh sang ibu, terutama kandung kemih, dari radiasi eksternal. Kemudian, setelah perkembangan organ dimulai, tiroid janin juga berisiko mengalami ablasi selama terapi radioiodin.

Beberapa radiofarmaka, termasuk ^{131}I sebagai iodida dan ^{32}P sebagai fosfat, dengan cepat akan melintasi plasenta sehingga ke-

ungkinan terjadinya kehamilan harus dicegah sebelum pemberian radiofarmaka ini.

Dalam praktiknya, kanker tiroid pada wanita relatif tidak agresif sehingga baik pembedahan maupun pengobatan dengan radioiodin dapat ditunda hingga setelah kehamilan. Karena itu, seorang wanita hamil tidak boleh diobati dengan radionuklida seperti iodin kecuali situasinya serius, misalnya jika terapi tersebut diperlukan untuk menyelamatkan nyawanya. Jika kejadian seperti ini terjadi, potensi dosis serap dan risiko pada janin harus diperkirakan dan diinformasikan kepada pasien dan dokter rujukan untuk menentukan tindakan terbaik dalam situasi tersebut.

Ketika seorang pasien yang sebelumnya diduga tidak hamil menerima radionuklida dan kemudian diketahui tengah hamil, situasi ini perlu dicermati dengan hati-hati. Kehamilan ini umumnya berada pada tahap awal dan pada tahap ini dapat terjadi dosis embrio atau janin di seluruh tubuh akibat emisi gamma dari radioiodin di kandung kemih ibu. Kemudian, selama kehamilan dosis seluruh tubuh untuk embrio/janin akan berada pada kisaran 50–100 $\mu\text{Gy}/\text{MBq}$ dari aktivitas yang diberikan (IAEA, 2018). Dosis ini dapat dikurangi dengan memberi cairan yang cukup kepada pasien secara oral dan menganjurkannya untuk sering berkemih.

2. Pasien Menyusui

Semua pasien wanita yang akan menjalani terapi radionuklida harus diminta untuk memberitahukan apakah dirinya sedang menyusui atau tidak karena banyak radiofarmaka yang dapat ditransfer ke bayi melalui air susu ibu (ASI). Penghentian menyusui, setidaknya untuk jangka waktu singkat, direkomendasikan untuk sebagian besar tindakan terapi radionuklida (ICRP, 2004).

Jika menjalani terapi dengan radioiodin, menyusui harus dihentikan sepenuhnya karena bayi dapat mengalami hipotiroid permanen atau berisiko tinggi terkena kanker tiroid berikutnya. Dosis pada bayi akibat pemberian ASI oleh seorang ibu yang menjalani terapi radionuklida ^{131}I ditunjukkan pada Tabel 5.1. Dosis diberikan dalam

satuan Sv/Bq, yang berarti besar dosis radiasi (dalam satuan Sv) pada bayi bergantung pada besar aktivitas radionuklida ¹³¹I yang diterima ibunya (dalam satuan Bq).

Saran yang paling baik adalah wanita berhenti menyusui 2–3 minggu sebelum menerima terapi radioiodin. Keuntungan dari tindakan ini adalah payudara akan berhenti memproduksi ASI, dosis pada jaringan payudara akan berkurang, bahaya dari ketidakpatuhan pada ketentuan ini tidak terjadi, dan bra serta pengikat payudara yang terkontaminasi tidak akan menjadi masalah (ICRP, 2004).

Tabel 5.1 Dosis (Sv/Bq) pada Bayi Akibat Pemberian ASI dari Seorang Ibu setelah Satu Kali Menerima Terapi Radionuklida ¹³¹I

Waktu pemberian terapi iodin	Dosis efektif
26 minggu sebelum kehamilan	0
5 minggu kehamilan	0
15 minggu kehamilan	$3,4 \times 10^{-6}$
35 minggu kehamilan	$1,3 \times 10^{-10}$
Kelahiran + 1 hari	$5,4 \times 10^{-8}$
Kelahiran + 10 hari	$5,4 \times 10^{-8}$
Kehamilan + 20 hari	$5,4 \times 10^{-8}$

Sumber: ICRP (2004)

Rekomendasi untuk berhenti menyusui setelah pemberian berbagai radiofarmaka diberikan pada Tabel 5.2 (IAEA, 2018). Rekomendasi ini mempertimbangkan pajanan internal dari ASI dan pajanan eksternal bayi dari ibu. ASI yang keluar selama periode penghentian harus dibuang.

Untuk radiofarmaka yang tidak termasuk dalam Tabel 5.2, periode penghentian menyusui harus dilanjutkan sampai radiofarmaka tersebut tidak lagi dikeluarkan dalam jumlah yang diperkirakan akan memberikan dosis efektif lebih besar dari 1 mSv kepada anak-anak.

Tabel 5.2 Rekomendasi untuk Berhenti Menyusui setelah Menerima Radionuklida

Radiofarmaka	Pemanfaatan klinis paling banyak	Aktivitas yang biasa diberikan (MBq)	Waktu berhenti menyusui
¹³ C bertanda	Tumor, pencitraan otak atau miokardial	Setiap aktivitas	Tidak ada
¹³ N bertanda	Pencitraan miokardial	Setiap aktivitas	Tidak ada
¹⁵ O bertanda	Pengukuran aliran/ perfusi	Setiap aktivitas	Tidak ada
¹⁸ F-FDG	Pencitraan tumor dan infeksi	400	4 jam
⁵¹ Cr-EDTA	GFR	2	Tidak ada
⁶⁷ Ga-sitrat	Pencitraan tumor dan infeksi	200	>3 minggu atau dihentikan total
⁶⁸ Ga-DOTA peptida terkonjugasi	Pencitraan tumor	100-200	4 jam
^{99m} Tc-DMSA	Pencitraan ginjal kortikal	80-200	4 jam
^{99m} Tc-DTPA	Pencitraan dan fungsi ginjal (GFR)	40-400	4 jam
^{99m} Tc-ECD	Perfusi otak	800	4 jam
^{99m} Tc-HMPAO	Perfusi otak	500	4 jam
^{99m} Tc-MDP dan agen fosfat lain (mis. HDP dan DPD)	Pemindai tulang	800	4 jam
^{99m} Tc-MIBI	Perfusi miokardial, pemindaian paratiroid	250-700	4 jam
^{99m} Tc-tetrofosmin	Perfusi miokardial	250-700	4 jam
^{99m} Tc-SC	Pemindai hati	200-400	4 jam
^{99m} Tc-DTPA aerosol	Pencitraan dan fungsi ventilasi paru-paru	50	4 jam

Radiofarmaka	Pemanfaatan klinis paling banyak	Aktivitas yang biasa diberikan (MBq)	Waktu berhenti menyusui
^{99m} Tc-karbon bertanda (Technegas)	Pencitraan ventilasi paru-paru	40	4 jam
^{99m} Tc-MAG3	Pencitraan dan fungsi ginjal dan saluran urine	40-400	4 jam
^{99m} Tc-perteknetat	Pemindai tiroid, divertikulum Meckel	100-400	12 jam
^{99m} Tc-MAA	Pencitraan perfusi paru-paru	40-150	12 jam
^{99m} Tc-eksameta-zim WBC	Pencitraan infeksi	180-400	12 jam
^{99m} Tc-bertanda RBC	Ventrikulografi radionuklida	800	12 jam
^{99m} Tc-mebrofenin/disofenin dan turunan IDA lainnya	Pencitraan dan fungsi hepatobilier	300	4 jam
^{99m} Tc partikel nanokoloidal albumin manusia	Sentinel nodes Pencitraan hati	5-120	4 jam
¹¹¹ In-oktreotida	Tumor neuroendokrin (sintigrafi reseptor somatostatina)	120-200	4 jam
¹²³ I-MIBG	Pencitraan neuroblastoma	100-200	60 jam
¹²³ I-Nal	Pencitraan dan fungsi tiroid	400	>3 minggu atau dihentikan total
¹²³ I-ioflupane (FP-CIT)	Neurotransmisi dopaminergik (D1) pada gangguan gerak	20	>3 minggu atau dihentikan total

Radiofarmaka	Pemanfaatan klinis paling banyak	Aktivitas yang biasa diberikan (MBq)	Waktu berhenti menyusui
¹²³ I-hippurate	Pencitraan dan fungsi ginjal dan saluran urine	150-250	>3 minggu atau dihentikan total
¹³¹ I-Nal	Diagnostik dan terapi penyakit tiroid jinak dan ganas	20-40	12 jam
¹³¹ I-MIBG	Pencitraan tumor dan terapi adrenal	Setiap aktivitas	Penghentian total
²⁰¹ Tl-klorida	Perfusi miokardial	Setiap aktivitas	>3 minggu atau dihentikan total
		100	96 jam

Sumber: IAEA (2018a)

Untuk terapi intrakaviter seperti dengan ⁹⁰Y silikat, terapi ini secara teori tidak menimbulkan bahaya. Namun, dalam praktiknya, kebocoran yang tidak disengaja dapat terjadi dan penghentian menyusui umumnya disarankan untuk terapi ini. Selain bahaya tertelan pada bayi, kedekatan anak dengan ibunya juga dapat menimbulkan bahaya eksternal. Penghentian menyusui sebelum terapi radionuklida juga disarankan dengan tujuan untuk menonaktifkan jaringan payudara, dengan demikian mengurangi dosis payudara (IAEA, 2009a).

3. Kehamilan setelah Menjalani Terapi Radionuklida

Isu terkait wanita yang lain adalah boleh tidaknya mengalami hamil setelah menjalani pemeriksaan terapi radionuklida. Umumnya, pasien wanita disarankan untuk tidak hamil setidaknya selama enam bulan setelah menjalani terapi dengan radioiodin (ICRP, 2004). Saran ini sebenarnya tidak didasarkan pada potensi efek radiasi herediter yang mungkin terjadi atau pertimbangan proteksi radiasi, namun lebih didasarkan pada kebutuhan untuk memastikan bahwa hipertiroidisme

atau kanker dapat dikendalikan, dan tindakan lain dengan radioiodin tidak akan diperlukan saat pasien hamil.

Namun demikian, dalam terapi radionuklida dengan ^{32}P , ^{89}Sr , dan MIBG, untuk menjaga agar dosis pada janin di bawah 1 mGy, kehamilan harus dihindari masing-masing selama 3, 24, dan 3 bulan. Untuk pasien wanita yang menjalani terapi radioiodin atau radiofarmaka yang diberi tanda dengan ^{59}Fe atau ^{75}Se (untuk pencitraan adrenal), dianjurkan untuk tidak hamil sampai potensi dosis radionuklida yang tersisa pada janin tidak melebihi 1 mGy (ICRP, 2004). Karena waktu paruh fisis yang panjang dan waktu tinggalnya yang lama di dalam tubuh, dianjurkan agar kehamilan dihindari atau ditunda masing-masing selama 6 dan 12 bulan. Tabel 5.3 memperlihatkan saran terkait periode menghindari kehamilan untuk setelah menjalani terapi radionuklida dengan radionuklida berumur panjang.

Tabel 5.3 Periode untuk Menghindari Kehamilan setelah Menjalani Terapi Radionuklida

Nuklida dan bentuk	Untuk pengobatan	Semua aktivitas hingga (MBq)	Hindari kehamilan (bulan)
^{32}P fosfat	Polisitaemia dan gangguan terkait	200	3
^{89}Sr klorida	Metastasis tulang	150	24
^{90}Y koloida	Arthritis sendi	400	0
^{90}Y antibodi atau ^{90}Y -oktreotida	Kanker	4000	1
^{131}I iodida	Penyakit tiroid jinak	800	6–12
^{131}I Na iodida	Kanker tiroid	6000	6–12
^{131}I -MIBGa	Keganasan	7500	3
^{153}Sm koloida	Metastasis tulang	2600	1
^{169}Er koloida	Arthritis sendi	400	0

Sumber: IAEA (2018a)

B. Penanganan Pasien Meninggal

Jika pasien meninggal segera setelah menjalani terapi radionuklida, jenazah perlu diberikan penanganan secara khusus. Penanganan khusus tidak hanya dilakukan di rumah sakit, di rumah tempat tinggal atau di tempat lain, namun juga pada saat otopsi, pembalsaman (*embalming*, pengawetan jenazah), pemakaman, atau kremasi.

1. Prosedur Umum

Tindakan khusus terkait dengan proteksi radiasi harus ditentukan oleh petugas proteksi radiasi berdasarkan penilaian keselamatan umum, baik untuk kebutuhan proteksi bagi personel yang melaksanakan prosedur penanganan maupun kebutuhan untuk memantau tingkat radiasi pada lokasi tempat jenazah disemayamkan dan kebutuhan untuk meminimalkan pajanan radiasi eksternal dan potensi kontaminasi. Selain pemantauan seluruh tubuh, pemantauan jari mungkin diperlukan bagi individu yang melakukan otopsi atau pembalsaman karena kemungkinan besar akan dihasilkan kontaminasi dan limbah radioaktif.

