BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

KARYA TERPILIH
PROGRAM AKUISISI
PENGETAHUAN LOKAL
TIDAK UNTUK DIPERJUALBELIKAN

Eri Hiswara, Nunung Nuraeni,
Dewi Kartikasari, Hayu Tyas Utami,
Achmad Faturrahman Jundi, Suzie Darmawati

KECELAKAAN RADIASI DAN NUKLIR

Pengertian dan Penanggulangannya



Buku ini tidak diperjualbelikan



KECELAKAAN
RADIASI DAN NUKLIR
Pengertian dan Penanggulangannya

Buku ini tidak diperjualbelikan

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN

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



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

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

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

Buku ini tidak diperjualbelikan



Eri Hiswara, Nunung Nuraeni,
Dewi Kartikasari, Hayu Tyas Utami,
Achmad Faturrahman Jundi, Suzie Darmawati

KECELAKAAN RADIASI DAN NUKLIR

Pengertian dan Penanggulangannya

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan

© 2026 Eri Hiswara, Nunung Nuraeni, Dewi Kartikasari, Hayu Tyas Utami, Achmad Faturrahman Jundi, Suzie Darmawati

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Kecelakaan Radiasi dan Nuklir: Pengertian dan Penanggulangannya/Eri Hiswara, Nunung Nuraeni, Dewi Kartikasari, Hayu Tyas Utami, Achmad Faturrahman Jundi, Suzie Darmawati–Jakarta: Penerbit BRIN, 2026.

xvi + 154 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-634-7933-26-3 (*e-book*)

1. Bencana
2. Penanggulangan
3. Radiasi
4. Nuklir

363.3497

Editor Akuisisi : Prapti Sasiwi
Copy editor : Meilany
Proofreader : Rahma Hilma Taslima
Penata isi : Rahma Hilma Taslima, Astuti Krisnawati
Desainer sampul : Astuti Krisnawati

Edisi pertama : November 2026

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

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Isi



Daftar Isi v
Daftar Gambar vii
Daftar Tabel ix
Pengantar Penerbit xi
Prakata xiii

Bab I Kondisi Umum 1

Bab II Mengenal Radiasi dan Efek Kesehatannya 5
A. Jenis-Jenis Radiasi 6
B. Radiasi di Sekitar Kita 8
C. Efek Kesehatan Radiasi 11
D. Efek Psikososial Radiasi 14

Bab III Kecelakaan Radiasi dan Nuklir 17
A. Kecelakaan Radiasi Tak Disengaja 18
B. Kecelakaan Radiasi Disengaja 30
C. Kecelakaan Nuklir Tak Disengaja 33
D. Kecelakaan Nuklir Disengaja 40

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab IV Jenis-Jenis Senjata Berbasis Radiasi dan Nuklir 45
A. Perangkat Paparan Radiasi 45
B. Perangkat Penyebar Radiologis 47
C. Perangkat Nuklir Rakitan 51
D. Bom Nuklir 53

Bab V Respons terhadap Bencana 55
A. Metode Perlindungan Diri 56
B. Respons Perorangan 60
C. Respons Profesional 72
D. Respons Institusi yang Relevan dan Berwenang 75

Bab VI Respons Medis terhadap Bencana 83
A. Respons di Tempat Kejadian 83
B. Tindakan Triase pada Korban 84
C. Pengangkutan Korban ke Fasilitas Medis 86
D. Penanganan Korban di Fasilitas Medis 87

Bab VII Pemulihan Kondisi Area Terdampak 89
A. Pembersihan Tapak atau Lokasi 90
B. Pemantauan Radiasi Lingkungan 103
C. Pemberian Informasi Publik 105
D. Pengembalian Tapak dan Lokasi ke Keadaan Normal 109

Bab VIII Instrumen Legal 113
A. Instrumen Legal Internasional 114
B. Instrumen Legal Kawasan Asia Tenggara 122
C. Instrumen Legal Nasional 123

Bab IX Kesiapan Menghadapi Bencana 129

Daftar Singkatan 133
Daftar Pustaka 137
Biografi Penulis 149
Indeks 153

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Gambar



Gambar 2.1 Hubungan antara Dosis Radiasi dengan Efek Kesehatan ...13

Gambar 3.1 Sumber radiografi industri. Pada kasus kecelakaan Cochabamba, selama pengangkutan sumber Ir-192 tidak berada di posisi aman, tetapi tersangkut di tabung pemandu. 19

Gambar 3.2 Desain Generator Termoelektrik Radioisotop (RTG) 22

Gambar 3.3 Portal Monitor Radiasi yang Dipasang di Kawasan Industri Cikande 29

Gambar 3.4 Patung Peringatan yang Didedikasikan kepada Pekerja Pemadam Kebakaran sebagai Perespons Awal pada Kecelakaan PLTN Chernobyl.....39

Gambar 3.5 "Little Boy", Bom Atom yang Dijatuhkan di Hiroshima, Jepang, pada 6 Agustus 1945 41

Gambar 3.6 "Fat Man", Bom Atom yang Dijatuhkan di Nagasaki, Jepang pada 9 Agustus 1945 42

Gambar 4.1 Ilustrasi Penempatan RED.....46

Buku ini tidak diperjualbelikan

Gambar 4.2 Konstruksi RDD 47
Gambar 4.3 Ilustrasi Pembuatan RDD 49
Gambar 5.1 Konsep "PEJABAT" untuk Proteksi Radiasi Eksternal 58
Gambar 5.2 Lambang Radiasi 61
Gambar 5.3 Lambang Radiasi Tambahan 63
Gambar 5.4 Struktur Organisasi Pos Komando Tanggap Darurat Bencana Nasional 77
Gambar 5.5 Struktur Organisasi Pos Komando Tanggap Darurat Bencana Daerah 78
Gambar 5.6 Organisasi dan Alur Kerja Tanggap Darurat Medis untuk Bencana Radiasi atau Nuklir 81

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Tabel



Tabel 2.1 Dosis Radiasi per Kapita per Tahun dari Sumber Radiasi Alam 9

Tabel 2.2 Dosis Radiasi per Kapita per Tahun yang Berasal dari Sumber Radiasi Buatan 10

Tabel 3.1 Insiden pada Aplikasi Sumber Radiasi di Indonesia pada Tahun 2001 26

Tabel 3.2 Tingkat Paparan Radiasi di Beberapa Lokasi di Perumahan BATAN Indah 32

Tabel 3.3 Hasil Pengukuran WBC pada Beberapa Warga di Perumahan BATAN Indah 32

Tabel 3.4 Data Perkiraan Jumlah Korban Bom Nuklir (Orang) di Hiroshima dan Nagasaki 42

Tabel 3.5 Perkiraan Dosis Paparan pada Jarak Tertentu dari Titik Jatuhan 43

Tabel 4.1 Karakteristik Sumber Radionuklida yang Dapat Digunakan sebagai Bom Kotor 48

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 6.1. Daftar Pertanyaan untuk Tindakan Triase.....85
Tabel 7.1 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Agen Dekontaminasi Kimia.....92
Tabel 7.2 Faktor Dekontaminasi.....92

Buku ini tidak diperjualbelikan

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.

Radiasi dan bahan nuklir kini digunakan secara luas untuk menunjang kesejahteraan manusia, mulai dari bidang medis, industri, pertanian, hingga riset, sementara bahan nuklir dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik berskala besar. Namun di balik manfaatnya, pemanfaatan sumber radiasi dan bahan nuklir tidak lepas dari risiko kecelakaan—baik yang terjadi secara tidak sengaja akibat kelalaian saat pengangkutan atau pengoperasian instalasi, maupun yang disengaja untuk mencelakakan individu, komunitas, bahkan sebuah kota. Bersama zat kimia dan biologis, bahan radiasi dan nuklir tergolong bahan berbahaya yang berpotensi menimbulkan bencana bagi manu-

Buku ini tidak diperjualbelikan

sia, hewan, tumbuhan, dan lingkungan, serta kerap dikaitkan dengan situasi terorisme, peperangan, atau kecelakaan yang menuntut respons darurat khusus.

Buku *Kecelakaan Radiasi dan Nuklir: Pengertian dan Penanggulangannya* hadir untuk membekali pembaca dengan pemahaman komprehensif mengenai jenis-jenis radiasi, efek kesehatan dan psikososialnya, serta ragam kecelakaan radiasi dan nuklir baik yang disengaja maupun tidak. Buku ini juga membahas jenis senjata berbasis radiasi dan nuklir, langkah perlindungan diri, respons perorangan hingga institusional, penanganan medis bagi korban, pemulihan area terdampak, serta instrumen legal terkait di tingkat internasional, kawasan, dan nasional.

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.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Prakata



Penggunaan sumber radiasi, bahan radioaktif, dan bahan nuklir saat ini telah sangat luas dan bermanfaat dalam membantu manusia meningkatkan kesejahteraannya. Sumber radiasi dan bahan radioaktif banyak digunakan di bidang medis, industri, pertanian, riset, dan berbagai bidang lainnya, sementara bahan nuklir telah dimanfaatkan di bidang energi untuk membangkitkan listrik dengan daya yang cukup besar.

Namun demikian, pemanfaatan sumber radiasi, bahan radioaktif dan bahan nuklir tidak lepas dari risiko kecelakaan. Kecelakaan yang melibatkan sumber radiasi dan bahan radioaktif digolongkan sebagai kecelakaan radiasi, sedangkan yang melibatkan bahan nuklir disebut sebagai kecelakaan nuklir.

Kecelakaan dapat terjadi baik di instalasi radiasi maupun di instalasi nuklir itu sendiri akibat kelalaian atau kecerobohan petugas, misalnya saat bahan radioaktif atau bahan nuklir diangkut dari satu tempat ke tempat lain. Selain itu, bahan radioaktif dapat sengaja

Buku ini tidak diperjualbelikan

digunakan untuk mencelakakan seseorang, komunitas, atau bahkan sebuah kota. Dengan kata lain, kecelakaan dapat terjadi secara tidak sengaja maupun sengaja.

Selain itu, sumber radiasi dan nuklir, bersama-sama dengan zat kimia dan biologis, merupakan bahan berbahaya yang berpotensi menimbulkan bencana bagi manusia, hewan, tanaman, dan lingkungan secara luas. Bahan-bahan ini sering dikaitkan dengan situasi terorisme, peperangan, atau kecelakaan yang memerlukan respons darurat serta penanggulangan khusus. Di Indonesia, bahan-bahan ini sering disebut sebagai 'nubika' (nuklir, biologi, dan kimia), dengan bahaya radiasi dianggap sama atau satu kesatuan dengan bahaya nuklir.

Buku ini secara khusus akan membahas kecelakaan radiasi atau nuklir serta tindakan awal yang praktis dapat dilakukan oleh individu, serta tindakan praktis yang dapat dilakukan oleh suatu kelompok masyarakat atau komunitas tertentu jika terjadi kecelakaan radiasi atau nuklir tersebut. Respons selanjutnya dapat dilakukan oleh tim tanggap darurat bencana, yang dapat dikoordinasikan oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) jika kecelakaannya terbatas pada suatu provinsi, dan oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) jika kecelakaannya berdampak pada dua provinsi atau lebih.

Meskipun kemungkinan terjadinya kecelakaan radiasi atau nuklir ini dapat diperhitungkan, bencana yang tidak terduga dapat saja terjadi di tempat umum, misalnya kecelakaan saat pengangkutan bahan nuklir atau bahan radioaktif. Dalam hal ini, masyarakat umum yang berada di sekitar lokasi kecelakaan dapat saja berinisiatif menolong tanpa menyadari adanya bahaya radiasi bagi dirinya yang berasal dari tumpahan bahan radioaktif di badan jalan.

Berdasarkan *Kamus Besar Bahasa Indonesia* (KBBI, t.t.), *kecelakaan* adalah kejadian atau peristiwa yang menyebabkan seseorang celaka atau mengalami kemalangan. Di sisi lain, bahasa Indonesia juga mengenal istilah "bencana" yang menurut KBBI didefinisikan sebagai sesuatu yang menimbulkan kerugian atau penderitaan. Dari kedua

Buku ini tidak diperjualbelikan

definisi tersebut terlihat bahwa kecelakaan berkaitan erat dengan bencana, bahkan kecelakaan diserap sebagai salah satu sinonim atau bagian dari makna bencana.

Namun demikian, definisi *kecelakaan* berdasarkan KBBI menekankan bahwa korbannya bisa hanya "seseorang", sedangkan *bencana* dapat bermakna lebih luas, yaitu kejadian yang mengakibatkan penderitaan bagi banyak orang. Dengan dasar ini, beberapa kecelakaan radiasi dan nuklir yang diuraikan dalam buku ini, seperti kecelakaan di Goiânia atau kecelakaan PLTN di Chernobyl dan Fukushima, dapat digolongkan sebagai bencana, sementara sebagian besar kecelakaan lainnya tetap digolongkan sebagai kecelakaan.

Buku semacam ini belum banyak, atau bahkan barangkali dapat dikatakan belum ada di tengah masyarakat, sehingga kehadirannya diharapkan dapat membantu masyarakat umum maupun para profesional yang bekerja dengan radiasi atau bahan nuklir dalam menghadapi kecelakaan yang melibatkan sumber radiasi dan bahan nuklir.

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada para pihak yang telah membaca buku ini sejak masih berupa rancangan naskah dan memberikan usulan perbaikan untuk menyempurnakannya. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Penerbit BRIN yang bersedia menerbitkan buku ini.

Sebagai penutup, tim penulis berharap penerbitan buku ini dapat mencapai tujuannya dan memberikan manfaat bagi kita semua.

Tangerang Selatan, Agustus 2026

Tim Penulis.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab I

Kondisi Umum



Manusia telah memperoleh banyak manfaat dari penggunaan radiasi dan energi nuklir pada sektor medis, industri, pertanian, riset, dan energi. Namun, kemungkinan terjadinya kecelakaan radiasi atau nuklir cukup nyata di era modern ini. Secara umum, bencana tersebut dapat disebabkan oleh kecelakaan yang terjadi, baik secara tidak sengaja maupun secara sengaja, dan juga oleh ledakan senjata berbasis radiasi dan nuklir.

Metode yang paling efektif untuk menghadapi bencana ini adalah mencegahnya untuk tidak terjadi sejak awal. Pencegahan dapat dilaksanakan dengan berbagai cara, mulai dari melakukan pengawasan terhadap semua kegiatan pemanfaatan bahan nuklir dan radiasi, menerapkan proteksi dan langkah-langkah keamanan yang ketat untuk mencegah pencurian dan penyalahgunaan bahan nuklir dan radiasi, hingga barangkali melakukan negosiasi dengan teroris yang mengancam akan meledakkan senjata berbasis radiasi atau nuklir.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Selain upaya pencegahan di atas, buku ini mencoba membantu para pembaca mempersiapkan diri menghadapi bencana radiasi atau nuklir ini, serta bagaimana menanggapinya jika bencana benar-benar terjadi di depan mata, baik sebagai anggota masyarakat biasa maupun sebagai profesional.

Satu hal yang penting adalah jangan pernah berpikir bahwa Anda tidak berdaya saat menghadapi keadaan bencana ini. Anda dapat mengambil tindakan tertentu untuk melindungi diri sendiri dan keluarga. Anda juga dapat mengambil tindakan untuk membantu masyarakat sekitar yang terdampak langsung. Reaksi kita terhadap keadaan bencana akan menentukan dampak akhirnya

Secara umum, buku ini dimulai dengan memperkenalkan secara singkat apa itu radiasi dan apa efek kesehatannya. Setelah itu, uraian tentang kecelakaan radiasi serta jenis-jenis senjata berbasis radiasi dan nuklir diberikan untuk memberi gambaran tentang bagaimana sumber-sumber radiasi dan nuklir dapat mengakibatkan bencana yang menjadi topik buku ini.

Fokus utama buku diberikan pada bagian selanjutnya, yaitu bagaimana masyarakat secara terbatas merespons bencana radiasi atau nuklir yang terjadi. Respons awal masyarakat tersebut kemudian akan diambil alih dan ditangani lebih lanjut oleh institusi yang relevan dan yang berwenang, yaitu institusi yang melakukan kegiatan pemanfaatan bahan nuklir atau radiasi, dan institusi yang secara legal diberi tugas untuk menangani keadaan bencana, termasuk penanganan dari segi medisnya.

Tindakan berikutnya dalam menghadapi bencana ini adalah melakukan pemulihan terhadap kondisi area yang terdampak. Tindakan ini sepenuhnya menjadi tugas instansi yang relevan dan berwenang, dan diuraikan di sini untuk memberikan informasi kepada masyarakat tentang tahapan yang dilakukan untuk mengembalikan barang, peralatan, tanah, atau lahan yang terkontaminasi radiasi agar dapat dimanfaatkan kembali.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Informasi tambahan lain yang diberikan adalah yang terkait dengan instrumen legal yang ada untuk menangani bencana ini, baik yang berlaku secara internasional, kawasan, maupun nasional. Instrumen legal internasional merupakan instrumen yang disusun pada tingkat Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), baik berupa resolusi yang diadopsi oleh Dewan Keamanan maupun berbagai traktat yang diadopsi oleh Sidang Majelis Umum. Instrumen legal kawasan adalah instrumen yang disusun di tingkat ASEAN, sedangkan instrumen legal nasional merupakan instrumen yang dikeluarkan oleh Pemerintah dalam bentuk peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab II

Mengenal Radiasi dan Efek Kesehatannya



Radiasi pada dasarnya adalah pancaran dan penyebaran gelombang atau partikel berenergi melalui ruang dan waktu. Sinar-X dan radiasi gamma merupakan contoh dari radiasi dalam bentuk gelombang, sementara radiasi alfa, beta, dan neutron merupakan contoh radiasi dalam bentuk partikel.

Secara umum, radiasi dapat diklasifikasikan menjadi radiasi pengion dan radiasi nonpengion. Radiasi pengion merupakan radiasi yang ketika berinteraksi dengan atom suatu bahan memiliki energi yang cukup untuk melepaskan elektron dari ikatan atomnya. Sementara itu, radiasi nonpengion adalah radiasi yang tidak memiliki energi yang cukup untuk melepaskan elektron tersebut, dan hanya dapat menyebabkan getaran akibat perpindahan elektron dari satu kulit ke kulit lainnya.

Fokus pembahasan buku ini adalah radiasi pengion, karena jenis radiasi inilah yang memiliki potensi bahaya yang cukup besar bagi kesehatan. Untuk memudahkan, istilah "radiasi pengion" selanjutnya hanya disebut sebagai "radiasi".

Buku ini tidak diperjualbelikan

A. Jenis-Jenis Radiasi

Seperti telah sedikit disinggung di atas, radiasi dapat dibedakan atas radiasi alfa, radiasi beta, radiasi neutron, sinar-X, dan radiasi gamma. Sebenarnya masih ada jenis radiasi yang lain saat terjadi interaksi radiasi dengan materi, seperti muon, pion, atau kaon, namun jenis-jenis radiasi ini memiliki masa hidup yang sangat singkat sehingga kehadirannya dalam kehidupan sehari-hari tidak memiliki dampak dalam interaksi dan dapat diabaikan. Ketiga jenis radiasi ini baru akan memiliki potensi bahaya jika terlibat dalam suatu kegiatan manusia yang menimbulkan paparan radiasi tinggi, seperti perjalanan angkasa, terapi medis, atau partikel akselerator.

1. Radiasi Alfa

Radiasi alfa diberi lambang α, adalah radiasi yang tersusun atas dua proton dan dua neutron seperti inti atom helium. Radiasi yang berbentuk partikel ini biasanya dipancarkan oleh inti atom berat dan tidak stabil selama terjadinya peluruhan radioaktif.

Radiasi alfa memiliki daya tembus yang rendah dibandingkan dengan jenis radiasi yang lain, seperti beta atau gamma. Oleh karena itu, radiasi ini dapat dihentikan hanya dengan selembar kertas atau lapisan luar kulit manusia. Dengan sifat seperti ini, radiasi alfa dapat dikatakan tidak berbahaya saat berada di luar tubuh, namun sangat berbahaya jika tertelan, terhirup, atau masuk ke dalam tubuh karena dapat merusak jaringan dan organ internal dari jarak yang sangat dekat.

2. Radiasi Beta

Radiasi beta, yang diberi lambang β, adalah radiasi dalam bentuk partikel berenergi tinggi yang dipancarkan dari inti atom yang tidak stabil melalui proses peluruhan beta. Peluruhan beta terdiri atas peluruhan beta minus (β^-) dengan memancarkan elektron, dan peluruhan beta positif (β^+) dengan memancarkan positron.

Partikel beta minus terbentuk saat neutron meluruh menjadi proton, elektron, dan antineutrino, sedangkan partikel beta plus

Buku ini tidak diperjualbelikan

terbentuk saat proton menangkap elektron dari luar inti atom menjadi neutron, positron, dan neutrino. Neutrino dan antineutrino adalah partikel dasar yang tidak memiliki massa maupun muatan, dan berguna dalam memahami sifat-ifat dasar materi dan interaksi fundamental dalam fisika inti.

Tidak seperti radiasi alfa yang massanya cukup besar sehingga mudah dihentikan oleh lapisan luar kulit manusia, radiasi beta dapat menembus lapisan kulit secara terbatas. Sifat ini mengakibatkan paparan eksternal yang memancarkan radiasi beta menjadi lebih berbahaya dibandingkan paparan eksternal dari radiasi alfa.

3. Radiasi Neutron

Radiasi neutron merupakan partikel subatomik yang tidak bermuatan listrik. Tidak seperti radiasi alfa dan beta, partikel neutron mempunyai sifat yang unik. Karena tidak bermuatan listrik sebagaimana sinar gamma, neutron dapat menembus materi secara lebih dalam. Perbedaannya dengan sinar gamma adalah jenis interaksi yang dialami, yaitu fotolistrik, hamburan Compton, dan produksi pasangan elektron-positron untuk sinar gamma, serta tumbukan elastik dan nonelastik untuk neutron.

Radiasi neutron umumnya berasal dari reaksi nuklir, seperti reaksi fisi (pembelahan inti atom berat), reaksi fusi (penggabungan inti atom ringan), atau proses peluruhan radioaktif tertentu. Radiasi neutron juga dapat dihasilkan dari akselerator partikel penghasil neutron dan isotop radioaktif seperti Kalifornium-252. Karena neutron tidak bermuatan listrik, neutron tidak dapat mengionisasi atom secara langsung, tetapi melalui interaksinya dengan inti atom menyebabkan terjadinya berbagai reaksi inti, seperti hamburan, penangkapan (*capture*), atau emisi partikel lain.

4. Sinar-X dan Radiasi Gamma

Sinar-X dan radiasi gamma merupakan radiasi dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Sinar-X memiliki panjang gelombang dalam kisaran 0,01 hingga 10 nanometer, yang jauh lebih pendek daripada

Buku ini tidak diperjualbelikan

cahaya tampak. Energinya yang tinggi memungkinkan sinar-X menembus benda. Sinar-X dapat menembus sebagian besar zat, termasuk tubuh manusia, tetapi diserap oleh bahan yang lebih padat, seperti tulang atau logam. Sifat ini membuatnya berguna dalam pencitraan medis, dan umumnya digunakan untuk mengambil gambar tulang dan organ dalam.

Paparan radiasi sinar-X yang berkepanjangan atau berlebihan dapat merusak jaringan hidup dan meningkatkan risiko kanker. Oleh karena itu, para tenaga medis perlu melakukan tindakan proteksi radiasi, seperti penggunaan pelindung timbal, selama prosedur sinar-X.

Radiasi gamma, sementara itu, merupakan gelombang elektromagnetik yang umumnya memiliki energi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sinar-X, kecuali sinar-X "keras" yang dihasilkan oleh suatu pembangkit sinar-X khusus yang dapat memiliki energi yang setara dengan energi sinar gamma. Radiasi gamma dipancarkan oleh inti atom bersamaan dengan proses peluruhan zat radioaktif, reaksi nuklir, atau proses berenergi tinggi lainnya.

Karena energinya yang tinggi, radiasi gamma banyak dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi, seperti pengobatan kanker dengan teknik radioterapi, sterilisasi peralatan medis, atau pencitraan dalam prosedur diagnostik tertentu (misalnya, pemindaian PET). Seperti halnya paparan sinar-X, paparan radiasi gamma pada manusia juga dapat menyebabkan kerusakan pada jaringan biologis dan meningkatkan risiko kanker.

B. Radiasi di Sekitar Kita

Radiasi terpancar dari suatu bahan atau sumber radiasi yang mengandung zat radioaktif. Sumber radiasi dapat berupa sumber yang telah ada di alam bersamaan dengan terbentuknya alam ini, atau yang keberadaannya karena dibuat oleh manusia. Sumber yang telah ada di alam disebut sebagai radiasi alamiah, sedangkan sumber yang dibuat oleh manusia disebut sebagai radiasi buatan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

1. Radiasi Alamiah

Tabel 2.1 memperlihatkan dosis radiasi rerata tahunan yang diterima manusia dari sumber radiasi alamiah. Inhalasi gas radon memberikan kontribusi terbesar bagi dosis radiasi yang diterima manusia dari sumber radiasi alamiah, diikuti oleh radiasi terestrial eksternal, radiasi kosmis, dan ingesi.

Radiasi eksternal dan gas radon pada dasarnya berasal dari sumber radiasi yang sama, yaitu sumber radioaktif yang berada di tanah dan batuan. Sementara itu, radiasi kosmis berasal dari matahari dan luar angkasa serta ingesi adalah sumber radiasi yang masuk ke dalam tubuh melalui makanan dan minuman yang dikonsumsi manusia.

Tabel 2.1 Dosis Radiasi per Kapita per Tahun dari Sumber Radiasi Alam

Sumber	Dosis rerata tahunan (mSv)	Rentang dosis (mSv)
Inhalasi (gas radon)	1,26	0,2–10
Terestrial eksternal	0,48	0,3–1
Ingesi	0,29	0,2–1
Radiasi kosmis	0,39	1–13
Total alamiah	2,4	1–13

Sumber: UNSCEAR (2010)

Meskipun sumber radiasi berasal dari alam, paparan yang diterima manusia pada dasarnya juga dipengaruhi oleh aktivitasnya sehari-hari. Contoh yang paling nyata adalah paparan gas radon yang makin besar diterima manusia jika dalam waktu lama berdiam diri di dalam gedung yang tertutup tanpa ventilasi. Untuk sumber radiasi kosmis, makin tinggi suatu lokasi dari permukaan laut, makin tinggi dosis radiasi di lokasi tersebut (UNSCEAR, 2010).

2. Radiasi Buatan

Dosis radiasi rerata per kapita tahunan yang diterima manusia dari sumber radiasi buatan diberikan pada Tabel 2.2. Radiasi dari tindakan diagnosis medis diketahui memberikan kontribusi terbesar pada dosis

Buku ini tidak diperjualbelikan

radiasi yang diterima manusia dari sumber radiasi buatan, diikuti oleh paparan dari kecelakaan PLTN Chernobyl di Ukraina, percobaan bom nuklir di atmosfer, paparan kerja (paparan yang diterima oleh orang yang bekerja dengan radiasi), dan paparan publik (paparan yang diterima publik dari rantai kegiatan nuklir sejak penambangan uranium hingga pembuangan limbah radioaktif).

Tabel 2.2 Dosis Radiasi per Kapita per Tahun yang Berasal dari Sumber Radiasi Buatan

Sumber	Dosis Rerata Tahunan (mSv)	Rentang Dosis (mSv)
Diagnosis medis (tidak termasuk terapi)	0,6	0–beberapa puluh
Percobaan bom nuklir di atmosfer	0,005	Dosis lebih tinggi masih dijumpai di lokasi
Paparan kerja	0,005	~0–20
Kecelakaan Chernobyl	0,002	Pada tahun 1986, dosis rerata untuk lebih dari 300.000 pekerja pemulihan mencapai 150 mSv, dan lebih dari 350.000 orang lainnya menerima dosis lebih besar dari 10 mSv
Daur bahan bakar nuklir (paparan publik)	0,0002	Dosis sampai 0,02 mSv dijumpai pada jarak 1 km dari tapak[1] reaktor nuklir pada manusia kritis
Total buatan	0,6	Dari praktis 0 hingga beberapa puluh mSv

Sumber: UNSCEAR (2010).

Besar dosis radiasi rerata tahunan yang diterima manusia dari aplikasi medis tidak terlepas dari makin meningkatnya jumlah pemeriksaan medis yang dilakukan di seluruh dunia. Laporan

[1] Istilah "tapak" merupakan penyederhanaan dari istilah "area tapak", yang didefinisikan oleh IAEA sebagai wilayah geografis yang memuat fasilitas resmi, aktivitas atau sumber resmi, dan di tempat manajemen fasilitas resmi, aktivitas resmi, atau perespons awal dapat langsung memulai tindakan tanggap darurat (IAEA, 2022a).

Buku ini tidak diperjualbelikan

UNSCEAR tahun 1988 memperkirakan secara tahunan sebanyak 1.740 juta pemeriksaan dilakukan saat itu, dan meningkat menjadi 2.460 juta pada tahun 2000, 3.660 juta pada tahun 2008, dan 4.190 juta pada tahun 2020/2021 (UNSCEAR, 2022).

Percobaan bom nuklir di atmosfer yang sebagian besar dilakukan di belahan bumi bagian utara pada tahun 1945–1980 menghasilkan kekuatan ledakan sekitar 434 megaton setara TNT (trinitrotoluen) (UNSCEAR, 2010). Dosis efektif per kapita, atau per orang, diperkirakan mencapai 0,11 mSv pada tahun 1963, dan berkurang secara perlahan sejak disepakatinya perjanjian pelarangan terhadap percobaan bom nuklir di atmosfer pada tahun 1963 (JFK Library, t.t.).

Sementara itu, lebih dari 100 jenis bahan radioaktif terlepas ke atmosfer saat terjadi kecelakaan PLTN di Chernobyl, Ukraina, pada April 1986. Kecelakaan terjadi akibat lepasnya kendali atas reaktor selama pengujian pada daya rendah, yang menyebabkan ledakan dan kebakaran yang menghancurkan bangunan reaktor (IAEA, t.t.-b). Sekitar 150.000 km^2 area di Belarus, Rusia dan Ukraina terkontaminasi zat radioaktif dan meluas ke utara lokasi tapak PLTN sejauh 500 km. Sejauh ini, kecelakaan Chernobyl merupakan kecelakaan PLTN terparah yang pernah terjadi.

Seperti terlihat pada Tabel 2.2, dosis radiasi diberikan dalam satuan mSv, yang merupakan kependekan dari "milisievert". Secara spesifik, dosis radiasi yang dimaksud merupakan besaran dosis efektif, yaitu suatu besaran yang menghubungkan jumlah dosis radiasi yang diterima seseorang dengan efek kesehatan yang terjadi pada suatu organ atau jaringan dari orang tersebut. Selain itu, satuan Sv juga digunakan pada besaran dosis ekuivalen, yaitu merupakan ukuran dosis radiasi yang sesuai dengan jenis radiasinya, apakah radiasi alfa, beta, atau gamma/sinar-X, yang diterima organ atau jaringan, untuk mencerminkan jumlah bahaya yang diakibatkannya.

C. Efek Kesehatan Radiasi

Selain membawa manfaat yang sangat besar untuk menyejahterakan manusia, penggunaan sumber radiasi diketahui memiliki efek yang

Buku ini tidak diperjualbelikan

berbahaya bagi kesehatan manusia. Efek radiasi dapat berupa reaksi jaringan atau yang lebih dikenal sebagai efek deterministik, serta efek stokastik. Reaksi jaringan merupakan efek yang dapat terjadi pada suatu organ atau jaringan tubuh tertentu yang menerima paparan radiasi dengan dosis tinggi. Sementara itu, efek stokastik merupakan efek akibat penerimaan paparan radiasi dosis rendah di seluruh tubuh yang baru akan diderita oleh orang yang menerima dosis setelah selang waktu tertentu, atau, secara teoritis, oleh turunan orang yang menerima dosis tersebut, walaupun sampai saat ini riset yang terkait tidak menjumpai adanya kelainan pada turunan para penyintas bom atom di Hiroshima dan Nagasaki (NRC, 2006).

1. Gambaran Umum

Gambar 2.1 memperlihatkan pandangan UNSCEAR mengenai status pengetahuan manusia mengenai hubungan antara dosis radiasi dan efek kesehatannya sampai saat ini. Seperti terlihat, UNSCEAR membedakan besar dosis sebagai dosis tinggi–yaitu dosis di atas 1 sievert (Sv); dosis menengah–yaitu dosis sekitar ratusan milisievert (mSv); dosis rendah– yaitu dosis sekitar puluhan mSv; dan dosis sangat rendah–yaitu dosis sekitar 1 mSv.

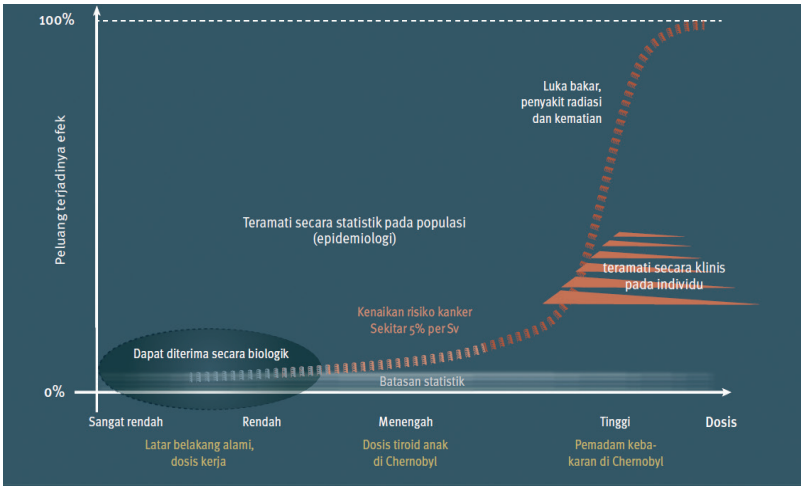
Dari Gambar 2.1 juga terlihat bahwa efek kesehatan yang teramati secara klinis pada individu sebenarnya hanya terjadi pada dosis menengah dan dosis tinggi. Pada rentang sebagian dosis rendah hingga menengah, efek kesehatan hanya dapat diamati secara statistik pada populasi melalui studi epidemiologi. Sementara itu, pada rentang dosis sangat rendah hingga sebagian dosis rendah, efek kesehatan tidak teramati, namun secara biologik dapat diterima, atau masuk akal, dan hanya dapat disimpulkan melalui penilaian subjektif para ahli. Sebagai tambahan, UNSCEAR memperkirakan bahwa pada dosis menengah sekitar 100 mSv, risiko terjadinya kanker akan naik sekitar 5% per Sv.

Tentang peluang terjadinya efek, peluang 100% berarti sesuai dengan kepastian bahwa efek akan terjadi, dan peluang 0% berarti sesuai dengan kepastian bahwa efek tidak akan terjadi. UNSCEAR

Buku ini tidak diperjualbelikan

selanjutnya membedakan peluang atas dua jenis, yaitu peluang frekuentis (*frequentist probabilities*) dan peluang subjektif (*subjective probabilities*) (González, 2022).

Peluang frekuentis berada di area dosis tinggi berdasarkan eksistensi efek kesehatan yang sesungguhnya dan terverifikasi, dan didefinisikan sebagai batas frekuensi relatif terjadinya efek dalam serangkaian studi epidemiologi yang terpercaya. Sementara itu, peluang subjektif, yang juga disebut sebagai Bayesian, berada di area dosis rendah, dan dinyatakan sebagai ekspektasi bahwa efek kesehatan radiasi mungkin terjadi, dan diukur berdasarkan keyakinan pribadi atau penilaian ahli yang tidak didukung oleh frekuensi atau kecenderungan bahwa efek tersebut benar-benar terjadi.



Sumber: UNEP (2016)

Gambar 2.1 Hubungan antara Dosis Radiasi dengan Efek Kesehatan

2. Reaksi Jaringan

Reaksi jaringan merupakan istilah lain untuk efek deterministik, yaitu efek radiasi terhadap kesehatan yang terjadi pada radiasi dosis tinggi dan memiliki tingkat ambang dosis, dengan keparahan efek akan makin besar untuk dosis yang makin tinggi. Dengan berkembangnya

Buku ini tidak diperjualbelikan

pengetahuan, efek ini diketahui tidak hanya ditentukan pada saat penyinaran, tetapi juga dapat dimodifikasi melalui prosedur setelah penyinaran, termasuk perawatan kesehatan dan pengubah respons biologis (ICRP, t.t.-b).

3. Efek Stokastik

Efek stokastik adalah efek radiasi terhadap kesehatan yang diakibatkan oleh radiasi dosis rendah, yang peluang terjadinya akan lebih besar dengan meningkatnya dosis. Peluang terjadinya efek stokastik dapat dihitung berdasarkan frekuensi efek yang diukur, dan secara umum disebut sebagai risiko radiasi. Risiko ini biasanya dinyatakan sebagai angka tanpa dimensi per satuan dosis radiasi yang diterima.

Saat ini, tidak ada penanda biologis (*biomarker*) yang ada untuk membedakan apakah efek stokastik pada seseorang disebabkan oleh paparan radiasi atau oleh penyebab lain, atau hanya kejadian alami. Dengan kata lain, tidak ada standar spesimen biologis yang memungkinkan untuk melakukan diagnosis spesifik untuk efek stokastik pada individu. Karena alasan ini, efek stokastik tidak hanya dapat dikaitkan dengan paparan yang ditimbulkan oleh individu tertentu, tetapi juga pada paparan kolektif yang ditimbulkan pada suatu populasi (González, 2022).

D. Efek Psikososial Radiasi

Ketika berbicara tentang kecelakaan radiasi atau nuklir, yang biasanya dibahas adalah kemungkinan kerusakan fisik dan bahaya bagi kesehatan manusia, serta dampak jangka panjang terhadap lingkungan atau kesehatan masyarakat. Namun, konsekuensi psikologis dan sosial dari pengalaman traumatis akibat bencana radiasi juga perlu dipahami.

Pengalaman trauma emosional dapat menyebabkan bahaya psikologis jangka panjang bagi korban bencana dan juga bagi para perespons kecelakaan tersebut (Ansari, 2010). Oleh karena itu, kesadaran akan isu kesehatan mental penting bagi semua orang, terutama bagi mereka yang terlibat dalam merespons bencana.

