



# RADIASI

## EFEK DAN SUMBER

Apa itu radiasi?  
Apa yang radiasi lakukan kepada kita?  
Dari mana asal radiasi?

>1.000 mSv

Dosis pada radioterapi

100 mSv

Dosis astronot  
(4 bulan)

10 mSv

CT Scan pada perut

1 mSv

Dosis pekerja pada industri nuklir  
(1 tahun)

0,1 mSv

Sinar-X dada atau penerbangan  
(20 jam)

0,01 mSv

Sinar-X gigi

0,001 mSv

Kacang Brazil (30 g)





# RADIASI

## EFEK DAN SUMBER

Apa itu radiasi?  
Apa yang radiasi lakukan kepada kita?  
Dari mana asal radiasi?

Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa

## PENAFIAN

Publikasi ini sebagian besar didasarkan pada temuan Komite Ilmiah PBB (Perserikatan Bangsa-bangsa) untuk Efek Radiasi Atom (United Nations Scientific Committee on the Effects of Radiation), badan di bawah Sidang Umum PBB yang sekretariatnya berada di Program Lingkungan PBB (United Nations Environment Programme). Publikasi ini tidak mewakili pandangan Komite Ilmiah atau Program Lingkungan PBB.

Penyebutan suatu tempat dan penyajian materi pada publikasi ini tidak menyiratkan ekspresi pendapat apa pun dari Program Lingkungan PBB mengenai status hukum suatu negara, wilayah, kota atau daerah atau batas-batasnya, atau tentang pembatasan perbatasan atau batasnya.

Publikasi ini dapat direproduksi sebagian dan dalam bentuk apa pun untuk tujuan pendidikan atau nirlaba tanpa izin khusus dari pemegang hak cipta, asalkan dicantumkan ucapan terima kasih kepada sumbernya. Program Lingkungan PBB akan senang hati menerima salinan materi cetak apa pun yang menggunakan publikasi ini sebagai sumber.

Publikasi ini dilarang untuk dijual kembali atau digunakan untuk tujuan komersial lainnya tanpa izin tertulis dari Program Lingkungan PBB.

Program Lingkungan PBB mempromosikan kegiatan-kegiatan berwawasan lingkungan secara global dalam kegiatannya. Publikasi ini dicetak pada kertas daur ulang, 100 persen bebas klorin. Kebijakan distribusi UNEP bertujuan untuk mengurangi jejak karbonnya.

Katalog: Radiasi: efek dan sumber, Program Lingkungan PBB Program, 2016

ISBN: 978-92-807-3828-5

Job No.: DEW/2326/NA

Hak Cipta © Program Lingkungan PBB, 2016

Versi elektronik



# **RADIASI**

## **EFEK DAN SUMBER**

Apa itu radiasi?  
Apa yang radiasi lakukan kepada kita?  
Dari mana asal radiasi?

Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa

## UCAPAN TERIMA KASIH

Buklet ini sebagian besar didasarkan pada temuan Komite Ilmiah PBB untuk Efek Radiasi Atom dan pada publikasi Program Lingkungan *PBB Radiasi: dosis, efek, risiko*, yang awalnya disunting pada tahun 1985 dan 1991 oleh Geoffrey Lean.

Buklet ini awalnya diterbitkan dalam bahasa Inggris. Terjemahan dilakukan oleh *Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional* (Indonesia). Jika ada ketidaksesuaian, bahasa asli yang akan berlaku.

Penyunting teknis: Malcolm Crick dan Ferid Shannoun

Penyunting teks: Susan Cohen-Unger dan Ayhan Evrensel

Grafik dan tata letak: Alexandra Diesner-Kuepfer

Selanjutnya, nama-nama berikut memberikan kontribusi dan komentar yang berharga pada buklet ini:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, Maria Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda, dan Anthony Wrixon.

## PENGANTAR

Hiroshima, Nagasaki, Three Mile Island, Chernobyl, dan Fukushima-Daiichi: nama-nama ini telah dikaitkan dengan ketakutan publik akan radiasi, baik dari penggunaan senjata nuklir atau kecelakaan di pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Kenyataannya, manusia jauh lebih terpapar radiasi setiap hari dari banyak sumber lain, termasuk dari atmosfer dan bumi serta dari aplikasi yang digunakan dalam kedokteran dan industri.