Situasi bagi pasien yang disuntik dengan radiofarmaka pencari tulang seperti ^{89}Sr untuk manajemen nyeri pada metastasis tulang menjadi lebih bermasalah karena waktu paruh radionuklida ini relatif lama (50 hari). Penyimpanan jenazah tidak praktis. Dalam hal kremasi, bergantung pada keinginan keluarga untuk mengambil abunya. Penyimpanan mungkin diperlukan jika diminta oleh peraturan legal setempat, termasuk untuk mematuhi kebiasaan dari sisi budaya atau etika (IAEA, 2018).

Jika kematian terjadi di rumah sakit, akses ke ruangan yang ditempati oleh almarhum harus dikontrol sampai ruangan tersebut telah didekontaminasi dan disurvei secara cermat. Jenazah yang mengandung radioaktif harus dipandang sebagai sumber bahaya radiasi dan karena itu harus diberi tanda pengenalan khusus tertentu. Kantong jenazah dapat digunakan untuk menampung kebocoran zat radioaktif. Untuk meminimalkan risiko radiasi eksternal, jenazah bisa disimpan di tempat khusus yang terpisah. Pengendalian lebih lanjut

juga diperlukan pada tahap penanganan jenazah selanjutnya, termasuk pemindahan dari kamar mayat ke krematorium, pemakaman, atau ke masjid untuk disalatkan bagi muslim, atau ke gereja untuk disemayamkan bagi umat kristiani. Lama waktu pengendalian akan bergantung pada waktu maksimum yang dihabiskan oleh pengurus pemakaman dan stafnya di dekat jenazah dan pada keterampilan untuk menyiapkan jenazah secepatnya sebelum dimakamkan.

Pengurus pemakaman perlu diberi tahu mengenai tindakan proteksi radiasi yang diperlukan dan jika perlu, disampaikan pula pemberitahuan kepada Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) sebagai otoritas nuklir secara nasional yang berwenang. Pengurus pemakaman dan pemuka agama diharapkan tidak bereaksi berlebihan terhadap risiko radiasi yang terkait dengan jenazah yang mengandung radioaktif ini. Komunikasi yang baik diperlukan untuk memastikan bahwa proteksi radiasi yang memadai diterapkan tanpa mengorbankan kekhidmatan yang ada dalam prosesi penghormatan kepada jenazah.

Beberapa hal yang terkait dengan pembalsaman, pemakaman atau kremasi jenazah, dan pelaksanaan otopsi perlu diperhatikan dengan baik. Sayangnya, peraturan nasional terkait hal-hal tersebut praktis hampir tidak ada di banyak negara. Yang jelas, permintaan mendiagnosa selama masih hidup atau permintaan keluarganya perlu dipertimbangkan dengan baik sebelum jenazah dimakamkan atau dikremasikan.

Meski demikian, petugas proteksi radiasi juga dapat memberikan pertimbangan jika misalnya beberapa organ tubuh diperlukan untuk pemeriksaan terkait proteksi radiasi. Selain itu, sebagian dari aktivitas sisa mungkin akan muncul pada sisa-sisa kremasi, terutama dalam penyebaran abu jenazah, dan perlu diawasi terutama jika jenazah sebelumnya menjalani terapi dengan radionuklida berumur panjang seperti ^{89}Sr (IAEA, 2009a).

2. Otopsi

Jenazah yang mengandung radioaktif disarankan untuk tidak diotopsi. Namun, jika terpaksa harus diotopsi—misalnya ketika ada dugaan

kematian tidak wajar, beberapa butir penting seperti yang diberikan pada Tabel 5.4 perlu dicermati.

Otopsi juga baru dapat dilakukan jika semua informasi terkait dengan zat radioaktif yang masih ada di tubuh jenazah telah diketahui. Selain itu, otopsi juga harus menunggu hingga petugas proteksi radiasi telah selesai melakukan kajian risiko dan bahaya ke orang dan lingkungan di sekitar dari sumber radioaktif yang masih ada di tubuh jenazah.

Tabel 5.4 Butir-Butir Penting Otopsi pada Jenazah yang Mengandung Radioaktif

-
- Riwayat klinis jenazah
 - Tanda atau label radioaktif pada tubuh jenazah
 - Informasi dan saran spesifik dari petugas terakhir yang menangani jenazah
 - Hasil kajian risiko untuk radioaktivitas yang dikandung dalam tubuh, sampel, organ, dan limbah dengan konsultasi pada ahli proteksi radiasi/fisikawan medik
 - Peraturan nasional, persyaratan pelaporan, batasan, dan kebiasaan
 - Keinginan kerabat sehubungan dengan perlakuan terakhir terhadap jenazah (mis. dimakamkan atau dikremasi)
 - Otopsi sedapat mungkin dihindari; jika terpaksa, lakukan secara terbatas.
 - Pertimbangan dari ahli proteksi radiasi/fisikawan medis mengenai prosedur untuk mengurangi dosis bagi staf kamar mayat dan untuk mengendalikan, menyimpan dan membuang bahan radioaktif
 - Penyimpanan aman dari bahan radioaktif yang diambil dari jenazah
 - Hasil survei kamar mayat untuk mengetahui adanya kontaminasi
 - Hasil identifikasi bahaya terhadap orang lain, pada tubuh, dan pada dokumen yang menyertainya
 - Jenazah diperlakukan sepatutnya secara aman
-

Sumber: IAEA (2009a)

Sebelum otopsi dilakukan, kontaminasi pada barang-barang yang dapat digunakan kembali dan limbah radioaktif padat dan cair harus telah dibersihkan. Plastik dapat digunakan untuk menutupi permukaan yang mungkin terkontaminasi meskipun hal ini mungkin tidak diperlukan karena cukup rendahnya kemungkinan radioaktivitas akan menempel pada permukaan kamar mayat. Kontaminasi juga dapat dicegah dengan melakukan otopsi pada jenazah yang tetap berada di kantong mayat. Selain itu, petugas yang melakukan otopsi sebaiknya

menggunakan pakaian pelindung luar sekali pakai dan bukan pakaian pelindung luar yang dapat digunakan kembali (IAEA, 2009a).

3. Donor Organ

Sebelum wafat, beberapa pasien kadang-kadang meninggalkan wasiat yang minta dilaksanakan oleh ahli warisnya. Salah satu wasiat yang ada adalah keinginannya untuk mendonorkan organnya yang masih sehat kepada orang lain.

Jika pasien wafat ada yang meninggalkan wasiat semacam itu, persiapan khusus harus dilakukan oleh tim medis, terutama menyangkut keselamatan bagi tim tenaga medis yang akan mengambil organ tertentu yang diminta untuk diwariskan. Petugas proteksi radiasi atau fisikawan medis harus mampu memperkirakan jumlah dan dosis radiasi yang mungkin dikandung oleh organ. Namun, yang jelas, kecuali jika terlibat langsung dalam program pengobatan, organ yang didonorkan kecil kemungkinannya mengandung bahan radioaktif yang dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada organ atau memberikan dosis radiasi kepada penerima yang cukup untuk membatalkan donasi (Dauer, 2014).

4. Batas Aktivitas pada Jenazah

Banyak negara saat ini yang telah memberikan batasan tingkat aktivitas yang masih boleh ada pada jenazah sebelum dilakukan otopsi, pembalsaman, pemakaman, atau kremasi. Jika batasan tersebut tidak dilampaui, otopsi, pembalsaman, pemakaman, atau kremasi dapat langsung dilaksanakan tanpa perlu ada upaya tindakan proteksi khusus. Jika batas aktivitas dilampaui, jenazah biasanya tidak dibalsam. Namun, jika pembalsaman diperlukan, konsultasi harus dilakukan dengan seorang petugas proteksi radiasi.

Tabel 5.5 memberikan contoh beberapa batas aktivitas pada jenazah di beberapa negara untuk sejumlah radionuklida tertentu. Seperti terlihat pada Tabel 5.5, terdapat perbedaan batas aktivitas yang cukup besar antarnegara. Untuk memudahkan dan menghindari perselisihan, suatu negara diharapkan dapat menggunakan salah satu

batas aktivitas yang ada secara konsisten. Akan jauh lebih baik lagi jika suatu negara dapat menetapkan sendiri batas aktivitas tersebut sesuai dengan kondisi setempat.

Tabel 5.5 Batas Aktivitas pada Jenazah

Radionuklida	Batas aktivitas (MBq)		
	Otopsi/Pembal-saman	Dimakamkan	Kremasi
³² P (fosfor)	100 (IPEM) 300 (Aus) 400 (S)	2000 (IPEM)	30 (IPEM) 400 (Aus) 400 (S)
⁸⁹ Sr (strontium)	50 (IPEM)	2000 (IPEM)	20 (IPEM)
⁹⁰ Y (itrium)	200 (IPEM) 150 (Aus) koloidal 450 (Aus) tertu-tup 200 (S)	2000 (IPEM)	70 (IPEM) 1000 (Aus) 1200 (S)
¹³¹ I (iodin)		400 (IPEM) 400 (UK)	400 (IPEM) 1000 (Aus) 1200 (S)
¹⁹⁸ Au (emas)	150 (Aus) ko-loidial 450 (Aus) tertu-tup		1000 (Aus)
Semuanya			74 (US)

Keterangan: Aus: Australia; S: Swedia; US: Amerika Serikat; IPEM: The Institute of Physics and Engineering in Medicine

Sumber: IAEA (2009a)

C. Pengelolaan Limbah Radioaktif

Pengelolaan limbah dalam kedokteran nuklir harus mengikuti prinsip umum dan praktik yang baik dalam pengelolaan limbah radioaktif. Limbah yang terbentuk sedapat mungkin diminimalkan dan dipilah, kemasan harus diberi label, dan limbah harus disimpan untuk melu-ruh sesuai dengan waktu paruh fisisnya. Limbah radioaktif biasanya disimpan paling sedikit 10 kali waktu paruh ketika setelah peluruhan hanya tersisa 0,1% dari aktivitas awal (Bly, 2020).

Isu utama limbah radioaktif adalah limbah yang berasal dari urine dan feses. Sebagian besar aktivitas yang diberikan pada awal akan dibuang ke saluran pembuangan. Tabel 5.6 menunjukkan beberapa bagian radionuklida untuk terapi yang biasanya dibuang melalui jalur ini. Setelah pasien keluar dari rumah sakit, tingkat radioaktivitas yang diekskresikan biasanya cukup rendah untuk dibuang melalui toilet di rumahnya tanpa melebihi nilai batas dosis untuk masyarakat (IAEA, 2009a).

Tabel 5.6 Bagian Aktivitas yang Diberikan ke Pasien yang Dilepas ke Saluran Pembuangan

Nuklida dan bentuknya	Penyakit atau kondisi yang diobati	Jumlah aktivitas yang dibuang (%)
¹⁹⁸ Au koloida	Penyakit ganas	0
¹³¹ I	Hipertiroid	54
¹³¹ I	Karsinoma tiroid	84–90
¹³¹ I MIBG*	Feokromositoma	89
³² P fosfat	Polisitemia, dll.	42
⁹⁰ Sr khlorida	Metastasis tulang	92
⁹⁰ Y koloida	Sendi artritik	0
⁹⁰ Y antibodi	Keganasan	12
¹⁶⁹ Er koloida	Sendi artritik	0

Sumber: IAEA (2009a)

ICRP juga menyatakan bahwa urine tidak perlu disimpan untuk kepentingan, misalnya, pengurangan aktivitas melalui peluruhan (ICRP, 2004). Penyimpanan urine pasien setelah menjalani terapi radionuklida manfaatnya sangat sedikit. Pelepasan radionuklida ke sistem pembuangan modern saat ini akan memberikan dosis kepada pekerja perawatan sistem pembuangan dan kepada masyarakat secara umum yang jauh lebih rendah dari nilai batas dosis untuk masyarakat.

D. Keselamatan Pengangkutan Radiofarmaka

Pelaku usaha atau pemegang izin suatu fasilitas kedokteran nuklir, termasuk terapi radionuklida, dapat menjadi penerima sekaligus pengirim barang, dan karenanya mempunyai tanggung jawab atas penerimaan dan pengiriman bahan radioaktif (IAEA, 2018a). Penerimaan bahan radioaktif akan menjadi pekerjaan rutin di semua fasilitas kedokteran nuklir. Pengiriman dapat dilakukan jika fasilitas tersebut memiliki siklotron atau laboratorium yang mengirimkan radiofarmasi ke lokasi lain, atau ketika generator radiasi atau larutan radioaktif perlu dikembalikan ke pemasok atau dibuang ke lokasi lain di luar fasilitas.

Persyaratan terperinci untuk keselamatan pengangkutan bahan radioaktif—meliputi ketentuan umum, batasan aktivitas dan klasifikasi, persyaratan dan pengendalian pengangkutan, persyaratan bahan radioaktif dan pengemasan, prosedur uji, serta persyaratan administratif dan persetujuan—telah diberikan oleh IAEA (2018b). IAEA juga telah memberikan persyaratan untuk kesiapsiagaan dan tanggap darurat jika terjadi kedaruratan nuklir atau radiologis, yang juga berlaku untuk keadaan darurat yang terjadi di fasilitas kedokteran nuklir atau khususnya fasilitas terapi radionuklida (IAEA, 2015). Pelaku usaha atau pemegang izin fasilitas kedokteran nuklir, petugas proteksi radiasi, dan semua pihak yang terlibat dalam pengangkutan bahan radioaktif untuk kedokteran nuklir perlu memahami persyaratan standar yang diberikan IAEA ini untuk memastikan bahwa pengangkutan bahan radioaktif berjalan dengan aman dan selamat.