Buku ini tidak diperjualbelikan

WHO juga telah menyatakan bahwa pelajaran yang dipetik dari kecelakaan radiasi dan nuklir di masa lalu telah menunjukkan adanya konsekuensi kesehatan mental dan psikososial yang lebih besar daripada dampak kesehatan fisik langsung dari paparan radiasi (WHO, 2020). Oleh karena itu, selain memberikan proteksi kepada publik terhadap kerusakan fisik dari radiasi, efek kesehatan sosial dan mental yang ditimbulkan oleh kecelakaan radiasi atau nuklir juga perlu mendapat perhatian yang mendalam.

Perbedaan konsekuensi gangguan kesehatan mental setelah terjadinya bencana alam, seperti gempa bumi atau tsunami, dan bencana teknis, seperti bencana radiasi atau nuklir, telah dipelajari oleh Lindberg et al. (2022). Meskipun bencana teknis dan alam dapat menimbulkan gejala psikologis yang luas, peristiwa radiasi dapat mengakibatkan jejak psikologis yang unik dan tidak terlihat setelah bencana alam. Penjelasan yang masuk akal adalah bahwa peristiwa kecelakaan radiasi sering terjadi tanpa peringatan sebelumnya, bahwa ancamannya tidak terlihat oleh subjek, dan bahwa efek kesehatan tidak mungkin diramalkan serta dapat menimbulkan ancaman jangka panjang bagi seluruh publik. Lebih jauh, bencana radiasi atau nuklir dapat mengakibatkan tingkat ketakutan yang lebih tinggi berdasarkan ketidakpastian tentang besarnya paparan dan efeknya terhadap kesehatan, dibandingkan dengan bencana alam.

Bencana yang terjadi pada PLTN Fukushima diketahui diawali dengan gempa bumi dengan kekuatan 9 Skala Richter, yang memicu terjadinya gelombang tsunami, dan selanjutnya membuat PLTN kehilangan daya listrik dalam sistem pendinginnya. Meskipun gempa bumi dan tsunami yang terjadi merupakan bencana besar yang berdiri sendiri, efek dari bencana nuklir berikutnya (yang tidak menyebabkan satu pun kematian "akut") tampaknya memberikan tekanan yang lebih tinggi terhadap kesehatan mental penduduk (Maeda et al., 2018). Untuk memperparah efek, tindakan perlindungan yang diambil oleh otoritas Jepang di PLTN Fukushima, dalam banyak kasus, berdampak negatif pada kehidupan sehari-hari individu dan masyarakat, sehingga memperparah tekanan mental (IAEA, 2015).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Menyusul kecelakaan PLTN Fukushima pada tahun 2011, *Fukushima Health Management Survey* mengkaji lebih dalam mengenai faktor tekanan psikososial dari bencana akibat kecelakaan PLTN tersebut. Survei berhasil mengidentifikasi faktor tekanan utama pada mereka yang terdampak bencana sebagai berikut (BfS, t.t.):

1. radiasi sebagai penyebab kecemasan tertentu;
2. hubungan mental antara kecelakaan Fukushima dan kecelakaan reaktor sebelumnya;
3. kurangnya pengetahuan mengenai penyebaran dan efek radiasi;
4. perkiraan risiko radiasi yang terlalu tinggi;
5. kekhawatiran terhadap kesehatan diri sendiri dan/atau kerabat;
6. kurangnya informasi yang dapat diandalkan mengenai bencana radiasi terkini;
7. tindakan proteksi seperti evakuasi dan pemukiman kembali, beserta konsekuensi akibat perubahan kondisi dan struktur kehidupan;
8. kritik terhadap otoritas terkait dan badan yang bertanggung jawab, dengan hilangnya kepercayaan;
9. diskriminasi dan stigmatisasi – misalnya, jika seseorang distigma sebagai "korban" atau "pengungsi" dari suatu bencana radiasi atau didiskriminasi sebagai "orang yang telah terpapar radiasi", orang tersebut akan dijauhi karena menyebabkan kecemasan pada orang lain.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab III

Kecelakaan Radiasi dan Nuklir



Pada dasarnya, sumber radiasi dan nuklir dapat digunakan sebagai senjata atau sebagai alat untuk membantu dalam meningkatkan kesejahteraan dan kesehatan manusia. Senjata berbasis radiasi dan nuklir secara sengaja disiapkan dan ditujukan untuk digunakan dalam serangan militer atau teroris, yang mampu menimbulkan bencana melalui daya rusaknya, dan yang lebih utama adalah menyebarnya kontaminasi berupa bahan radioaktif beraktivitas tinggi.

Meskipun sampai saat ini belum ada serangan teroris dengan menggunakan senjata nuklir, ancaman semacam ini tidak dapat dikesampingkan di masa mendatang. Di sisi lain, sumber radiasi yang pada dasarnya digunakan untuk tujuan damai, seperti dalam bidang industri, kedokteran, dan penelitian, berpotensi dimanfaatkan untuk tujuan terorisme dan tindak kejahatan.

Jika sumber radiasi dan nuklir yang dijadikan senjata untuk keperluan militer cukup terlindungi dari akses oleh orang-orang yang tidak berwenang, sumber yang sama yang digunakan untuk

Buku ini tidak diperjualbelikan

tujuan damai mungkin tidak selalu terlindungi secara memadai, terutama di lokasi-lokasi yang pengendalian pengawasannya kurang ketat. Hal terakhir ini khususnya berlaku dalam kaitannya dengan sumber-sumber radioaktif beraktivitas tinggi yang digunakan dalam berbagai aplikasi radiasi dan teknologi nuklir.

Dalam kaitan di atas, dapat dibedakan antara kecelakaan yang tidak disengaja dan yang disengaja. Perbedaan ini dapat dirinci lebih lanjut untuk tiap-tiap kecelakaan radiasi dan kecelakaan nuklir.

A. Kecelakaan Radiasi Tak Disengaja

Kecelakaan radiasi yang tidak disengaja disebabkan oleh kesalahan atau kelalaian manusia, serta oleh faktor alami atau teknologi, seperti gempa bumi, tumpahan, pelepasan, atau kebocoran bahan radioaktif yang dapat menyebar ke daerah sekitar dan memberikan dampak pada individu yang terpapar radiasinya. Beberapa kecelakaan radiasi tidak disengaja yang pernah terjadi, antara lain kecelakaan pada fasilitas industri, kecelakaan yang melibatkan sumber tak bertuan[2] (*orphan source*), kecelakaan pada fasilitas riset dan akademis, serta kecelakaan pada fasilitas medis.

1. Kecelakaan pada Fasilitas Industri

IAEA (2011) mencatat sedikitnya ada 80 kecelakaan pada fasilitas industri yang telah dilaporkan hingga tahun 2008. Sembilan kematian dilaporkan dalam kecelakaan ini. Semuanya terjadi di fasilitas iradiasi industri yang menggunakan sumber tertutup beraktivitas tinggi, terutama karena akses yang tidak tepat ke dalam sel panas (*hot cell*), dan kurangnya atau kegagalan mekanisme keselamatan. Setidaknya 84 orang lainnya terpapar secara berlebihan di fasilitas ini. Di industri lain, 36 pekerja terluka selama penggunaan sumber radiografi, perangkat sinar-X, dan akselerator, maupun selama

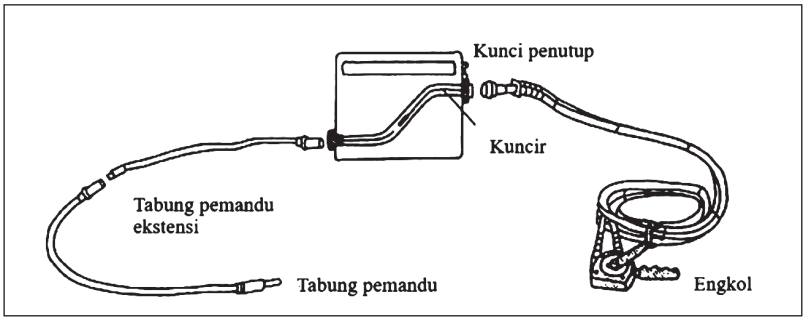
[2] UNSCEAR mendefinisikan "sumber yatim" sebagai sumber radioaktif yang tidak pernah berada di bawah kendali peraturan atau diketahui oleh badan pengawas, tetapi kemudian ditelantarkan, hilang, salah tempat, dicuri, atau dpindahkan tanpa izin (UNSCEAR, 2011).

Buku ini tidak diperjualbelikan

prosedur produksi. Diperkirakan pula adanya kemungkinan beberapa kecelakaan di fasilitas industri yang mengakibatkan kematian dan cedera yang tidak dilaporkan.

Contoh kecelakaan industri adalah kecelakaan yang terjadi pada tahun 2002 di Cochabamba, Bolivia, sekitar 400 km dari ibu kota La Paz. Kecelakaan terjadi pada bulan April 2002 dan melibatkan sumber radiografi industri Ir-192 beraktivitas 0,67 TBq (18 Ci) (IAEA, 2004). Sumber radiasi mengalami kerusakan pada jalur transfernya sehingga tidak sepenuhya dapat ditarik ke dalam kontainer pengirimannya. Sumber radiasi tersangkut di tabung pemandu, dan dalam posisi itu diangkut dari Cochabamba ke La Paz sebagai kargo pada bus penumpang umum.

Bus membawa penuh 55 orang penumpang dalam perjalanan sekitar delapan jam dari Cochabamba ke La Paz. Tidak ada pemantauan radiasi yang dilakukan selama perjalanan ini, dan pekerja yang membawanya juga tidak dilengkapi dengan dosimeter perorangan. Sumber radiasi kemudian diambil dan dipindahkan ke taksi untuk dibawa ke fasilitas penyimpanan. Di tempat terakhir ini, baru diketahui bahwa sumber radiasi tidak berada di posisi aman. Gambar 3.1 memperlihatkan skema wadah paparan yang dioperasikan dari jarak jauh dan peralatan tambahan dari sumber radiografi industri yang terlibat dalam kecelakaan di Cochabamba ini.



Sumber: IAEA (2004)

Gambar 3.1 Sumber radiografi industri. Pada kasus kecelakaan Cochabamba, selama pengangkutan sumber Ir-192 tidak berada di posisi aman, tetapi tersangkut di tabung pemandu.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Selain 55 orang penumpang bus, pekerja yang memuat dan menurunkan sumber, serta orang-orang yang terlibat dalam perjalanan taksi diperkirakan menerima paparan dari sumber radiasi. Tim IAEA yang dikirim untuk memberikan bantuan dalam penilaian dosis dan penilaian medis memperkirakan pekerja radiasi menerima dosis radiasi sekitar 0,10– 0,19 Gy, dan untuk penumpang bus kurang dari 0,19 Gy[3]. Pemeriksaan medis yang dilakukan selanjutnya tidak menjumpai adanya temuan yang spesifik pada semua orang yang diduga menerima paparan.

2. Kecelakaan yang Melibatkan Sumber Tak Bertuan

Laporan UNSCEAR tahun 2008 mencatat terjadinya 34 kecelakaan radiasi yang melibatkan sumber tak bertuan, yang mengakibatkan 42 kematian dan cedera yang merusak pada anak-anak dan orang dewasa (UNSCEAR, 2011). Kontaminasi lingkungan yang signifikan dan kontaminasi internal terhadap 129 orang terjadi dalam salah satu kecelakaan ini. Diperkirakan pula ada beberapa kecelakaan radiasi yang melibatkan sumber tak bertuan yang mengakibatkan kematian atau cedera, namun tidak dilaporkan.

Salah satu kecelakaan yang melibatkan sumber tak bertuan adalah kecelakaan yang terjadi di Goiânia Brazil. Kecelakaan terjadi saat sumber cesium-137 tertutup yang memiliki aktivitas sangat tinggi (50,9 TBq, atau 1375 Ci) dikeluarkan dari wadahnya pada pesawat teleterapi di sebuah klinik terbengkalai, lalu pecah. Kecelakaan yang terjadi pada tanggal 13 September 1987 tersebut mengakibatkan banyak orang terkena radiasi dalam dosis besar, baik melalui paparan eksternal maupun internal (IAEA, 1988a).

Empat korban akhirnya meninggal dan 28 orang menderita luka bakar akibat paparan radiasi. Ada tempat tinggal dan tempat umum

[3] Gy (atau gray) merupakan satuan untuk besaran dosis serap yang menggambarkan jumlah energi yang diterima suatu massa materi, yang dalam hal ini adalah tubuh manusia. Dosis serap tidak memberikan gambaran tentang efek kesehatan yang dapat dialami manusia, karena hal terakhir ini diberikan oleh besaran dosis efektif.

Buku ini tidak diperjualbelikan

yang terkontaminasi. Tindakan dekontaminasi pada lokasi tersebut mengharuskan pembongkaran tujuh tempat tinggal dan berbagai bangunan lainnya, serta pembuangan lapisan atas tanah dari area yang luas. Secara total, kecelakaan mengakibatkan terbentuknya limbah radioaktif dengan volume sekitar 3.500 m^3.

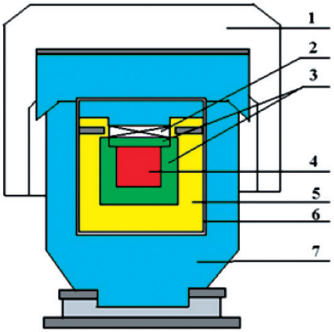
Contoh kecelakaan lain yang melibatkan sumber tak bertuan adalah kecelakaan yang terjadi di Istanbul, Turki, pada bulan Desember 1998 dan Januari 1999, ketika dua bungkusan yang digunakan untuk mengangkut sumber teleterapi Co-60 dijual sebagai besi tua. Orang-orang yang membeli dua bungkusan tersebut membukanya dan memecahkan wadah yang memiliki perisai radiasi, sehingga tanpa disadari mereka dan beberapa orang lain terpapar radiasi dari setidaknya satu sumber Co-60 yang perisai radiasinya telah dirusak (IAEA, 2000).

Sepuluh orang dewasa dirawat di rumah sakit setelah terpapar sumber Co-60. Tujuh orang didiagnosis menderita sindrom radiasi akut (SRA) dan mengalami pansitopenia berat serta gejala klinis. Semua orang yang terpapar pulih setelah menjalani perawatan intensif. Perawatan bersifat suportif dengan transfusi, faktor perangsang koloni granulosit, dan manajemen anti-infeksi yang mencakup agen antijamur. Analisis biodosimetrik mengungkapkan bahwa dosis pada seluruh tubuh berkisar antara 1–1,9 Gy. Semua subjek menunjukkan pemulihan nilai hasil uji laboratorium hematologi lengkap setelah perawatan (Engin et al., 2015).

Contoh berikutnya dari kecelakaan yang melibatkan sumber tak bertuan adalah kecelakaan yang terjadi di Lia, Georgia, pada 2 Desember 2001. Saat itu, tiga orang penduduk Desa Lia menemukan dua objek logam di hutan saat mengumpulkan kayu bakar (IAEA, 2014a). Objek logam yang ternyata merupakan sumber radiasi Sr-90 dengan aktivitas 1295 TBq tersebut merupakan bagian dari generator termoelektrik radioisotop (RTG, *radioisotope thermoelectric generator*) yang banyak digunakan di bekas negara Uni Soviet sebagai sumber listrik. Gambar 3.2 memperlihatkan desain suatu RTG.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Penyebab utama kecelakaan adalah penelantaran sumber dan ketiadaan label atau tanda radiasi yang jelas pada sumber yang memberi peringatan tentang potensi bahaya dari sumber tersebut. Sekitar 3–3,5 jam setelah kontak pertama dengan sumber, ketiga orang itu melaporkan adanya gangguan kesehatan berupa mual, sakit kepala, pusing, dan muntah, diikuti dengan sindrom radiasi kutan (CRS, *cutaneous radiation syndrome*).



Keterangan:
1. Pembuang panas
2. *Thermobattery*
3. Proteksi bagian dalam,
4. Sumber panas radionuklida
5. Isolasi panas
6. Susunan penyangga
7. Proteksi bagian luar

Sumber: IAEA (2014)

Gambar 3.2 Desain Generator Termoelektrik Radioisotop (RTG)

Manifestasi dan anamnesis klinis awal tersebut menunjukkan bahwa ketiga pasien mengalami sindrom radiasi akut (ARS, *acute radiation syndrome*) tipe hematologis. Selain itu, satu pasien juga mengalami sindrom orofaringeal transitori. Bersama dengan staf IAEA yang datang membantu, pejabat kesehatan Georgia memutuskan bahwa satu pasien dapat tetap dirawat di rumah sakit di Kota Tbilisi, Georgia, sedangkan dua pasien lainnya dikirim ke rumah sakit di Rusia dan Prancis. Dua pasien berhasil sembuh dan kembali ke rumah masing-masing, sementara satu orang meninggal pada 13 Mei 2004, tiga tahun setelah terjadinya kecelakaan (IAEA, 2014).

3. Kecelakaan pada Fasilitas Riset dan Akademis

Pada fasilitas riset dan akademis, tercatat 22 kecelakaan seperti yang dilaporkan UNSCEAR pada tahun 2008, dengan tujuh kecelakaan

Buku ini tidak diperjualbelikan

melibatkan sumber radioaktif tertutup, dan 15 kecelakaan melibatkan radiasi yang dibangkitkan oleh mesin (UNSCEAR, 2011). Kecelakaan umumnya terjadi akibat kecerobohan dalam bekerja, seperti melepaskan sumber radiasi saat penyinaran sampel, tidak mematuhi prosedur keselamatan kerja, mengabaikan kunci pengaman sehingga lampu peringatan tidak menyala, dan memasuki ruang iradiasi saat penyinaran berlangsung. Namun demikian, kecelakaan juga terjadi akibat kerusakan peralatan, cacat pada sarung tangan pelindung yang menyebabkan kontaminasi pada jari dan tangan, serta ledakan botol yang berisi zat radioaktif.

Dampak kecelakaan cukup bervariasi, meskipun bukan kematian. Sebagian besar pekerja menerima dosis radiasi sekujur tubuh antara 2,5–3 Gy dan dosis pada kulit dan tangan antara 12–100 Gy. Abdomen dan paha juga terkena paparan dengan dosis yang lebih rendah. Akibat yang paling parah adalah putusnya dua jari di satu tangan, dan putusnya satu jari di tangan yang lain. Selain itu, UNSCEAR juga menduga bahwa ada beberapa kecelakaan radiasi pada fasilitas riset dan akademis lainnya yang tidak dilaporkan (UNSCEAR, 2011).

4. Kecelakaan pada Fasilitas Medis

Kecelakaan radiasi pada fasilitas medis yang dilaporkan UNSCEAR pada tahun 2008 umumnya terjadi di fasilitas radioterapi, dengan lebih dari 100 kecelakaan (UNSCEAR, 2011). Kesalahan manusia merupakan penyebab utama kecelakaan di bidang medis. Contoh kesalahan tersebut, antara lain pemberian dosis radiasi kepada pasien atau pada lokasi yang salah, pemberian dosis yang salah akibat kesalahan dalam perencanaan penyinaran, serta kegagalan menggunakan peralatan survei/monitor sebagaimana mestinya.

Salah satu contoh kecelakaan pada fasilitas medis adalah yang terjadi di unit radioterapi Alcyon II yang menggunakan sumber Co-60 dari fasilitas radioterapi Rumah Sakit San Juan de Dios di San José, Kosta Rika. Pada tanggal 22 Agustus 1996, dilakukan penggantian sumber radiasi Co-60 yang digunakan. Namun, ketika sumber radiasi

Buku ini tidak diperjualbelikan

dikalibrasi, terjadi kesalahan dalam menghitung laju dosis dari keluaran pesawat radioterapi tersebut (IAEA, 1998a).

Kesalahan perhitungan di atas mengakibatkan pemberian dosis radiasi yang jauh lebih tinggi kepada pasien daripada yang diminta oleh dokter. Kesalahan perhitungan baru disadari pada tanggal 27 September 1996, dan pelayanan radioterapi kemudian dihentikan pada 3 Oktober 1996. Selama 32 hari tersebut, 115 orang pasien menerima tindakan dengan pesawat radioterapi yang kalibrasinya salah tersebut.

Pada 7 Juli 1997, dalam waktu sembilan bulan setelah kecelakaan, tiga orang meninggal akibat paparan berlebih dan empat orang meninggal dengan paparan berlebih sebagai kontributor utama. Selain itu, 22 orang meninggal karena penyakitnya dan bukan karena paparan radiasi. Dari pasien yang selamat yang menerima paparan berlebih, 16 orang menerima efek cukup parah dengan risiko tinggi terhadap efek di masa mendatang, 26 orang menerima efek yang tidak terlalu parah, dan 22 orang diperkirakan tidak menerima efek sama sekali (Steffens, 2017).

Pada tahun 2001, fisikawan medis yang atas kesalahannya menyebabkan terjadinya paparan radiasi berlebih tersebut didakwa dengan enam belas tuduhan pembunuhan, dan kemudian dijatuhi hukuman enam tahun penjara (Zúñiga, 2021).

5. Kecelakaan yang Terjadi setelah Tahun 2008

Beberapa kecelakaan radiasi lain juga terjadi setelah tahun 2008. Salah satu kecelakaan yang cukup penting adalah kecelakaan yang terjadi di Hueypoxtla, Meksiko, pada bulan Desember 2013. Saat itu, sebuah truk yang mengangkut sumber radiasi kobalt-60 yang sangat radioaktif dengan aktivitas 111 TBq dicuri (IAEA, 2022b). Sumber radiasi yang digunakan dalam pengobatan kanker di rumah sakit tersebut diambil dari wadah pelindungnya, lalu dibuang di daerah pedesaan. Hal ini memicu keadaan darurat karena paparan sumber radiasi dapat menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan bagi publik.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Beberapa pihak memberikan peringatan bahwa sumber radiasi yang berbahaya ini dapat digunakan oleh teroris untuk membuat "bom kotor" yang akan menyebarkan radiasi dengan meledakkan bahan peledak konvensional yang dibubuhi sumber radiasi tersebut. Pihak yang lain juga menyarankan agar tidak ada seorang pun yang diizinkan menyentuh atau berada di dekat sumber karena berisiko menyebabkan kematian. Jika dijual sebagai besi tua, seperti yang ditakutkan banyak orang, sumber radiasi dapat mencederai banyak orang jika sumber radiasi berakhir sebagai batangan baja yang digunakan sebagai bahan bangunan.

Pihak berwenang Meksiko, dengan dukungan internasional dari IAEA, melakukan operasi pencarian dan pemulihan secara intensif. Sumber tersebut kemudian ditemukan dan kemudian disimpan di tempat yang aman setelah sembilan hari pencarian.

Namun, penjelasan pihak berwenang diragukan oleh banyak orang. Skeptisisme ini didorong oleh reputasi pejabat pemerintahan Meksiko yang sering meremehkan bahaya yang dapat memengaruhi banyak orang.

Peristiwa ini menyoroti pentingnya memiliki rencana dan kemampuan tanggap darurat dan tanggap darurat yang handal untuk menangani ancaman radiologis. Meskipun Meksiko tidak memiliki rencana darurat radiologi nasional khusus pada saat itu, pelatihan sebelumnya dari Pan American Games 2011 membantu memberikan tanggapan terkoordinasi. Insiden tersebut menggarisbawahi perlunya tindakan keselamatan dan keamanan yang lebih ketat selama pengangkutan bahan berbahaya.

6. Kecelakaan Radiasi di Indonesia

Beberapa kecelakaan radiasi juga tercatat telah terjadi di Indonesia. Sampai dengan akhir tahun 2000, telah terjadi 14 insiden pada aplikasi radiasi, dengan kecelakaan yang serius terjadi pada Oktober 2000 berupa pencurian 25 unit sumber radiasi Co-60 dari gudang penyimpanannya di PT Krakatau Steel (FNCA, 2003). Dari 25 sumber

Buku ini tidak diperjualbelikan

radiasi tersebut, hanya 3 unit yang berhasil ditemukan, sementara 22 unit lainnya tidak dapat dilacak.

Seperti yang terlihat pada Tabel 3.1, pada tahun 2001, ada 6 insiden yang tercatat di BAPETEN, meskipun tidak menimbulkan dampak kesehatan pada manusia dan lingkungan. Penyebab 6 insiden ini diperkirakan adalah sebagai berikut.

a. Lemahnya pengamanan, karena wadah sumber yang disegel dapat memiliki daya tarik tertentu karena penampilannya atau nilainya yang tampak sebagai besi tua.
b. Penanganan oleh orang yang tidak memiliki pengetahuan yang memadai tentang proteksi radiasi atau peraturan.
c. Kurangnya personel proteksi radiasi di rumah sakit dan industri.
d. Kelalaian pencatatan penggunaan sumber.

Tabel 3.1 Insiden pada Aplikasi Sumber Radiasi di Indonesia pada Tahun 2001

No.	Tanggal	Insiden	Efek
1.	18 September	Iradiator karet: Kontrol panel menunjukkan Co-60 dalam posisi penyimpanan, namun sumbernya masih dalam posisi paparan	Tidak berpengaruh
2.	13 September	Eksplorasi minyak: sumber Am241-Be 16 Ci tersangkut dan Cs-137 1,7 Ci	Tidak berpengaruh
3.	4 Oktober	Eksplorasi minyak: sumber Am241-Be 16 Ci tersangkut dan Cs-137 1,7 Ci setelah jalur samping pengeboran	Tidak berpengaruh
4.	5 Oktober	Eksplorasi minyak: sumber Am241-Be 16 Ci tersangkut dan Cs-137 1,7 Ci.	Tidak berpengaruh
5.	24 Oktober	Eksplorasi minyak: sumber Am241-Be 16 Ci tersangkut dan Cs-137 1,7 Ci.	Tidak berpengaruh
6.	3 Desember	Pegangan tutup/buka sinar gamma tidak berfungsi dengan baik.	Tidak berpengaruh

Sumber: FNCA (2003)

Buku ini tidak diperjualbelikan

Kecelakaan lain terjadi pada tanggal 11 Januari 2024 sekitar pukul 18.00 ketika BAPETEN menerima pemberitahuan tentang hilangnya sumber berbahaya saat pengangkutan kamera gamma yang berisi Ir-192 (aktivitas sumber saat kejadian adalah 1917,8 GBq/51,8 Ci) di Kecamatan Jambangan, Surabaya, Jawa Timur (IAEA, t.t.-d). Peralatan ini milik perusahaan di Makassar, Sulawesi Selatan dan tipe/nomor serinya adalah LIR-05/008/AG624-8347G. Protokol nasional segera diaktifkan dan operasi pencarian segera dilakukan oleh Kompi (sekarang Detasemen) Nubika di Kepolisian Daerah Provinsi Jawa Timur.

Pada tanggal 13 Januari 2024 sekitar pukul 07.00 waktu setempat, kamera gamma telah ditemukan dan diamankan oleh kompi[4] Nubika di Kepolisian Daerah Provinsi Jawa Timur di Kecamatan Pakal, Surabaya, Jawa Timur. Peralatan tersebut masih utuh dan tidak ada peningkatan radiasi yang terdeteksi di sekitar peralatan tersebut. Kejadian tersebut melibatkan kegiatan kriminal. Berdasarkan penyelidikan kriminal, peralatan tersebut telah diserahkan kepada perusahaan pemilik di Makassar.

Kecelakaan terakhir di Indonesia menyangkut dengan temuan sumber radioaktif Cs-137 di kawasan industri di Cikande, Serang, Banten, pada pertengahan September 2025. Kasus bermula dengan ditolaknya produk udang beku yang diimpor dari Indonesia oleh otoritas Amerika Serikat (AS) di sejumlah pelabuhan besar, termasuk Los Angeles, Houston, Savannah, dan Miami (CNN Indonesia, 2025).

Pemerintah Indonesia kemudian bertindak cepat dengan membentuk Satuan Tugas Penanganan Kerawanan Bahaya Radiasi Radionuklida Cesium-137 (Satgas Penanganan Cs-137) melalui Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup (KLH/BPLH). Satgas juga melibatkan tim dari Satuan KBRN (Kimia, Biologi, Radioaktif dan Nuklir) Polri, BRIN, dan BAPETEN. Satgas melakukan survei radiasi dengan radius 2–5 km dari pusat

[4] Sejak Agustus 2024, kompi Nubika ditingkatkan statusnya menjadi Detasemen Nubika (Denzinubika).

Buku ini tidak diperjualbelikan

penemuan sumber Cs-137, dan menemukan laju radiasi lebih dari 500 μSv/jam pada salah satu titik pengukuran (KemenLH, 2025).

Dari penelusuran yang dilakukan BAPETEN, ditemukan bahwa kandungan radioaktif Cs-137 bersumber dari serbuk logam (*scrap metal*) yang menyebar ke lingkungan dari suatu pabrik pengolahan logam besi bekas (PT PMT) yang terletak tidak jauh dari pabrik pengepakan udang beku (PT BMS) yang diekspor ke AS. Serbuk logam ilegal yang terkontaminasi Cs-137 ditemukan dalam 14 kontainer dari Filipina (Ardiansyah, 2025).

Tindakan yang dilakukan Satgas selanjutnya adalah mitigasi dan dekontaminasi yang dilakukan secara intensif. Sampai akhir Oktober 2025, telah dilakukan relokasi sementara terhadap 31 keluarga dengan total 105 jiwa, dekontaminasi terhadap 22 pabrik di sekitar lokasi PT PMT, dekontaminasi pemukiman, lapak dan lahan kosong, dan pengangkatan material terkontaminasi dari berbagai titik yang mencapai 248,4 ton (Raissa, 2025). Sebanyak sembilan orang pekerja diduga terpapar zat radioaktif Cs-137 dan dirawat di Rumah Sakit Fatmawati, Jakarta Selatan, namun dalam waktu singkat telah dipulangkan ke rumah masing-masing karena paparan yang diterima tidak terlalu parah (Anshory, 2025).

Dalam perkembangan lebih lanjut, BAPETEN telah melakukan sosialisasi dampak radiasi ke masyarakat di sekitar kawasan industri Cikande (BAPETEN, 2025a), BRIN telah memasang portal monitor radiasi untuk mendeteksi radiasi pada kendaraan yang meninggalkan area kawasan industri Cikande (Gambar 3.3) (BRIN, 2025), dan Menteri Lingkungan Hidup akan menempuh jalur hukum perdata dan pidana kepada dua perusahaan (PT PMT dan PT BMS) di Cikande yang terlibat dalam kegiatan yang menimbulkan pencemaran lingkungan (Ridho & Maullana, 2025), Satgas menargetkan dekontaminasi dapat rampung paling lambat sebelum bulan Ramadan 2026 (Anshory, 2025).

Belum selesai pencemaran lingkungan dari serbuk logam yang mengandung radioaktif Cs-137 di Cikande ditangani sepenuhnya, Satgas penanganan Cs-137 kembali menemukan produk ekspor yang

Buku ini tidak diperjualbelikan

terkontaminasi zat radioaktif, yang kali ini adalah produk cengkih, di perkebunan di Lampung (Rachmawati, 2025). Kasus ini juga berawal di AS, ketika Badan Pengawas Obat dan Makanan AS (FDA) menemukan zat radioaktif Cs-137 pada produk cengkih Indonesia yang dikirim oleh PT NJS.



Sumber: BRIN (2025)

Gambar 3.3 Portal Monitor Radiasi yang Dipasang di Kawasan Industri Cikande

Tim verifikasi lapangan BAPETEN yang dikirim ke Lampung melakukan pemantauan radiasi lingkungan dan pengukuran paparan radiasi pada gudang pengepul cengkih dan kebun cengkih di Kabupaten Pesawaran (BAPETEN, 2025b). Tim menemukan kontaminasi dan paparan radiasi yang tinggi di beberapa titik pengukuran, dan juga menemukan adanya kontaminasi di beberapa produk cengkih yang tersimpan di dalam gedung penyimpanan.

Penelusuran sumber kontaminasi hingga ke distributor pupuk di Lampung tidak menemukan adanya kontaminasi pada produk pupuk

Buku ini tidak diperjualbelikan

yang ada di sana (BAPETEN, 2025b). Demikian pula, penelusuran hingga ke tiga lokasi pengolahan cengkih di Surabaya, Jawa Timur, tidak menemukan adanya kontaminasi di lokasi tersebut (Rachmawati, 2025). Hingga buku ini ditulis pada akhir November 2025, Satgas penanganan Cs-137 masih terus bekerja untuk menemukan sumber kontaminasi pada produk cengkih tersebut.

B. Kecelakaan Radiasi Disengaja

Kecelakaan radiasi disengaja adalah kecelakaan radiasi yang terjadi akibat perbuatan manusia dengan kesadaran penuh. Kecelakaan radiasi disengaja dapat meliputi hal-hal berikut ini (Sabol & Šesták, 2017).

1. Melakukan tindakan kriminal, seperti pembuangan, pelepasan, atau penyelundupan bahan radioaktif secara sengaja untuk menghindari persyaratan peraturan.
2. Melakukan sabotase atau serangan yang dimaksudkan untuk melepaskan bahan radioaktif dari pembangkit listrik tenaga nuklir atau fasilitas atau lembaga lain tempat sejumlah besar bahan ini diproduksi, digunakan, atau disimpan,
3. Melakukan tindakan teroris secara langsung untuk tujuan politik, agama, atau ideologis dengan menggunakan senjata radiologi yang mengakibatkan bahaya serius terhadap orang atau properti.

Kecelakaan radiasi disengaja yang pernah menggegerkan dunia adalah peristiwa pembunuhan Alexander Litvinenko, seorang mata-mata Rusia yang membelot ke Inggris, dengan cara diracun menggunakan polonium-210 (Po-210) yang dibubuhkan pada teh yang diminumnya dalam suatu pertemuan di Inggris pada tahun 2006 (Harrison et al., 2017).

Po-210 merupakan sumber radiasi yang memancarkan partikel alfa dengan energi sekitar 5,3 MeV (mega elektron volt) dan sinar gamma yang sangat lemah dengan energi 803 keV (kilo-elektron volt). Tidak seperti sinar gamma, partikel alfa tidak mampu menembus

Buku ini tidak diperjualbelikan

pakaian atau kulit. Dalam beberapa hal, polonium adalah racun yang sempurna. Po-210 dapat dibawa melalui bandara dan bahkan melewati detektor radiasi yang canggih tanpa terdeteksi. Berbahaya jika terhirup, disuntik, atau tertelan, Po-210 dapat meracuni korban dari dalam tubuh, sehingga menyebabkan kematian yang lambat dan menyiksa (Lerner, 2006).

Pengkajian atas masukan Po-210 pada tubuh Litvinenko dan dosis radiasi pada organ tubuhnya dilakukan dengan pengukuran radioaktivitas pada sampel jaringan hati, ginjal, limpa, paru-paru *post-mortem,* serta sampel darah dan urin (Harrison et al., 2017). Masukan melalui ingesi diperkirakan sekitar 4 GBq, dengan asumsi 10% diserap oleh darah, sehingga mengakibatkan dosis organ sekitar 20 Gy hingga 100 Gy.

Kecelakaan radiasi yang dapat dikategorikan sebagai kecelakaan radiasi disengaja juga pernah terjadi di Indonesia pada tahun 2020. Dosis radiasi sekitar 200 μSv terdeteksi di sebuah lapangan terbuka di perumahan BATAN Indah, Tangerang Selatan, pada Januari 2020 oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) (Utami et al., 2024). Dalam hal ini, sumber radiasi Cs-137 diduga sengaja dibuang di lapangan terbuka tersebut oleh pihak yang tidak bertanggung jawab (Sihombing, 2020).

Tim gabungan BAPETEN dan BATAN (Badan Tenaga Nuklir Nasional) kemudian melakukan upaya dekontaminasi dan pembersihan selama 16 hari. Tim melakukan pengambilan sampel vegetasi, air tanah, dan pemeriksaan dosis internal atau kontaminasi yang mungkin diterima oleh beberapa warga di sekitar lokasi dengan alat pencacah sekujur (WBC), serta remediasi dengan pengerukan tanah, pengurugan, pembetonan, dan penebangan vegetasi terkontaminasi. Tabel 3.2 memberikan tingkat dosis radiasi yang terdeteksi di beberapa lokasi di perumahan BATAN Indah, sementara hasil pengukuran WBC pada beberapa warga di perumahan tersebut diberikan pada Tabel 3.3.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 3.2 Tingkat Paparan Radiasi di Beberapa Lokasi di Perumahan BATAN Indah

No.	Lokasi	Kondisi Awal (31 Januari 2020) (µSv/jam)	Kondisi saat Ini (19 Februari 2020) (µSv/jam)
1.	Di permukaan tanah yang tercemar (posisi sumber cs-137)	200	5 ~ 7
2.	Di got jalan perumahan BATAN Indah terdekat dengan lokasi tercemar	0,7	0,12
3.	Di pagar luar jalan raya Serpong terdekat dengan lokasi tercemar	0,7	0,07
4.	Di rumah terdekat dengan lokasi tercemar (Cafe Titik)	0,05 ~ 0,07	0,04 ~ 0,06
5.	Di lapangan badminton/voli	0,04 ~ 0,06	0,04 ~ 0,06

Sumber: BAPETEN (2020a)

Tabel 3.3 Hasil Pengukuran WBC pada Beberapa Warga di Perumahan BATAN Indah

No.	Warga	Nilai Kontaminasi	
		Cs-137 (kBq)	Cs-137 (mSv/tahun)
1.	Warga A	-	-
2.	Warga B	-	-
3.	Warga C	-	-
4.	Warga D	-	-
5.	Warga E	-	-
6.	Warga F	-	-
7.	Warga G	0,376	0,05
8.	Warga H	-	-
9.	Warga I	0,864	0,12

Sumber: BAPETEN (2020a)

Buku ini tidak diperjualbelikan

Seperti terlihat pada Tabel 3.2, tingkat dosis radiasi pada beberapa lokasi telah turun dengan tajam setelah dilakukan dekontaminasi. Nilai dosis radiasi terukur ini sebenarnya masih dapat turun lagi, karena pada tanggal 19 Februari 2020 tersebut dekontaminasi tanah masih dalam proses dan masih terus dilanjutkan. Sebagai pembanding, tingkat dosis radiasi latar belakang di wilayah perumahan BATAN Indah umumnya sekitar 0,03–0,06 μSv/jam.