Pada tahun 1955, percobaan senjata nuklir meningkatkan kekhawatiran publik tentang efek radiasi atom pada udara, air, dan makanan. Untuk merespons hal ini, Majelis Umum Perserikatan Bangsa-Bangsa membentuk Komite Ilmiah Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Efek Radiasi Atom (UNSCEAR, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) untuk mengumpulkan dan mengevaluasi informasi tentang tingkat dan efek paparan radiasi. Laporan pertama Komite menjadi dasar ilmiah untuk merundingkan Perjanjian Larangan Uji Sebagian pada tahun 1963 yang melarang pengujian senjata nuklir atmosfer. Sejak itu, Komite terus menghasilkan laporan bermutu mengenai paparan radiasi, termasuk dari kecelakaan PLTN di Chernobyl dan Fukushima-Daiichi. Komite secara konsisten juga mengeluarkan publikasi yang bernilai tinggi baik bagi komunitas ilmiah maupun para pembuat kebijakan.

Meski pun komunitas ilmiah telah menerbitkan banyak informasi tentang sumber dan efek radiasi, berbagai publikasi tersebut cenderung bersifat teknis dan agak sulit untuk dipahami oleh masyarakat umum—yang sering membingungkan masyarakat, alih-alih memberi informasi, sehingga ketakutan dan kebingungan yang ditimbulkan sejak beberapa dekade tahun yang lalu tetap ada. Publikasi ini menangani masalah tersebut dengan merinci informasi ilmiah terbaru dari UNSCEAR—tentang jenis radiasi, sumber dan pengaruhnya terhadap manusia dan lingkungan—dan membuatnya dapat diakses oleh pembaca umum.

Saat ini, sekretariat UNSCEAR beroperasi di bawah naungan Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP), yang membantu

banyak negara dalam menerapkan kebijakan dan kegiatan berwawasan lingkungan. Membantu masyarakat memahami radiasi dan bagaimana radiasi mempengaruhi kehidupan di planet ini menjadi mandat utama UNEP.

Saya mengucapkan selamat kepada semua orang yang telah berkontribusi untuk publikasi ini, termasuk juga kepada semua anggota Komite dan delegasi mereka, yang telah bekerja dengan tekun selama enam dekade terakhir dalam isu-isu yang penting ini.

A handwritten signature in black ink, reading "Achim Steiner". The signature is written in a cursive, flowing style.