E. Perkembangan Pascapandemi COVID-19

Situasi pandemi di dunia selama tahun 2020–2022 yang melanda seluruh dunia akibat virus SARS-CoV-2, atau yang lebih dikenal dengan Covid-19, telah mengubah banyak aspek kehidupan dan pekerjaan manusia. Krisis kesehatan ini juga memengaruhi pekerjaan sehari-hari para praktisi proteksi radiasi, tidak terkecuali mereka yang bekerja di instalasi terapi radionuklida pada fasilitas kedokteran nuklir.

Pada bulan Juli 2020, yang relatif masih pada tahap awal wabah Covid-19 ini muncul, IAEA bergerak cepat dengan menerbitkan buku panduan teknis bagi departemen atau bagian kedokteran nuklir dalam menjalankan kegiatannya dengan aman (IAEA, 2020). Dalam buku panduan yang lebih mirip sebagai buklet ini, IAEA menguraikan langkah-langkah yang perlu dilakukan oleh manajemen terkait kegiatan prioritas dalam melakukan layanan, dan upaya-upaya penting dalam melindungi pekerja radiasi, termasuk penggunaan alat pelindung diri, pembagian daerah kerja dan prosedur terkait, serta pembatasan bagi para pekerja wanita hamil.

Saran praktis dalam penggunaan alat pelindung diri bagi pekerja kedokteran nuklir selama terjadi pandemi Covid-19 diberikan oleh Assadi et al. (2020). Alat pelindung diri yang digunakan berturut-turut adalah baju pelindung (*gown*), masker atau respirator, pelindung mata (*goggle*), dan terakhir sarung tangan pelindung. Ketika dilepas, urutannya adalah kebalikannya. Urutan ini sangat penting karena tangan merupakan organ yang paling sering dan paling mudah terkena kontaminasi oleh virus. Berdasarkan kemampuan dan tingkat proteksi yang diberikan, jenis bahan sarung tangan yang paling dianjurkan oleh lateks, disusul dengan nitril, vinil, dan nilon.

Keunggulan lateks dibandingkan nitril agak dipertanyakan menyusul hasil riset yang dilakukan oleh Ohnuki et al. (2021). Menggunakan larutan radionuklida ^{211}At sebagai bahan kontaminan, diperoleh bahwa larutan [^{211}At]NaAt dapat lebih mudah menembus sarung tangan yang terbuat dari lateks dibanding dengan yang terbuat dari nitril. Temuan ini menunjukkan bahwa sarung tangan nitril lebih baik dibandingkan sarung tangan lateks, paling tidak untuk kontaminasi yang berasal dari senyawa ^{211}At .

Di Indonesia, beberapa publikasi terkait dengan penanganan Covid-19 pada kegiatan medis juga telah diterbitkan. Uraian terperinci tentang cara penggunaan alat pelindung diri untuk mencegah penyakit infeksius pada tenaga medis dalam menghadapi pandemi Covid-19 diberikan oleh Evani (t.t.). Sementara itu, Aliansi Fisikawan Medik Indonesia juga mengeluarkan publikasi terkait

penanganan Covid-19 dalam kegiatan diagnosis radiasi, yang berisi terutama rekomendasi bagi para fisikawan medik untuk memastikan keamanan dan keselamatan para pasien dan tenaga kesehatan lainnya dalam menghadapi situasi pandemi Covid-19 (Lubis et al., 2020).

Di Spanyol, suatu survei dilakukan untuk mengevaluasi dampak pandemi Covid-19 pada performa kerja praktisi proteksi radiasi (Garcia-Baonza et al., 2022). Berdasarkan hasil survei, kemunculan Covid-19 mengubah kondisi kerja dan modalitas banyak praktisi proteksi radiasi, terutama pada awal pandemi. Selain itu, beban kerja meningkat untuk setengah dari peserta yang disurvei. Banyak kegiatan operasional mengalami penundaan karena pandemi, sedangkan periode pemakaian dosimeter perorangan pasif selama satu bulan banyak diperpanjang selama status waspada pertama yang diberlakukan pada 15 Maret 2020 hingga 21 Juni 2020.

Penggunaan sinar-X *mobile* di seluruh dunia diketahui meningkat selama pandemi Covid-19 berlangsung. Di Australia, peningkatan tersebut mencapai 1,7 kali, sementara laju pengambilan citra dari bagian tubuh yang tidak rutin secara *mobile* meningkat sekitar 6 hingga 7,8% (Yeung et al., 2022). Meski demikian, dosis radiasi yang diterima radiografer ternyata tetap jauh di bawah 20 mSv/tahun sebagai nilai batas dosis yang ditetapkan untuk pekerja radiasi.

BAB 6

PERSYARATAN DAN PANDUAN

Seperti aplikasi radiasi di berbagai bidang lainnya, pemanfaatan terapi radionuklida juga harus diawasi dengan ketat. Hal ini berkenaan dengan sifat radiasi yang tidak hanya berguna, tetapi juga memiliki potensi yang sangat berbahaya bagi tubuh manusia. Berbagai standar, pedoman dan peraturan yang terkait dengan proteksi dan keselamatan radiasi harus disiapkan terlebih dahulu sebelum izin pemanfaatan dapat diberikan.

Standar keselamatan umumnya bersifat internasional dan harus dipatuhi oleh semua negara di dunia yang memanfaatkan atau menggunakan sumber radiasi untuk keperluan apa pun. Institusi yang menyusun standar keselamatan internasional di bidang pemanfaatan nuklir dan radiasi, termasuk untuk terapi radionuklida, adalah Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA). Di tingkat negara, standar yang ada selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk menyusun peraturan nasional yang wajib dipatuhi oleh semua pelaku usaha atau pelaksanaan kegiatan terkait. Dengan sistem secara ini, berbagai kegiatan yang melibatkan bahan nuklir dan sumber radiasi di dunia dapat diawasi dengan prinsip dan metode yang sama antara satu negara dan negara yang lain.

A. Standar

Standar internasional untuk proteksi radiasi pada terapi radionuklida secara umum diberikan oleh Standar Keselamatan Dasar IAEA yang berlaku saat ini (IAEA, 2014a). Persyaratan 40 dari Standar Keselamatan Dasar IAEA menyatakan bahwa pendaftar² dan pemegang izin harus memastikan adanya pengaturan untuk menjamin proteksi radiasi yang tepat bagi anggota masyarakat dan untuk anggota keluarga sebelum seorang pasien dipulangkan ke rumah tempat tinggalnya setelah menjalani terapi radionuklida.

Untuk itu, praktisi medis radiologis harus memastikan bahwa tidak ada pasien yang telah menjalani prosedur terapi radionuklida yang diperbolehkan meninggalkan fasilitas radiasi medis sebelum dilakukan pengecekan terhadap aktivitas radionuklida yang masih dikandungnya. Pengecekan dilakukan untuk memastikan bahwa aktivitas radionuklida pada pasien sedemikian rupa sehingga dosis yang dapat diterima oleh masyarakat dan anggota keluarga memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh otoritas yang berwenang.

1. Instruksi setelah Pasien Diizinkan Pulang

Saat meninggalkan fasilitas radiasi medis, pasien atau wali pasien perlu diberikan instruksi tertulis untuk menjaga agar dosis radiasi pada orang yang melakukan kontak dengan atau di sekitar pasien serendah mungkin dan untuk menghindari tersebarnya kontaminasi. Instruksi juga harus memberikan informasi tentang risiko radiasi dari tindakan terapi radionuklida yang dijalannya (IAEA, 2009).

2. Keselamatan Terapi Radionuklida

Secara komprehensif, IAEA menggabungkan semua persyaratan atau standar keselamatan dalam aplikasi radiasi di bidang medis dalam satu

² Pendaftar adalah pemohon yang pendaftarannya untuk pemanfaatan atau sumber telah diterima dan telah memahami kewajiban serta tugasnya untuk pemanfaatan atau sumber tersebut. Dalam sistem IAEA, pendaftaran (*registration*) merupakan salah satu bentuk otorisasi pemanfaatan sumber radiasi selain izin dan notifikasi. Di Indonesia, semua otorisasi diberikan hanya dalam bentuk izin.

publikasi SSG-46 (IAEA, 2018a). Sebelumnya, standar keselamatan untuk ketiga aplikasi di sektor radiologi diagnostik, radioterapi, dan kedokteran nuklir diberikan dalam tiga publikasi yang terpisah.

Standar keselamatan terapi radionuklida merupakan bagian dari standar keselamatan kedokteran nuklir. Persyaratan yang diberikan dalam publikasi IAEA tersebut meliputi keselamatan fasilitas dan peralatan, proteksi radiasi di daerah kerja, proteksi radiasi pasien yang menerima pajanan medis, proteksi radiasi anggota masyarakat, pencegahan dan mitigasi kecelakaan, dan keselamatan dalam pengangkutan bahan radioaktif. Beberapa hal pokok dari persyaratan ini telah diuraikan pada beberapa bagian yang relevan dalam buku ini.

3. Pengelolaan Limbah Radioaktif

Limbah radioaktif merupakan subjek yang cukup penting dalam isu keselamatan pada pemanfaatan ketenaganukliran di berbagai bidang. Limbah radioaktif juga sangat bervariasi, dan terdiri atas limbah dikecualikan, limbah berumur sangat pendek, limbah tingkat sangat rendah, limbah tingkat rendah, limbah tingkat menengah, dan limbah tingkat tinggi (IAEA, 2009b). Mengingat aktivitas dan waktu paruh radionuklida yang digunakan pada terapi radionuklida umumnya rendah, limbah dari kegiatan terapi ini dapat digolongkan sebagai limbah berumur sangat pendek.

Persyaratan standar keselamatan terkait limbah radioaktif yang diberikan IAEA terdiri atas persyaratan pra-pembuangan pada publikasi GSR Part 5 (IAEA, 2009c) dan persyaratan pembuangan pada publikasi SSR-5 (IAEA, 2011). Untuk sektor medis, termasuk kedokteran nuklir dan terapi radionuklida, rekomendasi untuk memenuhi persyaratan pra-pembuangan diberikan dalam panduan yang sama untuk industri, pertanian, riset dan pendidikan pada publikasi SSG-45 (IAEA, 2019).

Panduan untuk penyimpanan limbah radioaktif diberikan IAEA pada publikasi WS-G-6.1 (IAEA, 2016). Pada publikasi ini diuraikan, antara lain desain dan operasi fasilitas penyimpanan untuk limbah radioaktif yang berumur pendek dan biasanya ditangani pada fasilitas

penyimpanan limbah kecil. IAEA juga memberikan panduan dalam merancang fasilitas pengolahan dan penyimpanan untuk volume yang kecil dari limbah radioaktif tingkat rendah dan menengah, termasuk sumber tertutup yang tidak digunakan lagi pada publikasi NW-T-1.4 (IAEA, 2014b).

4. Kesiapsiagaan dan Tanggap Darurat

Keadaan darurat adalah situasi yang menimbulkan risiko langsung terhadap kesehatan, kehidupan, harta benda, atau lingkungan. Sebagian besar keadaan darurat memerlukan intervensi segera untuk mencegah memburuknya situasi.

Keadaan darurat merupakan akibat langsung dari suatu kecelakaan yang terjadi. Dalam hal ini, kecelakaan adalah peristiwa yang tidak disengaja, biasanya tidak diinginkan dan tidak disebabkan secara langsung, tetapi bisa saja tanpa disengaja dilakukan oleh manusia. Istilah kecelakaan menyiratkan bahwa peristiwa tersebut mungkin disebabkan oleh risiko yang tidak diketahui atau tidak ditangani dengan baik.

Seperti telah disinggung pada Bab III, pada tindakan terapi radionuklida potensi kecelakaan radiasi yang mungkin terjadi sangat kecil sehingga istilah yang digunakan adalah insiden radiasi. Namun, mengingat peluang terjadinya keadaan darurat selalu ada, sekecil apa pun, kesiapsiagaan dan tanggap darurat harus selalu disiapkan.

Persyaratan standar untuk kesiapsiagaan dan tanggap darurat nuklir telah diberikan IAEA pada publikasi GSR Part 7 sebagai bagian dari persyaratan keselamatan umum (IAEA, 2015). Publikasi ini merupakan pengganti dari publikasi dengan judul yang sama yang terbit tahun 2002. Publikasi GS-G-2.1 untuk mendukung persyaratan standar yang terbit tahun 2002, yang terkait dengan persiapan yang perlu dilakukan untuk melaksanakan kesiapsiagaan dan tanggap darurat (IAEA, 2007), dan yang terkait dengan kriteria yang digunakan pada publikasi GSG-2 (IAEA, 2011) masih cukup relevan dan masih berlaku sebagai pendukung standar yang terbit tahun 2015.