Selain itu, nilai batas dosis (NBD) untuk penduduk atau masyarakat umum adalah 1 mSv/tahun (BAPETEN, 2013). NBD sebesar 1 mSv/tahun tersebut diyakini dapat diterima oleh masyarakat tanpa menimbulkan gejala atau efek biologis yang berarti terhadap kesehatan mereka. Seperti terlihat pada Tabel 3.3, nilai kontaminasi hanya terukur pada dua dari sembilan orang warga, dan nilainya masih jauh dari NBD untuk masyarakat.

Setelah dilakukan pengukuran ulang radioaktivitas dan paparan radiasi, yang telah kembali normal sesuai paparan radiasi latar belakang, lokasi kemudian dinyatakan aman untuk digunakan warga untuk beraktivitas sehari-hari. Kepala BAPETEN secara resmi menetapkan keadaan aman ini melalui pernyataan status *clearance* pada tanggal 22 Oktober 2020 (BAPETEN, 2020b).

C. Kecelakaan Nuklir Tak Disengaja

Seperti kecelakaan radiasi tak disengaja, kecelakaan nuklir tak disengaja juga terjadi akibat kesalahan atau kelalaian manusia dalam mengoperasikan suatu fasilitas nuklir, termasuk pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Secara umum, kecelakaan nuklir tak disengaja dapat dibedakan atas kecelakaan yang berkaitan dengan program senjata nuklir, dan yang tidak berkaitan dengannya. Kedua kategori kecelakaan nuklir ini masing-masing dapat dibedakan lagi atas kecelakaan kekritisan, kecelakaan lain dengan konsekuensi hanya di tapak, dan kecelakaan dengan pelepasan ke atmosfer yang berpotensi menyebabkan paparan publik yang signifikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

1. Kecelakaan yang Terkait dengan Program Senjata Nuklir

Kecelakaan nuklir yang terkait dengan program senjata nuklir dapat dirinci lebih lanjut menjadi kecelakaan kritikalitas reaktor, kecelakaan lain dengan konsekuensi hanya di tapak, dan kecelakaan dengan pelepasan ke lingkungan yang berpotensi menyebabkan paparan ke publik yang signifikan.

a. Kecelakaan Kritikalitas Reaktor

Berdasarkan laporan UNSCEAR tahun 2008, kecelakaan kekritisan reaktor yang terkait dengan program senjata nuklir dilaporkan terjadi sebanyak 17 kali (UNSCEAR, 2011). Penyebab Kecelakaan cukup bervariasi, mulai dari kelalaian dalam percobaan menggunakan perangkat kritis, kegagalan dalam mengganti batang kendali, kebocoran katup yang berakibat transfer larutan uranium diperkaya yang tidak direncanakan, batang kendali yang diangkat terlalu cepat, tidak diikutinya prosedur operasi, kegagalan mereposisi reflektor, dan tidak dipenuhinya persyaratan keselamatan (UNSCEAR, 2011).

Sebagian besar kecelakaan kekritisan reaktor terjadi di bekas negara Uni Soviet dengan 9 kasus, disusul dengan AS dengan 8 kasus. Sebanyak 15 orang pekerja tewas, dan 34 orang mengalami gangguan kesehatan yang cukup signifikan.

b. Kecelakaan Lain dengan Konsekuensi Hanya di Tapak

Laporan UNSCEAR tahun 2008 mencatat ada 5 kecelakaan pada fasilitas dengan program senjata nuklir yang hanya berdampak di tapak. Namun, 5 orang meninggal dan 12 orang mengalami gangguan kesehatan yang cukup signifikan akibat kecelakaan ini (UNSCEAR, 2011). Gangguan kesehatan yang terjadi antara lain sindrom radiasi akut, serta kontaminasi internal dengan tritium dan Po-210.

c. Kecelakaan dengan Pelepasan ke Lingkungan

Berdasarkan laporan UNSCEAR tahun 2008 (UNSCEAR, 2011), tercatat ada 4 kecelakaan dengan pelepasan ke lingkungan yang berpotensi menyebabkan paparan signifikan ke publik. Dari keempat

Buku ini tidak diperjualbelikan

kecelakaan tersebut, kecelakaan Kyshtym di Kompleks Mayak di bekas Negara Soviet dan kecelakaan di reaktor Windscale, Sellafield, Inggris, yang keduanya terjadi pada tahun 1957 dan menjadi yang paling mendapat sorotan.

Kecelakaan Khystym terjadi ketika 740 PBq (20 MCi) radionuklida terlepas ke lingkungan akibat ledakan kimia di tangki penyimpanan limbah radioaktif (Akleyev et al., 2017). Radionuklida tersebar ke daerah seluas 20.000 km^2 pada ketinggian sekitar 1 km di kawasan Chelyabinsk dan Sverdlovk.

Kontaminasi radioaktif yang cukup parah terjadi di daerah-daerah yang paling terdampak sehingga sekitar 10.730 orang harus dievakuasi. Dari jumlah ini, evakuasi terhadap 1.154 orang dilakukan dalam waktu dua minggu setelah kecelakaan karena tingginya tingkat radiasi gamma lingkungan akibat pengendapan radionuklida berumur pendek (terutama Ce-144 + Pr-144 dan Zr-95 + Nb-95), dan sisanya selama dua tahun berikutnya karena potensi masukan Sr-90 ke dalam tubuh yang mengendap dalam bahan pangan lokal (Wakeford, 2017).

Kecelakaan di reaktor Windscale, Sellafield, Inggris, sementara itu, terjadi akibat kebakaran di reaktor yang berlangsung selama tiga hari. Kecelakaan mengakibatkan pelepasan radioiodin dan nuklida lain dalam jumlah besar ke lingkungan di Cumbria dan sekitarnya. Radionuklida I-131 yang dilepaskan diperkirakan sekitar 740 TBq, yang diikuti oleh pelepasan radionuklida Cs-137 sekitar 22 TBq, radionuklida Ru-106 sebanyak 3 TBq, radionuklida Xe-133 sebanyak 16 PBq, dan radionuklida Po-210 sebanyak 8,8 TBq (UNSCEAR, 2011).

Studi epidemiologi selama 50 tahun tentang mortalitas dan insidensi kanker di antara 471 pekerja Sellafield yang diketahui terlibat dalam memadamkan api atau dalam operasi pembersihan dilakukan oleh McGeoghegan et al. (2010). Dengan membandingkan dosis eksternal rata-rata sebesar 6 mSv yang diterima pekerja selama Oktober 1957 dengan dosis seumur hidup sebesar 320 mSv, diperoleh bahwa data statistik dari studi epidemiolog sangat rendah untuk mendeteksi adanya efek kesehatan apa pun pada para pekerja tersebut akibat kebakaran. Dengan kata lain, tidak terlihat adanya

Buku ini tidak diperjualbelikan

dampak kecelakaan di Windscale terhadap kesehatan pekerja yang terlibat dalam pemadaman api.

2. Kecelakaan yang Tidak Terkait dengan Program Senjata Nuklir

Seperti kecelakaan nuklir yang terkait dengan program senjata nuklir, kecelakaan nuklir yang tidak terkait dengan program senjata nuklir juga dapat dibedakan atas kecelakaan kekritisan reaktor, kecelakaan lain dengan konsekuensi hanya di tapak, dan kecelakaan dengan pelepasan ke lingkungan yang berpotensi menyebabkan paparan ke publik yang signifikan.

a. Kecelakaan Kekritisan Reaktor

Berdasarkan laporan UNSCEAR tahun 2008 (UNSCEAR, 2011), tercatat sebanyak 6 kecelakaan terkait dengan kekritisan reaktor. Keenam kecelakaan ini mengakibatkan terjadinya kematian sebanyak 6 orang, dan 12 orang mengalami efek kesehatan yang cukup signifikan.

Kecelakaan pada fasilitas konversi bahan bakar yang terjadi di Tokai-mura, Jepang, merupakan kejadian yang patut dicermati lebih lanjut. Kecelakaan kritikalitas terjadi pada tanggal 30 September 1999, di fasilitas uji konversi di lokasi JCO Tokai. Kecelakaan dipicu oleh penuangan larutan uranil nitrat yang diperkaya 18,8% ke dalam bejana presipitasi di luar massa kritis. Kecelakaan tersebut memberikan dosis radiasi yang serius kepada 3 karyawan dengan dua di antaranya kemudian meninggal dunia.

Dosis yang dominan bagi penduduk dan karyawan JCO berasal dari neutron dan sinar gamma yang dikeluarkan oleh bejana presipitasi. Sementara itu, kontribusi gumpalan radioaktif dapat diabaikan. Estimasi dosis individu dilakukan terhadap 234 penduduk sekitar, 169 karyawan JCO, dan 260 personel darurat dengan hasil bahwa dosis maksimum adalah 21 mSv untuk penghuni, 48 mSv untuk karyawan JCO, dan 9,4 mSv untuk personel darurat. Namun, tidak ada efek deterministik yang teramati, kecuali pada 3 orang pekerja (Tanaka, 2001).

Buku ini tidak diperjualbelikan

b. Kecelakaan Lain dengan Konsekuensi Hanya di Tapak

Laporan UNSCEAR tahun 2008 mencatat ada tiga kecelakaan yang memiliki konsekuensi di tapak, yaitu yang terjadi di Argentina, Cekoslovakia, dan Hungaria. Di Argentina, pada tahun 1977, seorang pekerja PLTN tidak menggunakan sarung tangan timbal dan menyebabkan kontaminasi pada tangannya sebesar 3800 Bq. Sementara itu, di Cekoslovakia pada tahun 1985, seorang pekerja ceroboh dengan menggunakan peralatan yang tidak memadai untuk bekerja dengan transuranik, dan menimbulkan asupan Am-241 sebesar 600 Bq melalui luka yang terbuka. Selanjutnya, pada tahun 1989 di Hungaria, seorang pekerja PLTN menangani detektor dari bejana reaktor secara ceroboh sehingga menerima dosis sekujur sebesar 29 mGy dan 1 Gy pada jari tangan kiri (UNSCEAR, 2011). Masing-masing kecelakaan mengakibatkan terjadinya efek radiasi pada satu orang yang tidak terlalu parah, tanpa ada korban yang meninggal.

c. Kecelakaan dengan Pelepasan Bahan Radioaktif ke Lingkungan

Sampai tahun 2008, terjadi tiga kecelakaan dengan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan (UNSCEAR, 2011). Salah satunya adalah kecelakaan di Tokai-mura yang telah disinggung sebelumnya. Dua kecelakaan lain adalah kecelakaan di PLTN Three Mile Island di AS, dan kecelakaan PLTN Chernobyl di Uni Soviet (sekarang berada di dalam wilayah Ukraina).

Kecelakaan PLTN Three Mile Island di Harrisburg, Pennsylvania, AS, terjadi pada bulan Maret 1979. Rangkaian kejadian yang menyebabkan kecelakaan dimulai dengan penutupan katup yang mengalirkan air ke ketel uap. Serangkaian kejadian setelah itu menyebabkan inti reaktor meleleh dan produk fisi keluar melalui katup pelepas pada sistem pengisian air primer. Sebagian besar produk fisi tertahan di dalam air, tetapi sekitar 370 PBq gas mulia, terutama Xe-133, serta sekitar 550 GBq I-131 terlepas ke atmosfer. Sementara itu, kecelakaan tersebut melepaskan sejumlah besar aktivitas dari inti reaktor yang

Buku ini tidak diperjualbelikan

gagal dan paparan yang diakibatkannya pada publik dapat diabaikan (UNSCEAR, 2011).

Kecelakaan PLTN Chernobyl yang terjadi pada tahun 1986 menewaskan dua orang pekerja segera setelah terjadi ledakan, dan 28 orang petugas pemadam kebakaran dan pekerja kedaruratan yang meninggal dalam tiga bulan pertama setelah ledakan akibat sindroma radiasi akut dan satu orang akibat serangan jantung (IAEA, t.t.-b). Seluruh penduduk Kota Pripyat yang berada hanya tiga kilometer dari tapak PLTN langsung dievakuasi dalam 36 jam setelah kecelakaan, dan secara total sekitar 200 ribu orang kemudian direlokasi. Kecelakaan diperkirakan melepaskan lebih dari 100 unsur radioaktif ke atmosfer, dengan isotop Sr-90 dan Cs-137 yang memiliki waktu paruh masing-masing 29 dan 30 tahun diyakini masih tersisa di area hingga hari ini.

Selain itu, Laporan UNSCEAR tahun 2008 (UNSCEAR, 2011) menyatakan bahwa mayoritas dari 530.000 pekerja operasi pemulihan keadaan menerima dosis antara 0,02 Gy dan 0,5 Gy selama periode 1986–1990. Kelompok tersebut masih berisiko tinggi mengalami konsekuensi lanjut seperti kanker dan penyakit lainnya serta kesehatan mereka sampai saat ini masih dipantau secara ketat. Gambar 3.4 memperlihatkan sebuah patung peringatan yang didirikan di Kota Chernobyl untuk mengenang para pekerja pemadam kebakaran dan likuidator yang gugur dalam menangani kecelakaan tersebut.

Setelah tahun 2008, kecelakaan lain yang terjadi adalah kecelakaan PLTN Fukushima yang terjadi pada 11 Maret 2011. Kecelakaan diawali dengan gempa bumi besar di Jepang Timur yang berkekuatan 9,0 Skala Richter pada pukul 2.46 siang. Gempa bumi menyebabkan kerusakan yang cukup besar di wilayah tersebut, dan tsunami besar yang ditimbulkannya menyebabkan kerusakan yang lebih besar lagi. Tsunami membanjiri sekitar 560 km^2 dan mengakibatkan sekitar 19.500 korban jiwa serta banyak kerusakan pada pelabuhan dan kota-kota pesisir, dengan lebih dari satu juta bangunan hancur atau sebagian runtuh (WNA, 2024).

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: United Nations (2022)

Gambar 3.4 Patung Peringatan yang Didedikasikan kepada Pekerja Pemadam Kebakaran sebagai Perespons Awal pada Kecelakaan PLTN Chernobyl

Sebelas unit reaktor di empat lokasi PLTN di wilayah tersebut sedang beroperasi dan semuanya mati secara otomatis saat gempa terjadi. Tiga dari 11 reaktor yang berlokasi di Fukushima Daiichi kehilangan daya pada pukul 3.42 siang, hampir satu jam setelah gempa bumi, ketika seluruh lokasi terendam banjir tsunami setinggi 15 m. Hal ini melumpuhkan 12 dari 13 generator cadangan di lokasi, serta penukar panas yang berfungsi untuk memindahkan panas buangan reaktor dan panas peluruhan ke laut. Ketiga unit tersebut kehilangan kemampuan untuk mempertahankan fungsi pendinginan reaktor dan sirkulasi air yang tepat. Peralatan listrik juga lumpuh.

Bahan radioaktif yang terlepas ke atmosfer segera setelah kecelakaan telah mencemari tanah, air, dan persediaan makanan di sekitarnya. Kecelakaan menyebabkan evakuasi sekitar 150.000 orang dari area sekitar, dan penetapan zona eksklusif dengan radius 30 km dari lokasi PLTN karena tingkat radiasi yang tinggi (Britannica, t.t.).

Sekitar 18.500 orang meninggal atau hilang akibat tsunami dan gempa bumi yang memicu kecelakaan di PLTN. Sekitar 2.300 kematian dikaitkan dengan stres, trauma, dan kondisi buruk selama proses evakuasi setelah PLTN hancur. Korban sebagian besar adalah orang lanjut usia atau orang rentan yang menderita akibat evakuasi dan pengungsian.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Sampai saat ini, belum ada temuan mengenai kematian langsung akibat paparan radiasi akut dari kecelakaan PLTN Fukushima ini. Namun, dampak kesehatan jangka panjang, termasuk peningkatan risiko kanker akibat paparan radiasi, masih terus dipantau. UNSCEAR, misalnya, secara berkala memperbarui laporannya berdasarkan temuan mutakhir mengenai kecelakaan PLTN Fukushima, menyusul laporan utama yang terbit pada tahun 2013 (UNSCEAR, t.t.).

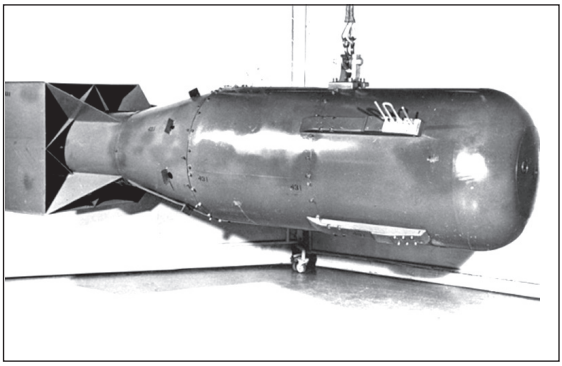
Isu mutakhir terkait kecelakaan PLTN Fukushima ini adalah rencana pembuangan air limbah ke Samudra Pasifik. Air limbah tersebut sebelumnya telah diolah di fasilitas ALPS (*Advanced Liquid Processing System*). Namun, karena kapasitas fasilitas terbatas, volumenya sudah begitu besar sehingga sebagian harus dibuang ke Samudra Pasifik. Satuan Tugas IAEA, yang anggotanya berasal dari beberapa negara, telah mengkaji rencana tersebut dari sisi keselamatan dan menyatakan bahwa Jepang dapat melaksanakan rencananya tersebut dengan aman (IAEA, t.t.-c).

Namun demikian, rencana Jepang untuk membuang air limbah ini ke Samudra Pasifik ternyata memicu kecemasan dan kemarahan, tidak hanya dari negara tetangganya, tetapi juga dari penduduknya sendiri (Wong, 2023). Komunitas setempat di Jepang menyatakan kekhawatirannya akan kontaminasi dan industri perikanan cemas bahwa konsumennya tidak akan membeli hasil tangkapannya. Cina juga telah menuduh Jepang sebagai memperlakukan Samudra Pasifik sebagai "saluran pembuangan pribadi".

D. Kecelakaan Nuklir Disengaja

Satu-satunya kecelakaan nuklir disengaja yang pernah terjadi di dunia adalah dijatuhkannya bom atom, atau bom nuklir, di Hiroshima dan Nagasaki, Jepang, oleh Amerika Serikat pada tahun 1945. Bom nuklir pertama, yang diberi julukan "Little Boy", dijatuhkan di pusat Kota Hiroshima pada tanggal 6 Agustus 1945 pukul 08.15 waktu setempat. Bom menggunakan uranium-235 sebagai bahan peledak. Gambar 3.5 memperlihatkan bentuk fisik dari "Little Boy" ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: CTBTO (t.t.)

Gambar 3.5 "Little Boy", Bom Atom yang Dijatuhkan di Hiroshima, Jepang, pada 6 Agustus 1945

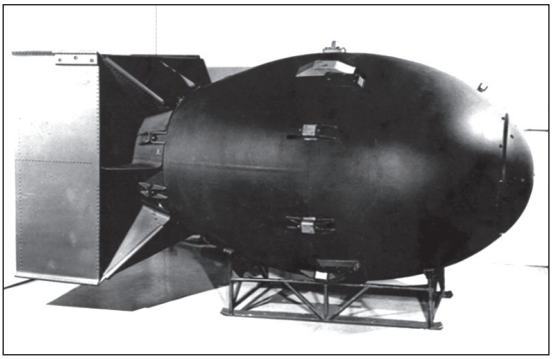
Setelah meledak, bom menghasilkan bola api yang menaikkan suhu hingga 7.000 derajat Celsius. Ledakan itu juga menghasilkan gelombang kejut yang melaju lebih cepat dari suara. Gelombang kejut ini, ditambah dengan radiasi yang dilepaskan, menewaskan ribuan orang, dan mengubah Hiroshima, kota dengan bangunan kayu dan kertas, menjadi kobaran api yang dahsyat. Setelah ledakan, hujan hitam yang lebat, yang membawa dampak radioaktif, menyebabkan kontaminasi yang meluas.

Tiga hari kemudian, pada dini hari tanggal 9 Agustus 1945, pesawat AS kedua lepas landas dari Pulau Tinian di Samudra Pasifik. Bom nuklir yang diangkut, yang bernama sandi "Fat Man", merupakan bom berbasis plutonium yang lebih canggih yang telah menjalani uji coba sebelumnya. Bom ini awalnya akan diledakkan di atas Kokura sebagai target utamanya, namun awak pesawat tersebut beralih ke Nagasaki karena adanya lapisan awan yang tebal di atas Kota Kokura (NPS, t.t.). Gambar 3.6 memperlihatkan bentuk fisik bom nuklir "Fat Man".

Korban total akibat bom nuklir di Jepang ini sulit diprediksi. Kesulitan utama dalam membuat perkiraan korban antara lain karena terjadinya kerusakan besar pada instalasi sipil (seperti rumah sakit, kepolisian, dan instansi pemerintah), kekacauan yang terjadi segera

Buku ini tidak diperjualbelikan

setelah ledakan, dan juga ketidakpastian jumlah populasi yang sebenarnya sebelum pengeboman (Atomic Archive, t.t.). Selain itu, sensus berkala Jepang tidak lengkap dan kebakaran besar yang berkobar di setiap kota menimbulkan banyak korban. Data perkiraan terbaik adalah seperti yang diberikan pada Tabel 3.4.



Sumber: CTBTO (t.t.)

Gambar 3.6 "Fat Man", Bom Atom yang Dijatuhkan di Nagasaki, Jepang pada 9 Agustus 1945

Tabel 3.4 Data Perkiraan Jumlah Korban Bom Nuklir (Orang) di Hiroshima dan Nagasaki

	Hiroshima	Nagasaki
Populasi sebelum pengeboman	255.000	195.000
Kematian	66.000	39.000
Luka	69.000	25.000
Korban total	135.000	64.000

Sumber: Atomic archive (t.t.)

Untuk memahami konsekuensi medis pada berbagai organ dan jaringan tubuh korban bom berdasarkan dosis radiasi yang diterima, Komisi Korban Bom Atom (ABCC, *Atomic Bomb Casualty Commission*) mengembangkan sistem dosimetri yang diberi kode DS65 pada

Buku ini tidak diperjualbelikan

tahun 1965. Pada tahun 1986, studi bersama oleh ilmuwan AS dan Jepang mengkaji kelemahan sistem DS65 efek dosis neutron pada tingkat perkembangan leukemia dan menggantikannya dengan sistem dosimetri DS86.

Dalam riset lebih lanjut, dijumpai perbedaan dalam perhitungan aktivasi neutron di bahan bangunan di Hiroshima, sehingga dengan metode perhitungan dan simulasi komputer yang ada pada tahun 2002, DS86 digantikan dengan DS02 (Tomonaga, 2019). Tabel 3.5 memberikan perkiraan dosis paparan pada jarak tertentu dari titik jatuhan yang dihitung dengan sistem dosimetri DS02.

Tabel 3.5 Perkiraan Dosis Paparan pada Jarak Tertentu dari Titik Jatuhan

Jarak dari Hiposentrum (m)	Jarak Miring (*Slant Distance*) dari Episentrum (m)		Sinar Gamma (Gy)	Radiasi Neutron (Gy)
0	Hiroshima	590	120	34,5
	Nagasaki	502	328	18,8
500	Hiroshima	780	35,7	6,48
	Nagasaki	709	83,0	2,97
1000	Hiroshima	1166	4,2200	0,26
	Nagasaki	1119	8,6200	0,125
1500	Hiroshima	1615	0,5270	0,00904
	Nagasaki	1582	0,9830	0,00511
2000	Hiroshima	2088	0,0764	0,00029
	Nagasaki	2062	0,1380	0,00024
2500	Hiroshima	2571	0,0125	0,00002
	Nagasaki	2550	0,0228	0,00001

Sumber: Tomonaga (2019)

Dalam perkembangan terakhir, sistem dosimetri DS02 telah diperbaiki kembali menjadi DS02 Revision 1 pada tahun 2017 (Cullings et al., 2025). Perubahan terakhir terkait dengan pengkajian dan evaluasi ulang terhadap data lokasi para penyintas, yang berimplikasi pada faktor penahan radiasi di lokasi tersebut.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Efek radiasi pada para penyintas bom nuklir di Hiroshima dan Nagasaki kemudian dipelajari secara lebih mendalam oleh Yayasan Riset Efek Radiasi (RERF, *Radiation Effects Research Foundation*), sebuah organisasi riset hasil kerja sama antara AS dan Jepang. Fokus utama program riset RERF adalah mempelajari dampak radiasi pada para penyintas bom atom di Hiroshima dan Nagasaki. RERF melakukan studi epidemiologi dan klinis mengenai status kesehatan serta mortalitas penyintas dan keturunannya.

Hasil studi sejauh ini telah mampu menjelaskan beberapa hal berikut:

1. kanker pada organ-organ tertentu telah meningkat di antara para penyintas bom atom;
2. penyakit nonkanker (katarak, tumor tiroid jinak, penyakit jantung, stroke, dll.) juga telah meningkat di antara para penyintas yang terpapar radiasi dosis tinggi;
3. para penyintas yang terpapar radiasi dosis tinggi cenderung menunjukkan penurunan sistem kekebalan tubuh yang serupa dengan yang diamati seiring bertambahnya usia;
4. banyak penyintas yang terpapar radiasi dosis tinggi menunjukkan reaksi peradangan ringan;
5. riset sejauh ini belum menunjukkan adanya efek genetik pada anak-anak penyintas bom atom; dan
6. pengamatan yang dilakukan hingga saat ini belum mengonfirmasi adanya peningkatan mortalitas atau kejadian kanker di antara anak-anak penyintas bom atom.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab IV

Jenis-Jenis Senjata Berbasis Radiasi dan Nuklir



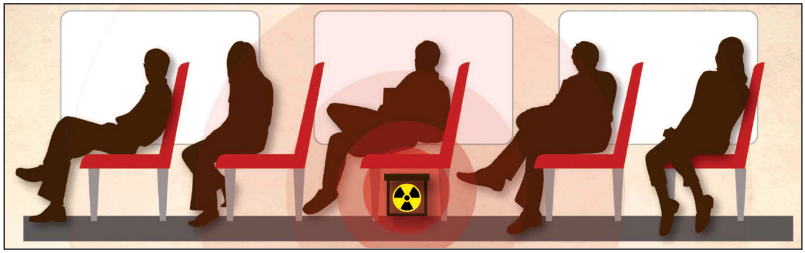
Seperti sebuah pisau yang bermata dua, radiasi dan nuklir dapat digunakan untuk tujuan positif atau negatif, serta dapat dimanfaatkan untuk tujuan kesejahteraan manusia, tetapi dapat menjadi sangat berbahaya jika digunakan untuk tujuan jahat dalam bentuk senjata. Senjata berbasis radiasi dapat berupa perangkat paparan radiasi (RED, *radiation exposure device*) dan perangkat penyebar radiologis (RDD, *radiological dispersal device*), sedangkan senjata berbasis nuklir dapat berupa perangkat nuklir rakitan (IND, *improvised nuclear device*) dan bom nuklir.

A. Perangkat Paparan Radiasi

Perangkat paparan radiasi (RED) adalah bahan radioaktif atau objek yang mengandung bahan radioaktif yang dapat memberikan paparan radiasi kepada manusia tanpa sepengetahuan mereka (CDC, t.t.). RED dapat disembunyikan di tempat umum, seperti di bawah kursi penumpang kendaraan umum, di tempat jajanan, atau di tempat ter-

Buku ini tidak diperjualbelikan

buka lainnya. Orang yang duduk atau melintas di dekat RED tersebut, dengan demikian, dapat terpapar radiasi. Gambar 4.1 memperlihatkan ilustrasi penempatan perangkat paparan radiasi (RED) ini.



Sumber: CDC (t.t.)

Gambar 4.1 Ilustrasi Penempatan RED

Dosis yang diterima manusia dari RED ini dapat bervariasi dan bergantung pada beberapa faktor seperti sifat dari bahan radioaktifnya—jenis, jumlah, dan besar aktivitasnya, jarak dari bahan radioaktifnya, lama manusia berada di dekatnya, jenis perisai radiasi (jika ada), dan bagian tubuh yang menerima dosis—seluruh tubuh atau hanya sebagian. Efek radiasi yang dapat dialami juga bervariasi sesuai dengan dosis radiasi yang diterima, mulai dari yang sedang, seperti luka bakar radiasi, hingga yang parah yang dapat mengakibatkan kematian. Namun demikian, peluang juga ada bahwa korban tidak mengalami efek kesehatan apa pun.

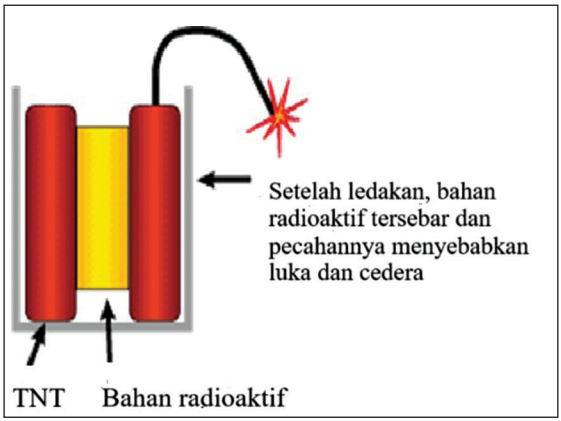
Bahan radioaktif yang dapat digunakan sebagai RED ini adalah berbagai bahan radioaktif yang biasa dimanfatkan pada beberapa bidang aplikasi, seperti di bidang medis, industri, pertanian, riset, dan berbagai bidang aplikasi lainnya. Agar berbagai bahan radioaktif tersebut tidak jatuh kepada pihak yang tidak berwenang dan digunakan untuk tujuan teror dan tindakan jahat lainnya, IAEA telah menyusun program keamanan nuklir yang bertujuan untuk melindungi manusia, harta benda, masyarakat, dan lingkungan dari konsekuensi kejadian keamanan nuklir yang berbahaya (IAEA, 2013).

Buku ini tidak diperjualbelikan

B. Perangkat Penyebar Radiologis

Perangkat penyebar radiologis (RDD) adalah jenis senjata peledak yang menggabungkan bahan peledak konvensional, seperti dinamit atau TNT, dengan bahan radioaktif (ANL, 2005). Secara umum, RDD lebih dikenal sebagai bom kotor (*dirty bomb*), walaupun RED juga merupakan contoh lain dari RDD.

Tidak seperti bom nuklir yang menyebabkan kerusakan melalui ledakan nuklir, maksud utama dari RDD adalah menyebarkan kontaminasi radioaktif ke area yang luas. Kontaminasi radioaktif yang terjadi sebenarnya tidak akan menyebabkan kerusakan berskala besar, namun hanya menimbulkan ketakutan, kepanikan, dan gangguan. Walaupun ledakan itu sendiri mungkin dapat menimbulkan korban jiwa, bahan radioaktif yang tersebar diharapkan dapat membuat area menjadi tidak aman, menyebabkan kontaminasi, serta meningkatkan risiko kesehatan jangka panjang, terutama akibat paparan radiasi. Gambar 4.2 menunjukkan konstruksi RDD yang berisi bahan radioaktif yang dipasang di antara dua alat peledak TNT.



Sumber: REMM (t.t.)

Gambar 4.2 Konstruksi RDD

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bom kotor dianggap sebagai bentuk terorisme, dan bukan senjata militer, karena dimaksudkan untuk menciptakan ketakutan dan kekacauan, bukan kematian massal. Namun, kerusakan sebenarnya dari bahan radioaktif dalam bom kotor umumnya tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan kerusakan yang disebabkan oleh ledakan itu sendiri. Dampak psikologis dan ekonomi, seperti kebutuhan akan evakuasi dan dekontaminasi, dapat menjadi sangat besar.

Seperti untuk RED, bahan radioaktif yang digunakan untuk RDD juga yang biasa digunakan dalam berbagai bidang aplikasi. Bahan radioaktif tersebut umumnya memiliki aktivitas tinggi, waktu paruh yang agak panjang, memancarkan radiasi dengan intensif, serta memiliki sifat kimia dan fisik yang relevan. Tabel 4.1 memperlihatkan sifat dari beberapa radionuklida yang dapat digunakan sebagai bom kotor.

Tabel 4.1 Karakteristik Sumber Radionuklida yang Dapat Digunakan sebagai Bom Kotor

Radionuklida	Bentuk Fisiokimia	Penggunaan Sumber dan Aktivitas Maksimal
Co-60	Logam	Iradiator sterilisasi (400.000 TBq), pesawat teleterapi (1000 TBq)
Sr-90	Keramik (SrTiO3)	Generator termolistrik radionuklida (10.000 TBq)
Cs-137	Garam (CsCl)	Iradiator sterilisasi (400.000 TBq), pesawat teleterapi (1000 TBq)
Ir-192	Logam	Sumber radiografi industri (50 TBq)
Ra-226	Garam (RaSO4)	Sumber terapi lama (5 TBq)
Pu-238	Keramik (PuO2)	Generator termolistrik radionuklida (5.000 TBq)
Am-241	Bubuk keramik mampat (AmO2)	Kegiatan well-logging (1 TBq)
Cf-252	Keramik (Cf2O3)	Kegiatan well-logging (1 TBq)

Sumber: Hudzietzová et al. (2015)

Gambar 4.3 memperlihatkan bagaimana suatu sumber radioaktif yang biasa digunakan untuk radioterapi, misalnya, setelah dicuri akan diekstraksi atau diambil dari wadah pelindungnya, lalu

Buku ini tidak diperjualbelikan

dicampur dengan peledak konvensional untuk dijadikan perangkat penyebar radiologis.



(1) (2) (3)

Keterangan:
(1) Sumber radioaktif, seperti yang digunakan di rumah sakit.
(2) Sumber radioaktif diambil dari wadah pelindungnya.
(3) Sumber radioaktif dicampur dengan peledak konvensional.

Sumber: BBC (2022)

Gambar 4.3 Ilustrasi Pembuatan RDD

Bom kotor sama sekali tidak mirip dengan bom nuklir (lihat Bagian D di bawah). Bom nuklir menciptakan ledakan yang jutaan kali lebih kuat daripada bom kotor. Bom kotor bukanlah "senjata pemusnah massal" (*weapon of mass destruction*), melainkan "senjata pengganggu massal" (*weapon of mass disruption*), karena kontaminasi dan kecemasan adalah tujuan utama para teroris. Sejumlah besar orang, misalnya, akan mengira bahwa mereka telah menerima paparan radiasi atau terkontaminasi pada tingkat yang tinggi.

Tingkat kontaminasi lokal akan bergantung pada sejumlah faktor, termasuk ukuran bahan peledak, jumlah dan jenis bahan radioaktif yang digunakan, cara penyebaran, serta kondisi cuaca (NRC, 2022). Mereka yang paling dekat dengan RDD akan paling mungkin mengalami cedera akibat ledakan tersebut. Saat bahan radioaktif menyebar, konsentrasinya akan berkurang dan menjadi kurang berbahaya. Deteksi segera jenis bahan radioaktif yang digunakan akan sangat membantu pihak yang berwenang dalam memberi tahu masyarakat tentang tindakan proteksi yang harus dilakukan, seperti berlindung di tempat, atau segera meninggalkan area tersebut. Radiasi dapat dengan

Buku ini tidak diperjualbelikan

mudah dideteksi menggunakan peralatan yang sudah dibawa oleh banyak petugas tanggap darurat.

Dari pengalaman selama ini, untungnya belum ada bom kotor yang berhasil diledakkan. Namun, upaya untuk merealisasikannya pernah dilakukan oleh pemberontak Chechnya pada tahun 1996, yang memasang perangkat RDD yang berisi dinamit dan radionuklida Cs-137 di Taman Izmailovo, Moskow, Rusia (BBC, 2022). Sebelum sempat meledak, petugas keamanan berhasil menemukan lokasi tersebut dan menjinakkan senjatanya.

Pada tahun 2002, seorang warga negara AS yang bernama Jose Padilla ditangkap di Chicago dengan tuduhan akan melakukan serangan dengan bom kotor. Dua tahun kemudian, seorang warga negara Inggris juga ditangkap di London karena merencanakan akan meledakkan bom kotor di Inggris dan AS. Kedua orang ini belum sempat merakit senjatanya saat mereka ditangkap (BBC, 2022).

Dalam salah satu serangannya ke Lebanon, Israel diduga telah menggunakan senjata yang mengandung uranium deplesi (CNN, 2024). Senjata uranium deplesi ini juga dapat dikategorikan sebagai bom kotor.

Uranium deplesi (DU, *depleted* duranium) adalah uranium yang memiliki konsentrasi U-235 lebih rendah dari uranium alami akibat proses pengayaan uranium. Karena densitasnya yang tinggi, DU dibuat menjadi amunisi dan senjata oleh Departemen Pertahanan AS pada tahun 1970-an (EPA, t.t.3). DU juga digunakan sebagai pemberat untuk menyeimbangkan pesawat, dan membentuk lapisan pelindung pada tank. Departemen Energi AS (DOE) mengoperasikan fasilitas yang memproduksi DU sebagai produk samping dari limbah, sehingga DU melimpah dan murah.

Sebagai amunisi, DU dimanfaatkan untuk menembus lapis baja yang secara umum disebut sebagai "penetrator energi kinetik". DU lebih disukai daripada logam lain karena selain densitas tinggi, juga memiliki sifat piroforik (DU menyala sendiri saat terkena suhu 600° hingga 700° dan tekanan tinggi), yang membuat DU lebih tajam saat menembus pelat lapis baja (IAEA, t.t.-a).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Saat mengenai sasaran, penetrator DU akan berpijar, pecah menjadi kepingan sangat kecil, dan membentuk aerosol partikel ("debu DU") yang ukurannya bergantung pada sudut benturan, kecepatan penetrator, dan suhu. Partikel debu halus ini dapat terbakar secara spontan di udara. Potongan-potongan kecil dapat menyala dalam api dan terbakar, tetapi pengujian telah menunjukkan bahwa potongan-potongan besar, seperti penetrator yang digunakan dalam senjata anti-tank, atau dalam beban keseimbangan pesawat, biasanya tidak akan menyala dalam api (IAEA, t.t.-a).