Achim Steiner  
Direktur Eksekutif UNEP dan  
Wakil Sekretaris Jenderal PBB



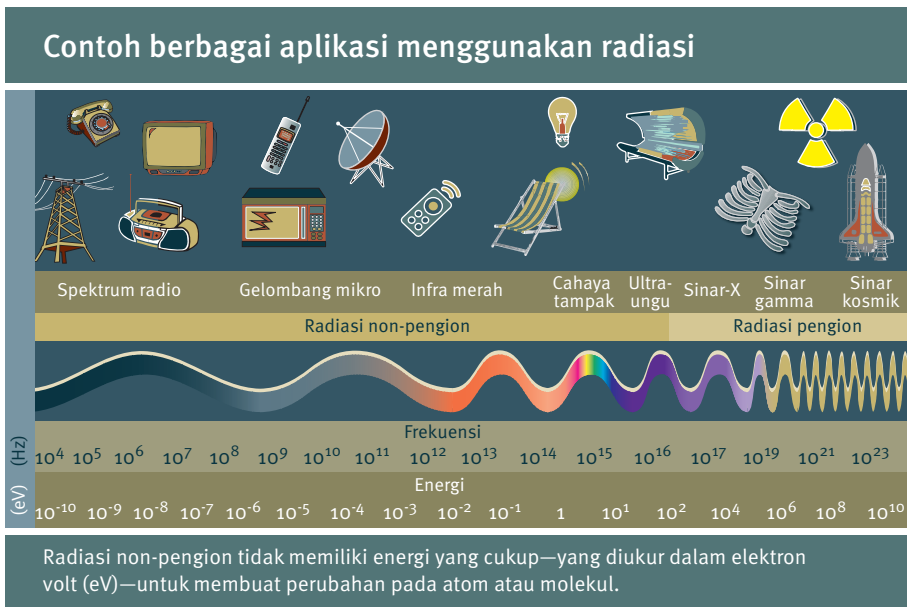
# DAFTAR ISI

<b>PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
<b>1. APA ITU RADIASI?</b>	<b>3</b>
1.1. Sejarah singkat	3
1.2. Pengetahuan dasar	4
Peluruhan radioaktif dan waktu-paro	6
Satuan radiasi	7
1.3. Daya tembus radiasi	9
<b>2. APA YANG RADIASI LAKUKAN KEPADA KITA?</b>	<b>11</b>
2.1. Efek pada manusia	13
Efek kesehatan dini	14
Efek kesehatan tertunda	15
Efek pada keturunan	18
2.2. Efek pada hewan dan tanaman	22
2.3. Hubungan dosis dan efek radiasi	24
<b>3. DARI MANA ASAL RADIASI?</b>	<b>27</b>
3.1. Sumber alami	28
Sumber kosmik	28
Sumber terestrial	29
Sumber di makanan dan minuman	32
3.2. Sumber buatan	32
Aplikasi medik	33
Senjata nuklir	37
Reaktor nuklir	39
Aplikasi industri dan lainnya	48
3.3. Paparan radiasi rata-rata untuk publik dan pekerja	54



# PENDAHULUAN

Sebelum dimulai, kita perlu membedakan antara radiasi pengion dan non-pengion. *Radiasi pengion* memiliki energi yang cukup untuk membebaskan elektron dari suatu atom, sehingga membuat atom menjadi bermuatan, sedangkan *radiasi non-pengion*, seperti gelombang radio, cahaya tampak atau radiasi ultra-violet, tidak membuat atom bermuatan. Publikasi ini adalah tentang efek pajanan radiasi dari sumber alami dan buatan. Namun, kata *radiasi* pada seluruh isi publikasi merujuk hanya pada radiasi pengion.



Dewasa ini manusia mengetahui lebih banyak tentang sumber dan efek pajanan radiasi dibandingkan hampir semua agen berbahaya lainnya, dan komunitas ilmiah terus memperbarui dan menganalisis pengetahuannya tentang hal ini. Sebagian besar orang mengetahui penggunaan radiasi dalam produksi listrik dari tenaga nuklir atau dalam aplikasi medik. Namun, banyak kegunaan lain dari teknologi nuklir dalam industri, pertanian, konstruksi, penelitian, dan bidang-bidang lainnya yang tidak diketahui sama sekali. Bagi seseorang yang membaca topik ini untuk pertama kalinya, mungkin akan mengejutkan bahwa sumber radiasi yang menyebabkan pajanan terbesar pada masyarakat umum bukan dari yang paling menarik perhatian. Kenyataannya, pajanan terbesar berasal dari sumber alami yang ada di lingkungan, dan penyumbang utama pajanan dari sumber buatan adalah penggunaan radiasi di bidang medik di

seluruh dunia. Selain itu, pengalaman sehari-hari seperti perjalanan udara dan tinggal di rumah yang terisolasi rapat di beberapa bagian dunia dapat meningkatkan pajanan radiasi secara substansial.

Publikasi ini merupakan upaya dari Program Lingkungan PBB (UNEP) dan sekretariat Komite Ilmiah Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Efek Radiasi Atom (UNSCEAR) untuk membantu meningkatkan kesadaran dan memperdalam pemahaman tentang sumber, tingkat dan efek pajanan radiasi pengion. Dengan melibatkan para ilmuwan terkemuka dari 27 Negara Anggota Perserikatan Bangsa-Bangsa, UNSCEAR dibentuk oleh Majelis Umum PBB pada tahun 1955 untuk mengevaluasi pajanan radiasi, efek dan risiko pada skala dunia. Namun, Komite tidak menetapkan, atau merekomendasikan, standar keselamatan; melainkan memberikan informasi ilmiah yang memungkinkan otoritas nasional dan badan-badan lain untuk melakukannya. Evaluasi ilmiah UNSCEAR selama enam puluh tahun terakhir merupakan sumber informasi utama untuk publikasi ini.

# 1. APA ITU RADIASI?

Untuk dapat membahas mengenai tingkat, efek dan risiko paparan radiasi, pertama-tama kita perlu membahas beberapa dasar pengetahuan dari ilmu radiasi. Baik radioaktivitas mau pun radiasi yang dihasilkan telah ada di bumi jauh sebelum kehidupan muncul. Kenyataannya, keduanya telah ada di ruang angkasa sejak awal alam semesta dan bahan radioaktif merupakan bagian dari bumi pada saat pembentukannya. Namun umat manusia pertama kali menemukan fenomena universal yang mendasar ini hanya pada tahun-tahun terakhir abad kesembilan belas dan sampai saat ini manusia masih terus mempelajari cara-cara baru untuk menggunakannya.