Publikasi terkait persiapan menguraikan tentang cara memberikan respons yang tepat terhadap berbagai keadaan darurat dan informasi latar belakang tentang pengalaman masa lalu sehingga dapat membantu dalam menerapkan pengaturan terbaik dalam mengatasi permasalahan yang mendasar. Sementara itu, publikasi terkait kriteria memberikan kriteria generik (diberikan dalam bentuk dosis radiasi) yang menjadi dasar dalam mengembangkan tingkat operasional yang dibutuhkan untuk pengambilan keputusan terkait tindakan protektif dan respons yang perlu diambil. Kesiapsiagaan dan tanggung darurat dalam terapi radionuklida sudah implisit dengan uraian yang diberikan pada bagian III.D, “Insiden Radiasi”.

5. Keselamatan Pengangkutan Zat Radioaktif

Persyaratan standar untuk keselamatan pengangkutan zat radioaktif telah diberikan IAEA pada publikasi SSR-6 Rev.1 sebagai bagian dari persyaratan keselamatan spesifik (IAEA, 2018b). Publikasi ini menetapkan persyaratan yang harus dipenuhi untuk memastikan keselamatan dan melindungi manusia, harta benda, dan lingkungan dari efek radiasi pengion yang berbahaya selama berlangsungnya pengangkutan zat radioaktif.

Berbagai publikasi telah diterbitkan IAEA untuk mendukung persyaratan standar keselamatan pengangkutan zat radioaktif pada publikasi SSR-6 Rev.1 tersebut. Publikasi-publikasi itu, antara lain terkait dengan kesiapsiagaan dan tanggap darurat dalam pengangkutan, format dan isi rancangan bungkusan pengangkutan, program proteksi radiasi untuk pengangkutan, dan sistem manajemen untuk pengangkutan. Keselamatan pengangkutan untuk radionuklida yang digunakan untuk terapi sudah implisit tercantum pada uraian di bagian V.D, “Keselamatan Pengangkutan Radiofarmaka”.

B. Peraturan

Peraturan tertinggi di bidang ketenaganukliran di Indonesia saat ini adalah Undang-Undang (UU) Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. Pasal 16 UU No. 10 Tahun 1997 menyatakan,

“Setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketentraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup” (UU No. 10, 1997).

Ketentuan dalam Pasal 16 UU No. 10 Tahun 1997 ini menjadi dasar hukum dalam penyusunan peraturan pelaksanaan di bawahnya yang berkaitan dengan proteksi dan keselamatan radiasi.

1. Keselamatan Radiasi dalam Kedokteran Nuklir

Peraturan Pemerintah (PP) yang menjadi peraturan pelaksanaan Pasal 16 UU No. 10 Tahun 1997 tersebut adalah PP Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat radioaktif. Beberapa ketentuan yang terkait dengan proteksi radiasi pada paparan medik, termasuk paparan pada terapi radionuklida, diberikan pada paragraf 3 Pasal 34 hingga Pasal 49.

Peraturan pelaksanaan lebih lanjut yang khusus untuk proteksi dan keselamatan radiasi pada kedokteran nuklir, termasuk terapi radionuklida, adalah Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Perka BAPETEN) Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir. Meskipun masih didasarkan, antara lain pada PP Nomor 33 Tahun 2007 yang telah dinyatakan dicabut dan diganti dengan PP Nomor 45 Tahun 2023, karena belum ada penggantinya, Perka BAPETEN No. 17 Tahun 2012 ini masih tetap berlaku.

Pasal 19 Perka BAPETEN No. 17 Tahun 2012 menyatakan bahwa personel yang terlibat dalam kedokteran nuklir terapi meliputi dokter spesialis kedokteran nuklir, tenaga ahli dan/atau fisikawan medis, petugas proteksi radiasi, radiofarmasis, radiografer, dan perawat. Sesuai Pasal 53, para personel ini harus mengupayakan agar pasien menerima paparan atau dosis serendah mungkin dengan memperhatikan

- 1) informasi terkait dari pemeriksaan sebelumnya,
- 2) nilai tingkat panduan aktivitas radionuklida,

- 3) penyiapan radionuklida dan/atau radiofarmaka yang tepat sesuai dengan jenis pemeriksaan,
- 4) metode yang tepat untuk mencegah masuknya radionuklida dan/atau radiofarmaka ke organ yang tidak menjadi sasaran pemeriksaan,
- 5) metode untuk mempercepat ekskresi, dan
- 6) akuisisi dan pengolahan citra yang baik.

Berdasarkan Pasal 55, untuk optimisasi dalam penggunaan kedokteran nuklir terapi, termasuk terapi radionuklida, pelaku usaha atau pemegang izin pemanfaatan ketenaganukliran harus menyediakan

- 1) sistem identifikasi pasien yang benar dan efektif,
- 2) prosedur untuk mengetahui apakah pasien wanita sedang hamil atau menyusui, sebelum pemberian radionuklida dan/atau radiofarmaka,
- 3) sistem perekaman pasien,
- 4) sistem penyampaian instruksi lisan dan tulisan tentang keselamatan radiasi kepada pasien,
- 5) sistem pencegahan penyebaran kontaminasi akibat muntah dan ekskreta pasien, dan
- 6) prosedur pengeluaran pasien dari rumah sakit setelah pemberian radionuklida dan/atau radiofarmaka.

Pasal 57 menetapkan bahwa pasien wanita yang menjalani terapi harus menunda kehamilan sampai jangka waktu tertentu, sedangkan Pasal 58 mengatur bahwa yang sedang menyusui harus menghentikan pemberian air susu ibu dan perawatan pada bayi. Tabel 6.1 dan Tabel 6.2 masing-masing memberikan jangka waktu penundaan kehamilan dan penghentian pemberian air susu ibu dan perawatan pada bayi. Pada Tabel 6.2, radiofarmaka dibedakan atas Kelas A, Kelas B, dan Kelas C, tetapi tidak ada penjelasan atau definisi dari pembagian kelas tersebut.

Tabel 6.1 Rekomendasi Jangka Waktu Penundaan Kehamilan setelah Terapi

Jenis dan bentuk radio-nuklida	Penyakit	Aktivitas maksimum (MBq)	Jangka waktu menghindari kehamilan (bulan)
¹⁹⁸ Au-koloid	Kanker	10.000	2
¹³¹ I-iodium	Tirotoksikosis	800	4
¹³¹ I-iodium	Kanker tiroid	5.000	4
¹³¹ I-MIBG	<i>Phaeochromocytoma</i>	5.000	4
³² P-fosfat	<i>Ploicythemia</i>	200	3
⁸⁹ Sr-klorida	Metastasis tulang	150	24
⁹⁰ Y-koloid	Peradangan sendi	400	0
⁹⁰ Y-koloid	Kanker	4.000	1
¹⁶⁹ Er-koloid	Peradangan sendi	400	0
¹⁵³ Sm-EDTMP	Metastasis tulang	5.550	24

Sumber: Perka BAPETEN 17 (2012)

Tabel 6.2 Rekomendasi Penghentian Pemberian Air Susu Ibu setelah Pemberian Radiofarmaka

Radiofarmaka	Aktivitas yang diberikan dalam MBq (mCi)	Perlu saran dokter	Jangka waktu
Radiofarmaka Kelas A:			
⁶⁷ Ga-sitrat	185 (5.0)	Ya	Berhenti
^{99m} Tc-DTPA	740 (20)	Tidak	-
^{99m} Tc-MAA	148 (4)	Ya	12 jam
^{99m} Tc-pertenitat	185 (5)	Ya	4 jam
¹³¹ I-NaI	5.550 (150)	Ya	Berhenti
Radiofarmaka Kelas B			
⁵¹ Cr-EDTA	1,85 (0,05)	Tidak	
^{99m} Tc-DISIDA	300 (8)	Tidak	
^{99m} Tc-glukohep-tonat	740 (20)	Tidak	

Radiofarmaka	Aktivitas yang diberikan dalam MBq (mCi)	Perlu saran dokter	Jangka waktu
^{99m} Tc-HAM	300 (8)	Tidak	
^{99m} Tc-MIBI	1.110 (30)	Tidak	
^{99m} Tc-MDP	740 (20)	Tidak	
^{99m} Tc-PYP	740 (20)	Tidak	
^{99m} Tc-RBC in vivo radiolabelling	740 (20)	Ya	
^{99m} Tc-RBC in vitro labelling	740 (20)	Tidak	12 jam
^{99m} Tc-koloid sulfur	444 (20)	Tidak	
¹¹¹ In-WBC	0,5 (18,5)	Tidak	
¹²³ I-NaI	14,8 (0,4)	Ya	Berhenti
¹²³ I-OIH	74 (2)	Tidak	
¹²³ I-MIBG	370 (10)	Ya	48 jam
¹²⁵ I-OIH	0,37 (0,01)	Tidak	
¹³¹ I-OIH	11,1 (0,3)	Tidak	
²⁰¹ Tl	111 (3)	Ya	96 jam
^{99m} Tc-DTPA aerosol	37 (1)	Tidak	
Radiofarmaka Kelas C:			
^{99m} Tc-WBC	185 (5)	Ya	48 jam
^{99m} Tc-MAG3	370 (10)	Tidak	
¹³³ Xe-gas		Tidak	

Sumber: Perka BAPETEN 17 (2012)

2. Pengelolaan Limbah Kedokteran Nuklir

Pasal 22 UU Nomor 10 Tahun 1997 mengamanatkan bahwa pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan untuk mencegah timbulnya bahaya radiasi terhadap pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup. Sementara itu, Pasal 24 menetapkan bahwa penghasil limbah radioaktif tingkat rendah dan tingkat sedang wajib mengumpulkan, mengelompokkan, atau mengolah dan menyimpan sementara limbah

tersebut sebelum diserahkan kepada BATAN³ sebagai badan pelaksana.

Ketentuan ini kemudian diatur lebih lanjut dengan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. Pasal 2 dari PP ini menyatakan bahwa limbah radioaktif diklasifikasikan atas limbah radioaktif tingkat rendah, tingkat sedang, dan tingkat tinggi. Limbah radioaktif tingkat rendah dan tingkat sedang adalah zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan, zat radioaktif terbuka yang tidak digunakan, atau bahan dan peralatan terkontaminasi dan/atau teraktivasi yang tidak digunakan.

Zat radioaktif yang digunakan pada terapi radionuklida merupakan zat radioaktif terbuka. Dengan demikian, limbah radioaktif yang berasal dari terapi radionuklida dapat digolongkan sebagai limbah radioaktif tingkat sedang dan tingkat rendah.

Pengaturan lebih lanjut mengenai pengelolaan limbah radioaktif tingkat rendah dan tingkat sedang diberikan oleh Peraturan Kepala (Perka) BAPETEN Nomor 8 Tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan Tingkat Sedang. Perka BAPETEN Nomor 8 Tahun 2016 ini mengatur kegiatan prapengolahan, pengolahan, pascapengolahan, perekaman, dan pelaporan limbah radioaktif tingkat rendah dan tingkat sedang yang dilakukan oleh penghasil limbah radioaktif dan BATAN.

3. Pengangkutan Sumber Radioaktif

Pasal 16 UU Nomor 10 Tahun 1997 juga digunakan sebagai dasar untuk menetapkan Peraturan Pemerintah Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan Dalam Pengangkutan Zat Radioaktif. PP No. 58 Tahun 2015 ini mengatur tentang teknis keselamatan radiasi dalam pengangkutan zat radioaktif, teknis keamanan dalam pengangkutan zat radioaktif, manajemen keselamatan radiasi dan keamanan dalam pengangkutan zat radioaktif, sistem

³ Seperti telah dijelaskan pada catatan kaki nomor 1, sejak tahun 2021 BATAN telah dilebur ke dalam BRIN sehingga semua kata BATAN pada Perka BAPETEN Nomor 8 Tahun 2016 ini dapat dibaca sebagai BRIN.

kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan dalam pengangkutan zat radioaktif, dan penatalaksanaan pengangkutan zat radioaktif.

Peraturan pelaksanaan dari PP No. 58 Tahun 2015 diberikan oleh Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (PerBAPETEN) Nomor 7 Tahun 2020 tentang Ketentuan Keselamatan dan Tata Laksana Pengangkutan Zat Radioaktif. PerBAPETEN No. 7 Tahun 2020 ini mengatur tentang identifikasi jenis zat radioaktif dan penentuan penggunaan bungkusan dalam pengangkutan, teknis keselamatan sebelum dan selama pelaksanaan pengangkutan, program proteksi dan keselamatan radiasi dalam pengangkutan zat radioaktif, dan penatalaksanaan pengangkutan zat radioaktif.

Untuk mengurangi potensi dan risiko bahaya radiasi dalam pengangkutannya, semua zat radioaktif dikirim dalam suatu pembungkus. Kesatuan antara zat radioaktif sebagai isi dengan pembungkusnya sebagai wadah dan penahan disebut sebagai bungkusan. Secara utuh, bungkusan zat radioaktif memiliki beberapa fungsi, antara lain, sebagai bahan penerap, struktur penguat, peredam guncangan, dan pengisolasi panas.

Secara keseluruhan, bungkusan zat radioaktif dibedakan atas bungkusan industri, bungkusan tipe A, bungkusan tipe B(U), bungkusan tipe B(M), bungkusan tipe C, dan bungkusan lain. Zat radioaktif yang digunakan pada kedokteran nuklir, termasuk untuk terapi radionuklida, umumnya dikirim sebagai bungkusan tipe A. Pembungkus dari bungkusan tipe A ini biasanya terbuat dari baja, kayu, atau papan serat, dan memiliki wadah penahan bagian dalam yang terbuat dari kaca, plastik, atau logam yang dikelilingi bahan pengemas yang terbuat dari polietilen, karet, atau vermikulit.