C. Perangkat Nuklir Rakitan

Perangkat nuklir rakitan (IND) adalah senjata nuklir yang dibeli secara ilegal, dicuri dari negara yang memiliki senjata nuklir, atau dibuat oleh kelompok teroris dari bahan senjata nuklir, seperti plutonium atau uranium dengan pengayaan tinggi, yang diperoleh secara ilegal (IOM, 2014). IND biasanya dibuat di luar program nuklir resmi yang diawasi negara dan dapat berkisar dari desain yang relatif sederhana hingga yang lebih canggih, bergantung pada keterampilan dan sumber daya yang dimiliki pembuatnya

IND merupakan masalah serius bagi keamanan global karena hal berikut ini.

1. Risiko terorisme: IND dapat digunakan oleh aktor nonnegara, seperti kelompok teroris, yang mungkin tidak memiliki akses ke senjata nuklir resmi, tetapi dapat memperoleh bahan fisil[5] dari pasar gelap atau sumber yang tidak jelas asalnya.
2. Potensi kehancuran: IND, jika berhasil diledakkan, dapat menyebabkan kerusakan besar, mirip, atau bahkan lebih besar daripada senjata nuklir tradisional, bergantung pada ukuran dan desainnya.

[5] Bahan fisil adalah bahan yang dapat menjalani pembelahan (fisi) nuklir saat ditembak neutron energi rendah. Bahan fisil yang utama adalah U-235 Pu-239 dan U-233.

Buku ini tidak diperjualbelikan

3. Jatuhan radioaktif: Selain kerusakan akibat ledakan, IND dapat melepaskan sejumlah besar bahan radioaktif, yang menyebabkan kontaminasi lingkungan jangka panjang serta menimbulkan bahaya bagi kesehatan.

Mencegah perolehan bahan fisil dan mendeteksi upaya untuk membangun perangkat semacam itu merupakan bagian penting dari upaya kontraterorisme dan nonproliferasi secara global.

Meskipun secara teoretis dapat dibuat, sampai saat ini belum ada aktor nonnegara yang berhasil merealisasikan IND tersebut. Untuk membuat IND, diperlukan tidak hanya sketsa prinsip, tetapi juga suatu cetak biru yang akurat. Bahkan, jika cetak biru dan bahan fisilnya tersedia, pembuatan IND tetap memiliki tantangan tersendiri yang sulit diatasi. Beberapa hambatan praktis tersebut, antara lain sebagai berikut (Wirz & Egger, 2005).

1. Uranium akan terbakar secara spontan di udara pada suhu 150-175°C.
2. Uranium secara kimia bersifat racun dan radioaktif, uranium dengan pengayaan tinggi akan meluruh 100 kali lebih banyak dibandingkan dengan uranium alam.
3. Saat didinginkan dari titik lelehnya (pada suhu 1132,2°C) ke suhu ruangan, uranium mengalami transisi dua fase sehingga densitasnya meningkat lebih dari 8,5%, dan perubahan densitas sebesar ini mengakibatkan perubahan massa kritisnya sekitar 18%.
4. Kecocokan kedua massa subkritis secara bersama-sama tidak mungkin diperiksa.
5. Bahan reflektor dan penekanan isostatik yang sesuai untuk membentuk reflektor harus melalui pengendalian internasional.

Secara historis, Abdul Qadeer Khan, seorang ilmuwan nuklir Pakistan yang kontroversial, tercatat pernah menyelundupkan rahasia teknologi senjata nuklir, beserta bahan dan keahliannya, ke Korea Utara, Libya, dan Iran pada akhir abad ke-20 dan awal abad ke-21 (Blastak, 2021). Kasus ini dikenal sebagai "jaringan proliferasi Khan".

Buku ini tidak diperjualbelikan

Jaringan ini terungkap pada tahun 2003 ketika Libya secara sukarela membongkar program senjata nuklirnya dan membuka rinciannya kepada IAEA dan AS. Pada tahun 2004, Khan mengakui secara terbuka peranannya pada jaringan penyelundupan nuklir, dengan mengklaim bahwa tindakannya dilakukan tanpa melibatkan pihak mana pun.

Namun demikian, banyak yang meragukan apakah Khan bertindak sendiri. O'Clary, misalnya, seperti dikutip oleh Singh (2009), berpendapat bahwa satu-satunya alasan Khan dapat menyebarkan teknologi senjata nuklir adalah karena adanya gangguan (*breakdown*) dalam struktur komando dan kontrol antara militer dan lembaga sipil Pakistan.

Berdasarkan bukti kuat yang ada (*prima facie*), Khan memang bertindak sendiri tanpa pengawasan. Namun, argumennya agak cacat karena tidak mempertimbangkan birokrasi dan budaya politik yang ada di Pakistan. Yang pasti, jaringan proliferasi Khan merupakan contoh buruk dari transfer gelap teknologi nuklir, dan membuat umat manusia makin meyakini pentingnya pengendalian proliferasi nuklir pada tingkat global.

D. Bom Nuklir

Senjata nuklir, yang juga dikenal sebagai senjata atom atau bom nuklir, adalah alat peledak yang memperoleh daya rusaknya dari reaksi nuklir. Reaksi ini melepaskan sejumlah besar energi dalam bentuk ledakan, panas, dan radiasi, yang dapat menyebabkan kerusakan yang hebat di wilayah yang luas.

Bom nuklir adalah senjata paling berbahaya di dunia. Senjata nuklir dapat menghancurkan seluruh kota, berpotensi membunuh jutaan orang, serta membahayakan lingkungan alam dan kehidupan generasi mendatang melalui dampak bencana jangka panjang. Meskipun bom nuklir hanya digunakan dua kali dalam peperangan—dalam pemboman Hiroshima dan Nagasaki pada tahun 1945—sekitar 13.400 senjata dilaporkan masih ada di dunia kita saat

Buku ini tidak diperjualbelikan

ini dan telah ada lebih dari 2.000 uji coba nuklir yang dilakukan hingga saat ini (UNODA, t.t.-a).

Sekitar 85% energi bom nuklir menghasilkan ledakan dan guncangan udara, dan energi panas, sementara 15% sisa energinya dilepaskan dalam bentuk berbagai jenis radiasi nuklir. Dari sekitar 15% sisa energi ini, 5% merupakan radiasi nuklir awal, yang didefinisikan sebagai yang dihasilkan dalam waktu sekitar satu menit setelah ledakan, dan sebagian besar berupa sinar gamma dan neutron. Sementara itu, 10% terakhir dari total energi fisi merupakan radiasi nuklir residual, atau tertunda, yang dipancarkan selama jangka waktu tertentu. Radiasi residu sebagian besar disebabkan oleh radioaktivitas produk fisi yang terdapat dalam residu senjata, atau puing-puing, serta jatuhan radioaktif setelah ledakan (Atomic Archive, t.t.).

Dengan kekuatan penghancurkannya yang sangat besar, senjata nuklir menjadi salah satu jenis senjata pemusnah massal yang sangat menakutkan. Sidang Umum PBB pada tahun 1977, melalui resolusi A/RES/32/84-B, menegaskan definisi senjata pemusnah massal (WMD, *weapons of mass destruction*) sebagai "… senjata peledak atom, senjata berbahan radioaktif, senjata kimia dan biologis yang mematikan, dan setiap senjata yang dikembangkan di masa depan yang memiliki karakteristik yang sebanding dalam efek merusaknya dengan senjata atom atau senjata lain yang disebutkan sebelumnya" (UNRCPD, t.t.).

Meskipun demikian, peluru kendali dengan hulu ledak nuklir di dunia saat ini masih cukup banyak (Arms Control Association, 2024). Pada tahun 2024, diperkirakan negara-negara pemilik senjata nuklir memiliki lebih dari 12.100 hulu ledak nuklir, dengan masing-masing 5.748 di AS, 5.580 di Rusia, 225 di Inggris, 290 di Prancis, 500 di Cina, 90 di Israel, 170 di Pakistan, 172 di India, dan 50 di Korea Utara.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab V

Respons terhadap Bencana



Sesuai dengan uraian pada Bab III dan Bab IV, bencana radiasi dan nuklir memiliki dimensi yang sangat luas dan beragam. Di satu sisi, kecelakaan radiasi dan nuklir dapat terjadi kapan saja, meskipun lokasinya barangkali terbatas pada suatu fasilitas radiasi atau nuklir. Namun, penggunaan senjata berbasis radiasi dan nuklir dapat terjadi di mana saja dan kapan saja, sesuai dengan intensi teroris yang menggunakannya.

Meskipun barangkali teroris di Indonesia belum cukup canggih untuk dapat merakit bom kotor, bahan radioaktif dapat saja dicuri dari fasilitas radiasi dan kemudian digunakan untuk menimbulkan kekacauan serta kecemasan di kalangan publik. Sementara itu, garis pantai Indonesia yang begitu panjang dan tidak sepenuhnya dapat diawasi dapat menjadi salah satu titik lokasi untuk menyelundupkan bahan nuklir yang selanjutnya dapat digunakan untuk membuat suatu perangkat nuklir rakitan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Dengan kemungkinan bencana radiasi dan nuklir yang dapat terjadi di mana saja dan kapan saja, setiap orang dengan demikian diharapkan mengetahui apa yang harus dilakukan untuk melindungi diri sendiri dan keluarga, serta meminimalkan dampak bahaya radiasi yang berpotensi serius. Dalam sebagian besar keadaan bencana, anggota masyarakat sebenarnya adalah perespons awal karena mereka dapat mengambil tindakan yang membantu, sering kali sangat penting, sebelum petugas yang berwenang datang untuk memberikan bantuan dan pertolongan yang dibutuhkan.

Bab ini dimulai dengan meninjau tindakan perlindungan diri yang sangat penting. Uraian selanjutnya diberikan mengenai respons yang dapat dilakukan oleh perorangan—baik sebagai orang awam maupun sebagai profesional—respons yang dapat dilakukan oleh suatu fasilitas radiasi jika bencana terjadi di fasilitas tersebut, atau oleh komunitas jika bencana terjadi di tengah masyarakat; dan terakhir, respons dari otoritas yang berwenang sesuai tugas dan fungsi yang diberikan melalui peraturan perundang-undangan yang berlaku.

A. Metode Perlindungan Diri

Tindakan perlindungan diri dapat dibagi menjadi tindakan proteksi terhadap radiasi eksternal dan tindakan proteksi terhadap radiasi internal.Tindakan proteksi radiasi eksternal dilakukan terutama dalam kondisi pemanfaatan bahan radiasi atau nuklir yang normal, sementara tindakan protektif diambil terutama jika terjadi kecelakaan.

1. Proteksi Radiasi Eksternal

Proteksi radiasi eksternal mengacu pada metode dan praktik yang dirancang untuk melindungi individu dari paparan radiasi yang berasal dari luar tubuh. Hal ini penting dalam lingkungan kerja yang menggunakan radiasi, seperti fasilitas medis (ruang sinar-X atau terapi radiasi), iradiator, radiografi industri, PLTN, atau laboratorium riset. Prinsip utama perlindungan radiasi eksternal mengikuti konsep serendah-rendahnya yang dapat dicapai (ALARA, *as low as reasonably achievable*), yang bertujuan untuk meminimalkan paparan radiasi melalui tiga metode berikut.

Buku ini tidak diperjualbelikan

a. Waktu

Makin singkat waktu paparan radiasi, makin rendah dosis yang diterima. Oleh karena itu, batasi waktu saat berada di dekat sumber radiasi untuk mengurangi paparan.

b. Jarak

Makin besar jarak antara seseorang dan sumber radiasi, makin kecil paparan radiasi yang diterima. Hal ini disebabkan karena adanya hukum kebalikan jarak pangkat dua, yang menyatakan bahwa tingkat radiasi berkurang dengan kuadrat jarak dari sumber. Sebagai contoh, ada sumber radiasi sejauh 1 m dari Anda. Jika Anda menjauh dua kali lipat, atau jaraknya menjadi 2 m, tingkat radiasinya berkurang menjadi seperempat dari semula . Atau, jika berada sejauh 10 m dari sumber radiasi, tingkat radiasinya akan berkurang menjadi seperseratus dari semula

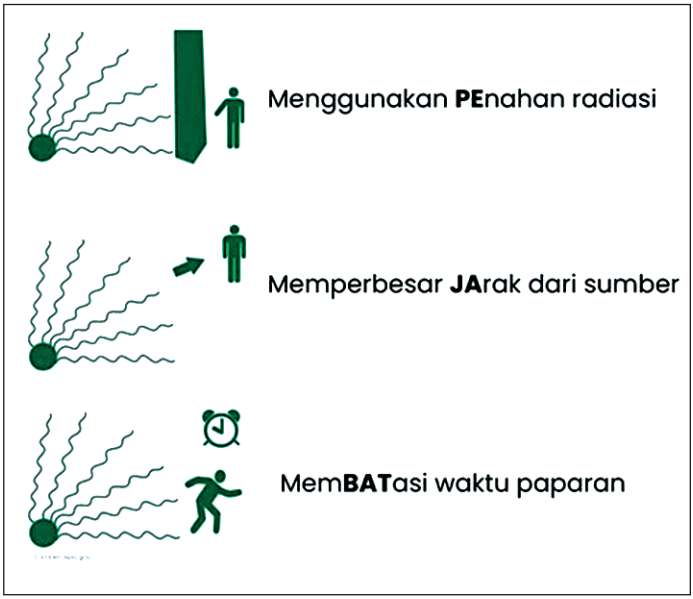
c. Penghalang Fisik

Tingkat radiasi akan menurun saat melewati beberapa jenis penghalang karena sinar atau partikel radiasi berinteraksi dengan atom-atom bahan penghalang dan kehilangan sebagian atau seluruh energinya. Penghalang dapat berupa apron timbal, penghalang bergerak (*mobile*), atau dinding yang terbuat dari beton atau timbal. Berdiri di belakang penghalang atau meletakkan material penghalang di antara Anda dan sumber radiasi akan memberikan perlindungan yang dibutuhkan.

Ada banyak contoh yang dapat diberikan untuk mengilustrasikan penggunaan penghalang fisik ini. Teknisi gigi, misalnya, dapat meletakkan apron timbal di dada Anda sebagai pasien saat mengambil rontgen gigi agar bagian tubuh lain tidak terpapar radiasi. Radiografer berdiri di belakang dinding berlapis timbal saat mengambil gambar CT pasien untuk menghindari paparan radiasi. Tempat perlindungan (*shelter*) melindungi Anda dari radiasi dengan daya tembus yang kuat yang dipancarkan oleh partikel jatuhan yang mengendap di luar tempat perlindungan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Ketiga konsep dalam tindakan proteksi radiasi eksternal ini secara sederhana sering disebut "PEJABAT", yang merupakan singkatan dari (a) menggunakan PEnahan radiasi, (b) memperbesar JArak dari sumber radiasi, dan (c) memBATasi waktu paparan, atau paparan. Secara grafis, konsep 'PEJABAT' disajikan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Konsep "PEJABAT" untuk Proteksi Radiasi Eksternal

Namun, konsep "PEJABAT" di atas hanya berlaku untuk sumber radiasi yang secara fisik cukup kecil, atau yang biasa disebut sebagai "sumber titik". Jika ukuran sumber radiasinya cukup besar, seperti genangan yang menyebabkan kontaminasi, hukum kebalikan jarak pangkat dua tidak berlaku. Tingkat radiasi memang berkurang jika Anda menjauh dari tepi daerah yang terkontaminasi, tetapi pengurangan tersebut tidak secepat jika sumber radiasinya berbentuk titik.

Dalam keadaan kecelakaan ketika sejumlah besar bahan radioaktif tersebar di area yang cukup luas, Anda tidak dapat segera menjauh dari area yang terkontaminasi. Anda perlu mengambil

Buku ini tidak diperjualbelikan

langkah-langkah perlindungan lain, seperti yang dijelaskan lebih lanjut berikut ini.

2. Tindakan Protektif

Tindakan protektif adalah tindakan yang diambil untuk mencegah atau mengurangi paparan radiasi selama keadaan darurat di fasilitas nuklir, seperti reaktor riset, PLTN, dan instalasi pengolahan bahan bakar nuklir. Tindakan ini sangat penting jika terjadi kecelakaan yang melibatkan bahan radioaktif yang terlepas ke lingkungan dan bertujuan untuk melindungi kesehatan masyarakat umum serta meminimalkan risiko bahaya akibat bahan tersebut. Tindakan protektif utama yang dapat dilakukan adalah berlindung (*sheltering*), pemberian tablet kalium iodida (KI), dan evakuasi.

a. Berlindung

Berlindung adalah tindakan awal jika terjadi kecelakaan yang menyebabkan pelepasan radioaktivitas ke lingkungan. Orang-orang disarankan untuk tetap berada di dalam ruangan, menutup jendela, pintu, dan sistem ventilasi untuk mencegah masuknya bahan radioaktif dalam bentuk partikel aerosol maupun gas. Dalam hal ini, bangunan memberikan perlindungan yang cukup efektif terhadap radiasi.

b. Pemberian Tablet Kalium Iodida (KI)

Jika terjadi pelepasan yodium radioaktif (seperti yang terjadi pada kecelakaan nuklir), tablet kalium iodida (KI) dapat didistribusikan kepada penduduk yang tinggal di sekitar fasilitas nuklir untuk menghalangi penyerapan yodium radioaktif oleh kelenjar tiroid.

Tablet KI juga dapat didistribusikan di fasilitas publik terdekat, seperti kantor polisi, rumah sakit dan apotek, sehingga penduduk dapat dengan cepat mengonsumsinya jika terjadi kecelakaan. Hal ini dapat mengurangi risiko kanker tiroid, terutama pada anak-anak dan dewasa muda. Pendistribusian langsung ke masyarakat dalam kondisi normal tidak dianjurkan karena ada kekhawatiran bahwa penduduk akan mengonsumsinya sebagai suplemen atau sebagai tindakan preventif terhadap potensi paparan radiasi sebelum kecelakaan terjadi.

Buku ini tidak diperjualbelikan

c. Evakuasi

Dalam kasus kecelakaan nuklir, evakuasi sering kali menjadi langkah pertama untuk memindahkan orang dari area dengan dosis radiasi yang tinggi. Pindah ke lokasi yang jauh dari sumber radiasi dapat mengurangi paparan, terutama jika sumbernya menyebar, seperti pada teror dengan senjata radiasi atau kecelakaan PLTN.

B. Respons Perorangan

Banyak orang yang secara keliru berpandangan bahwa jika mereka terpapar radiasi atau jika bahan radioaktif mengenai kulit mereka, tidak ada yang dapat dilakukan selain pasrah pada kematian. Namun demikian, sebenarnya seseorang dapat mengambil langkah-langkah sederhana dalam hampir semua kasus untuk mengurangi atau menghilangkan paparan radiasi yang diterimanya. Berikut ini beberapa respons perorangan sederhana dapat dilakukan jika menjumpai sumber radiasi tak dikenal, terjadi ledakan bom kotor, terjadi ledakan nuklir, dan terjadi kecelakaan PLTN.

1. Sumber Radiasi Tak Dikenal

Proteksi radiasi merupakan suatu ilmu yang diberikan secara terbatas hanya kepada mereka yang akan bekerja dengan sumber radiasi atau bahan nuklir. Oleh karena itu, sebagian besar masyarakat umum tidak memiliki pengetahuan tentang proteksi radiasi, atau lebih tepatnya tentang apa yang harus dilakukan jika dihadapkan pada situasi yang melibatkan paparan radiasi.

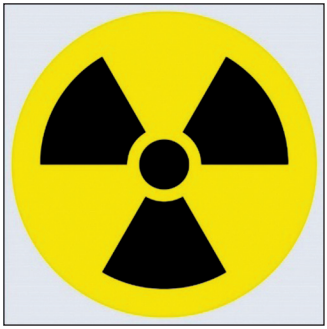
Jika Anda sebagai orang awam mencurigai ada barang atau benda tidak bertuan, yang barangkali saja berisi RED atau RDD, jangan pernah berusaha untuk menyentuh atau memindahkan barang atau benda tersebut. Laporkan segera temuan Anda ke petugas kepolisian terdekat, atau barangkali supir kendaraan umum yang Anda sedang naiki. Minta agar mereka segera menghubungi otoritas yang berwenang untuk menyelidikinya. Beritahu orang-orang yang ada di sekitar untuk menjauh, jika perlu pasang tanda peringatan agar

Buku ini tidak diperjualbelikan

mereka tidak mendekat. Anda juga harus segera menjauhi barang atau benda tidak bertuan tersebut untuk menghindari hal-hal yang tidak diinginkan, seperti menerima paparan dari sumber radiasi yang ada di dalam RED tersebut, atau bahkan mungkin ledakan dari RDD yang waktu meledaknya telah diatur oleh teroris yang meletakkan RDD tersebut.

Ada kemungkinan juga bahwa Anda menemukan suatu barang atau benda yang diberi lambang seperti yang diberikan pada Gambar 5.2. Lambang tersebut adalah lambang radiasi yang memberikan peringatan tentang keberadaan bahan radioaktif di dalamnya. Lingkaran di tengah trefoil melambangkan sebuah atom dan bilahnya melambangkan tiga jenis radiasi yang terpancar dari atom tersebut, yaitu radiasi alpha (α), radiasi beta (β), dan radiasi gamma (γ).

Suatu bahan radioaktif dapat saja tercecer atau tertinggal di suatu lokasi kerja yang menggunakan bahan radioaktif tersebut. Bahan radioaktif ini terlihat seperti potongan logam kecil yang mengilap dan tampak tidak berbahaya. Namun, kecelakaan tragis dapat terjadi jika seseorang mengambilnya karena mengira bahan atau barang tersebut bernilai jual, menaruhnya di saku, lalu membawanya pulang.



Sumber: Platonova. (2024)

Gambar 5.2 Lambang Radiasi

Buku ini tidak diperjualbelikan

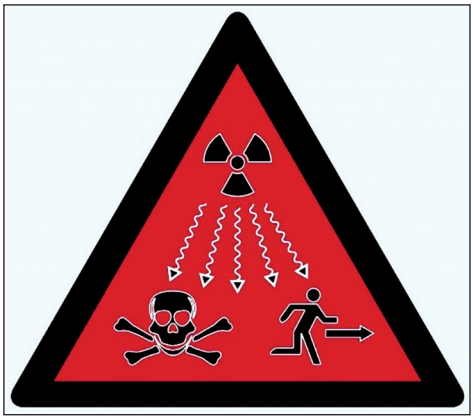
Terhadap bahan radioaktif ini, tindakan yang sama seperti terhadap barang atau benda tidak bertuan juga harus dilakukan. Jika Anda menemukan bahan radioaktif ini di lokasi kerja, beritahu pengawas kerja atau manajer lokasi dan meminta mereka untuk mengamankan bahan radioaktif tersebut. Jika tanpa sengaja Anda menyentuhnya, jangan pernah menyentuh wajah Anda atau makan sebelum Anda mencuci tangan dengan air hangat dan sabun yang lembut, jika ada. Jika tanpa sengaja Anda telah menyentuh wajah, cuci wajah dengan air hangat dan sabun yang lembut.

Namun demikian, perlu diketahui bahwa kejadian bahan radioaktif tercecer atau tertinggal seperti ini jarang terjadi. Selain itu, bahan radioaktif yang secara fisik cukup kecil umumnya hanya memancarkan radiasi tingkat rendah dan tidak akan menimbulkan bahaya yang besar. Bagian terpenting yang perlu diingat dari instruksi ini adalah jangan pernah menyentuh barang atau benda yang tidak dikenal dan mencurigakan, dan terlebih jangan pernah memungut atau menjadikan barang atau benda tersebut sebagai mainan anak-anak.

Jika Anda ke rumah sakit dan melihat ada lambang radiasi ini di depan pintu suatu ruangan, dipastikan di dalam ruangan tersebut terdapat bahan radioaktif atau mesin pembangkit radiasi seperti pesawat sinar-X. Anda tidak boleh memasuki ruangan tersebut, kecuali jika ditemani oleh petugas yang berwenang. Namun, jika Anda berdiri atau duduk di luar ruangan tersebut, Anda dijamin tetap berada dalam keadaan aman.

Satu lambang radiasi lain yang perlu diketahui adalah lambang radiasi tambahan seperti yang terlihat pada Gambar 5.3. Lambang radiasi tambahan berisi gambar gelombang radiasi, tengkorak dan manusia yang berlari. Secara universal, lambang dapat dipahami sebagai "Bahaya"—Jangan Disentuh—Lari Menjauh. Lambang tambahan ini khusus dirancang untuk memberi peringatan lebih keras agar tidak terjadi paparan kecelakaan dari sumber radiasi yang berada di dalamnya dan memiliki aktivitas yang tinggi.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: Platonova (2024)

Gambar 5.3 Lambang Radiasi Tambahan

IAEA menyatakan agar lambang tersebut tidak dipasang pada permukaan luar bungkusan pengiriman, peti kemas, atau alat angkut sumber radioaktif, atau pada pintu masuk gedung, tetapi digunakan untuk sumber radioaktif, perisai radiasi, atau dipasang di dalam wadah perangkat sumber. Dengan kata lain, lambang tambahan tersebut sebenarnya tidak terlihat selama penggunaan normal, tetapi dapat dilihat jika ada yang mencoba membongkar sumber radioaktif tertutup yang ada di dalamnya, sebagai peringatan terakhir untuk mencegah agar radiasi pengion terpancar secara tidak tanpa terkendali.

2. Ledakan Bom Kotor

Seperti telah disinggung pada Bab III, ledakan bom kotor dimaksudkan terutama untuk menimbulkan kekacauan dan kecemasan. Ledakan mungkin dapat menyebabkan sejumlah kematian akibat kekacauan yang timbul, namun tingkat radiasi yang diterima oleh mereka yang selamat dari bom itu tidak bersifat fatal. Selain itu, mereka yang berada di lokasi ledakan sebenarnya tidak segera menyadari adanya bahan radioaktif yang menyertai ledakan tersebut. Keberadaan bahan radioaktif hanya akan terdeteksi oleh perespons profesional

Buku ini tidak diperjualbelikan

yang membawa alat ukur radiasi dan melakukan pengukuran segera setelah mereka tiba di lokasi kejadian.

Respons yang dapat dilakukan bergantung pada posisi saat ledakan terjadi. Respons yang dapat dilakukan jika berada di atau dekat lokasi kejadian akan berbeda dengan respons jika berada cukup jauh dari ledakan. Namun, di mana pun posisi Anda, segera laporkan ledakan yang terjadi ke petugas kepolisian terdekat, atau petugas pemadam kebakaran jika terjadi kebakaran yang cukup besar.

a. Berada Di atau Dekat Lokasi Kejadian

Jika Anda kebetulan berada atau dekat dengan lokasi kejadian saat ledakan terjadi, respons yang dapat dilakukan, antara lain berikut ini (Ansari, 2010).

1) Segera tutup hidung dan mulut Anda dengan lapisan kain yang ada, lalu segera berlari dan masuk ke gedung yang kokoh dan tidak akan akan terdampak oleh ledakan. Gedung dengan kriteria ini adalah gedung yang dinding, pintu, dan jendelanya tampak kokoh dan tidak mudah runtuh.
2) Jika tidak ada gedung kokoh di dekat lokasi, lari menjauh dari lokasi kejadian ke arah yang berlawanan dengan arah angin yang bertiup sampai menemukan gedung sejenis dan masuk ke dalamnya.
3) Jika Anda sedang berada di dalam kendaraan saat ledakan terjadi, segera tutup jendela, hentikan kendaraan, lalu lari ke gedung terdekat yang kokoh.
4) Jika Anda harus tetap ada di dalam kendaraan dan tidak bisa keluar, pastikan jendela tetap tertutup dan matikan pendingin udara/AC.

Setelah berada di dalam gedung yang kokoh, segera tutup pintu, jendela, dan ventilasi, serta matikan pendingin udara dan peralatan lain yang dapat membawa udara keluar-masuk ke dalam gedung. Selain itu, pastikan terdapat cukup udara untuk bernapas dan usahakan agar suhu ruangan tidak terlalu panas. Nyalakan pendingin udara

Buku ini tidak diperjualbelikan

atau buka jendela sekali-kali jika suhu sudah terlalu panas. Lebih baik menerima paparan radiasi dalam jumlah kecil dibandingkan dengan menderita kepanasan dan mati lemas karena tempat berlindungnya terlalu tertutup rapat.

Selama di dalam gedung, Anda juga jangan makan dan minum dari makanan dan minuman yang telah tersaji di meja dalam keadaan terbuka. Makanan dan minuman yang terbuka mungkin saja telah tercemar oleh debu radioaktif akibat ledakan. Jangan lupa untuk memantau televisi, internet, atau alat komunikasi lain untuk memperbaharui informasi tentang kondisi di luar gedung. Petugas yang berwenang juga akan menggunakan jalur komunikasi ini untuk memberitahu kapan Anda dapat keluar dari gedung, atau barangkali untuk meminta Anda bersiap untuk dievakuasi ke lokasi lain.

b. Berada agak Jauh dari Lokasi Ledakan

Suara ledakan yang cukup kuat, yang berasal dari ledakan bom kotor, dapat terdengar dari jarak yang agak jauh. Karena risiko kesehatan langsung dari bom kotor adalah ledakannya, jika Anda berada di dalam gedung, tetaplah berada di dalamnya sampai ada instruksi lain dari institusi yang berwenang. Jika sumber radioaktif yang digunakan pada bom kotor cukup besar, orang yang berada dalam radius hingga 3 km akan diminta untu tetap berada di dalam gedung sampai kepulan debu radioaktifnya sudah berlalu.

Bergantung pada situasi di lapangan, setelah kepulan debu berlalu institusi yang berwenang mungkin akan meminta Anda untuk di-evakuasi. Area yang dievakuasi umumnya berada dalam radius sekitar 1,6 km dari titik ledakan. Jika anak Anda sedang berada di lingkungan sekolah saat ledakan terjadi, biarkan ia berlindung di dalam gedung sekolahnya sampai institusi yang berwenang mengizinkannya untuk dibawa pulang ke rumah.

Jika Anda berada pada jarak beberapa kilometer dari titik ledakan, Anda mungkin hanya terdampak sangat sedikit, atau bahkan tidak terdampak sama sekali. Namun, Anda tetap harus memantau informasi dari institusi yang berwenang. Jika saat ledakan angin

Buku ini tidak diperjualbelikan

sedang berhembus cukup kencang, ada kemungkinan orang yang berada dalam radius 160 km akan menerima sejumlah residu bahan radioaktif yang cukup kecil. Orang yang berada di area tersebut bisa diminta untuk direlokasi sementara hingga area tersebut dibersihkan.

Sangat penting untuk dipahami bahwa pemberitahuan resmi dari institusi yang berwenang untuk melakukan relokasi tidak berarti bahwa semua orang harus segera bergegas ke jalan utama untuk meninggalkan kota. Evakuasi yang terlalu tergesa-gesa dapat mengakibatkan macet dan tabrakan, yang berujung pada kecelakaan dan bahkan kematian. Pengalaman Fukushima menunjukkan bahwa pemerintah Jepang pada tahun 2012 memperkirakan sebanyak 573 orang meninggal tidak langsung akibat tekanan fisik dan mental selama evakuasi, dan bahkan bertambah menjadi 2.313 orang setelah dilakukan kajian yang lebih cermat pada tahun 2020 (Ritchie, 2017).

3. Ledakan Bom Nuklir

Bab III telah menguraikan bahwa senjata berbasis nuklir dapat berupa perangkat nuklir rakitan atau bom nuklir itu sendiri. Ledakan bom nuklir memberikan konsekuensi penyebaran bahan radioaktif ke lingkungan yang jauh lebih dahsyat dibandingkan dengan ledakan bom kotor.

Secara spesifik, beberapa bahaya yang diakibatkan oleh ledakan senjata berbasis nuklir adalah sebagai berikut (ICRP, t.t.-a).

a. Kilatan cahaya terang yang cukup untuk menyebabkan kebutaan sementara sejauh 10 km atau lebih merupakan indikasi ledakan bom nuklir.
b. Gelombang termal—Segera setelah ledakan, bola api dari gas yang sangat panas menghasilkan gelombang termal yang dapat berlangsung selama beberapa detik dan menyebabkan kulit terbakar, cedera mata, serta menyalakan bahan yang mudah terbakar seperti tumbuhan dan bangunan kayu, yang dapat terjadi hingga beberapa kilometer dari lokasi ledakan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

c. Gelombang ledakan—Bola api yang mampu menghancurkan beberapa blok kota dan gelombang ledakan merusak bangunan sejauh beberapa kilometer. Bahkan pada jarak beberapa kilometer, sumber bahaya dapat berasal dari pecahan kaca jendela dan puing yang beterbangan.

d. Radiasi awal dari bola api—Radiasi awal dari bola api dapat menyebabkan cedera atau kematian bagi mereka yang berada di tempat terbuka dalam jarak beberapa km dari ledakan.

e. Radiasi sisa dari jatuhan—Jika ledakan terjadi di dekat permukaan tanah, bahan radioaktif yang dihasilkan oleh ledakan akan bercampur dengan tanah dan puing. Bola api menarik material ini hingga beberapa kilometer ke atmosfer sebelum jatuh kembali ke permukaan Bumi. Diperlukan waktu 10 menit atau lebih agar material jatuh dan mencemari tanah. Material jatuh ini paling berbahaya dalam jarak puluhan kilometer dari ledakan selama beberapa jam pertama.

Faktor penyebab kerusakan tambahan adalah gelombang elektromagnetik yang menghasilkan lonjakan tegangan pada jaringan listrik, jaringan telekomunikasi, serta berbagai peralatan elektronik. Pasokan listrik, air ledeng, dan makanan dapat sangat terpengaruh selama berminggu-minggu. Jaringan seluler, internet, TV lokal, dan radio FM juga dapat terpengaruh, meskipun stasiun radio AM jarak jauh akan tetap beroperasi.

Respons yang dilakukan jika terjadi ledakan bom kotor pada prinsipnya juga digunakan jika terjadi ledakan akibat bom nuklir. Hanya saja, waktu Anda berada di dalam gedung, misalnya, akan lebih lama, bahkan mungkin lebih dari satu bulan.

Jika Anda terjebak di luar dan tidak dapat segera masuk ke dalam gedung, beberapa tindakan yang dapat dilakukan, antara lain berikut ini.

a. Jangan melihat kilatan atau bola api, karena hal itu dapat membutakan mata Anda.

b. Berlindunglah di balik apa pun yang dapat melindungi.

Buku ini tidak diperjualbelikan

c. Berbaringlah di tanah dan tutupi kepala Anda. Jika ledakan terjadi agak jauh, mungkin diperlukan waktu 30 detik atau lebih agar gelombang ledakan mengenai sasaran.
d. Tutupi mulut dan hidung Anda dengan masker, kain, atau handuk. Ini dapat membantu mengurangi jumlah partikel berbahaya yang Anda hirup.
e. Segera mencari tempat perlindungan, meskipun Anda berada beberapa kilometer dari lokasi terjadinya serangan, karena debu radioaktif dapat terbawa angin hingga ratusan kilometer.

Tempat perlindungan yang dimaksud adalah sama dengan yang dimaksud dalam memberikan respons terhadap bom kotor, yaitu gedung kokoh dengan dinding, pintu, dan jendelanya cukup kuat dan tidak akan mudah runtuh. Tempat perlindungan ini juga harus cukup nyaman dan dapat dipasok dengan berbagai kebutuhan hidup bagi mereka yang mungkin akan lama tinggal dalamnya.

Jika Anda sedang berada di dalam gedung saat ledakan terjadi, hindari berada di dekat pintu dan jendela, karena ada kemungkinan gelombang ledakan dapat menghantam pintu dan jendela, sehingga dapat membahayakan mereka yang berada di dekatnya.

- **Persiapan untuk Bertahan di Tempat Perlindungan**

Manusia tidak pernah mengetahui kapan suatu bencana radiasi atau nuklir akan terjadi. Namun, beberapa barang berikut diharapkan dapat tersedia di tempat perlindungan untuk dapat bertahan dan berkomunikasi dengan dunia luar, yaitu berikut ini.

a. Kit peralatan bertahan hidup, termasuk senter dengan baterai ekstra, *power bank*, dan radio AM dengan baterai cadangan.
b. Kit P3K (pertolongan pertama pada kecelakaan) dengan perlengkapan untuk merawat cedera dan luka bakar, serta obat harian yang diperlukan.
c. Persediaan air minum botol (dua liter per hari per orang) dan air untuk mencuci dan dekontaminasi (dua sampai dengan empat liter per hari per orang) untuk beberapa hari, paling tidak untuk

Buku ini tidak diperjualbelikan

satu atau dua minggu. Jika ada hewan peliharaan, jangan lupa menyediakan kebutuhan air untuk hewan ini.

d. Bahan makanan yang awet atau tahan lama, untuk beberapa hari.

e. Pakaian dan sepatu cadangan.

4. Kegiatan Pendukung Terkait

Baik dalam peristiwa terjadinya ledakan bom kotor maupun ledakan bom nuklir, korban kemungkinan dapat mengalami kontaminasi dan juga menjalani hidup di tempat berlindung selama beberapa waktu. Bagian ini akan menguraikan tindakan praktis yang dapat dilakukan untuk dekontaminasi tubuh dan agar dapat tenang selama berada di tempat berlindung.

a. Dekontaminasi Perorangan

Jika Anda terkontaminasi atau merasa terkontaminasi oleh bahan radioaktif saat berada di luar gedung, selama dan setelah ledakan, bersihkan diri segera untuk menghilangkan bahan radioaktif yang mungkin menempel di tubuh Anda. Untuk ini, lakukan tindakan dekontaminasi sebagai berikut.

1) Lepaskan dengan segera seluruh pakaian luar Anda, masukkan ke kantong plastik khusus, atau kantong apa pun yang tersedia di lokasi.
2) Segel atau ikat kantong tersebut dan beri label yang berisi informasi mengenai nama Anda, tanggal dan waktu pengumpulan, lokasi pengumpulan, serta pasang lambang radiasi di luarnya (jika ada).
3) Letakkan kantong sejauh-jauhnya dari manusia dan hewan sehingga radiasi yang dipancarkannya tidak menyinari orang dan hewan yang ada di sekitar.
4) Pastikan tidak ada debu yang berasal dari pakaian luar yang dilepaskan tersebut yang terhirup.