## 1.1. Sejarah singkat

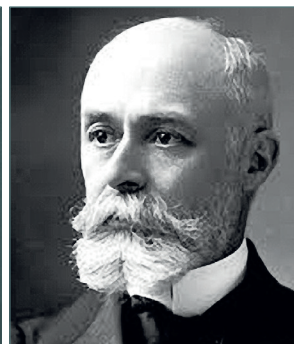
Pada tahun 1895, **Wilhelm Conrad Roentgen**, seorang fisikawan Jerman, menemukan radiasi—yang ia sebut sinar-X—yang dapat digunakan untuk melihat ke dalam tubuh manusia. Penemuan ini menandai penggunaan radiasi di bidang medik, yang sejak itu berkembang dengan pesat. Roentgen dianugerahi Penghargaan Nobel Fisika pertama pada tahun 1901 sebagai pengakuan atas layanan luar biasa yang telah ia berikan kepada umat manusia. Satu tahun setelah penemuan Roentgen, **Henri Becquerel**, seorang ilmuwan Prancis, menaruh beberapa lempeng foto ke dalam laci bersama dengan beberapa pecahan mineral yang mengandung uranium. Ketika dikembangkan, dia terkejut bahwa lempengan foto tersebut telah dipengaruhi oleh radiasi. Fenomena ini disebut sebagai **radioaktivitas** dan terjadi ketika energi dilepaskan dari atom secara spontan dan saat ini diukur dalam satuan yang disebut becquerel (Bq), sesuai dengan nama Henri Becquerel. Segera setelah itu, seorang ahli kimia muda, **Marie Sklodowska-Curie**, melakukan penelitian lebih lanjut dan menjadi orang pertama yang menciptakan kata radioaktivitas. Pada tahun 1898, ia dan suaminya Pierre Curie menemukan bahwa ketika uranium mengeluarkan radiasi, zat tersebut secara aneh berubah



Wilhelm C. Roentgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



Henri Becquerel (1852–1908)

menjadi beberapa unsur lain, yang salah satunya diberi nama polonium, sesuai dengan tanah kelahirannya, sementara yang lain diberi nama radium, atau unsur yang “bersinar”.

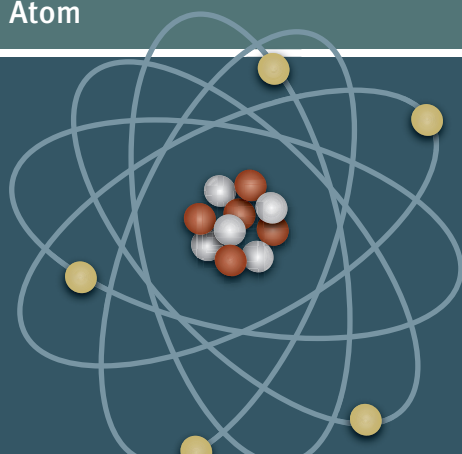
Marie Curie berbagi hadiah Nobel Fisika pada tahun 1903 dengan Pierre Curie dan Henri Becquerel. Marie Curie merupakan wanita pertama yang memenangkan Hadiah Nobel kedua kalinya pada tahun 1911 untuk penemuannya dalam kimia radiasi.

## 1.2. Pengetahuan dasar

Pencarian para ilmuwan adalah untuk memahami *atom* dan, lebih khusus lagi, strukturnya. Manusia sekarang tahu bahwa atom memiliki inti (*nucleus*) kecil bermuatan positif yang dikelilingi oleh awan *elektron* bermuatan negatif. Ukuran inti hanya sekitar seperseratusribu dari ukuran seluruh atom, tetapi sangat padat sehingga menyumbang hampir seluruh massa atom.