C. Pedoman

Selain mengikuti standar yang ditetapkan secara internasional, beberapa negara juga menyusun pedoman terkait proteksi radiasi pada terapi radionuklida yang disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing negara. Pada subbab ini akan diuraikan tiga pedoman yang dikeluarkan oleh tiga negara, yaitu AS, Inggris, dan Indonesia.

1. Pedoman NRC, Amerika Serikat

Peraturan NRC menyatakan bahwa pasien ^{131}I boleh dipulangkan setelah dosis radiasi ke orang di sekitarnya tidak melebihi 5 mSv. Dalam praktiknya, banyak pasien yang tidak langsung pulang ke rumah, tetapi menginap terlebih dahulu di hotel. Menyikapi hal ini, NRC mengeluarkan pedoman bahwa praktik semacam itu sangat tidak dianjurkan (NRC, 2011). Menginap di hotel dinyatakan sebagai meningkatkan potensi orang lain, terutama pekerja hotel dan tamu hotel lainnya, tanpa disadari akan terpajan radiasi dari si pasien.

2. Pedoman ARSAC-HAS, Inggris

Pedoman yang disusun Administration of Radioactive Substances Advisory Committee-Health Security Agency (ARSAC-HAS) cukup komprehensif, tidak hanya mengenai prosedur pemberian radionuklida dan penanganan pasien hamil serta menyusui, tetapi juga mengenai tata cara permohonan izin fasilitas, izin kerja para praktisi, otorisasi riset, dan juga kurikulum bagi pelatihan terkait proteksi radiasi dalam terapi radionuklida (ARSAC-HAS, 2024).

Dalam hal pasien hamil, kondisi klinis yang dapat memengaruhi siklus menstruasi harus diperhitungkan. Untuk prosedur diagnostik, pendekatan bertahap berikut perlu dimasukkan ke dalam prosedur pemberian radiofarmaka.

- 1) Untuk pemberian radiofarmaka yang menghasilkan dosis janin kurang dari 0,1 mGy, prosedur dapat menetapkan bahwa operator harus menanyakan kepada pasien apakah sedang hamil atau mungkin hamil.
- 2) Untuk pemberian radiofarmaka yang melibatkan dosis janin antara 0,1 mGy dan 10 mGy, perlu ada jaminan tambahan; misalnya, pasien dapat ditanyai apakah periode menstruasinya sudah lewat. Paparan yang menghasilkan dosis janin di bawah 10 mGy dapat terus dilakukan asalkan jangka waktu menstruasinya tidak melewati waktu.

- 3) Untuk pemberian radiofarmaka yang mengakibatkan dosis janin lebih tinggi, yaitu melebihi 10 mGy, pajanan sebaiknya hanya dilakukan pada 10 hari pertama siklus menstruasi. Dalam hal ini, prosedur harus menguraikan situasi di mana tes kehamilan diperlukan jika riwayat menstruasi tidak dapat dipastikan, atau mengecualikan kehamilan dari riwayat pasien (misalnya, histerektomi sebelumnya).

Hal lain yang menarik dari pedoman ARSAC-HAS ini adalah adanya informasi mengenai besar aktivitas radionuklida yang dapat diberikan pada anak berdasarkan berat tubuh dibanding dengan yang diberikan pada orang dewasa. Tabel 6.3 memberikan fraksi aktivitas yang dapat diberikan kepada anak dibandingkan orang dewasa.

Tabel 6.3 Fraksi Pemberian Aktivitas kepada Anak Dibandingkan Orang Dewasa

Berat (kg)	Fraksi aktivitas	Berat (kg)	Fraksi aktivitas	Berat (kg)	Fraksi aktivitas
3	0,10	22	0,50	42	0,78
4	0,14	24	0,53	44	0,80
6	0,19	26	0,56	46	0,82
8	0,23	28	0,58	48	0,85
10	0,27	30	0,62	50	0,88
12	0,32	32	0,65	52–54	0,90
14	0,36	34	0,68	56–58	0,92
16	0,40	36	0,71	60–62	0,96
18	0,44	38	0,73	64–66	0,98
20	0,46	40	0,76	68	0,99

Sumber: ARSAC-HAS (2024)

Selain itu, secara umum aktivitas yang kurang dari 10% dari nilai aktivitas orang dewasa tidak boleh diberikan kepada anak-anak. Untuk sebagian besar tujuan pemberian radionuklida, pendekatan sederhana ini sudah cukup. Namun, untuk sejumlah prosedur, jika ingin memperoleh kualitas citra yang memadai, aktivitas radionuklida yang diberikan harus tidak kurang dari yang ditetapkan pada Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Rekomendasi Aktivitas Minimum yang Diberikan pada Anak

Radiofarmaka	Tujuan	Aktivitas minimum (MBq)
^{99m} Tc-DTPA	Pencitraan ginjal/renografi	20
^{99m} Tc-DMSA(III)	Pencitraan ginjal	15
^{99m} Tc-MAG3	Pencitraan ginjal/renografi	15
^{99m} Tc-fosfonat dan fosfat	Pencitraan tulang	40
^{99m} Tc-koloid	Pencitraan hati dan limpa	15
^{99m} Tc-koloid	Pencitraan sumsum tulang	20
^{99m} Tc-koloid	Studi motilitas esofagus/lambung/usus	10
^{99m} Tc-eritrosit denaturasi	Pencitraan limpa	20
^{99m} Tc-eritrosit normal	Studi pencitraan/probe kumpulan darah	80
^{99m} Tc-perteknetat	Pencitraan aliran pertama darah	80
^{99m} Tc-perteknetat	Pencitraan mukosa lambung ektopik (Meckel's)	20
^{99m} Tc-perteknetat	Pencitraan/serapan tiroid	10
^{99m} Tc makroagregat atau mikrosfer albumin	Pencitraan perfusi paru	10
^{99m} Tc eksametazim	Pencitraan otak	100
^{99m} Tc leukosit bertanda eksametazim	Pencitraan infeksi/peradangan	40

Radiofarmaka	Tujuan	Aktivitas minimum (MBq)
^{99m} Tc-iminodiasetat	Pencitraan sistem empedu fungsional	20
^{99m} Tc-tetrofosmin	Pencitraan miokardial	50
^{99m} Tc-sestamibi	Pencitraan miokardial	50
¹²³ I-iodida	Pencitraan/ambilan tiroid	3
¹²³ I-MIBG	Pencitraan tumor	70

Sumber: ARSAC-HAS (2024)

3. Pedoman BAPETEN, Indonesia

BAPETEN menyusun pedoman teknis rilis pasien [pasien yang boleh pulang, pen⁴ untuk memandu pemegang izin dalam menerapkan *good practice* untuk rilis pasien kedokteran nuklir di rumah sakit untuk menjamin proteksi dan keselamatan bagi masyarakat dan lingkungan (BAPETEN, 2020)]. Dalam pedoman teknis ini diuraikan tentang penentuan kriteria rilis pasien, pengukuran pasien, dan panduan untuk pasien pascarilis.

Dalam pedoman teknisnya, BAPETEN memberikan nilai aktivitas dan laju dosis untuk rilis pasien seperti yang terlihat pada Tabel 6.5. Pasien dapat dirilis apabila jumlah aktivitas radiofarmaka yang diberikan kepada pasien kurang dari aktivitas pada kolom 1; apabila jumlah aktivitas radiofarmaka yang diberikan kepada pasien melebihi aktivitas pada kolom 1, tetapi setelah waktu tertentu meluruh sampai pada aktivitas yang tercantum pada kolom 1; atau laju dosis yang diukur pada jarak 1 m (dari permukaan pasien) tidak lebih besar dari nilai pada kolom 2.

⁴ Singkatan pen. disini adalah penulis. Hal ini hanya untuk menyatakan bahwa kalimat sebelumnya merupakan penjelasan tambahan dari penulis.

Tabel 6.5 Aktivitas dan Laju Dosis untuk Rilis Pasien

Radionuklida	Kolom 1 Pasien dapat dipulangkan apabila aktivitas telah mencapai atau di bawah nilai berikut:		Kolom 2 Pasien dapat dipulangkan apabila laju dosis pada jarak 1 m telah mencapai atau di bawah nilai berikut:	
	GBq	mCi	$\mu\text{Sv/jam}$	mrem/jam
^{111}Ag	19	520	80	8
^{198}Au	3,5	93	210	21
^{51}Cr	4,8	130	20	2
^{64}Cu	8,4	230	270	27
^{67}Cu	14	390	220	22
^{67}Ga	8,7	240	180	18
^{123}I	6,0	160	260	26
^{125}I	0,25	7	10	1
^{131}I	1,2	33	70	7
^{111}In	2,4	64	200	20
^{186}Re	28	770	150	15
^{188}Re	29	790	200	20
^{47}Sc	11	310	170	17
^{75}Se	0,089	2	5	0,5
^{153}Sm	26	700	300	30
$^{117\text{m}}\text{Sn}$	1,1	29	40	4
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	28	760	580	58
^{201}Tl	16	430	190	19
^{169}Yb	0,37	10	20	2

Sumber: BAPETEN (2020)

Secara umum IAEA menyatakan bahwa pasien yang diperbolehkan pulang harus dibekali dengan instruksi tertulis yang berisi pedoman tentang hal-hal yang perlu dilakukan setelah kembali ke rumah. Pada pedoman teknisnya, BAPETEN menyampaikan tidak semua pasien perlu dibekali dengan instruksi pascarilis tersebut.

Instruksi hanya perlu diberikan jika aktivitas dan laju dosis untuk beberapa radionuklida yang digunakan memenuhi nilai seperti yang diberikan pada Tabel 6.6.

Tabel 6.6 Kriteria Aktivitas dan Laju Dosis yang Menyebabkan Instruksi untuk Pasien

Radionuklida	Kolom 1 Instruksi diperlukan apabila aktivitas melebihi nilai berikut:		Kolom 2 Instruksi diperlukan apabila laju dosis pada jarak 1 m melebihi nilai berikut:	
	GBq	mCi	µSv/jam	mrem/jam
¹¹¹ Ag	3,8	100	20	2
¹⁹⁸ Au	0,69	19	40	4
⁵¹ Cr	0,96	26	4	0,4
⁶⁴ Cu	1,7	45	50	5
⁶⁷ Cu	2,9	77	40	4
⁶⁷ Ga	1,7	47	40	4
¹²³ I	1,2	33	50	5
¹²⁵ I	0,05	1	2	0,2
¹³¹ I	0,24	7	20	2
¹¹¹ In	0,47	13	40	4
¹⁸⁶ Re	5,7	150	30	3
¹⁸⁸ Re	5,8	160	40	
⁴⁷ Sc	2,3	62	630	3
⁷⁵ Se	0,018	0,5	1	0,1
¹⁵³ Sm	5,2	140	60	6
^{117m} Sn	0,21	6	9	0,9
^{99m} Tc	5,6	150	120	12
²⁰¹ Tl	3,1	85	40	4
¹⁶⁹ Yb	0,073	2	4	0,4

Sumber: BAPETEN (2020)

BAB 7

TANTANGAN AKTUAL

Terapi radionuklida merupakan salah satu pemanfaatan tenaga nuklir dan radiasi di sektor kedokteran nuklir. Radiofarmaka yang digunakan dalam terapi ini masih terus dikembangkan sehingga setiap saat akan muncul teknik terapi baru dengan jenis radiofarmaka yang baru pula.

Penerapan terapi radionuklida selalu diikuti dengan tindakan proteksi radiasi agar pemberian radionuklida kepada pasien dapat berjalan aman dan selamat tidak hanya bagi pasien itu sendiri, tetapi juga bagi pekerja, masyarakat sekitar, dan lingkungan hidup. Setiap kegiatan atau pergerakan pasien yang menerima radionuklida sebagai upaya terapi bagi penyakit yang dideritanya akan selalu terus dipantau, sejak masuknya radionuklida ke dalam tubuhnya sampai kembali pulang ke rumahnya. Bahkan jika pasien meninggal, tindakan proteksi radiasi masih tetap dilakukan untuk memastikan bahwa jumlah radiasi yang masih ada di tubuh jenazah cukup aman dan tidak membahayakan orang di sekitar dan lingkungannya.

Isu keselamatan tidak hanya dilihat dari sisi pasien, tetapi juga dari sisi pekerja dan lingkungan hidup secara lebih luas. Untuk itu, aspek limbah radioaktif yang timbul dari tindakan terapi radionuklida dan juga aspek keselamatan dalam pengangkutan zat radioaktifnya mendapat perhatian yang cukup tinggi. Rendahnya aktivitas limbah dan potensi insiden dalam pengangkutan yang juga relatif kecil tidak mengurangi keseriusan dalam menyusun peraturan dan prosedur keselamatan yang harus dilaksanakan secara cermat.