Buku ini tidak diperjualbelikan

5) Setelah tiba di gedung, segera bergegas ke kamar mandi yang ada, buka seluruh pakaian dalam Anda, lalu mandi dengan air mengalir. Air mandi tidak boleh terlalu panas karena dapat mempercepat penyerapan bahan radioaktif, dan juga tidak boleh terlalu dingin karena akan menutup pori-pori kulit yang sebelumnya mungkin sudah dimasuki bahan radioaktif.
6) Gunakan sabun lembut dan juga sampo, jika perlu, untuk melepaskan kotoran yang sulit lepas hanya dengan air yang mengalir.
7) Jangan menggosok atau menggaruk kulit, dan juga jangan gunakan kondisioner pada rambut Anda karena kondisioner akan mengikat bahan radioaktif ke rambut Anda, sehingga rambut Anda tidak mudah terbilas.
8) Hembuskan napas keluar dari hidung Anda dengan lembut, seka kelopak mata dan bulu mata Anda dengan kain basah yang bersih, dan juga seka telinga Anda dengan lembut.
9) Jika Anda tidak dapat mandi, gunakan tisu basah atau kain basah yang bersih untuk menyeka kulit Anda yang tidak tertutup pakaian.

b. Mengatasi Kejenuhan di Tempat Perlindungan

Berdiam diri selama berhari-hari di tempat perlindungan pasti akan menimbulkan rasa jenuh. Kejenuhan dapat terjadi karena tindakan berdiam diri telah mengganggu rutinitas kehidupan, serta mengganggu kegiatan dalam menjalankan tanggung jawab merawat anak dan keluarga. Dapat dimengerti jika kemudian orang menjadi mudah gugup atau tidak nyaman di tempat perlindungan.

Reaksi pribadi seseorang selama masa-masa sulit umumnya bersifat unik secara emosional. Reaksi mereka yang pernah terpaksa berlindung sangat bervariasi, mulai dari perasaan tertekan hingga ketidakpastian atau bahkan ketakutan. Selama berada di tempat perlindungan, reaksi emosional dapat berupa (American Red Cross, t.t.):

Buku ini tidak diperjualbelikan

1) kecemasan, terutama saat terpisah dari keluarga;
2) ketidakpastian tentang berapa lama berlindung di tempat perlindungan;
3) kekhawatiran akan keselamatan fisik diri sendiri dan orang lain;
4) kebingungan atau frustrasi karena pertanyaan yang ada di kepala tidak terjawab oleh pernyataan pejabat publik atau media;
5) rasa bersalah karena tidak dapat memenuhi tanggung jawab, seperti pekerjaan, mengasuh anak, atau merawat tanggungan;
6) perasaan bosan atau terisolasi; dan
7) pikiran untuk menyalahkan orang lain, khawatir, atau takut.

Untuk mengatasi kejenuhan yang menimbulkan reaksi emosional seperti di atas, beberapa tindakan dapat diambil, antara lain sebagai berikut.

1) Senantiasa mencari informasi terkait ledakan, terutama dari sumber berita lokal, namun perlu adanya pembatasan karena terlalu banyak informasi akan dapat memperbesar rasa tertekan, ketidakpastian dan kecemasan, terutama pada anak-anak.
2) Jaga kesehatan emosional Anda selama berlindung dengan mengingat bahwa berbagai perasaan yang muncul merupakan hal yang biasa. Ingat pula bahwa orang lain juga mengalami reaksi emosional dan mungkin membutuhkan bantuan Anda untuk mengatasinya.
3) Jaga agar kebutuhan kesehatan fisik Anda terpenuhi. Saat berlindung selama lebih dari beberapa jam, ingatlah untuk makan, beristirahat, dan minum obat yang diresepkan secara teratur. Hindari penggunaan alkohol atau obat-obatan terlarang.
4) Fokuskan pikiran pada tindakan positif yang dapat dilakukan, seperti membuat daftar pasokan yang diperlukan selama berlindung, memperoleh informasi yang akurat, dan memberikan dukungan kepada orang lain.

Buku ini tidak diperjualbelikan

5) Usahakan untuk tetap menjaga kontak dengan keluarga, teman, dan orang-orang di sekitar Anda. Telepon dan internet akan sangat membantu jika terpaksa berpisah secara fisik.
6) Bayangkan hasil terbaik yang akan dapat terjadi dan gunakan kelebihan yang Anda miliki untuk membantu diri sendiri dan orang lain agar tetap kuat secara emosional.
7) Jalankan ritual keagamaan dan/atau spiritual yang menurut Anda dapat memberikan kenyamanan dan kekuatan emosional.
8) Bantu anak Anda atau anak orang lain untuk melakukan kegiatan yang kreatif, sehat, dan menggembirakan yang dapat mengisi waktu mereka selama berada di tempat berlindung.
9) Jika hewan peliharaan juga ikut bersama Anda di tempat berlindung, perlu diingat bahwa perilakunya hewan juga dapat berubah. Untuk itu, Anda juga harus tetap memperhatikan dan memenuhi kebutuhan mereka.

C. Respons Profesional

Siapakah orang yang disebut sebagai profesional itu? Berdasarkan *Kamus Besar Bahasa Indonesia* VI daring, salah satu pengertian *profesional* adalah orang yang terlibat atau memenuhi kualifikasi dalam suatu profesi (KBBI, t.t.). Oleh karena itu, seorang profesional dalam arti luas adalah individu siapa saja yang terlatih dengan baik dan tahu persis apa yang harus dilakukan dalam profesinya, dan mampu melakukannya dengan baik setiap hari.

Dalam kaitannya dengan kegiatan merespons suatu peristiwa ledakan radiasi atau nuklir, seorang profesional tentunya merupakan seseorang yang pernah menerima informasi mengenai proteksi radiasi sebagai bagian dari pendidikan dan pelatihan yang diikutinya. Seorang profesional seperti ini dianggap telah memahami secara teknis apa yang harus segera dilakukan jika terjadi ledakan radiasi atau nuklir tersebut.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pada uraian terdahulu, telah disinggung bahwa ledakan radiasi atau nuklir yang terjadi paling tidak harus segera dilaporkan kepada petugas kepolisian atau petugas pemadam kebakaran setempat. Untuk ini, Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) telah secara aktif memberikan pelatihan dan bimbingan teknis untuk menangani situasi kedaruratan nuklir kepada anggota kepolisian satuan Brimob sebanyak 3 sampai 4 kali per tahun sejak tahun 2010 (BPHN, 2023). Bimbingan teknis yang sama juga telah diberikan kepada petugas Direktorat Jenderal Bea dan Cukai Kementerian Keuangan, petugas Kompi Zeni Nuklir, Biologi dan Kimia (Nubika) TNI AD, petugas Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), dan petugas Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD).

Ledakan senjata radiasi atau bom nuklir kemungkinan besar akan menimbulkan banyak korban luka. Profesional medis merupakan petugas yang paling relevan untuk melakukan triase, yaitu proses memilah pasien berdasarkan tingkat kegawatan luka atau cedera. Dengan kata lain, triase berfungsi untuk memastikan korban atau pasien mendapatkan penanganan yang cepat dan tepat, dan untuk meminimalkan cedera dan kegagalan selama proses penyelamatan pasien.

Profesional yang pertama kali tiba di lokasi ledakan biasa disebut pula sebagai perespons awal (*first responder*). Profesional atau perespons awal dapat memberikan pertolongan pertama kedaruratan untuk korban yang terluka. Paparan radiasi atau kontaminasi bahan radioaktif tidak menimbulkan tanda atau gejala dengan segera, sehingga jika korban pingsan, mengalami luka bakar, atau terlihat tertekan, cari penyebab lain selain radiasi.

Secara umum, tindakan yang dapat dilakukan profesional sebagai perespons awal sambil menunggu datangnya tim perespons yang lengkap dari institusi yang berwenang adalah sebagai berikut.

1. Perhatikan bahaya konvensional yang terjadi di lokasi kejadian (api, asap, uap, zat kimia, listrik, dan sebagainya) dan cari korban.
2. Jika alat ukur radiasi tersedia, lakukan pengukuran tingkat radiasi yang ada.

Buku ini tidak diperjualbelikan

3. Jika terjadi ledakan dan diduga akibat bom kotor, jangan sekali-kali mencoba memungut dan/atau melakukan kontak langsung dengan bahan radioaktif yang tersebar karena ledakan. Selama bahan radioaktif dalam keadaan utuh, tidak akan ada bahaya kontaminasi.
4. Beritahu Tim Tanggap Darurat Lapangan dari institusi yang berwenang dan jelaskan lokasi kejadian serta situasi yang terjadi (jika hal ini belum dilakukan).
5. Jika lokasi kejadian bebas dari bahaya konvensional, cek kondisi semua korban. Jika ada korban dengan luka parah yang dapat mengancam jiwa, selamatkan korban ini terlebih dahulu ke tempat aman.
6. Lakukan pertolongan pertama pada korban. Prosedur penyelamatan jiwa, termasuk resusitasi jantung paru (CPR, *cardiopulmonary resuscitation*), penghentian pendarahan, dan stabilitasi patah tulang, hanya boleh dilakukan oleh profesional yang telah terlatih untuk melakukannya, karena jika dilakukan oleh pihak yang tidak terlatih hanya akan memperparah kondisi korban.
7. Untuk menghindari kemungkinan paparan radiasi yang tak terduga atau ledakan susulan, lakukan tindakan penyelamatan jiwa dalam jarak sekitar 1 m dari perangkat yang terpapar radiasi, atau sekitar 100 m dari bom kotor atau bom nuklir.
8. Jangan pindahkan korban luka parah, kecuali jika ada bahaya yang dapat mengancam jiwanya di lokasi kejadian (seperti kebakaran). Jika korban mengalami patah tulang belakang atau luka yang mengancam jiwa, pemindahan dapat memperburuk kondisinya melebihi situasi bahaya yang ada.
9. Tetap berada di dekat korban hingga Tim Tanggap Darurat Lapangan tiba.
10. Jelaskan secara singkat kondisi dan situasi yang ada kepada Tim Tanggap Darurat Lapangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Profesional diharapkan juga dapat melakukan penilaian situasi di lokasi kejadian (IAEA, 2006). Penilaian situasi pertama dilakukan dengan melakukan pengamatan dari jarak jauh (minimal 30 m) untuk melihat kemungkinan adanya bom yang belum meledak, pesan ancaman tertulis, perangkat yang mungkin akan digunakan untuk menyebarkan kontaminasi radioaktif, teroris yang bersenjata api, serta hal-hal lain yang mencurigakan. Apabila ledakan senjata berbasis radiasi atau nuklir ini merupakan kegiatan teroris atau kriminal, asumsikan bahwa pelakunya masih berada di kerumunan masyarakat umum.

Selanjutnya, lakukan kajian situasi. Tentukan area darurat yang tidak boleh dimasuki oleh pihak yang tidak berkepentingan, serta atur posisi atau area untuk melakukan tindakan lanjutan, seperti pencatatan jumlah korban, triase, pemantauan tingkat radiasi pada korban, dekontaminasi, serta penyimpanan limbah dan penyimpanan mayat korban, jika ada. Selain itu, hindari juga penggunaan telepon seluler dan komunikasi radio sampai area dibersihkan dari bahan peledak, serpihan bom, dan jebakan yang mungkin dipasang oleh teroris. Rekam dan simpan semua tindakan yang telah dilakukan.

Tindakan yang dilakukan oleh profesional berakhir dengan datangnya tim perespons yang lengkap, baik yang berasal dari tingkat provinsi maupun dari tingkat pusat. Saat penyerahan tanggung jawab penanganan korban, profesional dapat memberitahukan semua tindakan yang telah dilakukannya, termasuk menyerahkan semua catatan dan rekaman terkait tindakan tersebut.

D. Respons Institusi yang Relevan dan Berwenang

Hal yang dimaksudkan dengan institusi yang relevan adalah institusi yang kegiatannya melibatkan pemanfaatan sumber radiasi atau bahan nuklir, sementara institusi yang berwenang adalah instansi pemerintah atau entitas lain yang secara legal memiliki kemampuan dan kewenangan untuk melakukan tindakan penanggulangan keadaan darurat radiasi atau nuklir sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Sesuai dengan persyaratan perizinan pemanfaatan sumber radiasi atau bahan nuklir, suatu institusi yang kegiatannya melibatkan kedua jenis pemancar radiasi ini—sumber radiasi dan bahan nuklir, diharuskan memiliki program proteksi dan keselamatan radiasi, yang salah satu butirnya adalah rencana penanggulangan keadaan darurat. Rencana keadaan darurat mencakup, antara lain, personel yang akan melaksanakan penanggulangan sesuai dengan kompetensi dan pelatihan yang telah diterima. Dengan alasan ini, institusi yang relevan diyakini memiliki kemampuan untuk melakukan tindakan penanggulangan bencana akibat ledakan senjata radiasi atau nuklir.

Instansi yang berwenang dapat dikatogorikan berdasarkan wilayah kewenangannya. Instansi yang berwenang di tingkat pusat adalah Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), sementara di tingkat daerah adalah Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD).

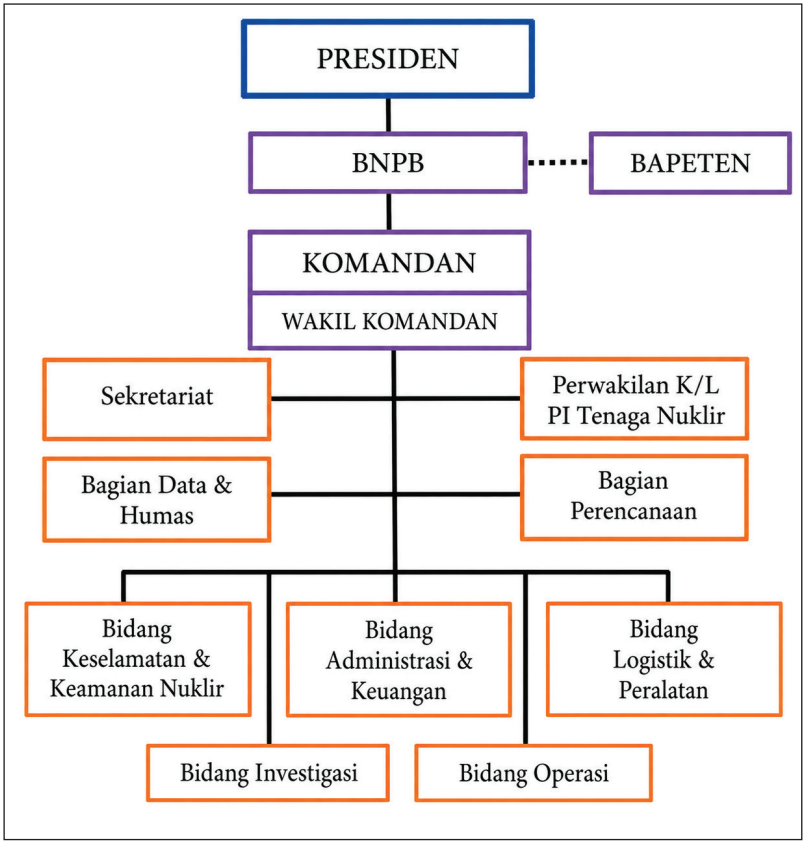
BNPB dan BPBD merupakan instansi yang bertugas menyelenggarakan kegiatan penanggulangan bencana. Jika terjadi kecelakaan radiasi atau ledakan nuklir di dekat institusi yang relevan, BPBD dapat mengundang tim kedaruratan institusi untuk membantu penanganan bencana. Jika bencana akibat ledakan berdampak luas dan melibatkan dua provinsi atau lebih, BPBD dapat menyerahkan kewenangan penanggulangan kepada BNPB.

Dalam rangka kesiapsiagaan dan tanggap darurat untuk penanggulangan bencana akibat kecelakaan radiasi atau ledakan nuklir, baik BPBD maupun BNPB diharapkan telah memiliki mekanisme organisasi yang selalu siap dan dapat dikerahkan setiap saat ke daerah atau lokasi terjadinya kecelakaan atau bencana. Namun, karena bencana radiasi atau nuklir sangat spesifik, dalam penanggulangan bencana akibat kecelakaan radiasi atau ledakan bom nuklir, BNPB dapat menyerahkan kewenangan teknis kepada BAPETEN, meskipun tetap bertanggung jawab penuh atas tindakan penanggulangan yang dilakukan.

Untuk ini, BAPETEN telah menyusun Organisasi Tanggap Darurat Nuklir Nasional (OTDNN) pada tingkat pusat dan Organisasi Tanggap Darurat Daerah (OTDND) pada tingkat daerah. Sejalan dengan kebijakan BNPB tentang sistem komando yang tertuang

Buku ini tidak diperjualbelikan

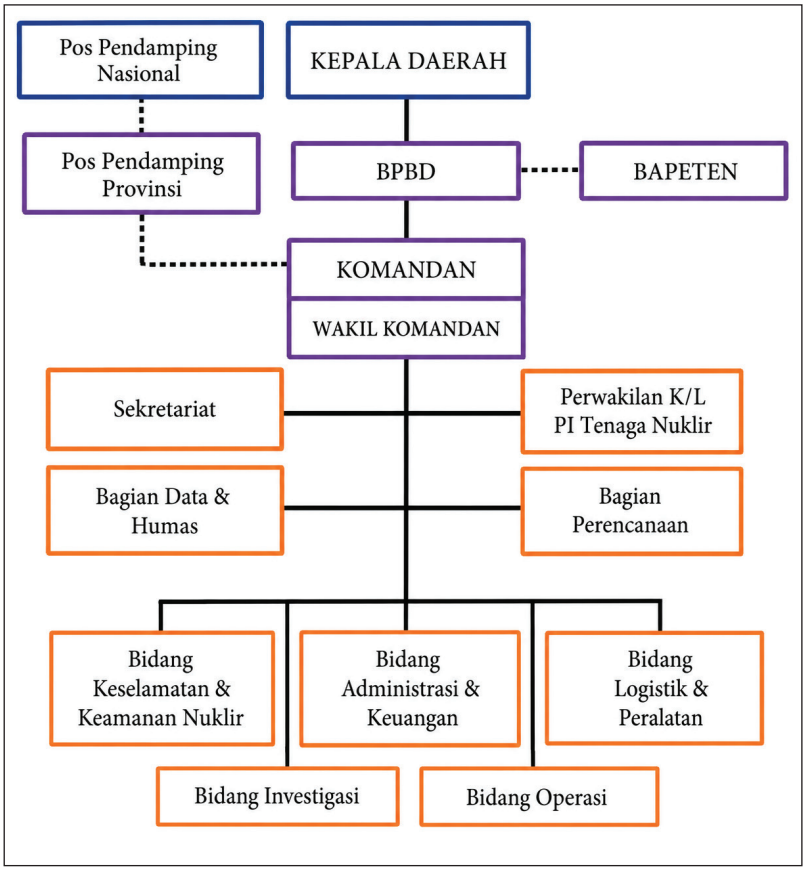
dalam Peraturan Kepala BNPB Nomor 5 Tahun 2016 tentang Sistem Komando Penanganan Darurat Bencana, pelaksanaan penanggulangan bencana akibat kecelakaan radiasi dan ledakan nuklir juga dilakukan melalui pos komando tanggap darurat bencana nasional dan daerah. Struktur organisasi pos komando tanggap darurat bencana tingkat pusat dan daerah masing-masing disajikan pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5.



Sumber: BAPETEN (2021)

Gambar 5.4 Struktur Organisasi Pos Komando Tanggap Darurat Bencana Nasional

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: BAPETEN (2021)

Gambar 5.5 Struktur Organisasi Pos Komando Tanggap Darurat Bencana Daerah

Keterlibatan kementerian, lembaga pemerintah nonkementerian (LPNK) dan organisasi pemerintah lainnya dalam organisasi pos komando tanggap darurat bencana nasional adalah sebagai berikut:

1. Bagian Data dan Humas: BNPB, BAPETEN, dan Kemenkomdigi;
2. Bagian Perencanaan: BNPB, BAPETEN, BRIN, BMKG, BAPPENAS;

Buku ini tidak diperjualbelikan

3. Bidang Keselamatan dan Keamanan Nuklir: PusZiAD-Nubika TNI, Polri (KBR, Polwil), BAPETEN, BRIN (Pengkaji Radiologik), BMKG, BNPT;
4. Bidang Operasi: OPD (Disdamkar, Dinkes, Dishub, DisLH), TNI, Polri, Basarnas, kemenkes, kemenhub, KLHK, Kementan, KemenPUPR, BPOM, KKP;
5. Bidang Investigasi: Polri;
6. Bidang Logistik dan Peralatan: BNPB, Kemensos, Kemendagri, KemenPUPR;
7. Bidang Administrasi dan Keuangan: BNPB, Kemendagri, Kemenkeu.

Untuk organisasi pos komando tanggap darurat bencana daerah, keterlibatan kementerian, lembaga pemerintah nonkementerian (LPNK) dan organisasi pemerintah lainnya diberikan sebagai berikut:

1. Bagian Data dan Humas: BPBD, BAPETEN, Diskomdigi;
2. Bagian Perencanaan: BPBD, BAPETEN, BRIN, BMKG, BAPPEDA;
3. Bidang Keselamatan dan Keamanan Nuklir: PusZi Nubika TNI, Polri (KBR, Polwil), BAPETEN, BRIN (Pengkaji Radiologi), BMKG, BNPT;
4. Bidang Operasi: Polri;
5. Bidang Logistik dan Peralatan: BPBD, Dinsos, Dinas PUPR;
6. Bidang Administrasi dan Keuangan: BPBD.

Untuk bencana radiasi atau nuklir yang dapat dikendalikan dan berdampak hanya pada fasilitas nuklir, organisasi tanggap darurat cukup terdiri atas ketua, pengendali operasi, pelaksana operasi, dan pengkaji radiologi. Ketua umumnya dipegang oleh pimpinan fasilitas. Pengendali Operasi dipimpin oleh manajer atau kepala bidang yang menyelenggarakan kegiatan terkait keselamatan, keamanan, dan lingkungan (KKL). Pelaksana Operasi dapat dilakukan olehpersonel lintas bagian dan bidang, sedangkan Pengkaji Radiologi dilaksanakan oleh staf bidang KKL yang ditunjuk khusus untuk melakukan pengkajian radiologi.

Buku ini tidak diperjualbelikan

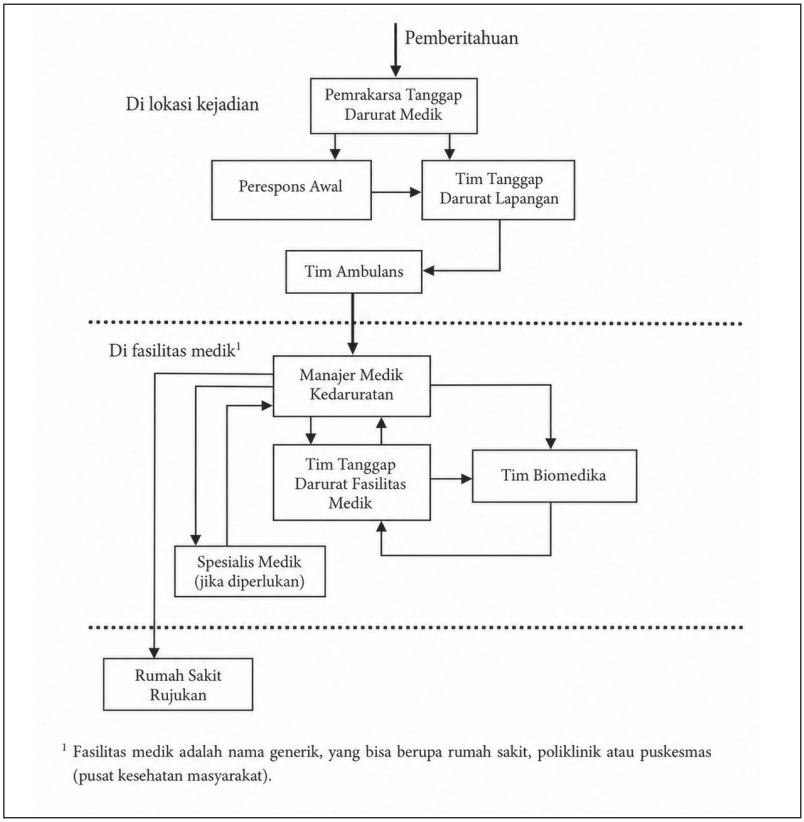
Agar organisasi pos komando tanggap darurat bencana dapat berfungsi secara penuh, setiap kementerian, LPNK, dan organisasi pemerintah lainnya perlu menunjuk stafnya yang akan berfungsi secara penuh dalam organisasi pos komando tersebut. Setelah itu, organisasi dapat menyusun seluruh prosedur serta melengkapi bahan serta peralatan yang dibutuhkan untuk kelancaran upaya tanggap darurat bencana radiasi atau nuklir ini.

Namun demikian, untuk melakukan tindakan penanggulangan dari sisi medis, organisasi pos komando tanggap darurat bencana belum sepenuhnya beroperasi. Untuk itu, diperlukan suatu organisasi lain yang memang dimaksudkan untuk merespons secara medis bencana radiasi atau nuklir ini secara langsung. Gambar 5.6 memperlihatkan contoh organisasi tanggap darurat medis yang dapat dibentuk oleh organisasi pos komando tanggap darurat bencana.

Pemrakarsa tanggap darurat medis pada Gambar 5.6 adalah pihak yang mengawali dilakukannya tanggap darurat medis secara resmi setelah adanya pemberitahuan tentang keadaan darurat radiasi atau nuklir. Untuk kecelakaan radiasi atau nuklir di suatu fasilitas, pemrakarsa idealnya adalah pihak yang bertanggung jawab atas fasilitas tersebut. Demikian pula untuk kecelakaan di ruang publik, seperti saat pengangkutan bahan radioaktif/bahan nuklir atau kegiatan radiografi industri, pemrakarsa adalah penanggung jawab atas pengangkutan atau kegiatan tersebut. Namun untuk bencana akibat ledakan senjata berbasis radiasi atau nuklir di ruang publik, pemrakarsa bisa orang biasa yang kebetulan berkegiatan di dekat lokasi dan memiliki pengetahuan tentang ketenaganukliran, atau mungkin perespons awal itu sendiri.

Selanjutnya, Tim Tanggap Darurat Lapangan adalah tim medis khusus yang berasal dari fasilitas medis terdekat atau tim yang menjadi bagian dari Organisasi Tanggap Darurat Nuklir, Nasional, ataupun Daerah, yang datang ke tempat kejadian darurat setelah adanya pemberitahuan dari Pemrakarsa Tanggap Darurat Medis atau Perespons Awal.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Sumber: Hiswara (2023)

Gambar 5.6 Organisasi dan Alur Kerja Tanggap Darurat Medis untuk Bencana Radiasi atau Nuklir

Tim Tanggap Darurat Lapangan bertanggung jawab untuk menyediakan bantuan pertama pada para korban. Anggota Tim harus telah memiliki pengetahuan mengenai penanganan korban dalam keadaan darurat, termasuk pemberian pengobatan yang diperlukan, dan juga pengetahuan mengenai efek kesehatan dasar dari radiasi, dan proteksi radiasi. Tim ini biasanya terdiri atas dokter gawat darurat, petugas triase, perawat, petugas proteksi radiasi, petugas pencatat, petugas perlengkapan, petugas keamanan, dan petugas media, dan

Buku ini tidak diperjualbelikan

dipimpin oleh seorang ketua yang bertugas untuk memimpin kegiatan tanggap darurat medis di lapangan. Ketua memberikan keputusan dan mengambil kebijakan atas tindakan yang dilakukan tim di lapangan dan mengoordinasikan semua kegiatan tim, termasuk komunikasi dengan Manajer Medis Kedaruratan dari fasilitas medis untuk menyiapkan Tim Tanggap Darurat Fasilitas Medis.

Tim ambulans, sementara itu, merupakan tim yang bertanggung jawab untuk mengangkut korban dari lokasi kejadian darurat ke fasilitas medis. Fasilitas medis ini berupa instalasi/unit gawat darurat di rumah sakit, poliklinik, atau fasilitas lainnya yang difungsikan sebagai tempat untuk menangani korban dalam keadaan darurat.

Para anggota tim harus sudah memahami cara menangani orang yang cedera selama pengangkutan. Para anggota tim ini perlu dilatih mengenai prosedur pengendalian kontaminasi. Jika perlu, dokter gawat darurat atau perawat dari Tim Tanggap Darurat Lapangan bisa ikut di dalam ambulans yang harus tiba di lokasi kejadian dengan cepat. Setelah melakukan tindakan di lokasi kejadian, dokter atau perawat dapat menemani korban selama pengangkutan dengan ambulans ke fasilitas medis.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab VI

Respons Medis terhadap Bencana



Respons medis bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keparahan kondisi korban, menentukan prioritas respons, serta mempertimbangkan tindakan medis yang tepat setelah korban dievakuasi oleh tim tanggap darurat. Oleh karena itu, respons medis telah dilakukan sejak awal di tempat kejadian, dengan penanganan lebih lanjut di fasilitas medis, serta tindakan lebih lanjut di rumah sakit rujukan jika kondisi cedera dan luka korban sangat parah.

Respons medis yang diuraikan di sini hanya bersifat pokok-pokok kegiatan yang dapat dilakukan. Uraian lebih lengkap mengenai respons medis terhadap bencana dapat dilihat pada acuan tersendiri (Hiswara, 2023).

A. Respons di Tempat Kejadian

Respons di tempat kejadian yang dimaksud di sini adalah respons yang dilakukan oleh Tim Tanggap Darurat Lapangan, karena respons sebelumnya telah dilakukan oleh profesional selaku Perespons Awal.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Hal pertama yang dilakukan Tim Tanggap Darurat Lapangan melalui ketuanya adalah meminta informasi kepada Perespons Awal tentang semua hal yang diketahui dan telah dilakukan. Setelah itu, dokter gawat darurat, yang umumnya adalah dokter umum, dapat menilai status korban berdasarkan riwayat dan pemeriksaan fisik pasien.

Tindakan penting lain yang perlu dilakukan di tempat kejadian adalah melakukan survei radiologis dengan mengukur tingkat radiasi, eksternal maupun kontaminasi, pada tubuh korban. Jika terdeteksi adanya kontaminasi, serendah apa pun, pakaian dan semua barang yang menempel pada korban, harus segera dilepas dan diperlakukan sebagai limbah radioaktif. Setelah selesai, dokter dapat melakukan triase bersama petugas triase dengan bantuan perawat yang ada.

Dokter umum ini harus mampu memisahkan korban yang diduga terkena kontaminasi dan terpapar radiasi dari korban yang hanya mengalami luka akibat terjatuh atau hal lain yang sama sekali tidak terkait dengan radiasi. Korban akibat kontaminasi atau radiasi selanjutnya dapat dibawa ke fasilitas medis menggunakan ambulans.

B. Tindakan Triase pada Korban

Secara umum, triase adalah proses memprioritaskan tugas, kasus, atau pasien berdasarkan urgensi atau tingkat keparahan kondisi, kebutuhan, atau kepentingan yang ada. Dalam situasi terjadinya korban akibat ledakan senjata berbasis radiasi atau nuklir, triase digunakan untuk menentukan prioritas perawatan korban berdasarkan tingkat keparahan kondisi korban.

Pada situasi bencana radiasi atau nuklir ini, korban diklasifikasikan ke dalam prioritas sebagai berikut.

1. Prioritas pertama: korban yang memerlukan tindakan penyelamatan jiwa.
2. Prioritas kedua: korban yang memerlukan tindakan perawatan segera.
3. Prioritas ketiga: korban yang dapat menunggu untuk mendapatkan perawatan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tujuan penentuan prioritas ini adalah untuk mengalokasikan sumber daya secara lebih efisien. Selain itu, prioritas diberikan untuk memastikan kebutuhan mendesak segera terpenuhi dan mengoptimalkan hasil dengan mendahulukan kasus paling kritis.

Triase umumnya dilakukan dengan mengajukan pertanyaan kepada korban yang sadar, atau tidak pingsan, dan berada paling dekat dengan tempat kejadian. Jawaban pertanyaan langsung dianalisis di tempat oleh dokter gawat darurat yang datang sebagai anggota Tim Tanggap Darurat Lapangan, atau tenaga medis lain yang ada di lokasi jika dokter gawat darurat tidak ada. Pertanyaan yang diajukan biasanya adalah seperti yang tercantum pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1. Daftar Pertanyaan untuk Tindakan Triase

Nama korban	:			
Identitas (KTP/SIM/yang lain)	:			
Nama pewawancara	:			
Status pewawancara	:	Dokter/perawat/..... (sebutkan)		
Tanggal dan waktu	:			
Pertanyaan	:	Ya	Tidak	Uraian
Anda berada di mana saat kejadian?	:			
Berapa kira-kira jarak Anda dari lokasi kejadian?	:			
Apakah Anda berada di dalam ruangan? Ruang yang mana?	:			
Apakah Anda berada di luar gedung?	:			
Berapa lama Anda berada di lokasi kejadian?	:			
Apakah Anda memiliki masalah pencernaan (mual, muntah, diare)	:			
Pukul berapa Anda muntah?	:			
Apakah Anda merasa sangat lelah?	:			
Apakah Anda merasakan sakit kepala?	:			

Sumber: FNSA (t.t.)

Buku ini tidak diperjualbelikan

C. Pengangkutan Korban ke Fasilitas Medis

Pengangkutan korban ke fasilitas medis dilakukan oleh petugas ambulans yang telah terlatih dengan bantuan dokter gawat darurat dan perawat jika perlu. Mobil dan petugas ambulans tersebut dilarang untuk memasuki daerah yang telah diberi batas oleh perespons awal sebelumnya, atau yang disebut pula sebagai daerah pengendalian. Korban yang terpapar radiasi tidak memerlukan penanganan khusus, sementara korban yang terkontaminasi perlu ditangani dan diangkut sesuai dengan prosedur pengendalian kontaminasi. Jika ada keraguraguan, anggap semua korban terkontaminasi hingga dibuktikan sebaliknya.

Saat tiba di tempat kejadian, petugas ambulans perlu menggunakan dosimeter perorangan jika tersedia. Gunakan juga pakaian pelindung tambahan jika perlu dan jika tersedia, namun selalu gunakan sarung tangan. Korban yang berada di daerah pengendalian ditempatkan di atas tandu dengan alas kain, lalu dipindahkan ke tandu ambulans yang juga dilapisi kain melalui garis batas daerah pengendalian. Alas kain dari tandu di daerah pengendalian harus segera dimasukkan ke dalam kantong plastik besar yang diberi label sebagai limbah radioaktif.

Status medis korban terus dicatat selama perjalanan ke fasilitas medis dan tindakan medis dilakukan jika perlu. Setibanya di fasilitas medis, korban langsung dibawa ke ruang kedatangan ambulans dan dimasukkan ke ruangan yang telah disiapkan sebelumnya. Petugas ambulans selanjutnya menyerahkan rekaman status korban selama perjalanan kepada petugas yang berada di fasilitas medis.

Jika masih dibutuhkan, petugas dan mobil ambulans dapat kembali ke tempat kejadian untuk mengangkut korban lainnya. Namun, sebelum meninggalkan fasilitas medis, petugas dan mobil ambulans harus diukur tingkat radiasinya dan, jika perlu, didekontaminasi oleh petugas proteksi radiasi, sehingga baik petugas maupun mobil ambulansnya telah kembali bersih dari kemungkinan kontaminasi yang melekat.

Buku ini tidak diperjualbelikan

D. Penanganan Korban di Fasilitas Medis

Sebelum menangani korban akibat bencana radiasi atau nuklir, fasilitas medis perlu mempersiapkan diri agar penanganan dapat berjalan lancar, aman, dan terbebas dari kontaminasi. Selain memiliki personel dengan kualifikasi seperti untuk Tim Tanggap Darurat Lapngan, personel di fasilitas medis juga perlu ditambah dengan tim biomedis yang akan melakukan analisis terhadap sampel biologik pasien, petugas radiopatologi yang akan mengambil sampel jaringan dan menganalisis hispatologi, petugas biodosimetri yang akan mengkaji dosis radiasi yang diterima pasien dengan prosedur sitogenetik, dan dokter spesialis, jika perlu.

Untuk tindakan berhati-hati, semua korban yang diangkut ke fasilitas medis harus dianggap mengalami kontaminasi radiasi sampai dibuktikan sebaliknya. Semua korban dibawa ke area tindakan untuk mendapatkan perawatan atas cedera atau luka yang dialami.

Di fasilitas medis, tindakan yang dapat dilakukan bervariasi sesuai dengan tingkat keparahan dan komplikasi akibat terpapar radiasi dan/atau terkontaminasi. Dengan kata lain, korban yang cedera, terpapar, dan terkontaminasi, akan mendapat tindakan yang berbeda dengan korban yang cedera dan terpapar, tetapi tidak terkontaminasi.

Sesuai dengan lokasi dan tingkat kontaminasinya, dekontaminasi yang dilakukan juga bervariasi. Dekontaminasi pada luka terbuka, pada lubang tubuh, pada rambut, pada kulit utuh, akan dilakukan dengan cara yang berbeda. Bahan dekontaminasi juga bervariasi dari hanya dicuci dengan air hangat yang mengalir, pengunaan sabun ringan, hingga penggunaan beberapa bahan kimia seperti sodium hipoklorit.

Setelah selesai ditangani di area tindakan, dokter dapat memilih untuk mengizinkan korban pulang karena cedera atau lukanya tidak parah, dipindahkan ke ruangan dari bagian perawatan dari fasilitas medik jika cedera atau lukanya sedikit parah, atau dipindahkan ke rumah sakit rujukan jika cedera atau lukanya sangat parah. Rumah sakit rujukan adalah rumah sakit yang memiliki kemampuan dan telah dilatih untuk menangani korban bencana radiasi atau nuklir dengan cedera atau luka yang sangat parah.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab VII

Pemulihan Kondisi Area Terdampak



Fase pemulihan setelah terjadinya suatu bencana radiasi atau nuklir, baik disebabkan oleh kecelakaan maupun oleh ledakan senjata berbasis radiasi atau nuklir, berlangsung dalam beberapa tahapan, antara lain pembersihan tapak atau lokasi, pengurangan tingkat radiasi lingkungan, pemberian informasi kepada publik tentang situasi terkini, dan pengembalian tapak atau lokasi kejadian ke keadaan normal.