Inti umumnya merupakan kumpulan partikel, *proton* dan *neutron*, yang menempel erat satu sama lain. Proton memiliki muatan listrik positif sedangkan neutron tidak memiliki muatan. Unsur kimia ditentukan oleh jumlah proton dalam atomnya (misal, boron memiliki atom dengan 5 proton dan uranium memiliki atom dengan 92 proton). Unsur dengan jumlah proton yang sama tetapi jumlah neutron yang berbeda disebut *isotop* (misal, uranium-235 dan

**Atom**



Jumlah atom 5 - jumlah elektron  
Lambang **B** - jumlah proton  
Nama BORON

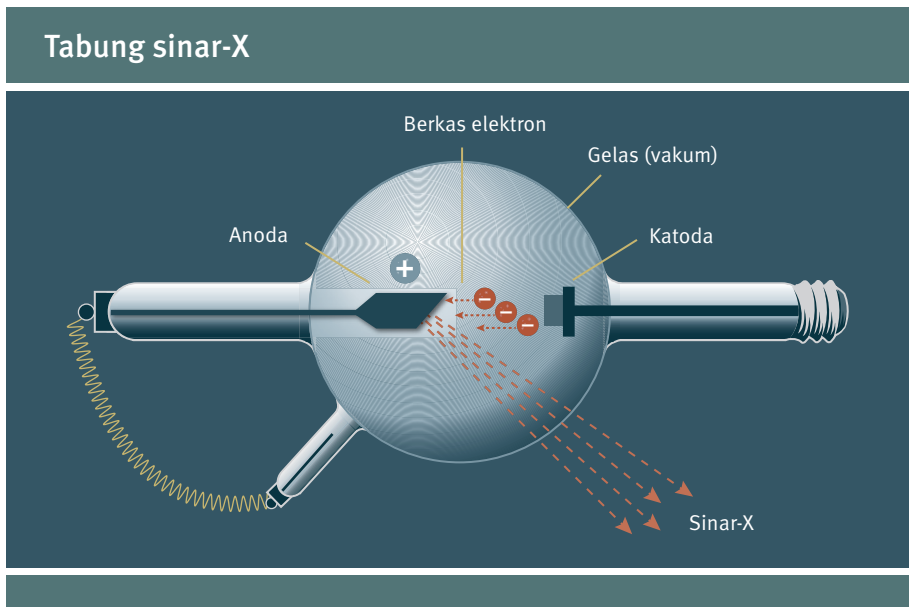
Elektron proton neutron

Suatu atom terdiri atas satu inti yang memiliki neutron yang tidak bermuatan dan proton yang bermuatan positif dikelilingi oleh awan elektron yang bermuatan negatif. Dalam atom yang tidak bermuatan, jumlah elektron dan proton adalah sama, yang mewakili jumlah atom unsur tersebut.

uranium-238 berbeda tiga neutron dalam intinya). Suatu atom secara keseluruhan biasanya tidak bermuatan positif atau negatif karena memiliki jumlah elektron yang bermuatan negatif yang sama dengan yang memiliki proton bermuatan positif.

Beberapa atom secara alami bersifat stabil sementara yang lain tidak stabil. Atom-atom dengan inti yang tidak stabil—yang secara spontan mengubah dan melepaskan energi dalam bentuk radiasi—disebut sebagai *radionuklida*. Energi ini dapat berinteraksi dengan atom lain dan mengionisasikannya. *Ionisasi* adalah proses dimana atom menjadi bermuatan positif atau negatif dengan mendapatkan atau kehilangan elektron. Radiasi pengion membawa energi yang cukup untuk mengeluarkan elektron dari orbitnya sehingga menghasilkan atom bermuatan yang disebut *ion*. Pancaran dua proton dan dua neutron disebut sebagai *peluruhan alfa* dan pancaran elektron sebagai *peluruhan beta*. Kadang-kadang nuklida yang tidak stabil akan diberi energi sedemikian rupa sehingga pancaran partikelnya tidak cukup untuk menstabilkannya. Nuklida kemudian mengeluarkan ledakan energi yang kuat dalam bentuk gelombang elektromagnetik sebagai foton yang disebut sebagai *sinar gamma*.