Dari sisi standar keselamatan, IAEA sebagai organisasi internasional yang memiliki misi mempercepat dan memperbesar kontribusi tenaga atom untuk kedamaian, kesehatan, dan kesejahteraan manusia di seluruh dunia telah mengembangkan berbagai publikasi terkait proteksi dan keselamatan radiasi dalam penerapan tenaga atom di berbagai bidang kehidupan manusia, termasuk juga keselamatan dan proteksi dalam terapi radionuklida. Publikasi yang diterbitkan IAEA ini merupakan publikasi yang menjadi dasar dalam pengembangan berbagai publikasi di hampir semua negara di dunia sehingga sistem keselamatan dan proteksi radiasi secara global tertelusur ke sumber yang sama.

Di Indonesia, layanan kedokteran nuklir secara umum masih sangat terbatas. Dengan jumlah populasi yang mencapai sekitar 270 juta jiwa, pada pertengahan tahun 2023 Indonesia hanya memiliki 61 dokter spesialis kedokteran nuklir (Manumoyoso, 2023). Jumlah ini dapat dibandingkan dengan dokter spesialis penyakit dalam sebanyak 6.972 orang yang merupakan dokter spesialis terbanyak dari jumlah total dokter spesialis di Indonesia yang mencapai 30.347 orang (Mustajab, 2023).

Dari sisi peraturan, BAPETEN di Indonesia juga telah melakukan tugasnya dengan baik di bidang keselamatan dan proteksi radiasi, termasuk yang berlaku untuk terapi radionuklida. Namun, premis umum yang berlaku antara peraturan dan teknologi juga berlaku di bidang ketenaganukliran ini, yaitu peraturan selalu terlambat dalam mengatur penggunaan teknologi yang terus berkembang dengan cepat. Peraturan tentang keselamatan radiasi dalam kedokteran nuklir, misalnya, yang telah terbit sejak tahun 2012 masih tetap berlaku hingga saat buku ini ditulis (Juli 2024) meski berbagai perkembangan terkait teknologi kedokteran nuklir dan proteksi radiasi telah terjadi sepanjang rentang waktu 12 tahun.

Selain itu, patut dicermati pula konsistensi penggunaan bahasa Indonesia pada suatu peraturan yang berlaku di Indonesia. Peraturan BAPETEN Nomor 7 Tahun 2020 dilengkapi dengan beberapa lampiran, termasuk keterangan tentang tanda radiasi, label, dan plakat.

Sayangnya, informasi tentang isi bungkusan pada beberapa contoh tanda radiasi mengandung campuran kata bahasa Indonesia dengan bahasa Inggris. Mengingat peraturan ini adalah peraturan nasional Indonesia, semua kata yang digunakan peraturan mestinya, tanpa kecuali adalah bahasa Indonesia.

DAFTAR SINGKATAN

ARPANSA	: Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency
ARSAC-HAS	: Administration of Radioactive Substances Advisory Committee- Health Security Agency
ASI	: air susu ibu
BAPETEN	: Badan Pengawas Tenaga Nuklir
CID	: <i>compound identification number</i>
DMSA	: <i>dimercaptosuccinic acid</i>
DPD	: <i>dicarboxypropane diphosphonate</i>
DTPA	: <i>diethylenetriaminepentaacetic acid</i>
ECD	: <i>ethyl cysteinate dimer</i>
EDTA	: <i>ethylene diamine tetraacetic acid</i>
EDTMP	: <i>ethylene diamine tetra methylene phosphonate</i>
FDG	: <i>fluorodeoxyglucose</i>
GFR	: <i>glomerular filtration rate</i>
HCC	: <i>hepatocellular carcinoma</i>
HDP	: <i>hydroxymethane diphosphonate</i>
HER2	: <i>human epidermal growth factor receptor 2</i>
HMPAO	: <i>hexamethylpropyleneamine oxime</i>
HVL	: <i>half value layer</i>
IAEA	: International Atomic Energy Agency
ICRP	: International Commission on Radiological Protection

IDA	: <i>iminodiacetic acid</i>
IPEM	: The Institute of Physics and Engineering in Medicine
KI	: <i>potassium iodide</i>
LET	: <i>linear energy transfer</i>
MAA	: <i>macroaggregate of albumin</i>
MAG3	: <i>mercaptoacetyltriglycine</i>
MBq	: megabecquerel
MDP	: <i>methylene diphosphonate</i>
MIBG	: <i>metaiodobenzylguanidine</i>
MIBI	: <i>methoxyisobutylisonitrile</i>
NBD	: nilai batas dosis
NRC	: Nuclear Regulatory Commission
PET/CT	: <i>positron emission tomography/computed tomography</i>
PP	: peraturan pemerintah
PRAB	: Pusat Reaktor Atom Bandung
PRRT	: <i>peptide receptor radionuclide therapy</i>
PRTKMMN	: Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir
PSMA	: <i>prostat-specific membrane antigen</i>
RAI	<i>radioactive iodine</i>
RBC	: <i>red blood cells</i>
SC	: <i>sulphur colloid</i>
SIRT	: <i>selective internal radiation therapy</i>
SMM	: sistem manajemen mutu
SOP	: <i>standard operating procedure</i>
SPECT/CT	: <i>single photon emission computed tomography/computed tomography</i>
SSTR2	: <i>somatostatin receptor type 2</i>
TVL	: <i>tenth value layer</i>
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UU	: undang-undang
WBC	: <i>white blood cells</i>

GLOSARIUM

ablasi	: prosedur terapi yang digunakan untuk menghilangkan atau menghancurkan fungsi jaringan yang menjadi sumber masalah medis
anak luruh	: Radionuklida yang terbentuk sebagai hasil peluruhan radionuklida induk atau sebelumnya; jika anak luruh bersifat radioaktif, suatu saat ia juga akan menjadi induk.
atenuasi	: proses ketika suatu berkas radiasi berkurang intensitasnya saat melalui suatu bahan tertentu
<i>bremssstrahlung</i>	: radiasi elektromagnetik yang terjadi saat partikel beta atau elektron berkecepatan tinggi berinteraksi dengan materi
peluruhan	: disintegrasi inti suatu nuklida tidak stabil melalui pancaran spontan partikel bermuatan dan/atau foton
radionuklida	: nuklida yang tidak stabil dan bersifat radioaktif
radiofarmaka	: Senyawa bertanda radioaktif dan memenuhi persyaratan farmakologis untuk digunakan dalam diagnostik, terapi, dan penelitian medis klinis.
radiofarmasi	: Obat radioaktif yang digunakan untuk diagnosis atau terapi dalam jumlah kecil, massanya sangat kecil sehingga tidak menghasilkan efek farmakologis.
waktu paruh	: Untuk suatu zat radioaktif, sama dengan waktu paruh fisik; jika suatu radionuklida masuk ke dalam jaringan tubuh, sama dengan waktu paruh efektif, yang biasa ditulis sebagai $T_{1/2}$.

waktu paruh fisis	: waktu yang dibutuhkan untuk alih-bentuk setengah bagian dari atom pada suatu proses peluruhan radioaktif, yang mengikuti hukum eksponensial
waktu paruh biologis	: waktu yang dibutuhkan untuk menunjukkan pembuangan bahan dari jaringan, organ, atau seluruh tubuh (yang secara umum juga mengikuti hukum eksponensial) menjadi separuh dari jumlah semula
waktu paruh efektif	: waktu yang dibutuhkan suatu bahan radioaktif di dalam organisme hidup untuk berkurang separuh dari jumlah semula dengan kombinasi pembuangan biologik dan peluruhan radioaktif

DAFTAR PUSTAKA

- Administration of Radioactive Substances Advisory Committee-Health Security Agency (ARSAC-HAS). (2024). Notes for guidance on the clinical administration of radiopharmaceuticals and use of sealed radioactive sources. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65f997f9703c42001158ef75/Notes-for-guidance-on-the-clinical-administration-of-radiopharmaceuticals-and-use-of-sealed-radioactive-sources.pdf>
- Asadian, S., Mirzaei, H., Kalantari, B. A., Davarpanah, M. R., Mohamadi, M., Shpichka, A., Nasehi, L., Es, H. A., Timashev, P., Najimi, M., Gheibi, N., Hassan, M. & Vosough, M. (2020). β -radiating radionuclides in cancer treatment, novel insight into promising approach. *Pharmacol. Res.*, 160, 105070. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.105070>
- Assadi, M., Gholamrezanezhad, A., Jokar, N., Keshavarz, M., Picchio, M., Seregini, E., Bombardieri, E. & Chiti, A. (2020). Key elements of preparedness for pandemic coronavirus disease 2019 (COVID-19) in nuclear medicine units. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 47, 1779–1786. <https://doi.org/10.1007/s00259-020-04780-4>
- Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. (2002). *Discharge of patients undergoing treatment with radioactive substances*. <https://www.arpsansa.gov.au/regulation-and-licensing/regulatory-publications/radiation-protection-series/guides-and-recommendations/rps4>
- Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. (2008). *Radiation protection in nuclear medicine*. <https://www.arpsansa.gov.au/regulation-and-licensing/regulatory-publications/radiation-protection-series/guides-and-recommendations/rps14-2>

- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. (2020). *Ringkasan eksekutif pedoman teknis rilis pasien (release of patient) pada kedokteran nuklir*.
<https://cloud.bapeten.go.id/index.php/s/5tMApat96nFwj6W#pdfviewer>
- Barrington, S. F., Kettle, A. G., O'Doherty, M. J., Wells, C. P., Somer, E. J. & Coakley, A. J. (1999). Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of the thyroid. *Eur J Nucl Med* 23(2), 123–130. <https://doi.org/10.1007/BF01731834>
- Bly, R. (2020). Radiation protection issues in radionuclide therapy – workers (medical staff), third persons, waste management. Dalam *EU Scientific Seminar November: Developments in nuclear medicine– new radioisotopes in use and associated challenges, Proceedings of a scientific seminar held in Luxembourg on 13 November 2019, Radiation Protection No. 194*. European Commission.
https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/30e0db9d-3a96-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=37085&WT.ria_f=3608&WT.ria_ev=search
- Budiawan, H. (2018). Nuclear theranostics in Indonesia: Past, present, and future. *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 53, 33–34. <https://doi.org/10.1007/s13139-018-0561-6>
- Burkett, B. J., Dundar, A., Young, J. R., Packard, A. T., Johnson, G. B., Halfdanarson, T. R., Eiring, R. A., Gansen, D. N., Patton, C. M. & Kendi, A. T. (2021). How we do it: A multidisciplinary approach to 177Lu DOTATATE peptide receptor radionuclide therapy. *Radiology*, 298, 261–262. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020201745>
- Cember, H. & Johnson, T. E. (2009). *Introduction to health physics* (4th ed., 73). McGraw Hill Medical.
- Dauer, L. T. (2014). Management of therapy patients. Dalam D. L. Bailey, J. L. Humm, A. Todd-Pokropek, & A. van Aswegen (Ed.), *Nuclear medicine physics: A handbook for teachers and students*. IAEA.
<https://www.iaea.org/publications/10368/nuclear-medicine-physics>
- Ersahin, D., Doddamane, I. & Cheng, D. (2011). Targeted radionuclide therapy. *Cancers*, 3, 3838–3855. <https://doi.org/10.3390/cancers3043838>
- Escopharma (t.t.). Radiopharmacy compounding equipment. Diakses 21 Maret 2024, dari <https://www.escopharma.com/pdf/brochures/Radiopharmacy-Compounding-Equipment-vA-A4-LR.pdf>
- Evani, S. (t.t.). Penggunaan alat pelindung diri untuk mencegah penyakit infeksius pada tenaga medis dalam menghadapi pandemi Covid-19. Diakses 23 Juli 2024, dari <https://www.alomedika.com/penggunaan-alat-perlindungan-diri-untuk-mencegah-penyakit-infeksius-pada-tenaga-medis>

- Garcia-Baonza, R., Sáez-Muñoz, M., Candela-Juan, C., Rozas, S., Camp, A., Martinez & Andresz, A. (2022). COVID-19 pandemic impact on the Spanih radiation protection professionals. *Radioprotection*, 57(3), 233–240. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2022016>
- Goldsmith, S. J. (2020). Targeted radionuclide therapy: A historical and personal review. *Seminars in Nuclear Medicine*, 50(1), 87–97. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2019.07.006>
- Hidayati, N. R., Setyowati, S., Sutari, Triningsih, Karyadi, Aguswarini, S., Humani, T. S., Hidayat, B., Ramli, M., Massora, S., Susilo, V. Y., Mutalib, A., Sastramihardja, H. & Masjhur, J. S. (2015). Studi awal estimasi dosis internal ¹⁷⁷Lu-DOTA Trastuzumab pada manusia berbasis uji biodistribusi pada mencit. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 16(2), 105–116. <https://dx.doi.org/10.17146/jstni.2015.16.2.2362>
- Hidayati, N. R., Poon, A., Willowson, K., Eslick, E., Ryu, H. & Bailey, D. L. (2019). Evaluation of kidney dose in neuroendocrine tumors patients after peptide receptor radionuclide therapy using ¹⁷⁷Lu-DOTATATE. *Atom Indonesia*, 45(3), 147–152. <https://doi.org/10.17146/aij.2019.910>
- Hiswara, E. (2023). *Istilah dan definisi dalam proteksi dan keselamatan radiasi*. Penerbit BRIN. <https://doi.org/10.55981/brin.522>
- Hoefnagel, C. A., den Hartog Jager, F. C. A., Taal, B.G., Abeling, N. G. G. M. & Engelsman, E. E. (1987). The role of I-131-MIBG in the diagnosis and therapy of carcinoids. *European Journal of Nuclear Medicine*, 13, 187–191. <https://doi.org/10.1007/BF00256489>
- Humas BRIN. (2023, 8 Desember). *Tantangan nuklir bidang kesehatan, PKN-TMI: fasilitas kedokteran nuklir dan radiofarmaka terbatas*. BRIN. <https://www.brin.go.id/news/117035/tantangan-nuklir-bidang-kesehatan-pkn-tmi-fasilitas-kedokteran-nuklir-dan-radiofarmaka-terbatas>
- Humas Unand. (2023, 8 Maret). Guru besar FK UNAND kenalkan kedokteran nuklir yang masih asing di Indonesia. *Universitas Andalas*. <https://www.unand.ac.id/index.php/berita/9-seputar-unand/379-gubes-fk-unand-kedokteran-nuklir.html>
- Idée, J-M., Louguet, S., Ballet, S. & Corot, C. (2013). Theranostics and contrast-agents for medical imaging: a pharmaceutical company viepoint. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 3(6), 292–297. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2223-4292.2013.12.06>
- International Atomic Energy Agency. (t.t.-a). Radiation protection in nuclear medicine. Diakses 20 Maret 2024, dari <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/nuclear-medicine>