Namun demikian, upaya pemulihan kondisi area terdampak akan berbeda antara setelah terjadinya kecelakaan dan ledakan radiasi dan setelah terjadinya kecelakaan dan ledakan nuklir. Kecelakaan dan ledakan radiasi umumnya hanya menimbulkan dampak pada area yang relatif terbatas, sementara kecelakaan dan ledakan nuklir dapat mengakibatkan dampak lingkungan yang lebih luas. Hal ini disebabkan oleh kecelakaan dan ledakan radiasi umumnya hanya melibatkan sumber tertutup, yaitu sumber radiasi yang bahan radioaktifnya tertutup secara permanen dalam kapsul atau terikat erat dalam bentuk padat, sehingga sumber radiasi tersebut tidak akan menyebar

Buku ini tidak diperjualbelikan

jauh. Sementara itu, kecelakaan dan ledakan nuklir akan melibatkan sumber terbuka, yang tidak terikat erat dalam bentuk padat, dan juga melibatkan sumber dalam bentuk gas, sehingga dapat tersebar jauh dari tapak atau lokasi kejadian.

A. Pembersihan Tapak atau Lokasi

Mengacu pada definisi pembersihan yang diberikan ICRP (t.t.-b), pembersihan tapak dan lokasi adalah proses remediasi dan rehabilitasi tapak dan lokasi ke keadaan semula, seperti sebelum kecelakaan dan ledakan berlaku. Tindakan pembersihan yang paling utama adalah melakukan dekontaminasi atau menghilangkan kontaminasi pada bangunan, barang dan benda, area kerja, atau area lahan yang cukup luas, area hutan, dan ekosistem akuatik, dan membuang limbah radioaktif yang terbentuk akibat kegiatan dekontaminasi tersebut.

1. Dekontaminasi Bangunan, Barang dan Benda, Area Kerja

Dekontaminasi bangunan, barang dan benda, serta area kerja yang terkontaminasi zat radioaktif dimulai dengan mengkaji situasi, menentukan jenis radionuklida kontaminan, apakah berada di permukaan atau sudah melekat, serta mengukur tingkat radiasinya. Sebelumnya, petugas dekontaminasi perlu mengamankan dirinya dengan menggunakan alat pelindung diri, seperti pakaian antiradiasi, sarung tangan, dosimeter perorangan, dan respirator jika diperlukan.

Untuk barang dan benda yang teridentifikasi sebagai telah terkontaminasi, dengan hati-hati dipindahkan ke area dekontaminasi yang telah ditentukan sebelumnya. Untuk mengurangi paparan radiasi ke luar area kontaminasi, barang dan benda terkontaminasi dapat ditempatkan dalam wadah yang dilapisi timbal, atau areanya diberi batas dengan penghalang berupa dinding yang tebal.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Dekontaminasi selanjutnya dapat dilakukan melalui pembersihan fisik atau pembersihan kimia. Pembersihan fisik dilakukan dengan menggunakan air mengalir, larutan khusus untuk dekontaminasi tak lekat, atau sikat atau bahan abrasif untuk dekontaminasi lekat. Penyedot debu dengan filter HEPA dapat digunakan untuk mengumpulkan debu partikel radioaktif yang terlepas saat penyikatan. Untuk area kerja, dekontaminasi dilakukan menggunakan kertas penyerap yang dilembapkan dengan larutan pembersih (IAEA, t.t.-e).

Pembersihan secara kimia melibatkan kontak kontaminan dengan reagen kimia berupa bahan asam, basa, atau agen khelasi yang dirancang untuk melarutkan dan mengikat zat radioaktif. Pemilihan jenis reagen yang digunakan bergantung pada sifat kontaminan yang akan dihilangkan, rencana penggunaan material atau barang di masa mendatang, dan kemampuan pengguna untuk menangani limbah sekunder yang dihasilkan, termasuk larutan dekontaminasi bekas. Keuntungan dan kerugian penggunaan agen dekontaminasi kimia disajikan pada Tabel 7.1.

Barang, benda, dan area kerja yang telah dibersihkan kemudian harus dipantau kembali untuk memastikan apakah tingkat radioaktivitas telah menurun. Penurunan tingkat kontaminasi dinyatakan dalam faktor dekontaminasi, *DF*, dengan:

$$DF = \frac{\text{aktivitas terukur sebelum dekontaminasi}}{\text{aktivitas terukur setelah dekontaminasi}}$$

Nilai DF yang diinginkan dalam suatu tindakan dekontaminasi bergantung pada keadaan tertentu. Dalam beberapa kasus, DF yang relatif rendah (2–3) dapat diterima, tetapi dalam banyak kasus DF dengan orde 10 diperlukan. Tabel 7.2 memperlihatkan hubungan antara faktor dekontaminasi dan aktivitas yang dapat dihilangkan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tabel 7.1 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Agen Dekontaminasi Kimia

Keuntungan	Kerugian
• Dapat sangat efektif, bahkan untuk geometri kompleks dan permukaan internal. • Dapat membersihkan kontaminasi dengan komposisi kompleks radionuklida dalam bentuk oksida (UxOy dan PuxOy). • Dapat relatif murah, terutama jika peralatan atau personel tambahan tidak diperlukan. • Dapat diterapkan untuk peralatan pemrosesan tanpa pembongkaran (misalnya, objek kompleks seperti sirkuit primer, penukar panas, kolom ekstraksi, pipa, dan katup di tempat). • Dapat diandalkan sebagai metode yang telah mapan dalam industri nuklir. • Dapat mencapai faktor dekontaminasi (DF) yang tinggi, bergantung pada kombinasi bahan kimia yang digunakan. • Dapat mencegah kontaminasi melalui udara jika menggunakan sistem tertutup. • Dapat diterapkan dalam berbagai cara untuk mengoptimalkan hasil yang dicapai (pengkabutan, penyemprotan, pasta, gel).	• Memerlukan pengolahan/pembuangan limbah sekunder dalam jumlah yang relatif besar (misalnya larutan agresif dan/atau berbahaya (asam/basa dengan komposisi kompleks) yang dihasilkan) • Sulit diterapkan pada permukaan yang sulit dijangkau, dan efektivitasnya mungkin tidak dapat dipastikan. • Memerlukan pemanasan larutan (biasanya 70–90°C) agar efektif. • Berisiko tinggi menyebabkan korosi pada proses dan infrastruktur pabrik (misalnya saluran pembuangan) akibat produksi limbah sekunder. • Menghasilkan DF yang tidak sebaik pada permukaan berpori. • Menggunakan sejumlah bahan kimia paling efektif yang tidak kompatibel dengan opsi hilir.

Sumber: IAEA (2023a)

Tabel 7.2 Faktor Dekontaminasi

Faktor dekontaminasi, *DF*	% aktivitas yang dihilangkan, $\left(1-\frac{1}{DF}\right)\times 100\%$
2	50%
5	80%
10	90%
50	98%
100	99%

Sumber: IAEA (2023a)

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pada dasarnya, DF tidak dapat dipandang sebagai satu-satunya kriteria untuk pemilihan teknik dekontaminasi. Hal ini karena nilai DF sangat bergantung pada kondisi operasi dan kondisi permukaan yang terkontaminasi, termasuk karakteristik kontaminasi (penyebaran tersebar dan seragam, lekat atau tak lekat, satu atau beberapa lapisan, deposit larut atau tak larut), sifat korosif barang dan benda, atau kestabilan dan konsentrasi larutan dekontaminan (IAEA, 2023a).

Untuk mencapai faktor dekontaminasi (DF) yang baik, proses dekontaminasi harus dipilih berdasarkan pertimbangan kekhususan lokasi dan berbagai parameter seperti (IAEA, 1989):

a. jenis material: logam, aspal, beton, tanah, kayu, dll.;
b. jenis permukaan: kasar, berpori, dilapisi (cat, plastik, dll.);
c. komposisi kontaminan: produk aktivasi atau fisi, aktinida, dll.;
d. bentuk fisik dan kimia kontaminan: larutan, aerosol, partikel berflokulasi, senyawa kompleks dengan material lain, dll.; untuk banyak proses dekontaminasi, makin kecil partikelnya, makin sulit untuk dihilangkan dari permukaan;
e. faktor dekontaminasi yang diinginkan;
f. efisiensi proses yang telah terbukti;
g. metode pengendapan; distribusi dekontaminasi dan daya rekatnya pada permukaan dapat bergantung pada apakah pengendapannya basah atau kering.

Di lingkungan perkotaan, akan ada banyak bangunan, jenis permukaan, dan faktor hunian yang memerlukan beberapa kriteria pembersihan yang berbeda dan juga tidak perlu dibersihkan dengan faktor dekontaminasi yang sama. Selain itu, area yang relatif sulit diakses dapat dibiarkan tetap terkontaminasi selama kontaminasi tersebut bersifat lekat dan memengaruhi manusia yang berada di dalam gedung.

2. Dekontaminasi Area Lahan yang Cukup Luas

Metode dekontaminasi untuk bangunan, barang dan benda, serta area kerja yang diuraikan sebelumnya tidak dapat digunakan untuk

Buku ini tidak diperjualbelikan

dekontaminasi area lahan yang cukup luas. Pemilihan metode yang paling tepat untuk membersihkan lahan terkontaminasi yang cukup luas dan memulihkannya agar dapat digunakan secara produktif menjadi rumit karena (IAEA, 1989):

a. topografi area yang akan dibersihkan;
b. banyaknya ekosistem alami dan penggunaan lahan;
c. banyaknya jenis vegetasi;
d. banyaknya variasi dalam karakteristik kelas tanah;
e. perilaku radionuklida yang kompleks pada tanah yang berbeda;
f. besarnya variasi respons kontaminasi terhadap kondisi cuaca yang berbeda;
g. dampak ekologis yang ditimbulkan oleh berbagai teknik pembersihan terhadap berbagai ekosistem alami dan pemulihan lahan.

Secara umum, metode pembersihan dapat dibedakan menjadi metode fisis, kimia, pertanian, atau kombinasi keduanya. Pembersihan lahan secara fisis dan kimia dapat dilakukan dengan memisahkan radionuklida secara selektif dari matriks tanah, dengan pembajakan dalam untuk menghilangkan kontaminasi dari permukaan dan zona akar, atau dengan menghilangkan vegetasi dan/atau lapisan atas tanah yang mengandung kontaminan (IAEA, 1989).

Pemisahan radionuklida dari tanah sangat disukai karena dapat mengurangi volume limbah yang harus diangkut dan dibuang secara signifikan. Namun, teknik ini hanya berlaku untuk tanah berbutir kasar atau berkerikil yang di dalamnya radionuklida menempel pada partikel berbutir halus yang dapat dipisahkan dengan mudah. Teknik ini juga paling praktis digunakan jika area yang akan didekontaminasi relatif kecil. Selain itu, karena pemisahan radionuklida secara fisis hampir selalu mengakibatkan hilangnya sedikit lempung dari matriks tanah, proses ini dapat menurunkan kesuburan tanah. Jika lahan akan digunakan lagi untuk produksi tanaman, penambahan pupuk setelah pembersihan akan diperlukan untuk memulihkan kesuburan tanah.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pembajakan dalam telah diteliti secara terbatas di beberapa negara sebagai alternatif untuk menghilangkan lapisan tanah yang terkontaminasi. Biasanya, bajak parit yang ditarik oleh traktor digunakan untuk membalikkan lapisan tanah yang tebal secara menyeluruh, menempatkan lapisan atas yang aktif 10 cm di bagian bawah dan memindahkan lapisan dalam yang bersih ke bagian atas. Secara teori, dengan metode ini, sebagian besar aktivitas akan ditempatkan jauh di bawah batas bawah akar tanaman. Namun, pembajakan tidak menghasilkan pembalikan lapisan tanah yang sempurna dan menyebabkan beberapa pencampuran lapisan (IAEA, 1989).

Pengalaman dari pembersihan lahan pertanian akibat kecelakaan PLTN Fukushima menunjukkan bahwa pertimbangan dalam pembersihan seharusnya tidak hanya sekadar mengurangi paparan radiasi, tetapi juga bagaimana publik dapat kembali ke lahannya dengan perasaan aman bahwa tanaman mereka telah diselamatkan dan lingkungan yang berkualitas tinggi di wilayahnya telah dipulihkan (Takada et al., 2023). Pembuangan lapisan atas lahan yang subur juga menyebabkan publik ragu untuk kembali bertani di lahan tersebut.

3. Dekontaminasi Area Hutan

Dekontaminasi area hutan merupakan tugas yang cukup sulit, rumit, dan menantang karena karakteristik ekosistem hutan yang unik. Hutan dapat bertindak sebagai reservoir untuk kontaminasi radioaktif, yang dapat didistribusikan di antara tanah, vegetasi, sistem air, dan satwa liar. Strategi dekontaminasi yang efektif memerlukan perencanaan yang cermat untuk mengurangi tingkat radioaktivitas sekaligus meminimalkan gangguan terhadap lingkungan.

Tantangan utama dalam dekontaminasi area hutan adalah kompleksitas hutan, sehingga bahan radioaktif dapat terakumulasi di tanah, serasah daun, kulit pohon, dan dedaunan. Vegetasi yang rapat juga mempersulit akses dan upaya dekontaminasi. Selain itu, karena hutan menyediakan habitat dan layanan ekologis, penebangan atau gangguan hutan dalam skala besar dapat membahayakan keanekaragaman hayati.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pembuangan lapisan atas tanah hutan tempat partikel radioaktif mengendap merupakan salah satu cara dekontaminasi, meskipun hal ini menyebabkan terbentuknya limbah radioaktif yang cukup besar. Teknik lain adalah dengan menggunakan zat untuk mengikat partikel radioaktif dan mencegah migrasinya, memangkas hanya vegetasi (daun, cabang, atau semak) yang terkontaminasi, serta menanam spesies tanaman yang diketahui menyerap radiasi lebih sedikit.

Teknik pencucian secara mekanis dan alami juga dapat dilakukan untuk dekontaminasi area hutan ini, antara lain dengan menggunakan air untuk membersihkan kontaminan permukaan pada daun dan kulit kayu dan mengandalkan proses alami, seperti curah hujan untuk mengencerkan kontaminan secara bertahap. Fitoremediasi dengan cara menanam spesies yang menyerap dan menyimpan isotop radioaktif, yang kemudian dapat dipanen dan dibuang dengan aman juga dapat dilakukan.

Pengendalian erosi untuk mencegah penyebaran kontaminasi dengan menstabilkan sistem tanah dan air menggunakan vegetasi juga dapat dilakukan sebagai salah satu teknik dalam dekontaminasi area hutan. Namun, pembakaran pohon dan semak belukar yang terkontaminasi sebagai alternatif pemindahan dan pembuangan, secara umum tidak boleh diizinkan karena akan meningkatkan konsentrasi radioaktivitas dalam abu sisa, yang harus dibuang, dan dapat mengakibatkan tersuspensinya kembali aerosol radioaktif (IAEA, 1989).

Pengalaman kecelakaan PLTN Chernobyl menunjukkan bahwa resuspensi dari area hutan menjadi sumber kontaminasi sekunder bagi lahan yang berdekatan (Tikhomirov et al., 1993). Namun demikian, ekosistem hutan juga dapat efektif dalam membatasi penyebaran kontaminasi lebih jauh dari titik pengendapan awal dan kemampuan ini akan meningkat seiring waktu.

Sementara itu, untuk dekontaminasi area hutan pada kasus kecelakaan PLTN Fukushima, dilakukan pada tanaman dan lapisan serasah organik bagian atas tanah hutan pada jarak dua puluh meter yang terdekat dari area permukiman, lahan pertanian, dan ruang

Buku ini tidak diperjualbelikan

publik (IAEA, 2014b). Dari kegiatan dekontaminasi di area Fukushima ini diperoleh bahwa, secara umum, keseimbangan antara keuntungan dan kerugian dekontaminasi area hutan bervariasi dan bergantung pada tingkat dosis, kepadatan populasi, serta topografi. Oleh karena itu, dekontaminasi area hutan harus dioptimalkan dengan penerapan yang fleksibel dan dilakukan secara kasus demi kasus.

4. Dekontaminasi Ekosistem Perairan

Dekontaminasi ekosistem perairan merupakan proses yang rumit dan memerlukan pertimbangan cermat terhadap jenis radiasi, sumbernya, tingkat kontaminasi, serta karakteristik ekologis badan air yang terdampak. Untuk menanganinya, perlu dilakukan pengendalian dan penahanan, antara lain dengan memasang penghalang atau sistem penahan seperti bendungan atau tirai sedimen untuk mencegah penyebaran lebih lanjut dari partikel radioaktif. Air tanah perlu dikendalikan dengan sistem pompa-olah untuk mencegah bahan radioaktif merembes ke badan air dan sedimen terkontaminasi yang dapat mengikat partikel radioaktif dibuang melalui pengerukan.

Pembersihan kontaminan pada ekosistem perairan juga dapat dilakukan melalui pengolahan air dengan pertukaran ion, reverse osmosis, atau penyaringan karbon aktif. Selain itu, teknik koagulasi dan presipitasi dapat membantu mengendapkan partikel radioaktif dari suspensi, termasuk juga teknik bioremediasi menggunakan mikroba tertentu yang dapat menyerap atau memetabolisme radionuklida, atau fitoremediasi menggunakan tumbuhan air untuk mengakumulasi isotop radioaktif.

Salah satu contoh fitoremediasi adalah penggunaan mikroalga *Dunaliella salina* dan *Chlorella vulgaris* untuk mengakumulasi ^{137}Cs dan ^{60}Co (Galanda et al., 2019). Dari studi diketahui bahwa efektivitas fitoremediasi bergantung pada pH sampel. Hal ini terlihat, misalnya, dengan nilai pH 8, D. salina paling efektif untuk fitoremediasi ^{60}Co dibandingkan dengan fitoremediasi ^{137}Cs, dan dengan nilai pH 9,6, keadaan sebaliknya terjadi.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Kecelakaan PLTN Chernobyl mengakibatkan meningkatnya kadar bahan radioaktif dalam sistem air permukaan di area yang dekat dengan lokasi reaktor dan di banyak bagian lain di Eropa akibat jatuhan dari bahan radioaktif yang terlepas ke atmosfer (The Chernobyl Forum, 2006). Kadar awal terutama disebabkan oleh pengendapan langsung radionuklida di permukaan sungai dan danau, yang didominasi oleh radionuklida berumur pendek, terutama ^{131}I. Namun, kadar dalam badan air turun dengan cepat beberapa minggu setelah jatuhan melalui pengenceran, peluruhan fisis, dan penyerapan radionuklida ke tanah tangkapan. Sedimen dasar merupakan tempat penampungan jangka panjang yang penting bagi radioaktivitas.

Sampai tahun 1998, konsentrasi aktivitas ^{137}Cs pada sejumlah ikan di Danau Svyatoe, Kostiukovichy, di sekitar Chernobyl masih terpantau cukup tinggi. Untuk menurunkan konsentrasi aktivitas tersebut, kemudian ditaburkan sejumlah 25t kalium klorida ke dalam danau. Penaburan kalium klorida tersebut diketahui berhasil menurunkan konsentrasi aktivitas ^{137}Cs pada sejumlah spesies ikan hingga 40% dari nilai sebelumnya (Smith et al., 2003).

Kecelakaan PLTN di Fukushima, Jepang, telah mengakibatkan erosi yang cukup tebal dan mengendap di Sungai Kuchibuto. Dekontaminasi dilakukan dengan membuang tanah erosi dari area seluas sekitar 1.600 ha (IAEA, 2023b). Selama pekerjaan dekontaminasi dilakukan dari April 2014 hingga Maret 2015, pengurangan aktivitas ^{137}Cs dari daerah tangkapan air akibat limpasan permukaan adalah sekitar 0,03% per bulan. Namun, pengurangan inventori yang signifikan di daerah tangkapan disebabkan oleh peluruhan radioaktif sebesar 0,19% per bulan.

5. Pengelolaan Limbah

Limbah radioaktif yang berasal dari hasil dekontaminasi pada barang, benda, dan lahan akibat ledakan senjata berbasis radiasi atau nuklir pada dasarnya cukup terbatas, dan dapat dibuang atau disimpan di fasilitas pengelolaan limbah radioaktif yang biasanya tersedia di negara dengan fasilitas nuklir yang cukup besar. Masalah yang jauh

Buku ini tidak diperjualbelikan

lebih besar timbul dari limbah radioaktif akibat kecelakaan radiasi atau nuklir, terutama akibat kecelakaan PLTN, yang mengakibatkan terjadinya kontaminasi pada lahan yang cukup luas.

Untuk kasus limbah radioaktif dengan volume yang cukup kecil, limbah dapat dikumpulkan dalam kantong atau wadah yang sesuai. Kantong atau wadah limbah kemudian diberi label dan disimpan di area penyimpanan limbah yang telah ditentukan.

Tingkat radioaktivitas di area penyimpanan limbah ini sebelumnya diukur menggunakan alat ukur radiasi yang sesuai. Setelah terkumpul cukup banyak, kantong atau wadah limbah diangkut ke fasilitas pengelolaan limbah radioaktif yang ada. Sebelumnya, tingkat radioaktivitas di kendaraan pengangkut juga diukur. Untuk memastikan tidak ada bahan radioaktif yang tersisa, baik di area penyimpanan limbah maupun di kendaraan pengangkut, pengukuran tingkat radioaktif perlu dilakukan kembali setelah pekerjaan selesai, kemudian dibandingkan dengan kondisi sebelum limbah ditempatkan di area penyimpanan serta dipindahkan ke kendaraan pengangkut.

Untuk kasus limbah radioaktif dengan volume yang besar, pengelolaannya cukup rumit. Tantangan setelah terjadinya bencana radiasi atau nuklir terkait dengan jangka waktu karena adanya saling kebergantungan kegiatan pengelolaan limbah sejak limbah terbentuk hingga pembuangannya, termasuk juga proses pengambilan keputusan dan kegiatan pemulihan setelahnya (IAEA, 2017).

Prioritas selama fase awal setelah terjadinya bencana radiasi atau nuklir adalah menstabilkan situasi, mengendalikannya, dan melindungi individu. Hal ini menghadirkan tantangan bahwa keputusan yang dihasilkan mungkin kurang ideal dalam pengelolaan limbah. Keputusan cepat yang dibuat di awal tanggap darurat kemungkinan besar perlu ditinjau ulang dan direvisi saat beralih dari situasi paparan darurat ke ke situasi paparan eksisting.

Beberapa pertimbangan lain terkait dengan jangka waktu adalah sebagai berikut (IAEA, 2017).

Buku ini tidak diperjualbelikan

a. Pengelolaan limbah yang terbentuk akibat berbagai tindakan pemulihan perlu dilakukan tepat waktu sehingga tidak menunda tindakan pemulihan lebih lanjut, dan juga dengan cara yang tidak mengorbankan strategi proteksi secara keseluruhan.
b. Apa pun metode kesiapsiagaan yang diterapkan, setiap keputusan yang memengaruhi pengelolaan limbah akan dimulai segera setelah keadaan darurat terjadi.
c. Sifat dan tingkat kontaminasi, dan keputusan mengenai bahan radioaktif apa yang dapat dan tidak dapat digunakan kembali/didaur ulang atau dibebaskan dari pengawasan, akan membatasi kondisi akhir yang dapat dicapai dalam pemulihan, dan juga lama waktu untuk mencapai kondisi akhir yang terbatas tersebut.

Penetapan kondisi akhir setelah dilakukan tindakan pemulihan juga memiliki tantangan tersendiri, karena adanya kepentingan yang berbeda. Untuk area lahan tertentu, misalnya, kondisi akhir yang dipilih adalah pembersihan hingga tingkat yang paling aman yang harus dicapai pada waktu yang ditetapkan agar lahan dapat digunakan kembali seperti semula. Namun, ada kemungkinan pula kondisi akhir yang diinginkan adalah mendedikasikan lahan sebagai fasilitas pembuangan limbah radioaktif lainnya.

Dari sisi teknis, pengelolaan limbah radioaktif yang terbentuk akibat bencana radiasi atau nuklir dilakukan seperti umumnya pengelolaan limbah radioaktif yang lain. Tindakan pertama yang perlu dilakukan adalah melakukan karakterisasi dan pemisahan atau pemilahan limbah.

Karakterisasi limbah menjadi dasar untuk menentukan jenis limbah dan membuat keputusan tentang langkah-langkah pengelolaan limbah yang sesuai. Pemisahan limbah sesuai jenisnya merupakan prasyarat untuk melaksanakan kegiatan pengelolaan limbah selanjutnya, yaitu penyimpanan, pemrosesan, pengondisian, dan pembuangan) secara efektif dan tepat sasaran.

Fasilitas penyimpanan limbah radioaktif diperlukan setelah terjadinya bencana radiasi atau nuklir. Mengingat pemrosesan limbah untuk kasus bencana radiasi atau nuklir ini umumnya dilakukan

Buku ini tidak diperjualbelikan

dengan sistem pemrosesan portabel, limbah hanya disimpan dalam waktu yang relatif singkat. Perlu diketahui bahwa penyimpanan dalam hal ini adalah penyimpanan awal dan bukan penyimpanan akhir yang dilakukan setelah pengondisian.

Secara umum, penyimpanan dapat memiliki beberapa fungsi. Penyimpanan dapat digunakan untuk menyimpan limbah yang mengandung radionuklida berumur pendek agar terurai hingga ke tingkat yang dapat dibebaskan dari pengawasan, atau diizinkan untuk dibuang, didaur ulang, dan digunakan kembali. Penyimpanan juga dapat digunakan untuk mengumpulkan dan mengakumulasi limbah radioaktif dalam jumlah yang cukup sebelum dipindahkan ke fasilitas lain untuk diolah dan dikondisikan.

Pemrosesan limbah radioaktif dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain dengan sistem terpasang tetap pada fasilitas pengelolaan limbah, atau dengan sistem pemrosesan portabel yang mudah dipindahkan. Untuk limbah dengan distribusi radionuklida yang luas dan tersebar dalam jumlah besar, seperti tanah, tumbuhan, bahan bangunan, atau puing, sistem yang digunakan umumnya adalah sistem pemrosesan portabel.

Jika terjadi bencana radiasi atau nuklir, distribusi radionuklida yang luas, yang tersebar dalam berbagai limbah massal (misalnya dalam tanah, tumbuhan, bahan bangunan, dan puing) diperkirakan berasal dari berbagai titik sumber. Dengan demikian, akan lebih menguntungkan untuk memanfaatkan sistem pemrosesan portabel guna menangani limbah radioaktif seperti ini.

Istilah sistem pemrosesan portabel atau bergerak mengacu pada sistem pemrosesan limbah radioaktif yang dirancang agar dapat diangkut dan tidak dipasang secara permanen. Sistem bergerak yang ditempatkan di suatu lokasi dapat menyediakan pemilihan dan penerapan teknologi yang optimal untuk aliran limbah tertentu dengan membawa proses ke titik tempat limbah dihasilkan. Selain itu, sistem bergerak dapat menawarkan fleksibilitas tambahan dengan berbagi peralatan di antara beberapa lokasi pembangkit untuk kegiatan pemrosesan dengan durasi yang bervariasi, dari periode yang sangat singkat hingga beberapa tahun (IAEA, 2014c).

Buku ini tidak diperjualbelikan

Pengondisian limbah radioaktif adalah proses yang digunakan untuk menyiapkan limbah radioaktif agar dapat ditangani, diangkut, disimpan, dan dibuang dengan aman. Proses ini meliputi menstabilkan limbah, mengurangi volume, mengimobilisasi untuk mencegah penyebaran kontaminasi, serta memastikan bahwa limbah yang dikondisikan dapat bertahan dalam kondisi penyimpanan atau pembuangan jangka panjang.

Pengondisian diawali dengan pemilahan, pemisahan, dan pengurangan volume limbah melalui pemadatan atau pembakaran. Selanjutnya, dilakukan stabilisasi dengan beberapa bahan, seperti semen, bitumen, atau polimer untuk menciptakan matriks limbah yang stabil. Setelah itu, dilakukan pemadatan dengan mencampur limbah cair atau sedimen dengan bahan pengikat untuk mengubahnya menjadi bentuk padat dan stabil.

Proses enkapsulasi berikutnya dilakukan dengan menutup limbah dalam wadah atau matriks pelindung, seperti drum beton atau drum logam. Proses terakhir dalam pengondisian adalah pengemasan, dengan menempatkan limbah dalam wadah yang dirancang untuk menahan korosi, radiasi, dan kerusakan mekanis sehingga memastikan keamanan selama penyimpanan dan pembuangan.

Pembuangan limbah radioaktif bertujuan untuk memastikan keselamatan manusia dan lingkungan dari paparan radiasi yang dipancarkan oleh limbah tersebut. Limbah radioaktif dibuang di fasilitas yang menampung dan mengisolasinya dari lingkungan.

Salah satu metode pembuangan limbah radioaktif adalah pembuangan geologis, yang menempatkan limbah di fasilitas buatan di bawah tanah atau terowongan bekas tambang. Metode ini dianggap sebagai pilihan terbaik untuk limbah yang paling radioaktif. Metode lain adalah insinerasi, yang membakar limbah pada suhu tinggi untuk mengurangi volumenya; superkompaksi, yang menempatkan limbah di bawah tekanan tinggi untuk mengurangi volumenya; dan sementasi, yaitu proses yang melibatkan penuangan semen ke dalam wadah untuk imobilisasi.

Buku ini tidak diperjualbelikan

B. Pemantauan Radiasi Lingkungan

Pemantauan radiasi lingkungan dilakukan untuk mendeteksi dan menentukan tingkat kontaminasi radiasi lingkungan sisa setelah dilakukan pembersihan tapak dan lokasi. Pemantauan dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran radiasi di lapangan dan mengumpulkan sampel yang kemudian dianalisis di laboratorium. Pengukuran lapangan dapat dilakukan di seluruh tapak atau pada beberapa titik tertentu. Dalam pengukuran laboratorium, beberapa parameter seperti frekuensi, lokasi, dan teknik pengambilan sampel perlu dipertimbangkan, selain kemampuan laboratorium (IAEA, 1999).

Secara umum, beberapa teknik pengukuran yang biasa dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pemantauan tanah dan lahan meliputi hal-hal berikut ini.
    a. Spektrometri gamma *in-situ*, yang dilakukan untuk mengukur konsentrasi radionuklida dalam tanah tanpa menggganggu kondisi tanah itu sendiri.
    b. Pengambilan sampel tanah dan analisis laboratorium, yang dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis sampel tanah untuk mengetahui komposisi isotop yang dikandungnya menggunakan spektroskopi gamma, spektrometri alfa, atau pencacah sintilasi cair.
    c. Survei kontaminasi permukaan, yang dilakukan dengan menggunakan alat pencacah Geiger-Muller (GM) portabel, detektor sintilasi, atau surveimeter alfa-beta untuk memeriksa kontaminasi permukaan.
2. Pemantauan radiasi udara hal-hal berikut ini.
    a. Pengambilan sampel dan analisis udara, yang dilakukan dengan mengambil sampel udara bervolume tinggi untuk mengumpulkan partikulat, yang kemudian dianalisis untuk mengetahui komposisi isotop radioaktif pada udara yang sampelnya diambil.

Buku ini tidak diperjualbelikan

b. Pemantauan radon dan thoron, yang dilakukan dengan menggunakan detektor pasif atau aktif memantau tingkat radon di area yang diremediasi.
c. Pemantauan laju dosis gamma waktu nyata (*real-time*), yang dilakukan dengan menggunakan alat pemantau laju dosis gamma portabel atau tetap yang mengukur tingkat paparan radiasi.

3. Pemantauan air dan sedimen meliputi hal-hal berikut ini.
   a. Pengambilan sampel air tanah dan air permukaan, yang dilakukan untuk mendeteksi radionuklida, seperti tritium, radium, atau sesium, dengan cara analisis radiokimia terhadap sampel air yang dikumpulkan tersebut.
   b. Pemantauan air *in-situ*, yang secara terus-menerus akan mengukur tingkat radiasi di badan air.
   c. Pengambilan sampel sedimen, yang berasal dari sedimen dasar danau atau dasar sungai yang dianalisis untuk mengetahui adanya kontaminasi radioaktif.
4. Pemantauan biologis meliputi hal-hal berikut ini.
   a. *Bioassay* dan biomonitoring, yang dilakukan dengan menguji sampel tanaman, hewan, dan urin/feses manusia untuk mengetahui penyerapan radionuklida internal.
   b. Analisis rantai makanan, yang dilakukan dengan memantau tanaman, ternak, dan ikan untuk memastikan tingkat radionuklida yang tersisa telah memenuhi standar keselamatan yang diberlakukan.
   c. Survei radiasi jarak jauh dan udara meliputi hal-hal berikut ini.
   d. Pemetaan radiasi berbasis *drone*, yang dilakukan dengan *drone* dan dilengkapi dengan detektor radiasi untuk melakukan survei udara di area yang luas.
   e. Survei satelit atau pesawat, yang dilakukan dengan membuat pencitraan gamma resolusi tinggi untuk memetakan distribusi radiasi di suatu wilayah.

Buku ini tidak diperjualbelikan

5. Pengawasan jangka panjang dan pencatatan data meliputi hal-hal berikut ini.
    a. Dosimeter lingkungan dilakukan dengan meletakkan dosimeter di lokasi-lokasi penting untuk memantau dosis radiasi yang terakumulasi dari waktu ke waktu.
    b. Jaringan pemantauan radiasi waktu nyata (*real time*), yang merupakan stasiun pemantauan berkelanjutan menyediakan data waktu nyata tentang tingkat radiasi.

C. Pemberian Informasi Publik

Keadaan darurat nuklir atau radiasi akan menimbulkan kekhawatiran publik yang tinggi. Pengalaman dengan berbagai keadaan darurat telah menunjukkan bahwa akan ada permintaan publik yang kuat untuk informasi mengenai semua upaya darurat yang dilakukan, termasuk permintaan akan informasi, data, dan konteks yang tepat waktu dan terbuka (termasuk pengakuan jujur tentang apa yang tidak pasti atau belum diketahui). Ketidakmampuan atau keengganan untuk menyediakan data dan informasi yang komprehensif dan konsisten, beserta konteksnya untuk memungkinkan publik memahami dampaknya terhadap diri mereka sendiri, orang lain, dan lingkungan, akan makin mengikis kepercayaan sekaligus kemampuan untuk mengambil tindakan guna memperbaiki situasi.

Kekhawatiran publik setelah terjadinya keadaan darurat nuklir atau radiasi biasanya akan menimbulkan beberapa tantangan berikut ini (IAEA, 2020).

1. Persepsi risiko: Persepsi publik tentang risiko biasanya berbeda dari penilaian risiko yang diberikan oleh para ahli dalam proteksi radiasi, yang berimplikasi pada komunikasi publik selama keadaan darurat nuklir atau radiasi. Para ahli proteksi radiasi mendefinisikan risiko dalam hal hubungan sebab-akibat dan mencoba mengukur kemungkinan bahaya yang dapat terjadi akibat paparan radiasi, sementara publik lebih mempertimbangkan

Buku ini tidak diperjualbelikan

faktor kualitatif dalam memutuskan apakah mereka menganggap risiko yang tidak disengaja dapat diterima.

Untuk mengatasi kecenderungan perbedaan risiko ini, kegiatan informasi rutin dan/atau komunikasi rutin dan konsultasi dengan publik harus dilakukan secara berkala, baik dengan suatu komunitas yang berada di dekat suatu fasilitas nuklir atau radiasi maupun dengan membuat suatu *podcast, podtalk*, atau *webinar* terkait keselamatan radiasi dan nuklir yang disebarkan di media sosial. Sampai buku ini disusun, HIMNI (Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia) telah membuat *webinar* terkait teknologi nuklir secara rutin setiap hari Kamis, yang juga disiarkan melalui YouTube. Namun, untuk menjembatani perbedaan persepsi risiko, selayaknya juga dibuat *webinar* yang khusus membahas keselamatan radiasi dan nuklir.

2. Rumor dan informasi yang salah: Kecemasan yang meningkat selama dan setelah terjadinya bencana nuklir atau radiasi dapat diperparah oleh rumor dan informasi yang salah, sehingga memperberat bahaya kesehatan yang timbul. Rumor akan muncul dari berbagai sumber selama tanggap darurat, dan saat ini diperkirakan sumber terbesar berasal dari media sosial, yang memungkinkan informasi keliru dan spekulasi menyesatkan menjadi tersebar.

   Persiapan untuk menanggapi rumor dan informasi yang salah harus dilakukan sejak awal guna memastikan bahwa hal tersebut tidak membuat masyarakat mengambil tindakan berdasarkan informasi yang keliru atau menyesatkan. Persiapan ini harus mampu mengidentifikasi rumor dan informasi keliru melalui pemantauan media serta menangkalnya melalui komunikasi publik.

3. Memelihara kepercayaan publik: Tingkat kepercayaan publik diperkirakan akan memengaruhi seberapa besar keinginan publik untuk mematuhi instruksi tentang tindakan protektif dan tindakan tanggap darurat lainnya. Selain itu, hilangnya ke-

Buku ini tidak diperjualbelikan

percayaan publik juga diduga akan meningkatkan kemungkinan orang untuk mengambil tindakan yang tidak diinginkan selama keadaan darurat. Publik juga tidak memiliki pandangan yang sama tentang pihak mana yang dapat dipercaya.

Untuk itu, semua upaya harus dilakukan untuk mendapatkan dan mempertahankan kepercayaan publik dalam tanggap darurat, yang harus dimulai sejak awal saat fasilitas nuklir atau radiasi telah dipastikan akan dibangun. Komunikasi publik harus memiliki fitur-fitur penting untuk membantu mempertahankan kepercayaan publik selama keadaan darurat nuklir atau radiasi.

4. Ketepatan waktu dan keakuratan informasi: Beberapa jam pertama setelah tanggap darurat nuklir atau radiasi sangat penting bagi respons komunikasi publik. Meningkatnya penggunaan media sosial saat ini meningkatkan permintaan akan komunikasi publik yang tepat waktu. Meskipun publik dan pihak yang berkepentingan akan menuntut informasi rinci dengan segera, organisasi tanggap darurat biasanya belum dapat memastikan kebenaran informasi yang tersedia pada tahap awal tanggap darurat.