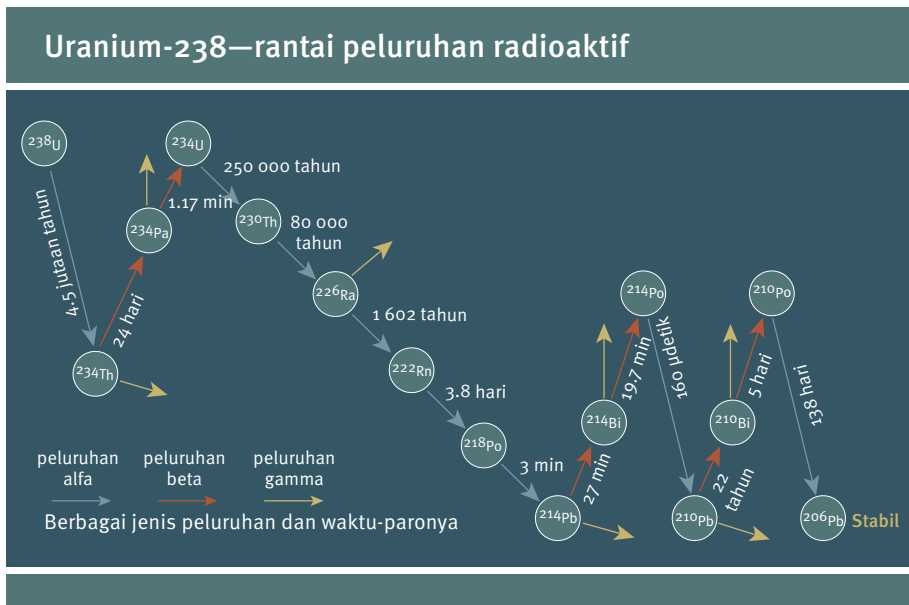
*Sinar-X* juga merupakan radiasi elektromagnetik seperti sinar gamma namun dengan foton energi yang lebih rendah. Spektrum sinar-X dengan energi berbeda diproduksi dalam tabung vakum yang terbuat dari gelas ketika berkas elektron, yang dipancarkan oleh *katoda*, ditembakkan pada bahan target yang disebut



*anoda*. Spektrum sinar-X bergantung pada bahan anoda dan energi percepatan dari berkas elektron. Dengan demikian, sinar-X dapat dihasilkan secara buatan pada saat dibutuhkan, yang sangat menguntungkan dalam aplikasi industri dan medik.

## Peluruhan radioaktif dan waktu-paro

Walau pun semua radionuklida tidak stabil, beberapa diantaranya lebih tidak stabil dibandingkan yang lain. Sebagai contoh, partikel-partikel di dalam inti atom uranium-238 (dengan 92 proton dan 146 neutron) hanya mampu mengelompok bersama. Pada akhirnya, rumpun dua proton dan dua neutron akan pecah dan meninggalkan atom sebagai partikel alfa, mengubah uranium-238 menjadi thorium-234 (dengan 90 proton dan 144 neutron). Tetapi thorium-234 juga tidak stabil, dan berubah oleh proses yang berbeda. Dengan memancarkan elektron berenergi tinggi sebagai partikel beta dan mengubah neutron menjadi proton, thorium-234 menjadi protaktinium-234, dengan 91 proton dan 143 neutron. Pada gilirannya, protaktinium-234 juga sangat tidak stabil dan segera menjadi uranium-234, dan begitu seterusnya atom melanjutkan peluruhan partikel dan mengubah dirinya hingga berakhir sebagai timah-206, dengan 82 proton dan 124 neutron, yang stabil. Banyak rangkaian transformasi yang terjadi di atas, atau yang disebut juga sebagai *peluruhan radioaktif*.





Periode yang dibutuhkan oleh separo dari sejumlah unsur untuk meluruh dikenal sebagai *waktu-paro*. Setelah satu waktu-paro, dari satu juta atom rata-rata 500.000 akan meluruh menjadi atom yang lain. Selama satu waktu-paro berikutnya, sekitar 250.000 atom lainnya akan meluruh, dan seterusnya, sampai semuanya meluruh. Setelah 10 waktu-paro, hanya sekitar seribu yang tersisa dari awal yang sejuta (yaitu sekitar 0,1 persen). Dari contoh ini, dibutuhkan sedikit lebih dari satu menit untuk setengah dari atom protaktinium-234 untuk meluruh menjadi uranium-234. Sebaliknya, untuk uranium-238 akan membutuhkan empat setengah milyar (4.500.000.000) tahun untuk setengah dari atomnya meluruh menjadi thorium-234. Dapat dikatakan bahwa hanya sedikit radionuklida yang terjadi secara alami di lingkungan.