- International Atomic Energy Agency. (t.t.-b). Radionuclide therapy. Diakses 7 Februari 2024, dari <https://www.iaea.org/topics/radionuclide-therapy>
- International Atomic Energy Agency. (t.t.-c). Specific therapies involving radiation. Diakses 7 Februari 2024, dari <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/nuclear-medicine/therapeutic-nuclear-medicine/specific-therapies>
- International Atomic Energy Agency. (1996a). Manual on therapeutic uses of iodine-131. <https://www.iaea.org/publications/4596/manual-on-therapeutic-uses-of-iodine-131>
- International Atomic Energy Agency. (1996b). *International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*. https://gnssn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_115_1996_Pub996_EN.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2007). *Arrangements for preparedness for a nuclear or radiological emergency*. <https://www.iaea.org/publications/7503/arrangements-for-preparedness-for-a-nuclear-or-radiological-emergency>
- International Atomic Energy Agency. (2011). *Criteria for use in preparedness and response for nuclear or radiological emergency*. <https://www.iaea.org/publications/8506/criteria-for-use-in-preparedness-and-response-for-a-nuclear-or-radiological-emergency>
- International Atomic Energy Agency. (2009a). *Release of patients after radionuclide therapy*. <https://www.iaea.org/publications/8179/release-of-patients-after-radionuclide-therapy>
- International Atomic Energy Agency. (2009b). *Classification of radioactive waste*. <https://www.iaea.org/publications/8154/classification-of-radioactive-waste>
- International Atomic Energy Agency. (2009c). *Predisposal management of radioactive waste*. <https://www.iaea.org/publications/8004/predisposal-management-of-radioactive-waste>
- International Atomic Energy Agency. (2011). *Disposal of radioactive waste*. <https://www.iaea.org/publications/8420/disposal-of-radioactive-waste>
- International Atomic Energy Agency. (2014a). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards*. <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>
- International Atomic Energy Agency. (2014b). *Modular design of processing and storage facilities for small volumes of low and intermediate level radioactive waste including disused sealed sources*. <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>

- org/publications/10484/modular-design-of-processing-and-storage-facilities-for-small-volumes-of-low-and-intermediate-level-radioactive-waste-including-disused-sealed-sources
- International Atomic Energy Agency. (2015). *Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency*. <https://www.iaea.org/publications/10905/preparedness-and-response-for-a-nuclear-or-radiological-emergency>
- International Atomic Energy Agency. (2016) *Storage of radioactive waste*. <https://www.iaea.org/publications/7441/storage-of-radioactive-waste>
- International Atomic Energy Agency. (2018a). *Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation*. <https://www.iaea.org/publications/11102/radiation-protection-and-safety-in-medical-uses-of-ionizing-radiation>
- International Atomic Energy Agency. (2018b). *Regulations for the safe transport of radioactive material* <https://www.iaea.org/publications/12288/regulations-for-the-safe-transport-of-radioactive-material>
- International Atomic Energy Agency. (2019). *Predisposal management of radioactive waste from the use of radioactive material in medicine, industry, agriculture, research and education*. <https://www.iaea.org/publications/11087/predisposal-management-of-radioactive-waste-from-the-use-of-radioactive-material-in-medicine-industry-agriculture-research-and-education>
- International Atomic Energy Agency. (2020). *Covid-19 pandemic: Technical guidance for nuclear medicine departments*. <https://www.iaea.org/publications/14733/covid-19-pandemic-technical-guidance-for-nuclear-medicine-departments>
- International Atomic Energy Agency. (2021). *Quantum 3.0: An updated tool for nuclear medicine audits* (3rd ed). <https://www.iaea.org/publications/13619/quantum-30-an-updated-tool-for-nuclear-medicine-audits>
- International Commission on Radiological Protection. (2004). Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. *ICRP Publication 94. Ann. ICRP, 34*(2). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2094>
- International Commission on Radiological Protection. (2012). Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. *ICRP Publication 119. Ann. ICRP, 41*(Suppl.) <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20119>

- Kartamihardja, A. H. S. (2013). *Perkembangan kedokteran nuklir dan radiofarmaka di Indonesia*. <http://pustaka.unpad.ac.id/wp-content/uploads/2015/06/Perkembangan-KN-dan-RF-di-Indonesia.pdf>
- Kheruka, S. C., Shankar, N., Ora, M. & Ghambir, S. (2021). Do current radiation safety guidelines allow the safe release of a thyroid cancer patient after high-dose radioiodine therapy? An Indian perspective. *Indian Journal of Nuclear Medicine*, 36, 148-52. https://doi.org/10.4103/ijnm.ijnm_210_20
- Kim, K. & Kim, S-J. (2018). Lu-177-based peptide receptor radionuclide therapy for advanced neuroendocrine tumors. *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 52, 208–215. <https://doi.org/10.1007/s13139-017-0505-6>
- Klaassen, N. J., Arntz, M. J., Arranja, A. G., Roosen, J. & Nijsen, J. F. W. (2019). The various therapeutic applications of the medical isotope holmium-166: A narrative review. *EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry*, 4(19). <https://doi.org/10.1186/s41181-019-0066-3>
- Lassen, S. A., Andersen, T. H., Liukonen, J., Pétursdóttir, N., Andersen, A. & Idestrom, L. (2023). *Considerations for the release of patients after radionuclide therapy*. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/nordic-series/022023/>
- Laurus Systems Inc. (t.t.). Ring dosimeters. Diakses 22 Maret 2024 dari <https://www.laurussystems.com/wp-content/uploads/LS-Ring-Dosimetry.pdf>
- Lepareur, N., Laccœuille, F., Bouvry, C., Hindré, F., Garcion, E., Chérel, M., Noiret, N., Garin, E. & Knapp Jr., F. F. R. (2019). Rhenium-188 labeled radiopharmaceuticals: Current clinical applications in oncology and promising perspectives. *Frontiers in Medicine*, 6(132). <https://doi.org/10.3389/fmed.2019.00132>
- Lubis, L. E., Nastiti, Y., Anam, C., Lestariningsih, I., Gani, M. R. A., Laksono, M. B., Fahmi, A. & Simanjuntak, J. (2020). *Penggunaan radiasi pengion dalam diagnosis dan penanganan COVID-19*. https://www.afismi.org/_files/ugd/b982fa_ea39ed9b5ce14f8c9aa040596ad7be21.pdf
- Manumoyoso, A. H. (2023, 25 Agustus). Spesialis kedokteran nuklir perlu ditambah. *Kompas*. <https://www.kompas.id/baca/humaniora/2023/08/25/spesialis-kedokteran-nuklir-perlu-ditambah>
- Menon, S. R., Mitra, A., Chakraborty, A., Tawate, M., Sahu, S., Rakshit, S., Gaikwad, S., Dhotre, G., Damle, A., & Banerjee, S. (2022). Clinical dose preparation of [¹⁷⁷Lu]Lu-DOTA-Pertuzumab using medium specific activity [¹⁷⁷Lu]LuCl₃ for radioimmunotherapy of breast and

- epithelial ovarian cancers, with HER2 receptor overexpression. *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, 37(5), 384–402.
<https://doi.org/10.1089/cbr.2021.0230>
- Mustajab, R. (2023, 28 Juni). Indonesia miliki 30.347 dokter spesialis per 27 Juni 2023. *DataIndonesia.id*. <https://dataindonesia.id/kesehatan/detail/indonesia-miliki-30347-dokter-spesialis-per-27-juni-2023>
- Nelson, B. J. B., Andersson, J. D. & Wuest, F. (2021). Targeted alpha therapy: Progress in radionuclide production, radiochemistry, and applications. *Pharmaceutics*, 13(49). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13010049>
- Nuclear Regulatory Commission. (2011). *NRC policy on release of iodine-131 therapy patients under 10 CFR 35.75 to locations other than private residences*. <https://www.nrc.gov/docs/ML1036/ML103620153.pdf>
- NRC Memorandum. (t.t.). International patient release practices following iodine-131 therapy. Diakses 20 Februari 2024, dari <https://www.nrc.gov/docs/ML1421/ML14217A350.pdf>
- Ohnuki, K., Yoshimoto, M., & Fujii, H. (2021). Radiological protection and biological COVID-19 protection in the nuclear medicine department. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 48, 6–8.
<https://doi.org/10.1007/s00259-020-05062-9>.
- Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Perka BAPETEN) Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir. (2012). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/peraturan-kepala-badan-no-17-tahun-2012-tentang-keselamatan-radiasi-dalam-kedokteran-nuklir>
- Peraturan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (Perka BRIN) Nomor 6 Tahun 2022 tentang Tugas, Fungsi, dan Struktur Organisasi Riset Tenaga Nuklir. (2022). <https://peraturan.go.id/id/peraturan-brin-no-6-tahun-2022>
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif. (2023).
<https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/peraturan-pemerintah-no-45-tahun-2023-tentang-keselamatan-radiasi-pengion-dan-keamanan-zat-radioaktif>
- Pharmavision (2023). Radiopharmaceuticals. Diakses 20 Maret 2024, dari <https://pharmavision.health/2023/09/radiopharmaceuticals/>
- Poty, S., Francesconi, L.C., McDevitt, M.R., Morris, M.J. & Lewis, J.S. (2018). α -emitters for radiotherapy: From basic radiochemistry to clinical studies – Part 1. *Journal of Nuclear Medicine*, 59, 878–884.
<https://doi.org/10.2967/jnumed.116.186338>

- Qaim, S. M. (2001). Therapeutic radionuclides and nuclear data. *Radiochimica Acta*, 89(4–5), 297–302. <https://doi.org/10.1524/ract.2001.89.4-5.297>
- Ritawidya, R., Wongso, H., Effendi, N., Pujiyanto, A., Lestari, W., Setiawan, H. & Humani, T. S. (2023). Lutetium-177-labeled prostate-specific membrane antigen-617 for molecular imaging and targeted radioligand therapy of prostate cancer. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 13(4), 701–711. <https://doi.org/10.34172/apb.2023.079>
- Saenger, E. L. & Kereiakes. (1980). Reflections on cancer treatment and the federal agency regulations. *Radiology*, 137(3), 865–866. <https://doi.org/10.1148/radiology.137.3.7444073>
- Smart, R.C. (2014). Physics in the radiopharmacy. Dalam D. L. Bailey, J. L. Humm, A. Todd-Pokropek, A. van Aswegen. (Ed.), *Nuclear medicine physics: A handbook for teachers and students*. IAEA. <https://www.iaea.org/publications/10368/nuclear-medicine-physics>
- Stella, M., Braat, A. J. A. T., van Rooij, R., de Jong, H. W. A. M. & Lam, M. G. E. H. (2022). Holmium-166 radioembolization: Current status and future perspective. *Cardiovascular and Interventional Radiology*, 45, 1634–1645. <https://doi.org/10.1007/s00270-022-03187-y>
- Thomadsen, B. (2020). Radionuclide therapy events: What we can learn and what to do. <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/07/rpop-webinar-july2020.pdf>
- Undang-Undang (UU) Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. (1997). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/undang-undang-remasyarakat-indonesia-nomor-10-tahun-1997-tentang-ketenaganukliran>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2022). Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2020/2021 Report to the general assembly, with scientific annexes. Volume I: Scientific Annex A. United Nations. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2020_2021_1.html
- Yeong, C-H., Cheng, M-H. & Ng, K-H. (2014). Therapeutic radionuclides in nuclear medicine: Current and future prospects. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B (Biomed & Biotechnol)*, 15(10), 845–863. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1400131>
- Yeung, P., Pinson, J-A., Lawson, M., Leong, C. & Badawy, M. K. (2022). COVID-19 pandemic and the effect of increased utilisation of mobile X-ray examinations on radiation dose to radiographers. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 69, 147–155. <https://doi.org/10.1002/jmrs.570>

TENTANG PENULIS



ERI HISWARA

(erih001@brin.go.id)

Penulis adalah salah seorang staf periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak 2021. Sebelumnya, penulis merupakan staf peneliti di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sejak tahun 1984. Penulis menamatkan pendidikan S-1 di FMIPA UI dan S-2 di University of Surrey, Guildford, Inggris, keduanya pada jurusan Fisika. Pada tahun 2003–2007 penulis sempat menjadi atase ilmu pengetahuan di KBRI/PTRI Wina. Selain aktif sebagai periset, penulis juga menjadi staf pengajar luar biasa pada Program Pendidikan Dokter Spesialis (PPDS) Radiologi di FKUI untuk mata ajar Fisika dan Proteksi Radiasi, dan di Sekolah Tinggi Intelijen Negara (STIN) untuk mata ajar Nuklir, Biologi dan Kimia (NUBIKA), dengan kekhususan pada keselamatan dan keamanan nuklir dan radiasi. Penulis adalah anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), Perkumpulan Ahli Proteksi Radiasi Indonesia (APRI), dan Health Physics Society.