   Untuk menangani isu ketepatan dan keakuratan informasi ini, petugas humas (hubungan masyarakat) harus dapat menyusun pernyataan awal untuk membangun saluran komunikasi publik, mencegah rumor dan informasi yang salah, serta mengklarifikasi jenis informasi mana yang telah dikonfirmasi dan mana yang belum. Petugas humas juga harus memberitahukan kapan, dan dalam kondisi apa informasi lebih lanjut akan tersedia.

5. Mengenali konteks sosial: Program komunikasi publik harus mempertimbangkan fakta bahwa pelaksanaan komunikasi publik dan persepsi publik terhadap bencana radiasi atau nuklir dapat berbeda-beda, bergantung pada konteks sosial seperti latar belakang pekerjaan, pendidikan, ekonomi, dan bahasa. Hal ini mungkin berarti bahwa langkah-langkah penjangkauan perlu disesuaikan untuk memastikan penerimaan yang optimal.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Untuk komunikasi publik yang efektif dengan media dan publik, perbedaan dalam konteks sosial ini perlu dipahami. Untuk itu, harus dilakukan persiapan yang matang agar komunikasi dengan semua strata sosial dapat berlangsung dengan baik.

6. Komunikasi dua arah: Keadaan darurat nuklir atau radiasi akan memerlukan komunikasi dua arah, dari otoritas yang berwenang ke media atau publik, dan sebaliknya. Dalam hal ini, juru bicara adalah pejabat yang ditunjuk untuk berbicara kepada media dengan dukungan dari spesialis komunikasi publik/hubungan media, yang akan mengoordinasikan semua tanggapan agar tidak ada pesan yang saling bertentangan. Juru bicara sedapat mungkin harus memiliki keahlian teknis, kemampuan komunikasi yang baik, serta mampu menyederhanakan informasi ilmiah dan teknis agar dapat dipahami dengan baik oleh masyarakat umum (IAEA, 2020).

   Dalam berkomunikasi dengan media atau publik, juru bicara harus berbicara secara terus terang menjelaskan apa yang terjadi, percaya diri, jujur, dan konsisten. Selain itu, juru bicara juga harus memberikan perhatian penuh kepada penanya, menjawab dengan singkat, jelas, tegas, tulus, penuh energi, dan antusias terhadap setiap pertanyaan.

Jika kecelakaan radiasi atau nuklir hanya berdampak pada fasilitas, tanggung jawab komunikasi dengan media dan publik dapat sepenuhnya berada pada juru bicara fasilitas tersebut. Namun, pemegang izin wajib memberikan informasi yang lebih komprehensif kepada pemerintah daerah dan BPBD setempat, dan juga BAPETEN. Pemegang izin juga dapat berkoordinasi dengan ketiga institusi ini untuk mengatasi rumor dan informasi yang keliru yang dapat mengakibatkan kesalahan pengambilan tindakan oleh publik (BAPETEN, 2021).

Jika kecelakaan radiasi atau nuklir, dan juga ledakan berbasis radiasi atau nuklir, berdampak pada publik secara luas, tanggung jawab komunikasi dengan media dan publik berada di pihak Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), yang harus segera membentuk

Buku ini tidak diperjualbelikan

Organisasi Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedauratan Nuklir Nasional dengan anggota yang berasal dari berbagai organisasi yang terkait dan relevan. Sesuai dengan mekanisme dan koordinasi yang dilakukan, juru bicara yang ditunjuk berasal dari unsur teknis, seperti BAPETEN atau BRIN. Juru bicara harus terus-menerus melakukan komunikasi dengan koordinator tim penanggulangan di tempat kejadian perkara agar informasi yang kemudian disampaikan ke publik selalu mutakhir.

Di era digital saat ini, tim juru bicara juga harus dapat mengantisipasi bahwa media berita dan media sosial akan meningkatkan permintaan komunikasi dua arah selama keadaan darurat. Hal ini, pada gilirannya, akan memerlukan peningkatan sumber daya untuk memungkinkan penyebaran informasi dan komunikasi publik yang cepat setiap saat, tergantung pada sifat dan tingkat keparahan keadaan darurat.

D. Pengembalian Tapak dan Lokasi ke Keadaan Normal

Dalam nomenklatur ICRP, keadaan darurat radiasi atau nuklir juga disebut sebagai situasi paparan darurat. Per definisi, situasi paparan darurat adalah situasi paparan yang terjadi akibat hilangnya kendali atas suatu sumber, atau akibat penyalahgunaan sumber yang disengaja, yang memerlukan tindakan segera dan tepat waktu untuk menghindari atau mengurangi paparan (ICRP, t.t.-b).

Semua tindakan yang dilakukan untuk menghindari atau mengurangi paparan, seperti yang telah diuraikan pada Bagian A dari Bab VII ini, juga disebut sebagai kegiatan remediasi. Tujuan remediasi adalah mengembalikan tapak dan lokasi ke keadaan normal seperti sebelum terjadinya bencana radiasi atau nuklir.

Dalam istilah ICRP, keadaan normal tersebut juga disebut sebagai situasi paparan eksisting. Berdasarkan definisi yang diberikan ICRP, situasi paparan eksisting adalah situasi paparan yang diakibatkan oleh sumber yang sudah ada, tanpa ada maksud untuk menggunakan

Buku ini tidak diperjualbelikan

sumber tersebut karena sifat radioaktifnya, sebelum pengambilan keputusan dilakukan untuk mengendalikan paparan yang diakibatkannya. (ICRP, t.t.-b).

Jenis dan luas tindakan remediasi perlu mempertimbangkan rencana penggunaan tapak atau lokasi terkait di masa mendatang, serta apakah tapak tersebut dapat digunakan dengan atau tanpa pembatasan. Pembatasan dapat berupa akses terbatas, penggunaan untuk aktivitas tertentu (misalnya pembangunan rumah, dijadikan lahan bercocok tanam) atau prosedur tertentu (misalnya bahan hanya dapat didaur ulang atau digunakan kembali dalam suatu fasilitas). Dalam beberapa keadaan, tapak atau lokasi yang diizinkan untuk dimanfaatkan tanpa pembatasan tidak dapat dimanfaatkan dalam jangka waktu yang cukup lama. Dalam kasus ini, beberapa persyaratan terkait tapak dan lokasi yang sesuai dengan standar keselamatan internasional perlu ditetapkan oleh badan pengawas sebelum keputusan untuk mengizinkan pemanfaatan tapak atau lokasi tersebut dapat diambil (IAEA, 2023c).

Seiring dengan tindakan remediasi yang dilakukan, terjadi pula proses transisi dari situasi paparan darurat ke situasi paparan eksisting. Fase transisi dapat berlangsung dari beberapa hari hingga beberapa bulan, kecuali untuk keadaan darurat skala kecil (seperti keadaan darurat selama pengangkutan bahan nuklir atau zat radioaktif) yang mungkin hanya berlangsung tidak lebih dari satu hari. Selain itu, jika tapak atau lokasi terdampak cukup luas, kecepatan transisi akan berbeda dari satu bagian lokasi ke bagian lokasi yang lain. Dalam hal ini, ada kemungkinan satu bagian lokasi akan terus dikelola sebagai situasi paparan darurat, sementara bagian lokasi yang lain telah dapat dikelola sebagai situasi paparan eksisting.

Transisi juga akan memerlukan transfer tanggung jawab kepada otoritas berwenang yang berbeda. Transfer ini harus dilakukan secara terkoordinasi dan sepenuhnya transparan, dan harus dipahami oleh semua pihak yang terlibat. Untuk memuluskan transfer tanggung jawab, perencanaan untuk transisi dari situasi paparan darurat ke situasi paparan eksisting harus dilakukan sebagai bagian dari upaya

Buku ini tidak diperjualbelikan

kesiapsiagaan dan tanggap darurat secara keseluruhan, dan harus melibatkan pemangku kepentingan yang relevan.

Ujung dari proses transisi adalah penghentian upaya remediasi jika situasi paparan di lokasi telah dipahami sepenuhnya, sumber radiasi telah terkendali, tidak ada lagi pelepasan radioaktif atau paparan radiasi yang tidak sengaja yang signifikan, dan kemungkinan perkembangan situasi di masa mendatang juga telah dapat diprediksi dengan baik.

Pada kasus ledakan nuklir, orang-orang di sebagian besar area yang terdampak dapat diizinkan untuk keluar dari tempat berlindung dalam beberapa hari dan, jika perlu, mengungsi ke wilayah yang tidak terdampak. Dampak terberat akan terbatas pada wilayah di sekitar atau di bawah arah angin ledakan. Karena hal ini, mereka yang berada di area di bawah arah angin dari ledakan mungkin perlu berlindung selama satu bulan atau lebih.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab VIII

Instrumen Legal



Instrumen legal adalah dokumen resmi yang mengikat secara hukum dan menetapkan hak, tugas, serta kewajiban para pihak dalam instrumen tersebut. Dalam kaitannya dengan upaya untuk mencegah terjadinya bencana nuklir dalam bentuk kecelakaan ataupun ledakan berbasis radiasi dan nuklir, instrumen hukum internasional diadopsi dalam bentuk resolusi Sidang Dewan Keamanan PBB dan traktat yang diadopsi oleh Sidang Majelis Umum PBB.

Selain itu, negara-negara di kawasan Asia Tenggara juga memiliki instrumen hukum tersendiri untuk menjaga kawasan ini bebas dari senjata nuklir dan senjata pemusnah massal lainnya.

Secara nasional, beberapa Undang-Undang dan Peraturan Pemerintah juga diberlakukan sebagai landasan dalam melakukan upaya kegiatan penanggulangan bencana, baik yang bersifat umum maupun yang terkait dengan bencana nuklir dan radiasi. Sesuai dengan perkembangan teknologi dan geopolitik yang berkembang,

Buku ini tidak diperjualbelikan

semua instrumen hukum internasional dan nasional ini akan terus mengalami perubahan, perbaikan, dan penyempurnaan.

A. Instrumen Legal Internasional

Kerangka legal internasional untuk mencegah terjadinya bencana nuklir dibuat oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) dan beberapa badan dan organisasi yang berada di lingkungannya, seperti Dewan Keamanan (DK). Kerangka legal internasional yang ada saat ini dapat dibedakan menjadi resolusi DK PBB dan traktat yang bersifat mengikat, serta resolusi Sidang Majelis Umum PBB dan resolusi yang disusun oleh organisasi di lingkungan PBB, seperti IAEA, yang bersifat tidak mengikat.

1. Resolusi DK PBB 1373 (2001)

Resolusi Dewan Keamanan PBB 1373, yang diadopsi dengan suara bulat pada tanggal 28 September 2001, merupakan tanggapan atas serangan teroris 11 September 2001, dan menjadi dokumen dasar dalam perang melawan terorisme internasional. Resolusi DK PBB 1373 menetapkan kerangka kerja yang luas untuk penanggulangan terorisme, termasuk langkah-langkah untuk mencegah dan memerangi terorisme secara global.

Ketentuan pokok dari resolusi 1373 tahun 2001 ini adalah mengenai berikut ini.

a. Kriminalisasi Terorisme dan Pendanaan Teroris

   Resolusi ini mengamanatkan negara-negara anggota PBB untuk mengkriminalisasi terorisme, pendanaan terorisme, dan penampungan teroris. Negara-negara diharuskan untuk membekukan aset yang terkait dengan terorisme dan mencegah penggunaan sistem keuangan untuk kegiatan terorisme.

b. Penguatan Keamanan Perbatasan

   Resolusi ini menyerukan peningkatan keamanan perbatasan, peningkatan kontrol pada dokumen perjalanan, dan pencegahan pergerakan teroris melalui perbatasan negara-negara anggota.

Buku ini tidak diperjualbelikan

c. Kerja Sama Internasional

Resolusi ini menekankan pentingnya kerja sama internasional, mendesak negara-negara untuk berbagi intelijen, saling membantu dalam penyelidikan, dan mengadili mereka yang terlibat dalam tindakan teroris.

d. Mencegah Dukungan bagi Teroris

Resolusi melarang negara memberikan segala bentuk dukungan kepada entitas atau individu yang terlibat dalam aksi teroris, termasuk tempat berlindung yang aman, serta mengharuskan negara menolak memberikan perlindungan kepada teroris atau mereka yang membantu terorisme.

e. Pembentukan Komite Kontra-Terorisme (CTC)

Resolusi menetapkan pembentukan Komite Kontra-Terorisme (*Counter-Terrorism Committee*), yang memantau penerapan resolusi oleh negara-negara anggota dan membantu mereka memperkuat kemampuan kontra-terorisme mereka.

Sampai saat ini, Resolusi 1373 tetap penting dan relevan karena menetapkan kerangka hukum untuk upaya internasional melawan terorisme dan telah menjadi pegangan dalam penyusunan undang-undang nasional, peraturan keuangan, dan protokol keamanan di seluruh dunia.

2. Resolusi DK PBB 1540 (2004)

Resolusi Dewan Keamanan Perserikatan Bangsa-Bangsa 1540, yang diadopsi pada tanggal 28 April 2004, merupakan langkah internasional utama yang bertujuan mencegah penyebaran senjata pemusnah massal (WMD, *Weapons of Mass Destruction*) kepada aktor nonnegara, khususnya teroris.

Unsur utama dari Resolusi DK PBB 1540 Tahun 2004 ini adalah sebagai berikut.

Buku ini tidak diperjualbelikan

a. Mandat Nonproliferasi

Resolusi mengamanatkan agar semua negara anggota PBB mencegah aktor nonnegara memperoleh, menggunakan, atau memperdagangkan senjata nuklir, kimia, dan biologi serta sistem pengirimannya.

b. Langkah-Langkah Pengendalian Domestik

Negara-negara diharuskan untuk memberlakukan dan menegakkan hukum yang melarang aktor nonnegara memiliki dan mentransfer WMD, termasuk mengadopsi langkah-langkah untuk memastikan keamanan fisik serta penanganan yang tepat atas bahan-bahan terkait WMD di wilayah mereka.

c. Pengendalian Ekspor

Resolusi menekankan perlunya pengendalian ekspor yang ketat untuk mencegah penyebaran bahan dan teknologi terkait WMD. Negara-negara anggota diharuskan untuk menetapkan dan mempertahankan pengendalian yang efektif atas ekspor, transit, dan penggunaan akhir bahan-bahan tersebut.

d. Kerja Sama Internasional

Resolusi mendorong negara-negara anggota untuk bekerja sama dan berbagi praktik terbaik, teknologi, serta informasi guna meningkatkan kemampuan mereka dalam nonproliferasi.

e. Komite 1540

Untuk memantau dan memfasilitasi implementasi, resolusi membentuk Komite 1540 yang memberikan dukungan, panduan, dan bantuan kepada negara-negara anggota, serta melakukan pelaporan berkala mengenai kemajuan negara-negara tersebut.

Resolusi 1540 sampai saat ini tetap menjadi pilar penting upaya nonproliferasi global, yang berupaya mencegah WMD jatuh ke tangan teroris dan kelompok tidak sah lainnya. Resolusi mengharuskan semua negara anggota PBB untuk berpartisipasi aktif dalam upaya menegakkan prinsip-prinsip yang tercantum dalam resolusi ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan

3. Traktat NonProliferasi Senjata Nuklir

Traktat nonproliferasi senjata nuklir (NPT, *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*) adalah traktat internasional yang bertujuan untuk mencegah penyebaran senjata nuklir dan mendorong penggunaan energi nuklir secara damai. Traktat merupakan satu-satunya komitmen yang mengikat dalam perjanjian multilateral untuk tujuan pelucutan senjata oleh negara-negara pemilik senjata nuklir. Traktat dibuka untuk ditandatangani pada tahun 1968 dan mulai berlaku pada tahun 1970.

Sebanyak 191 negara telah bergabung dalam traktat tersebut, termasuk lima negara pemilik senjata nuklir. Kenyataan ini menunjukkan bahwa traktat ini menjadi salah satu traktat pengendalian senjata yang paling banyak disepakati. Namun, tiga negara yang diduga kuat memiliki senjata nuklir (India, Pakistan, dan Israel) tidak pernah bergabung dengan NPT. Korea Utara juga menarik diri dari traktat pada tahun 2003 dan kemudian mengembangkan senjata nuklir.

Isu utama NPT dikandung pada tiga pasal utamanya, yaitu sebagai berikut.

a. Pasal 1: Setiap Negara Pihak pada Traktat yang memiliki senjata nuklir berjanji untuk tidak mengalihkan senjata nuklir, atau alat peledak nuklirnya, atau pengendalian senjata atau alat ledak semacam itu, secara langsung atau tidak langsung kepada penerima mana pun.
b. Pasal III: Setiap Negara Pihak pada Traktat yang tidak memiliki senjata nuklir harus melaksanakan persetujuan gardaman[6] dengan IAEA dalam semua kegiatan damai nuklirnya dengan tujuan mencegah penyimpangan energi nuklir menjadi senjata atau alat ledak nuklir lainnya melalui kegiatan verifikasi pemenuhan kewajibannya berdasar Traktat.

[6] Gardaman (safeguards) adalah setiap tindakan yang ditujukan untuk memastikan bahwa tujuan pemanfaatan bahan nuklir hanya untuk maksud damai.

Buku ini tidak diperjualbelikan

c. Pasal IV: Traktat mengakui hak semua Negara Pihak untuk memiliki peralatan, bahan, dan informasi ilmiah dan teknologi nuklir dalam aplikasinya untuk tujuan damai.

Beberapa pengamat berpendapat bahwa NPT tidak setara, karena memungkinkan beberapa negara memiliki senjata nuklir sementara mencegah negara lain memperolehnya. Lambatnya kemajuan pelucutan senjata nuklir oleh negara-negara yang diakui memiliki senjata nuklir telah menjadi perhatian utama. Kepatuhan dan penegakan hukum masih menjadi masalah, seperti yang terlihat dalam kasus-kasus di Korea Utara dan Iran.

Untuk menilai kemajuan Traktat dan mengatasi tantangannya, Pasal VII Traktat meminta agar setiap 5 tahun sekali diadakan konferensi tinjauan (RevCon, *review conference*). RevCon tahun 1975 menegaskan dukungan semua Pihak terhadap NPT, gardaman IAEA, dan rekomendasi perluasan agar NPT bersifat universal, sedangkan pada RevCon tahun 1995 dicapai kesepakatan bahwa Traktat diperpanjang hingga waktu yang belum ditentukan.

Pada RevCon tahun 2022, setelah mengalami beberapa penundaan akibat pandemi COVID-19, 17 Negara Pihak, termasuk Indonesia, mengeluarkan komunike bersama yang menyatakan bahwa "sekarang merupakan saat yang tepat bagi Negara Pihak untuk menerjemahkan kata-kata (pada traktat) menjadi tindakan nyata yang didukung oleh tolok ukur dan jadwal yang jelas serta disepakati". Hanya melalui upaya seperti ini kita dapat melihat ke depan menuju kesuksesan NPT dalam 50 tahun mendatang, meningkatkan pencapaian penting dari 50 tahun terakhir, yang saat ini kita peringati bersama (Joint Communique, 2020).

4. Traktat Larangan Uji Coba Nuklir Komprehensif

Traktat Larangan Uji Coba Nuklir Komprehensif (CTBT, *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*) adalah traktat internasional yang bertujuan untuk melarang semua ledakan nuklir untuk tujuan militer atau sipil. Traktat diadopsi oleh Sidang Majelis Umum PBB pada tanggal 10 September 1996, diadopsi oleh Sidang Umum melalui resolusi

Buku ini tidak diperjualbelikan

50/245, dan terbuka untuk ditandatangani oleh semua negara anggota PBB pada 24 September 1996 (CTBTO, t.t.-a).

CTBT melarang semua ledakan uji coba nuklir, termasuk uji coba di bawah tanah, di bawah air, dan di atmosfer. Verifikasi dilakukan oleh Organisasi Traktat Pelarangan Uji Coba Nuklir Komprehensif (CTBTO) yang akan memantau kepatuhan melalui jaringan stasiun seismik, hidroakustik, infrasonik, dan radionuklida global. CTBT sangat penting untuk mencegah pengembangan senjata nuklir baru, mengurangi risiko proliferasi nuklir dan perlombaan senjata, serta melindungi lingkungan dari kontaminasi radioaktif.

Namun demikian, Traktat masih belum berlaku atau belum menjadi hukum internasional hingga saat ini, meskipun telah ditandatangani oleh 187 negara dan diratifikasi oleh 178 negara. Traktat baru akan berlaku sepenuhnya jika telah ditandatangani dan diratifikasi oleh 44 negara yang tercantum dalam Annex 2 Traktat. Dari 44 negara tersebut, tiga negara belum menandatangani (Korea Utara, India, dan Pakistan), dan sembilan negara belum meratifikasinya (Cina, Korea Utara, Mesir, India, Iran, Israel, Pakistan, Rusia, dan AS) (CTBTO, t.t.-b). Tanda tangan merupakan tanda bahwa suatu negara bersedia melanjutkan proses pembuatan Traktat menuju ratifikasi, sementara ratifikasi adalah persetujuan suatu negara untuk terikat pada Traktat.

Jika telah menjadi hukum internasional, tugas untuk melakukan verifikasi dalam penerapan Traktat akan dilaksanakan oleh CTBTO. Sambil menunggu CTBT berlaku, dunia internasional membentuk Komisi Persiapan (PrepCom, *Preparatory Commission*) CTBTO berdasarkan resolusi PBB pada bulan November 1996. Tugas utama PrepCom CTBTO adalah untuk melaksanakan persiapan yang diperlukan demi penerapan CTBT yang efektif dan untuk mempersiapkan sidang pertama Konferensi Negara-Negara Pihak pada Perjanjian, yang akan berlangsung setelah CTBT mulai berlaku.

Karena PrepCom CTBTO bukan organisasi yang dibentuk berdasarkan hukum internasional, belum ada kerangka legal yang dapat mengikat yang dibuat atas nama organisasi ini. Kerangka legal internasional yang relevan yang ada saat ini adalah resolusi yang dikeluarkan oleh Dewan Keamanan PBB.

Buku ini tidak diperjualbelikan

5. Traktat Larangan Senjata Nuklir

Traktat Larangan Senjata Nuklir (TPNW, *Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons*) adalah traktat internasional yang bertujuan untuk melarang senjata nuklir secara menyeluruh. Traktat diadopsi oleh Sidang Majelis Umum PBB pada 7 Juli 2017, dan mulai berlaku pada 22 Januari 2021. Traktat merupakan langkah signifikan menuju pelucutan senjata nuklir dengan menjadikan senjata nuklir ilegal menurut hukum internasional bagi negara-negara yang menjadi pihak di dalamnya (UNODA, t.t.-b).

Traktat diadopsi oleh Sidang Majelis PBB (dengan 122 negara mendukung, satu negara menentang, dan satu negara abstain) pada 7 Juli 2017, dan dibuka untuk penandatanganan pada 20 September 2017. Setelah instrumen ratifikasi ke-50, Traktat diserahkan kepada Sekretaris Jenderal PBB pada 24 Oktober 2020, perjanjian ini mulai berlaku pada 22 Januari 2021 sesuai dengan Pasal 15 ayat (1).

Hingga tahun 2024, lebih dari 90 negara telah menandatangani Traktat dan lebih dari 70 negara telah meratifikasinya. Namun, tidak ada negara bersenjata nuklir (Amerika Serikat, Rusia, Tiongkok, Prancis, Inggris, India, Pakistan, Israel, dan Korea Utara) yang bergabung. Negara-negara anggota NATO dan sekutu di bawah payung nuklir AS (seperti Jepang dan Korea Selatan) juga belum menandatangani perjanjian tersebut, dengan alasan bahwa pencegahan nuklir diperlukan untuk keamanan.

Isu utama yang dikandung TPNW adalah berikut ini.

a. Larangan, yang secara tegas melarang:
    - pengembangan, pengujian, produksi, perolehan, pemilikan, dan penimbunan senjata nuklir;
    - penggunaan atau ancaman penggunaan senjata nuklir;
    - pengalihan dan penempatan senjata nuklir;
    - bantuan atau dorongan kepada negara mana pun untuk terlibat dalam kegiatan terlarang ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan

b. Kewajiban bagi negara pemilik senjata nuklir:
    - jika negara pemilik senjata nuklir bergabung dengan Traktat, negara tersebut harus segera menghapus senjata nuklirnya dari status operasional dan menghancurkannya dengan cara yang mengikat secara hukum dan tepat waktu;
    - negara juga harus menerima verifikasi internasional untuk memastikan kepatuhan.
c. Dukungan untuk korban dan remediasi lingkungan:
    - Traktat mewajibkan bantuan bagi korban akibat penggunaan senjata nuklir dan pengujiannya;
    - Traktat juga mengamanatkan upaya untuk memulihkan wilayah yang terkontaminasi akibat ledakan nuklir.

Secara umum, TPNW melengkapi, tetapi berbeda dari, perjanjian NPT. NPT masih mengizinkan negara-negara pemilik senjata nuklir untuk memiliki senjata nuklir tersebut untuk sementara, sementara TPNW menyerukan penghapusan senjata nuklir secara menyeluruh. Para pendukung TPNW melihat bahwa traktat ini menjadi langkah penting dan bersejarah menuju dunia yang bebas senjata nuklir serta memperkuat hukum kemanusiaan. Namun, para penentangnya, terutama negara pemilik senjata nuklir, berpendapat bahwa traktat tersebut merusak kerangka keamanan berbasis pencegahan nuklir.

Para pengamat, sementara itu, berpendapat bahwa traktat tidak memiliki mekanisme verifikasi yang cukup kuat untuk menegakkan pelucutan senjata. Yang jelas, diadopsinya Traktat mencerminkan meningkatnya tekanan global untuk pelucutan senjata nuklir, meskipun efektivitasnya bergantung pada upaya membujuk negara-negara bersenjata nuklir untuk bergabung dalam Traktat tersebut.

6. Konvensi Proteksi Fisik Bahan Nuklir

Konvensi Proteksi Fisik Bahan Nuklir (CPPNM, *Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*) merupakan satu-satunya persetujuan internasional yang mengikat terkait proteksi fisik bahan nuklir.

Buku ini tidak diperjualbelikan

7. Konvensi Internasional untuk Penanggulangan Tindak Terorisme Nuklir

Konvensi Internasional untuk Penanggulangan Tindak Terorisme Nuklir (ICSANT, *International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism*) merupakan satu-satunya perjanjian internasional yang mengikat secara hukum tentang keamanan sumber radioaktif. Konvensi diadopsi oleh Majelis Umum PBB pada tanggal 13 April 2005, dibuka untuk penandatanganan pada tanggal 14 September 2005, dan kemudian mulai berlaku pada tanggal 7 Juli 2007.

ICSANT bertujuan untuk mencegah dan mengkriminalisasi aksi terorisme nuklir dengan menetapkan kerangka hukum untuk kerja sama internasional dalam menyelidiki, mengadili, dan mengekstradisi individu yang terlibat dalam kepemilikan dan penggunaan bahan nuklir atau radioaktif secara ilegal untuk tujuan teroris.

Konvensi mendefinisikan terorisme nuklir sebagai kepemilikan, penggunaan, atau ancaman penggunaan bahan nuklir atau radioaktif secara ilegal dengan maksud untuk menimbulkan kerugian. Konvensi ini juga mengkriminalisasi serangan terhadap fasilitas nuklir yang dapat menyebabkan kerugian yang signifikan.

B. Instrumen Legal Kawasan Asia Tenggara

Negara-negara yang tergabung dalam Perhimpunan Bangsa-Bangsa Asia Tenggara (ASEAN) pada tahun 1997 telah mengadopsi Traktat Zona Bebas Senjata Nuklir di Asia Tenggara (SEANWFZ, *Southeast Asia Nuclear-Weapon-Free Zone Treaty*) sebagai komitmen untuk menjaga kawasan Asia Tenggara sebagai kawasan yang bebas dari senjata nuklir dan senjata pemusnah massal lainnya. Perjanjian ini juga dikenal sebagai Perjanjian Bangkok (ASEAN, t.t.).

Protokol dari Traktat mengundang lima negara pemilik senjata nuklir untuk berpartisipasi, yang akan mewajibkan mereka untuk tidak mengancam atau menggunakan senjata nuklir terhadap anggota Traktat. Namun hingga saat ini, kelima negara tersebut masih belum mau menandatanganinya. Baru setelah berdirinya AUKUS pada

Buku ini tidak diperjualbelikan

tahun 2021—kemitraan keamanan AS-Inggris-Australia—Tiongkok menyatakan minatnya untuk menandatangani protokol tersebut dengan syarat negara-negara pemilik senjata nuklir lainnya melakukan hal yang sama (Li, 2024).

Selain itu, negara-negara ASEAN juga membentuk Jaringan Badan Pengawas Energi Atom ASEAN (ASEANTOM) yang berfokus pada berbagi praktik penerapan terbaik, meningkatkan kerangka kerja pengawasan, dan membangun kapasitas melalui kursus pelatihan dan kolaborasi teknis dengan organisasi internasional lain seperti IAEA dan Komisi Eropa. Kolaborasi regional utama lainnya tentang keamanan nuklir adalah Kemitraan Keamanan Radiasi Regional di Asia Tenggara (RRSP), yang beranggotakan negara-negara Asia Tenggara, Australia, Amerika Serikat, dan IAEA.

Diluncurkan oleh Australia pada tahun 2004, RRSP terutama bertujuan untuk meningkatkan proteksi fisik dan manajemen keamanan sumber radioaktif berisiko tinggi di Asia Tenggara melalui bantuan teknis dan pelatihan, penyediaan peralatan deteksi radiasi, dan berbagi praktik penerapan terbaik. Program ini juga memfasilitasi pencarian sumber radioaktif yang hilang secara kooperatif dan tanggap darurat di antara badan-badan nasional, pengawas, dan penegak hukum (Caballero-Anthony & Trajano, 2018).

C. Instrumen Legal Nasional

Berbagai peraturan dan pedoman nasional terkait kegiatan penanggulangan bencana secara umum, keselamatan dan keamanan sumber radiasi dan bahan nuklir, dan kesiapsiagaan dan penanggulangan bencana nuklir, sudah terbit dan berlaku. Peraturan terkait kegiatan penanggulangan bencana secara umum berguna dalam mengatur koordinasi antarinstitusi dalam upaya penanggulangan bencana yang terjadi Indonesia. Peraturan terkait keselamatan dan keamanan sumber radiasi dan bahan nuklir merupakan dasar dari semua dalam upaya pencegahan agar sumber radiasi dan bahan nuklir tidak disalahgunakan dan menjadi bahan baku untuk pembuatan senjata berbasis radiasi dan nuklir, sementara peraturan serta pedoman kesiapsiagaan

Buku ini tidak diperjualbelikan

dan penanggulangan bencana nuklir berfungsi sebagai acuan dalam melakukan upaya teknis penanggulangan bencana akibat ledakan senjata berbasis radiasi dan nuklir ini.

1. Peraturan Terkait Kegiatan Penanggulangan Bencana secara Umum

Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 merupakan peraturan tertinggi yang menjadi dasar pelaksanaan kegiatan penanggulangan bencana di Indonesia. UU ini menyatakan bahwa penanggulangan bencana bertujuan, antara lain, untuk menjamin terselenggaranya penanggulangan bencana secara terencana, terpadu, terkoordinasi, dan menyeluruh. Bencana itu sendiri didefinisikan sebagai peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan, baik oleh faktor alam dan/atau faktor nonalam maupun faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis.

Mengingat luasnya wilayah Indonesia, pemerintah menetapkan status dan tingkatan bencana pada tingkat nasional dan daerah. Penetapan status dan tingkat bencana tersebut ditentukan oleh beberapa indikator, yaitu jumlah korban, kerugian harta benda, kerusakan prasarana dan sarana, luas wilayah terdampak, serta dampak sosial ekonomi yang ditimbulkan.

Melalui Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2008, pemerintah membentuk Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) untuk menyelenggarakan penanggulangan bencana di tingkat nasional, dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) untuk menyelenggarakan penanggulangan bencana di daerah. Ketentuan lebih lanjut terkait BNPB diatur dalam Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 1 Tahun 2019 jo. Perpres Nomor 29 Tahun 2021 tentang BNPB, yang menetapkan kedudukan, tugas dan fungsi BNPB, juga menegaskan bahwa apabila terjadi bencana nasional, BNPB melaksanakan fungsi komando dalam penanganan status keadaan darurat bencana.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Untuk mendukung penanganan keadaan darurat bencana, BNPB kemudian membentuk klaster penanggulangan bencana yang aktif pada tahap prabencana, keadaan darurat bencana, dan pascabencana. Berdasarkan Keputusan Kepala BNPB Nomor 308 Tahun 2024, klaster penanggulangan bencana terdiri atas klaster pencarian dan pertolongan, klaster pengungsian dan perlindungan, klaster logistik, klaster kesehatan, klaster pendidikan, dan klaster pemulihan. Tiap-tiap klaster tersebut dikoordinasikan oleh Kementerian/Lembaga sesuai dengan fungsi dan kewenangannya, sementara koordinasi antarklaster dipimpin oleh Deputi Bidang Penanganan Darurat BNPB.

2. Peraturan Terkait Keselamatan dan Keamanan Sumber Radiasi dan Bahan Nuklir

Undang-Undang (UU) Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran merupakan peraturan tertinggi dalam semua kegiatan ketenaganukliran di Indonesia, termasuk semua peraturan dan pedoman nasional terkait keselamatan dan keamanan sumber radiasi dan bahan nuklir. Dalam UU No, 10 Tahun 1997 ini, semua istilah yang terkait radiasi dan nuklir, seperti sumber radiasi, bahan radioaktif, dan bahan nuklir, digabung menjadi hanya tenaga nuklir. Pasal 16 dari UU Nomor 10 Tahun 1997 menyatakan bahwa setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketenteraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup.

Beberapa peraturan pelaksana dari UU No. 10 Tahun 1997 yang terkait keselamatan dan keamanan sumber radiasi dan bahan nuklir adalah sebagai berikut.

a. Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir, yang mengatur tentang teknis keselamatan instalasi nuklir, teknis keamanan instalasi nuklir, manajemen keselamatan dan keamanan instalasi nuklir, serta kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir.

Buku ini tidak diperjualbelikan

b. PP Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif, yang 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 kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan dalam pengangkutan zat radioaktif, dan penatalaksanaan pengangkutan zat radioaktif.

c. PP Nomor 52 Tahun 2022 tentang Keselamatan dan Keamanan Pertambangan Bahan Galian Nuklir, yang mengatur tentang keselamatan pertambangan bahan galian nuklir, keamanan pertambangan bahan galian nuklir, serta manajemen keselamatan dan keamanan pertambangan bahan galian nuklir.

d. PP Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif, yang mengatur tentang keselamatan radiasi, keamanan zat radioaktif, manajemen keselamatan radiasi dan keamanan zat radioaktif, dan inspeksi dalam pemanfaatan tenaga nuklir.

3. Peraturan dan Pedoman Terkait Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Bencana Nuklir

Peraturan dan pedoman terkait kesiapsiagaan dan penanggulangan bencana nuklir merupakan peraturan pelaksana dari beberapa PP yang telah disebutkan terdahulu. Beberapa peraturan dan pedoman tersebut adalah sebagai berikut.

a. Peraturan Kepala (Perka) Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 1 Tahun 2010 tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir, yang mengatur tentang kesiapsiagaan nuklir dan penanggulangan kedaruratan nuklir.

b. Perka BAPETEN Nomor 4 Tahun 2011 tentang Sistem Seifgard, yang mengatur tentang persyaratan sistem seifgard yang meliputi pertanggungjawaban dan pengendalian bahan nuklir dan inspeksi seifgard.

Buku ini tidak diperjualbelikan

c. Perka BAPETEN Nomor 17 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kegiatan Impor, Ekspor, dan Pengalihan Barang Konsumen, yang mengatur tentang persyaratan izin dalam kegiatan impor, ekspor, dan/atau pengalihan barang konsumen, persetujuan impor barang konsumen, persetujuan ekspor barang konsumen, dan keselamatan radiasi dalam kegiatan impor, ekspor dan/atau pengalihan barang konsumen.

d. Perka BAPETEN Nomor 2 Tahun 2017 tentang Larangan dan Pembatasan Impor dan Ekspor Barang Konsumen, Sumber Radiasi Pengion, dan Bahan Nuklir, yang mengatur tentang larangan dan pembatasan impor dan ekspor barang konsumen, serta pembatasan impor dan ekspor sumber radiasi pengion dan bahan nuklir.

e. Pedoman BAPETEN No.Rek.PUK/DK2N.3/NN.21 Tahun 2015 tentang Pedoman Organisasi Tanggap Darurat Nuklir Nasional (OTDNN).

f. Pedoman BAPETEN No.Rek.PUK/DK2N.3/PT.16 Tahun 2021 tentang Pedoman Kesiapsiagaan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir Nasional.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Bab IX

Kesiapan Menghadapi Bencana



Fokus utama buku ini adalah memberikan informasi kepada masyarakat umum tentang tindakan awal yang praktis dapat dilakukan jika terjadi bencana radiasi atau nuklir. Meskipun kemungkinan terjadinya bencana jenis ini dapat dikatakan sangat kecil, pengetahuan dasar tentang upaya penanggulangan bencana sebaiknya diketahui oleh masyarakat agar tindakan penanggulangan yang dilakukan tidak memperbesar bahaya yang terjadi.

Namun, apakah masyarakat peduli terhadap bencana radiasi atau bencana nuklir? Banyak prioritas yang harus dikerjakan dalam hidup ini, terutama hal-hal sehari-hari seperti pekerjaan, kesehatan, cicilan rumah, cicilan kendaraan, dan sebagainya. Dapat dipastikan bahwa merencanakan dan mempersiapkan diri untuk keadaan darurat di masa mendatang tidak akan pernah menjadi prioritas dalam hidup dibandingkan dengan masalah sehari-hari tersebut. Mempersiapkan diri untuk keadaan darurat yang secara rutin dialami, seperti banjir,

Buku ini tidak diperjualbelikan

longsor, atau gempa bumi, belum tentu dilakukan, apalagi untuk menghadapi keadaan darurat akibat radiasi atau nuklir.