### Satuan radiasi



Harold Gray (1905–1965)  
Rolf Sievert (1896–1966)

Dewasa ini kita mengetahui bahwa energi radiasi dapat merusak jaringan hidup, dan jumlah energi yang mengendap dalam jaringan hidup dinyatakan dalam suatu jumlah atau besaran yang disebut *dosis*. Dosis radiasi dapat berasal dari radionuklida, atau sejumlah radionuklida, yang bisa tetap berada di luar tubuh atau menyinari dari dalam, misalnya setelah dihirup atau dicerna. Besaran dosis dinyatakan dalam berbagai cara bergantung pada seberapa besar tubuh dan bagian tubuh mana yang diiradiasi, apakah hanya satu atau banyak orang yang terpajan, dan lamanya periode pajanan (mis. pajanan akut).

Jumlah energi radiasi yang diserap per kilogram jaringan disebut *dosis serap* dan dinyatakan dalam satuan yang disebut gray (Gy), sesuai dengan nama ahli fisika dan pelopor biologi radiasi Inggris, *Harold Gray*. Tetapi hal ini tidak memberikan gambaran lengkap karena dosis yang sama dari partikel alfa dapat melakukan lebih banyak kerusakan dibandingkan dari partikel beta atau sinar gamma. Untuk membandingkan dosis yang diserap dari berbagai jenis radiasi, jenis radiasi perlu diberi bobot terkait potensinya untuk menyebabkan jenis kerusakan biologik tertentu.

Dosis terbobot ini disebut *dosis tara* (equivalent dose), yang memiliki satuan yang disebut sievert (Sv), sesuai nama ilmuwan Swedia **Rolf Sievert**. Satu sievert adalah 1.000 milisievert, sama seperti satu liter adalah 1.000 mililiter atau satu meter adalah 1.000 milimeter.

Pertimbangan lain adalah bahwa beberapa bagian tubuh lebih rentan dibandingkan yang lain. Sebagai contoh, sejumlah dosis tara yang dibandingkan lebih mungkin menyebabkan kanker di paru-paru dibanding di hati, dan organ reproduksi menjadi perhatian khusus karena risiko efek yang dapat diwariskan. Dengan demikian, untuk membandingkan dosis ketika jaringan dan organ yang berbeda diiradiasi, dosis tara untuk bagian tubuh yang berbeda juga diberi bobot, dan hasilnya disebut dosis efektif, yang juga dinyatakan dalam sievert (Sv). Namun, *dosis efektif* adalah indikator kemungkinan terjadinya kanker dan efek genetik menyusul penerimaan dosis rendah dan tidak dimak-

Besaran radiasi	
Besaran fisik	
Aktivitas	Jumlah transformasi nuklir dari energi per satuan waktu. Diukur sebagai peluruhan per detik dan dinyatakan dalam becquerel (Bq).
Dosis serap	Jumlah energi yang mengendap oleh radiasi pada satu satuan massa bahan, seperti jaringan atau organ. Dinyatakan dalam gray (Gy), yang sesuai dengan joule per kilogram.
Besaran terhitung	
Dosis tara	Dosis serap dikalikan dengan faktor radiasi ( $w_R$ ) yang memperhitungkan cara berbagai jenis radiasi menyebabkan kerusakan biologik pada jaringan atau organ. Dinyatakan dalam sieverts (Sv), yang sesuai dengan joule per kilogram.
Dosis efektif	Dosis tara dikalikan dengan faktor organ ( $w_T$ ) yang memperhitungkan kerentanan terhadap kerusakan jaringan dan organ yang berbeda. Dinyatakan dalam sievert (Sv), yang sesuai dengan joule per kilogram.
Dosis efektif kolektif	Jumlah semua dosis efektif dari suatu populasi atau kelompok manusia yang terpajan radiasi. Dinyatakan dalam orang-sievert (org-Sv, atau man-Sv).