NUNUNG NURAENI
(nunu002@brin.go.id)

Penulis adalah seorang periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak 2021. Sebelumnya penulis merupakan peneliti di Badan Tenaga Nuklir Nasional sejak tahun 2001. Penulis merupakan lulusan S-1 Fisika di Universitas Indonesia dan S-2 Fisika Medis di Universitas Indonesia. Selanjutnya, penulis melanjutkan studi S-3 di Jurusan Fisika ITB. Bidang kepakaran dari penulis adalah fisika nuklir. Penulis juga merupakan anggota dari Perhimpunan Periset Indonesia (PPI).



NUR RAHMAH HIDAYATI
(nurr001@brin.go.id)

Penulis lahir Yogyakarta, 8 Agustus 1969. Penulis adalah kepala kelompok dosimetri pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak 2021. Penulis menamatkan Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir BATAN 2005. Pada tahun 2010–2012 penulis melanjutkan pendidikan pada bidang *medical radiation physics* di University of Wollongong, Australia. Selain aktif sebagai periset, penulis juga menjadi staf pengajar luar biasa pada Program Pendidikan Dokter Spesialis (PPDS) Radiologi di FKUI. Selain itu, penulis juga sebagai dosen tamu pada Internal Dosimetry, TC on Candidate of Medical Physics, Hasanuddin University dan Universitas Diponegoro.



DEWI KARTIKASARI
(dewi028@brin.go.id)

Penulis adalah seorang periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak 2021. Sebelumnya penulis merupakan peneliti di Badan Tenaga Nuklir Nasional sejak tahun 2011. Penulis merupakan lulusan S-1 Kimia di Universitas Brawijaya dan S-2 Kimia di Universitas Indonesia. Bidang kepakaran dari penulis adalah kimia nuklir

dan material. Penulis juga merupakan anggota dari Perhimpunan Periset Indonesia (PPI).



HAYU TYAS UTAMI
(hayu002@brin.go.id)

Penulis adalah periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (sebelumnya Badan Tenaga Nuklir Nasional), sejak 2020, dengan bidang kepakaran aplikasi teknologi nuklir. Setelah menyelesaikan pendidikan S-1 pada tahun 2010 di Program Studi Teknik Nuklir, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika di Universitas Gadjah

Mada, Yogyakarta, penulis melanjutkan S-2 di Korea University of Science and Technology, Korea Selatan pada jurusan Radiation Biotechnology and Applied Isotope Science dan lulus pada 2014. Selain aktif sebagai periset, penulis juga menjadi mitra bestari dan dosen praktisi pada program Praktisi Mengajar serta anggota dari Perhimpunan Periset Indonesia (PPI).



SYARIFATUL ULYA

(syar015@brin.go.id)

Penulis lahir di Demak pada tanggal 10 Agustus 1992, dan memperoleh gelar sarjana fisika dari Universitas Negeri Semarang pada tahun 2014. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan pada program Magister Fisika di Universitas Indonesia dan lulus pada tahun 2016. Setelah itu penulis mengikuti Program Residensi Fisikawan Medis Spesialis di Universitas Indonesia dalam kerangka IAEA RCA

Project RAS/6/077. Pada awal tahun 2021 penulis menjadi pegawai di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) pada Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Dengan bergabungnya BATAN ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada September 2021, penulis kemudian menjadi staf periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTKMMN)-BRIN. Beberapa pendidikan tambahan yang pernah diperolehnya adalah Training Course on Enhancing Emergency Preparedness and Response Capabilities in ASEAN Region in Radiation Monitoring and Dose Assessment pada proyek RCA-ASEANTOM pada tahun 2023, ICTP/IAEA Workshop on Radiotherapy Dosimetry Audits Methodologies di Italia pada tahun 2022, Winter School on Dosimetry-Guided Treatment Planning for Radionuclide Therapy (EFOMP) pada tahun 2021, ASEAN Trainer Training Course on Advanced Radiotherapy di Korea Selatan pada tahun 2019, dan Particle Therapy Workshop, ACPSEM, di Australia pada tahun 2018.



OKKY AGASSY FIRMANSYAH
(okky001@brin.go.id)

Penulis lahir di Kabupaten Nganjuk pada tanggal 11 Juni 1993. Penulis meneruskan jenjang kuliah di jurusan D-3 Metrologi dan Instrumentasi ITS Surabaya, yang kemudian dilanjutkan dengan program lintas jalur (LJ) ke sarjana di Teknik Fisika ITS Surabaya. Pada tahun 2021 penulis mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan pendidikan S-2 di University of Science and Technology (UST) Korea

Selatan. Bidang minat yang ditekuni oleh penulis adalah dosimetri dan metrologi radiasi pengion.



ACHMAD FATURRAHMAN JUNDI
(achm038@brin.go.id)

Penulis merupakan periset dari Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sejak tahun 2019. Kini BATAN telah mengalami peleburan bersama lembaga riset lain di Indonesia dan berganti nama menjadi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Saat ini penulis menjadi periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN) BRIN. Penulis merupakan lulusan

S-1 Fisika Universitas Indonesia, dan lulusan S-2 Fisika Medis Universitas Indonesia. Bidang kepakaran penulis adalah fisika medis, terkhusus di bidang kedokteran nuklir.

INDEKS

- abu jenazah, 76
- air susu ibu, 69, 91, 107
- aktivitas radionuklida, 24, 25, 38,
50, 53, 57, 63, 65, 70, 86, 90,
97
- aktivitas sisa, 45, 47, 76
- alih energi linier, 9
- apron timbal, 26, 31

- Badan Riset dan Inovasi Nasional,
2, 118, 121, 122, 123, 124,
125
- Batas Aktivitas pada Jenazah, 78, 79
- Batas Turunan, 32

- COVID-19, 81, 82, 111, 113, 117,
119
- daerah kerja, 27, 28, 31, 42, 82, 87
- daerah pengendalian, 27, 28, 31,
32, 37
- daerah supervisi, 27, 28, 32
- deposisi tulang, 10
- Donor Organ, 78
- Dosis efektif, 58, 70
- dosis eksternal, 47, 62

- efek reaksi jaringan, 33
- elektron Auger, 9, 10
- embolisasi mikrosfer, 12

- faktor konversi dosis, 63
- fisikawan medis, 24, 25, 26, 41, 53,
77, 78, 90
- fungsi ginjal, 1, 71, 72, 73

- gastroenteropankreatik, 16

- hipertiroid, 54, 55, 57, 58, 60, 61,
62, 63

- ingesi, 63, 64
- inhalasi, 32, 63, 64
- insiden radiasi, 21, 38, 39, 88
- International Atomic Energy
Agency, 4, 107, 114, 115

- justifikasi, 22

- kaca timbal, 30, 31
- Kajian Keselamatan, 40

kamera gamma, 7, 23
 kanker prostat, 2, 3, 17
 karsinoma hepatoselular, 14, 15
 karsinoma sel skuamosa, 15
 karsinoma tiroid, 55, 61
 kastrasi metastatik, 2, 17
 kemoterapi, 2, 12
 keselamatan pengangkutan, 67, 81, 89
 kesiapsiagaan, 81, 88, 89, 94
 Kontaminasi internal, 32
 kontaminasi permukaan, 32
 kremasi, 75, 76, 78
 Kriteria Pemulangan, 52

 laju klirens, 11, 49
 limbah radioaktif, 5, 8, 40, 67, 75, 77, 79, 80, 87, 93, 94, 103
 limfoma non-Hodgkin, 17
 luka bakar, 1

 mieloproliferatif, 11
 mitigasi, 21, 38, 40, 41, 42, 87
 molekul biologi, 1
 morbiditas, 12

 natrium fosfat, 11
 neuroendokrin metastatik, 12
 nilai batas dosis, 27, 45, 47, 59, 80, 83, 108
 nyaris celaka, 42
 optimisasi, 22, 27, 91
 otopsi, 75, 76, 77, 78

 Pajanan kerja, 26
 Pajanan Masyarakat, 37
 pajanan medis, 21, 22, 23, 37, 87
 paraganglioma, 14
 Pasien Hamil, 67
 Pasien Meninggal, 75
 Pasien Menyusui, 69
 pemakaman, 75, 76, 78
 pemancar alfa, 9, 17
 pemancar beta, 11, 12, 13, 14, 16, 29, 30, 32, 38, 48
 pemancar positron, 7, 34
 pembalsaman, 75, 76, 78
 pendamping pasien, 21, 23, 25, 26, 37, 43, 47, 53, 66
 pendekatan bertingkat, 50
 penghambat dosis, 27, 28, 45, 47
 pengikatan protein, 10
 perisai radiasi, 27, 29, 30, 36, 37, 39
 perunut, 8, 10, 11
 petugas proteksi radiasi, 24, 25, 26, 28, 41, 43, 53, 75, 76, 77, 78, 81, 90
 Polisitemia, 80
 proteksi radiasi, 4, 5, 9, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 38, 41, 43, 53, 65, 67, 73, 75, 76, 77, 78, 81, 83, 86, 87, 89, 90, 95, 96, 103, 104
 Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir, 108, 121

 radioembolisasi, 11, 15
 radiofarmaka, 1, 10, 13, 16, 23, 28, 29, 30, 31, 34, 37, 38, 40, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 74, 75, 90, 91, 96, 99, 103, 109, 113, 116
 radiofarmasi, 1, 33, 81, 109
 radioimunoterapi, 15, 62
 rawat inap, 4, 5, 25, 36, 45, 46, 48, 49, 50, 53, 58, 59, 60
 rawat jalan, 50, 53, 58

- serapan metabolik, 10
- Sinar-X, 17
- sinovektomi, 11, 12, 14
- strontium klorida, 12
- tanggap darurat, 81, 88, 89
- teranostik, 2, 3, 15
- terapi bertarget, 2
- terapi intrakaviter, 7, 11, 73
- terapi radionuklida reseptor
 - peptida, 3, 15
- terapi sistemik, 7
- trombositemia, 11
- tumor ganas, 3
- tumor hepatik, 15
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 108, 119
- vaskularitas tumor, 11
- waktu paruh, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 61, 74, 75, 79, 87, 109, 110
- waktu paruh biologis, 8, 9, 110
- waktu paruh efektif, 9, 109, 110
- waktu paruh fisis, 8, 9, 11, 12, 74, 110

Terapi radionuklida merupakan salah satu pemanfaatan sumber radiasi, yang juga disebut sebagai radionuklida, di bidang medis. Sumber radionuklida tersebut diikat kuat dengan suatu molekul biologi atau farmaka sehingga disebut sebagai radiofarmaka. Keuntungan terapi radionuklida adalah mampu memberikan dosis serap yang sangat terkonsentrasi pada tumor target dan tidak memberikan dosis ke jaringan sehat di sekitarnya. Sumber radionuklida yang digunakan umumnya merupakan pemancar beta atau alfa, dan sedikit pemancar gamma. Aktivitas radiasi yang digunakan juga cukup rendah.

Namun demikian, sebagai sumber radiasi, radiofarmaka juga memiliki potensi bahaya yang perlu dikelola dengan baik. Buku ini menguraikan pokok-pokok tindakan proteksi radiasi yang perlu dilakukan agar tindakan terapi radionuklida dapat berjalan dengan aman dan selamat. Tindakan proteksi radiasi yang perlu dilakukan adalah sejak pasien dipersiapkan di rumah sakit untuk menerima radiofarmaka hingga pasien pulang ke rumah. Bahkan, tindakan proteksi radiasi perlu juga dilakukan jika pasien meninggal dalam perawatan dan kemudian akan dimakamkan atau dikremasi, dan juga dibalsam untuk pengawetan jika akan dikirim dari satu lokasi ke lokasi lain dalam waktu yang agak lama.

Buku ini diharapkan dapat menjadi pedoman untuk berbagai pihak yang terlibat dalam tindakan terapi radionuklida, mulai dari para tenaga medis, fisikawan medis, perawat, hingga petugas proteksi radiasi, dan juga pendamping pasien, dalam mengambil tindakan yang tepat dari sisi proteksi dan keselamatan radiasi.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

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

DOI: 10.55981/brin.1134



ISBN 978-602-6303-62-2



9 786026 303622