Masyarakat mempercayakan upaya penanganan bencana kepada instansi pemerintah, dan pemerintah juga telah melaksanakan kewajibannya dalam penanganan bencana dengan membentuk BNPB dan BPBD. Namun, tidak ada salahnya jika masyarakat mengambil langkah-langkah untuk memperoleh informasi terkait penanggulangan semua jenis bencana, termasuk bencana radiasi atau nuklir.

Dari sisi institusi, kelangkaan ahli radiasi atau nuklir di BNPB membuat institusi ini bekerja sama dengan BAPETEN untuk menanggulangi keadaan darurat atau bencana radiasi dan nuklir. Kedua institusi ini kemudian membentuk wadah koordinasi bersama beberapa institusi pemerintah lain, seperti Kementerian Luar Negeri, Polri, BIN, BMKG, BNPT, BNPB, TNI AD, Kementerian Perhubungan, dan Kementerian Kesehatan, yang disebut I-CoNSEP (*Indonesia Center of Excellence on Nuclear Security and Emergency Preparedness*). Wadah ini menjadi tempat untuk menangani isu-isu terkait keamanan nuklir dan kesiapsiagaan nuklir di tingkat nasional.

Satu isu lain yang cukup penting dalam menangani bencana nuklir adalah keterampilan petugas dalam melakukan upaya penanggulangan yang diperlukan. Dalam kaitan ini, perlu dilakukan pelatihan dan gladi rutin untuk mengasah keterampilan para petugas tersebut. Di tingkat fasilitas, institusi BATAN, yang kini dilanjutkan oleh BRIN, telah secara rutin melakukan latihan kedaruratan nuklir di fasilitas yang berada di Serpong, Bandung, dan Yogyakarta. Latihan ini juga melibatkan BAPETEN dan perangkat pemerintahan di lingkungan fasilitas nuklir masing-masing.

Ledakan senjata berbasis radiasi atau nuklir sampai saat ini belum pernah terjadi di Indonesia, Namun, di tengah situasi dunia yang terus bergejolak saat ini, ancaman ledakan berbasis radiasi atau nuklir mungkin saja dapat terjadi. Untuk itu, kesiapsiagaan dan latihan untuk menghadapi bencana jenis ini juga barangkali perlu dilaksanakan.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Dengan memiliki pengetahuan dasar tentang upaya penanggulangan bencana radiasi atau nuklir ini, masyarakat dapat memiliki kepercayaan diri untuk melakukan tindakan awal penanggulangan jika bencana terjadi di hadapannya. Demikian pula, para petugas yang telah terlatih dapat melakukan tindakan penanggulangan lebih lanjut dengan penuh percaya diri. Kepercayaan diri yang dimiliki untuk menghadapi bencana tidak saja membantu dalam melakukan tindakan saat bencana benar-benar terjadi, tetapi juga dapat membantu dalam menghadapi tantangan hidup sehari-hari.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Singkatan



ABCC : *Atomic Bomb Casualty Commission*
ALARA : *As Low as Reasonably Achievable*
ALPS : *Advanced Liquid Processing System*
ARS : *Acute Radiation Syndrome*
ASEAN : *Association of Southeast Asian Nations*
ASEANTOM : *ASEAN Network of Regulatory Bodies on Atomic Energy*
BAPETEN : Badan Pengawas Tenaga Nuklir
BAPPENAS : Badan Perencanaan Pembangunan Nasional
BMKG : Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
BNPB : Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BNPT : Badan Nasional Penanggulangan Terorisme
BPBD : Badan Penanggulangan Bencana Daerah

Buku ini tidak diperjualbelikan

BRIN	:	Badan Riset dan Inovasi Nasional
CPPNM	:	*Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*
CPR	:	*Cardiopulmonary Resuscitation*
CRS	:	*Cutaneous Radiation Syndrome*
CTBT	:	*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*
CTBTO	:	*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization*
CTC	:	*Counter-Terrorism Committee*
DF	:	*Decontamination Factor*
DK (PBB)	:	Dewan Keamanan (Perserikatan Bangsa-Bangsa)
DU	:	*Depleted Uranium*
FNCA	:	*Forum for Nuclear Cooperation in Asia*
IAEA	:	*International Atomic Energy Agency*
ICRP	:	*International Commission on Radiological Protection*
ICSANT	:	*International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism*
IND	:	*Improvised Nuclear Device*
JCO	:	*Japan Nuclear Fuel Conversion*
KI	:	*Kalium iodida*
NATO	:	*North Atlantic Treaty Organization*
NPT	:	*Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*
OPD	:	Organisasi Perangkat Daerah
OTDNN	:	Organisasi Tanggap Darurat Nuklir Nasional
P3K	:	Pertolongan Pertama Pada Kecelakaan
PBB	:	Perserikatan Bangsa-Bangsa
PLTN	:	Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
RDD	:	*Radiological Dispersal Device*
RED	:	*Radiation Exposure Device*

Buku ini tidak diperjualbelikan

RERF	:	*Radiation Effects Research Foundation*
RRSP	:	*Regional Radiation Safety Partnership*
RTG	:	*Radioisotope Thermoelectric Generator*
SEANWFZ	:	*Southeast Asia Nuclear Weapon-Free Zone Treaty*
TNI AD	:	Tentara Nasional Indonesia Angkatan Darat
TNT	:	*Trinitrotoluene*
TPNW	:	*Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons*
UNODA	:	*United Nations Office for Disarmament Affairs*
UNSCEAR	:	*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*
WMD	:	*Weapons of Mass Destruction*

Buku ini tidak diperjualbelikan

Buku ini tidak diperjualbelikan

Daftar Pustaka



Akleyev, A. V., Krestinina, L. Y., Degteva, M. O., & Tolstykh, E. I. (2017). Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the "Kyshtym accident"). Journal of Radiological Protection, 37, R19–R42. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa7f8d

American Red Cross. (t.t.-a). Coping with shelter-in-place emergencies. https://www.redcross.org/content/dam/redcross/atg/PDF_s/Preparedness___Disaster_Recovery/Disaster_Preparedness/Terrorism/Coping_with_ShelterinPlace_Emergencies.pdf

American Red Cross. (t.t.-b). Nuclear explosion and radiation emergencies. https://www.redcross.org/get-help/how-to-prepare-for-emergencies/types-of-emergencies/nuclear-explosion-radiation-emergencies.html

ANL (Argonne National Laboratory). (2005, Agustus). Radiological dispersal device (RDD) [Fact sheet]. https://iwaste.epa.gov/rpts/anl_hhfs_rdd.pdf

Ansari, A. (2010). Radiation threats and your safety: A guide to preparation and response for professionals and community. CRC Press.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Anshory, W. W. (2025). Target dekontaminasi Cs-137 di Cikande rampung paling lambat sebelum bulan Ramadhan 2026. Kompas.com. https://www.kompas.com/banten/read/2025/10/13/164500388/target-dekontaminasi-cs-137-di-cikande-rampung-paling-lambat-sebelum

Ardiansyah, H. (2025). Kasus udang Cikande dan alarm waspada paparan radiasi dari logam bekas. The Conversation. https://theconversation.com/kasus-udang-cikande-dan-alarm-waspada-paparan-radiasi-dari-logam-bekas-268304

Arms Control Association. (2024). Nuclear weapons: Who has what at a glance. https://www.armscontrol.org/factsheets/nuclear-weapons-who-has-what-glance

ASEAN (Association of South East Asian Nations). (t.t.). Treaty on the Southeast Asia Nuclear Weapon-Free Zone. https://agreement.asean.org/media/download/20131230234315.pdf

Atomic Archive. (t.t.). The energy from nuclear weapons. https://www.atomicarchive.com/science/effects/energy.html

BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir). (2013). Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/peraturan-kepala-badan-no-4-tahun-2013-tentang-keselamatan-radiasi-dalam-pemanfaatan-tenaga-nuklir

BAPETEN. (2020a). BAPETEN press release (004/PR/HM 02/BHKK/II/2020). https://www.bapeten.go.id/upload/39/3e77133f3b-press-release-bapeten-no-004-nilai-batas-dosis-berdasarkan-wbc.pdf

BAPETEN. (2020b). Pernyataan status clearance atas lahan terkontaminasi radioaktif di perumahan BATAN Indah – Tangerang Selatan. https://bapeten.go.id/upload/15/cddb7bce2f-deklarasi-cleraence-rev2.pdf

BAPETEN. (2021). Pedoman kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir nasional. [catatan: tautan resmi menyusul dari penulis]

BAPETEN. (2025a). BAPETEN lakukan verifikasi lapangan terkait temuan komoditas cengkih terkontaminasi zat radioaktif di Lampung. https://bapeten.go.id/berita/bapeten-lakukan-verifikasi-lapangan-terkait-temuan-komoditas-cengkih-terkontaminasi-zat-radioaktif-di-lampung--152417

Buku ini tidak diperjualbelikan

BAPETEN. (2025b). Sosialisasi dampak radiasi ke masyarakat sekitar kawasan industri modern Cikande. https://www.bapeten.go.id/berita/sosialisasi-dampak-radiasi-ke-masyarakat-sekitar-kawasan-industri-modern-cikande-091723

BBC. (2022). What is a "dirty bomb" and why is Russia saying Ukraine could use one? https://www.bbc.com/news/world-63373637

BfS (Bundesamt fűr Strahlenschutz). (t.t.). Psychosocial consequences of a radiological emergency. https://www.bfs.de/EN/topics/ion/accident-management/consequences/psychosocial/psychosocial.html

Blastak, M. (2021). Abdul Qadeer Khan and his proliferation network. https://www.securityoutlines.cz/abdul-qadeer-khan-and-his-proliferation-network/

BPHN (Badan Pembinaan Hukum Nasional). (2023). Hasil penyelarasan naskah akademik rancangan undang-undang tentang ketenaganukliran. https://bphn.go.id/data/documents/hasil_penyelarasan_na_ruu_ketenaganukliran.pdf

BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional). (2025). Belajar dari kasus radiasi Cikande, seberapa penting portal monitor radiasi? https://www.brin.go.id/news/125605/belajar-dari-kasus-radiasi-cikande-seberapa-penting-portal-monitor-radiasi

Caballero-Anthony, M., & Trajano, J. C. (2018). Stopping dirty bombs in Southeast Asia. East Asia Forum. https://eastasiaforum.org/2018/12/04/stopping-dirty-bombs-in-southeast-asia/

CDC (Centers for Disease Control and Prevention). (t.t.). Radiological exposure device (RED). https://www.cdc.gov/radiation-emergencies/infographic/radiological-exposure-device.html

The Chernobyl Forum. (2006). Chernobyl's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts, and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. https://www.who.int/publications/m/item/chernobyl-s-legacy-health-environmental-and-socio-economic-impacts-and-recommendations-to-thegovernments-of-belarus-the-russian-federation-and-ukraine

CNN Indonesia. (2024, Oktober 12). Kenapa senjata uranium terlarang dalam perang? CNN Indonesia. https://www.cnnindonesia.com/internasional/20241011141932-120-1154307/kenapa-senjata-uranium-terlarang-dalam-perang

Buku ini tidak diperjualbelikan

CNN Indonesia. (2025, September 30). Fakta-fakta pencemaran radioaktif Cs-137 di Cikande Serang. CNN Indonesia. https://www.cnnindonesia.com/nasional/20250930120754-20-1279217/fakta-fakta-pencemaran-radioaktif-cs-137-di-cikande-serang

CTBTO (The Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization). (t.t.-a). Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). https://www.ctbto.org/sites/default/files/2023-10/2022_treaty_booklet_E.pdf

CTBTO. (t.t.-b). Status of signature and ratification. https://www.ctbto.org/our-mission/states-signatories

Cullings, H. M., Funamoto, S., Egbert, S. D., Griffin, K. T., Paulbeck, C. J., Domal, S. J., Correa-Alfonso, C. M., Shimizu, S., Sato, T., Lee, C., Endo, A., & Bolch, W. E. (2025). History and current developments of RERF dosimetry. Carcinogenesis, 46(3), Article bgaf045. https://doi.org/10.1093/carcin/bgaf045

Engin, V. S., Tufan, F., Besisik, S. K., Engin, G., Ozturk, M., & Ersoy, S. (2015). Hematological aftermath of the radiation accident in Istanbul. International Journal of Radiation Biology, 91(9), 724–731. https://doi.org/10.3109/09553002.2015.1054527

EPA (US Environmental Protection Agency). (t.t.). Depleted uranium. https://www.epa.gov/radtown/depleted-uranium

FNCA (Forum for Nuclear Cooperation in Asia). (2003). Safe management of spent radiation sources (Activity report of SRSM Task Group). FNCA RWM-R002. https://www.fnca.mext.go.jp/english/rwm/FNCA_RWM_SRSM_Task_Report.pdf

FNSA (French Nuclear Safety Authority). (t.t.). Triage questionnaire: Guide medical response in a nuclear or radiological emergency. https://www.french-nuclear-safety.fr/content/download/199527/file/Triage%20questionnaire%20-%20Guide%20medical%20response%20in%20a%20nuclear%20or%20radiological%20emergency%20-%202023.docx

Galanda, D., Tatarova, D., Kuruc, J., Gaálová, B., & Slimáková, J. (2019). Radioactive remediation of aquatic ecosystems using microalgae. Radiation Protection Dosimetry, 186(2–3), 296–300. https://doi.org/10.1093/rpd/ncz221

González, A. J. (2022). Legal imputation of radiation harm to radiation exposure situations. Dalam International Atomic Energy Agency (Ed.), Nuclear law: The global debate (pp. 141–159). Springer.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Harrison, J., Fell, T., Leggett, R., Lloyd, D., Puncher, M., & Youngman, M. (2017). The polonium-210 poisoning of Mr. Alexander Litvinenko. Journal of Radiological Protection, 37, 266–278. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa58a7

Hiswara, E. (2023). Pedoman kesiapsiagaan dan tanggap darurat medis: Studi kasus kecelakaan radiasi. Pustaka Panasea.

Hudzietzová, J., Sabol, J., & Šesták, B. (2016). Radiation protection aspects relevant to radiological terrorism. International Journal of Radiation and Nuclear Science, Medicine, Engineering, Technology and Ecology (RAD Journal), 1(1), 69–75. https://doi.org/10.21175/RadJ.2016.01.13

IAEA (International Atomic Energy Agency). (t.t.-a). Depleted uranium. https://www.iaea.org/topics/spent-fuel-management/depleted-uranium

IAEA. (t.t.-b). Frequently asked Chernobyl questions. https://www.iaea.org/newscenter/focus/chernobyl/faqs

IAEA. (t.t.-c). Fukushima Daiichi ALPS treated water discharge. https://www.iaea.org/topics/response/fukushima-daiichi-nuclear-accident/fukushima-daiichi-alps-treated-water-discharge

IAEA. (t.t.-d). Missing dangerous source during transport has been found. https://www-news.iaea.org/ErfView.aspx?mId=fd650b1f-e5df-4c29-8674-64f16b1d610c

IAEA. (t.t.-e). Radiation monitoring and decontamination of the working area. https://humanhealth.iaea.org/hhw/radiopharmacy/virrad/radiation_monitoring/index.html

IAEA. (1988a). Radiation sources: Lessons from Goiânia. IAEA Bulletin, 30(4), 10–17. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull30-4/30402781017.pdf

IAEA. (1988b). The radiological accident in Goiânia. https://www.iaea.org/publications/3684/the-radiological-accident-in-goiania

IAEA. (1989). Cleanup of large areas contaminated as a result of a nuclear accident (IAEA Technical Report Series No. 300). https://www.iaea.org/publications/1403/cleanup-of-large-areas-contaminated-as-a-result-of-a-nuclear-accident

IAEA. (1998a). Accidental overexposure of radiotherapy patients in San José, Costa Rica. https://www.iaea.org/publications/4727/accidental-overexposure-of-radiotherapy-patients-in-san-jose-costa-rica

Buku ini tidak diperjualbelikan

IAEA. (1998b). The radiological accident in the reprocessing plant at Tomsk. https://www.iaea.org/publications/4740/the-radiological-accident-in-the-reprocessing-plant-at-tomsk

IAEA. (1999). Compliance monitoring for remediated sites (IAEA-TECDOC-1118). https://www.iaea.org/publications/5737/compliance-monitoring-for-remediated-sites

IAEA. (2000). The radiological accident in Istanbul. https://www.iaea.org/publications/6071/the-radiological-accident-in-istanbul

IAEA. (2004). The radiological accident in Cochabamba. https://www.iaea.org/publications/6975/the-radiological-accident-in-cochabamba

IAEA. (2006). Manual for first responders to a radiological emergency (EPR-First Responders). https://www.iaea.org/publications/7606/manual-for-first-responders-to-a-radiological-emergency

IAEA. (2011). Nuclear security recommendations on radioactive material and associated facilities (IAEA Nuclear Security Series No. 14). https://www.iaea.org/publications/8616/nuclear-security-recommendations-on-radioactive-material-and-associated-facilities

IAEA. (2013). Objective and essential elements of a state's nuclear security regime (IAEA Nuclear Security Series No. 20). https://www.iaea.org/publications/10353/objective-and-essential-elements-of-a-states-nuclear-security-regime

IAEA. (2014a). The follow-up IAEA international mission on remediation of large contaminated areas off-site the Fukushima Daiichi nuclear power plant: Final report (NE/NEFW/2013). https://www.iaea.org/sites/default/files/final_report230114_0.pdf

IAEA. (2014b). Mobile processing systems for radioactive waste management (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.8). https://www.iaea.org/publications/10438/mobile-processing-systems-for-radioactive-waste-management

IAEA. (2014c). The radiological accident in Lia, Georgia. https://www.iaea.org/publications/10602/the-radiological-accident-in-lia-georgia

IAEA. (2015). The Fukushima Daiichi accident: Technical Volume 4/5 Radiological consequences. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV4-Web.pdf

Buku ini tidak diperjualbelikan

IAEA. (2017). Management of large volumes of waste arising in a nuclear or radiological emergency (IAEA-TECDOC-1826). https://www.iaea.org/publications/12253/management-of-large-volumes-of-waste-arising-in-a-nuclear-or-radiological-emergency

IAEA. (2018). Arrangements for the termination of a nuclear or radiological emergency (IAEA Safety Standards Series No. GSG-11). https://www.iaea.org/publications/12269/arrangements-for-the-termination-of-a-nuclear-or-radiological-emergency

IAEA. (2020). Arrangements for public communication in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency (IAEA Safety Standards Series No. GSG-14). https://www.iaea.org/publications/13517/arrangements-for-public-communication-in-preparedness-and-response-for-a-nuclear-or-radiological-emergency

IAEA. (2022a). IAEA nuclear safety and security glossary: Terminology used in nuclear safety, nuclear security, radiation protection and emergency preparedness and response (2022 Interim ed.). https://www.iaea.org/publications/15236/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary

IAEA. (2022b). The radiological incident in Hueypoxtla. https://www.iaea.org/publications/15207/the-radiological-incident-in-hueypoxtla

IAEA. (2023a). Decontamination methodologies and approaches (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.38). https://www.iaea.org/publications/15270/decontamination-methodologies-and-approaches

IAEA. (2023b). Determination of environmental remediation end states (IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-3.2). https://www.iaea.org/publications/14914/determination-of-environmental-remediation-end-states

IAEA. (2023c). Off-site decontamination and remediation following the Fukushima Daiichi NPP accident: Cooperation between the International Atomic Energy Agency and Fukushima Prefecture. https://www.iaea.org/sites/default/files/23/09/fcp_data_matrix_report.pdf

ICRP (International Commission on Radiological Protection). (t.t.-a). Advice for the public on protection in case of a nuclear detonation. https://www.icrp.org/page.asp?id=611

ICRP. (t.t.-b). ICRP glossary. http://icrpaedia.org/ICRP_Glossary

Buku ini tidak diperjualbelikan

ICRP. (2009). Application of the Commission's recommendations for the protection of people in emergency exposure situations (ICRP Publication 109). Annals of the ICRP, 39(1). https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20109

IOM (Institute of Medicine). (2014). Nationwide response issues after an improvised nuclear device attack: Medical and public health considerations for neighboring jurisdictions. Workshop summary. National Academies Press. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK148669/pdf/Bookshelf_NBK148669.pdf

JFK Library. (t.t.). Nuclear test ban treaty. https://www.jfklibrary.org/learn/about-jfk/jfk-in-history/nuclear-test-ban-treaty

Joint Communique to Commemorate the 50th Anniversary of the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT). (2020). [catatan: nama lembaga penerbit menyusul dari penulis] https://reachingcriticalwill.org/images/documents/Disarmament-fora/npt/revcon2020/joint-communique_May2020.pdf

KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia). (t.t.). Profesional. Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia. https://kbbi.kemdikbud.go.id/entri/profesional

KemenLH (Kementerian Lingkungan Hidup). (2025). KLH/BPLH pimpin penanganan radiasi Cs-137 di Cikande demi keamanan lingkungan dan masyarakat. https://kemenlh.go.id/news/detail/klhbplh-pimpin-penanganan-radiasi-cs-137-di-cikande-demi-keamanan-lingkungan-dan-masyarakat

Lemhannas (Lembaga Ketahanan Nasional). (t.t.). Direktorat Pengkajian Hankam dan Geografi Lemhannas RI selenggarakan FGD Jurpat Mitigasi Risiko Perang Nuklir. https://www.lemhannas.go.id/index.php/berita/berita-utama/1942-direktorat-pengkajian-hankam-dan-geografi-lemhannas-ri-selenggarakan-fgd-jurpat-mitigasi-risiko-perang-nuklir

Lerner, K. L. (2006). Moscow – Deadly spy games: The poisoning of Alexander Litvinenko. Taking Bearings, Harvard Blogs. https://scholar.harvard.edu/kleelerner/publications/moscow-%E2%80%94-deadly-spy-games-poisoning-alexander-litvinenko-0

Li, N. (2024). Is Southeast Asia's Nuclear Weapon-Free Zone the key to Indo-Pacific stability? United States Institute of Peace. https://www.usip.org/publications/2024/08/southeast-asias-nuclear-weapon-free-zone-key-indo-pacific-stability

Buku ini tidak diperjualbelikan

Lindberg, M. L., Hedman, C., Lindberg, K., Valentin, J., & Stenke, L. (2022). Mental health and psychosocial consequences linked to radiation emergencies—increasingly recognised concerns. Journal of Radiological Protection, 42, Article 031001. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac7d19

Maeda, M., Oe, M., & Suzuki, Y. (2018). Psychosocial effects on the Fukushima disaster and current tasks: Differences between natural and nuclear disasters. Journal of the National Institute of Public Health, 67(1), 50–58. https://doi.org/10.20683/jniph.67.1_50

McGeoghegan, D., Whaley, S., Binks, K., Gillies, M., Thompson, K., & McElvenny, D. M. (2010). Mortality and cancer registration experience of the Sellafield workers known to have been involved in the 1957 Windscale accident: 50 year follow-up. Journal of Radiological Protection, 30(3), 407–431. https://doi.org/10.1088/0952-4746/30/3/001

NPS (National Park Service). (t.t.). The atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki. https://www.nps.gov/articles/000/the-atomic-bombings-of-hiroshima-and-nagasaki.htm

NRC (National Research Council). (2006). Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/11340

NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission). (2022). Backgrounder on dirty bombs. https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fs-dirty-bombs.html

Platonova, M. (2024). How are universal ionizing radiation symbols used around the world? https://www.iaea.org/newscenter/news/how-are-universal-ionizing-radiation-symbols-used-around-the-world

Rachmawati. (2025). Cengkih asal Lampung terindikasi terpapar radioaktif Cs-137, pemerintah bergerak cepat. Kompas.com. https://www.kompas.com/sumatera-selatan/read/2025/10/14/124500288/cengkih-asal-lampung-terindikasi-terpapar-radioaktif-cs-137

Raissa, A. (2025). Penanganan cemaran radioaktif Cikande masih berlanjut. Mongabay. https://mongabay.co.id/2025/11/02/penanganan-cemaran-radioaktif-cikande-masih-berlanjut/

REMM (Radiation Emergency Medical Management). (t.t.). Radiological dispersal devices (RDDs). https://remm.hhs.gov/rdd.htm

RERF (Radiation Effects Research Foundation). (t.t.). Past results and future studies. https://www.rerf.or.jp/en/about/

Buku ini tidak diperjualbelikan

Ridho, R., & Maullana, I. (2025). Menteri LH bongkar biang kerok pencemaran radioaktif Cs-137 di Cikande, siapa yang kena? Kompas.com. https://bandung.kompas.com/read/2025/09/30/214055678/menteri-lh-bongkar-biang-kerok-pencemaran-radioaktif-cs-137-di-cikande-siapa

Ritchie, H. (2017). What was the death toll from Chernobyl and Fukushima? Our World in Data. https://ourworldindata.org/what-was-the-death-toll-from-chernobyl-and-fukushima

Sabol, J., & Šesták, B. (2017). Assessing the real threat and mitigating the impact of a terrorist use of radiological weapons. Radiation Applications, 2(2), 134–138. https://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.028

Singh, N. (2009). The Khan proliferation network: Intelligence failure or realpolitik? World Affairs, 13(4), 112–123. https://www.jstor.org/stable/48505219

Smith, J. T., Kudelsky, A. V., Ryabov, I. N., Hadderingh, R. H., & Bulgakov, A. A. (2003). Application of potassium chloride to a Chernobyl-contaminated lake: Modelling the dynamics of radiocaesium in an aquatic ecosystem and decontamination of fish. Science of the Total Environment, 305(1–3), 217–227. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00477-1

Steffens, M. (2017). Radiation overdose in Costa Rica, 1996 [catatan: kelayakan sumber menyusul dari penulis]. http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/steffens2/

Takada, M., Kuroda, Y., Kanai, Y., & Yasutaka, T. (2023). Impacts of environmental decontamination on the rebuilding of returnees' lives after the Fukushima accident. Journal of Radiological Protection, 43, Article 031513. https://doi.org/10.1088/1361-6498/acf504

Tanaka, S-I. (2001). Summary of the JCO criticality accident in Tokai-mura and a dose assessment. Journal of Radiation Research, 42(Suppl.), S1–S9. https://doi.org/10.1269/jrr.42.S1

Tikhomirov, F. A., Shcheglov, A. I., & Sidorov, V. P. (1993). Forests and forestry: Radiation protection measures with special reference to the Chernobyl accident zone. Science of the Total Environment, 137, 289–305. https://doi.org/10.1016/0048-9697(93)90395-m

Buku ini tidak diperjualbelikan

Tomonaga, M. (2019). The atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki: A summary of the human consequences, 1945–2018, and lessons for homo sapiens to end the nuclear weapon age. Journal for Peace and Nuclear Disarmament, 2(2), 491–517. https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/25751654.2019.1681226?needAccess=true

UNEP (United Nations Environment Programme). (2016). Radiation: Effects and sources. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/radiation-effects-and-sources.html

United Nations. (2022). International Chernobyl Disaster Remembrance Day, 26 April. https://www.un.org/en/observances/chernobyl-remembrance-day

UNODA (United Nations Office for Disarmament Affairs). (t.t.-a). Nuclear weapons. https://disarmament.unoda.org/wmd/nuclear/

UNODA. (t.t.-b). Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons. https://disarmament.unoda.org/wmd/nuclear/tpnw/

UNRCPD (United Nations Regional Centre for Peace and Disarmament in Asia and the Pacific). (t.t.). Weapons of mass destruction. https://www.unrcpd.org/wmd/

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). (t.t.). Fukushima Daiichi nuclear power station accident. https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/fukushima.html

UNSCEAR. (2010). Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with scientific annexes. Volume I: Sources. Scientific Annexes A and B. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html

UNSCEAR. (2011). Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with scientific annexes. Volume II: Effects. Scientific Annexes C, D and E. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_2.html

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: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2020_2021_1.html

Buku ini tidak diperjualbelikan

Utami, H. T., Nuraeni, N., Kartikasari, D., Hiswara, E., Hidayati, N. R., & Prasetio, H. (2024). Understanding potential health impacts caused by Cesium-137 contamination in Tangerang Selatan, Indonesia: A review. AIP Conference Proceedings, 2967, Article 150010. https://doi.org/10.1063/5.01933374

Wakeford, R. (2017). A double diamond anniversary—Kyshtym and Windscale: The nuclear accidents of 1957. Journal of Radiological Protection, 37(3), E7–E13. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa7e87

WHO (World Health Organization). (2020). A framework for mental health and psychosocial support in radiological and nuclear emergencies. https://www.who.int/publications/i/item/9789240015456

Wirz, C., & Egger, E. (2005). Use of nuclear and radiological weapons by terrorists? International Review of the Red Cross, 87(859), 497–510. https://international-review.icrc.org/sites/default/files/irrc_859_5.pdf

WNA (World Nuclear Association). (2024). Fukushima Daiichi accident. https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident

Wong, T. (2023). Fukushima: What are the concerns over waste water release? BBC. https://www.bbc.com/news/world-asia-66106162

Zúñiga, A. (2021). CRC Daily: Costa Rica's 1996 radiotherapy tragedy. https://www.crcdaily.com/p/crc-daily-costa-ricas-1996-radiotherapy

Buku ini tidak diperjualbelikan

Biografi Penulis





Eri Hiswara

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 sarjana (S1) di FMIPA UI dan pendidikan master (S2) di University of Surrey, Guildford, Inggris, keduanya pada jurusan Fisika. Pada tahun 2003–2007, penulis sempat menjadi Atase Ilmu Pengetahuan di KBRI/PTRI Wina.

Berbagai pertemuan ilmiah nasional dan internasional di bidang proteksi dan keselamatan radiasi pernah diikuti oleh penulis selama tahun 1995–2017. 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

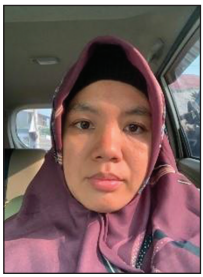
Buku ini tidak diperjualbelikan

Radiasi, serta pernah mengajar di Sekolah Tinggi Intelijen Negara (STIN) untuk mata ajar Nuklir, Biologi, dan Kimia (NUBIKA). Penulis adalah anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), Perkumpulan Ahli Proteksi Radiasi Indonesia (APRI), dan *Health Physics Society* (HPS). Eri Hiswara dapat dihubungi melalui alamat surat elektronik erih001@batan.go.id



Nunung Nuraeni

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 S1 Fisika Univertas Indonesia, S2 Fisika Medis di Universitas Indonesia, dan S3 Fisika Nuklir dan Biofisika di ITB. Bidang kepakaran penulis adalah fisika nuklir. Penulis merupakan anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI). Penulis dapat dihubungi melalui alamat surat elektronik nunu002@brin.go.id.



Dewi Kartikasari

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 S1 Kimia di Universitas Brawijaya dan S2 Kimia di Universitas Indonesia. Saat ini, penulis sedang mengikuti program S3 Fisika Material di Universitas Indonesia. Bidang kepakaran penulis adalah kimia nuklir dan material. Penulis merupakan anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI). Penulis dapat dihubungi melalui alamat surat elektronik dewi028@brin.go.id.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Hayu Tyas Utami

Penulis adalah peneliti di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak 2021, dengan bidang kepakaran dalam penerapan teknologi nuklir. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Teknik Nuklir di Universitas Gadjah Mada pada tahun 2010, dan lulus S2 *Radiation Biotechnology and Applied Isotope Science* di *Korea University of Science and Technology*, Korea Selatan, pada tahun 2014. Penulis saat ini sedang menyelesaikan pendidikan S3 Biomedis di Universitas Indonesia. Penulis merupakan anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) dan dapat dihubungi melalui alamat surat elektronik hayu002@brin.go.id.



Achmad Faturrahman Jundi

Penulis merupakan periset di 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). Penulis menjadi periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir (PRT-KMMN) BRIN hingga saat ini. Penulis merupakan lulusan S1 Fisika Universitas Indonesia, S2 Fisika Medis Universitas Indonesia, dan sedang melanjutkan pendidikan S3 Fisika Medis di Universitas Indonesia. Bidang kepakaran penulis adalah fisika medis, khususnya dalam bidang kedokteran nuklir. Penulis dapat dihubungi melalui Alamat surat elektronik achm038@brin.go.id.

Buku ini tidak diperjualbelikan



Suzie Darmawati

Penulis adalah purnabakti dari Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sejak tahun 2021 setelah mengabdi selama 35 tahun. Penulis menamatkan pendidikan formal sarjana (S1) pada jurusan Fisika di FMIPA UI tahun 1985 dan master (S2) pada jurusan Fisika di University of Surrey, Guildford, Inggris tahun 1990. Setelah menamatkan S1, penulis bekerja di Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif BATAN dan kemudian pindah ke Pusat Standardisasi dan Jaminan Mutu Nuklir BATAN pada tahun 2000. Penulis memperoleh pengetahuan tambahan melalui berbagai pelatihan teknis dan lokakarya di bidang proteksi radiasi yang diikuti sejak tahun 1987 di beberapa negara, seperti Jepang dan Australia. Beberapa kegiatan ilmiah internasional yang membahas isu-isu terkait proteksi radiasi yang dilangsungkan di kantor pusat Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) di Wina, Austria, juga pernah diikuti oleh penulis. Penulis dapat dihubungi melalui alamat surat elektronik suzie.darmawati@yahoo.co.uk.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Indeks



ALARA, 56, 133

BAPETEN, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 73, 76, 77, 78, 79, 108, 109, 126, 127, 130, 133, 138, 139

bencana nuklir, 15, 106, 113, 114, 123, 124, 126, 129, 130

bencana radiasi, 2, 14, 15, 16, 55, 56, 68, 76, 79, 80, 84, 87, 89, 99, 100, 101, 107, 109, 129, 130, 131

biodosimetrik, 21

bom nuklir, 10, 11, 40, 41, 44, 45, 47, 49, 53, 54, 66, 67, 69, 73, 74, 76

Chernobyl, xv, 10, 11, 37, 38, 39, 96, 98, 139, 141, 146, 147

Cikande, 27, 28, 29, 138, 139, 140, 144, 145, 146

Cs-137, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 38, 48, 50, 138, 140, 144, 145, 146

dekontaminasi, 21, 28, 31, 33, 48, 68, 69, 75, 87, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 138

diagnosis medis, 9

efek kesehatan, xii, 11, 12, 13, 15, 20, 35, 36, 46, 81

Efek Psikososial, 14

efek stokastik, 12, 14

faktor dekontaminasi, 91, 92, 93

Fat Man, 41, 42

Buku ini tidak diperjualbelikan

generator termoelektrik radioisotop, 21
Hiroshima, 12, 40, 41, 42, 43, 44, 53, 145, 147

IAEA, 10, 11, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 38, 40, 46, 50, 51, 53, 63, 75, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 101, 103, 105, 108, 110, 114, 117, 118, 123, 134, 141, 142, 143
Informasi Publik, 105

kecelakaan kekritisan reaktor, 34, 36
kecelakaan radiasi, xii, xiii, xiv, xv, 1, 2, 14, 15, 18, 20, 23, 24, 25, 30, 31, 33, 55, 76, 77, 80, 99, 108, 141

Lampung, 29, 138, 145
Larangan Senjata Nuklir, 120
Little Boy, 40, 41

Nagasaki, 12, 40, 41, 42, 43, 44, 53, 145, 147
nonproliferasi, 52, 116, 117

peluang frekuentis, 13
peluang subjektif, 13
pemantauan radiasi, 19, 29, 105
perangkat nuklir rakitan, 45, 55, 66
Perangkat paparan radiasi, 45
Perangkat penyebar radiologis, 47
Perjanjian Bangkok, 122
Persepsi risiko, 105
PLTN, xv, 10, 11, 15, 16, 33, 37, 38, 39, 40, 56, 59, 60, 95, 96, 98, 99, 134
Proteksi Fisik, 121
PT Krakatau Steel, 25

Radiasi Alam, 9
radiasi alfa, 5, 6, 7, 11
radiasi beta, 6, 7, 61
radiasi buatan, 8, 9, 10
radiasi gamma, 5, 6, 7, 8, 35, 61
radiasi kosmis, 9
radiasi neutron, 6
radioterapi, 8, 23, 24, 48
radon, 9, 104
reaksi jaringan, 12
remediasi, 31, 90, 109, 110, 111, 121
resolusi, 3, 54, 104, 113, 114, 115, 116, 118, 119

senjata nuklir, 17, 33, 34, 36, 51, 52, 53, 54, 113, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123
sinar-X, 6, 8, 11, 18, 56, 62
sindrom radiasi akut, 21, 22, 34
sindrom radiasi kutan, 22
situasi paparan darurat, 99, 109, 110
situasi paparan eksisting, 99, 109, 110

terestrial eksternal, 9
Terorisme Nuklir, 122
Traktat, 117, 118, 119, 120, 121, 122

uji coba nuklir, 54, 119
UNSCEAR, 9, 10, 11, 12, 18, 20, 22, 23, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 135, 147

Buku ini tidak diperjualbelikan

Radiasi dan bahan nuklir kini digunakan secara luas untuk menunjang kesejahteraan manusia, mulai dari bidang medis, industri, pertanian, hingga riset, sementara bahan nuklir dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik berskala besar. Namun di balik manfaatnya, pemanfaatan sumber radiasi dan bahan nuklir tidak lepas dari risiko kecelakaan—baik yang terjadi secara tidak sengaja akibat kelalaian saat pengangkutan atau pengoperasian instalasi, maupun yang disengaja untuk mencelakakan individu, komunitas, bahkan sebuah kota. Bersama zat kimia dan biologis, bahan radiasi dan nuklir tergolong bahan berbahaya yang berpotensi menimbulkan bencana bagi manusia, hewan, tumbuhan, dan lingkungan, serta kerap dikaitkan dengan situasi terorisme, peperangan, atau kecelakaan yang menuntut respons darurat khusus.

Buku *Kecelakaan Radiasi dan Nuklir: Pengertian dan Penanggulangannya* hadir untuk membekali pembaca dengan pemahaman komprehensif mengenai jenis-jenis radiasi, efek kesehatan dan psikososialnya, serta ragam kecelakaan radiasi dan nuklir baik yang disengaja maupun tidak. Buku ini juga membahas jenis senjata berbasis radiasi dan nuklir, langkah perlindungan diri, respons perorangan hingga institusional, penanganan medis bagi korban, pemulihan area terdampak, serta instrumen legal terkait di tingkat internasional, kawasan, dan nasional.

Buku ini tidak diperjualbelikan

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.1930

ISBN 978-634-7933-26-3