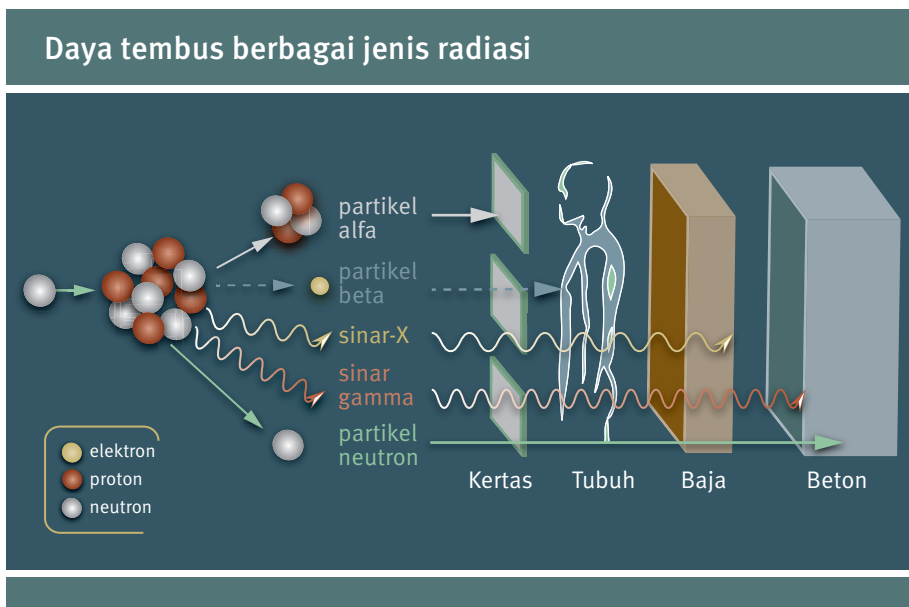
sudkan sebagai ukuran keparahan efek pada dosis yang lebih tinggi.

Sistem besaran radiasi yang cukup rumit ini diperlukan untuk membawa sistem ini ke struktur yang koheren, yang memungkinkan para ahli proteksi radiasi untuk merekam dosis individu secara konsisten dan dapat dibandingkan, yang sangat penting bagi orang yang bekerja dengan radiasi dan *terpajan di tempat kerjanya*.

Namun demikian, uraian di atas hanya menggambarkan dosis untuk individu. Jika semua dosis efektif yang diterima oleh setiap individu ditambahkan pada suatu populasi, hasilnya disebut sebagai *dosis efektif kolektif* atau cukup *dosis kolektif*, dan dinyatakan dalam orang-sievert (orang-Sv). Sebagai contoh, dosis kolektif tahunan untuk populasi dunia adalah lebih dari 19 juta orang-Sv, yang sama dengan dosis rerata tahunan 3 mSv per orang.

### 1.3. Daya tembus radiasi

Secara singkat, radiasi dapat berbentuk partikel (termasuk partikel alfa, beta dan neutron) atau gelombang elektromagnetik (sinar gamma dan sinar-X), semuanya dengan jumlah energi yang berbeda. Perbedaan dalam energi yang dipancarkan dan jenis partikel membuat perbedaan dalam daya tembus—dan karenanya memiliki efek berbeda pada bahan hidup. Karena partikel alfa terdiri atas dua proton bermuatan positif dan dua neutron, partikel ini membawa muatan paling besar dari semua jenis radiasi. Peningkatan muatan ini berarti bahwa



mereka berinteraksi lebih banyak dengan atom-atom di sekitarnya. Interaksi ini dengan cepat mengurangi energi partikel dan karenanya mengurangi daya tembus. Partikel alfa dapat dihentikan, misalnya, dengan selembar kertas. Partikel beta, yang terdiri atas elektron yang bermuatan negatif, membawa muatan lebih sedikit dan karenanya lebih menembus dibandingkan partikel alfa. Partikel beta dapat melewati satu atau dua sentimeter jaringan hidup. Sinar gamma dan sinar-X mempunyai daya tembus yang kuat dan akan melewati apa pun yang kurang padat dibandingkan lempengan baja tebal. Neutron yang diproduksi secara buatan dipancarkan dari inti yang tidak stabil sebagai hasil dari fisi atom atau fusi nuklir. Neutron juga dapat terjadi secara alami sebagai komponen radiasi kosmik. Karena neutron adalah partikel yang netral secara listrik, mereka memiliki daya tembus yang sangat tinggi ketika berinteraksi dengan bahan atau jaringan.

## 2. APA YANG RADIASI LAKUKAN KEPADA KITA?

Sebelum membahas lebih rinci tentang efek pajanan radiasi, perlu diingat kembali pelopor dalam ilmu radiasi yang diperkenalkan sebelumnya. Segera setelah penemuan **Henri Becquerel**, dia sendiri mengalami kelemahan dari radiasi yang paling menyusahkan—efeknya terhadap jaringan hidup. Sebotol kecil radium yang dia masukkan ke sakunya ternyata merusak kulitnya.

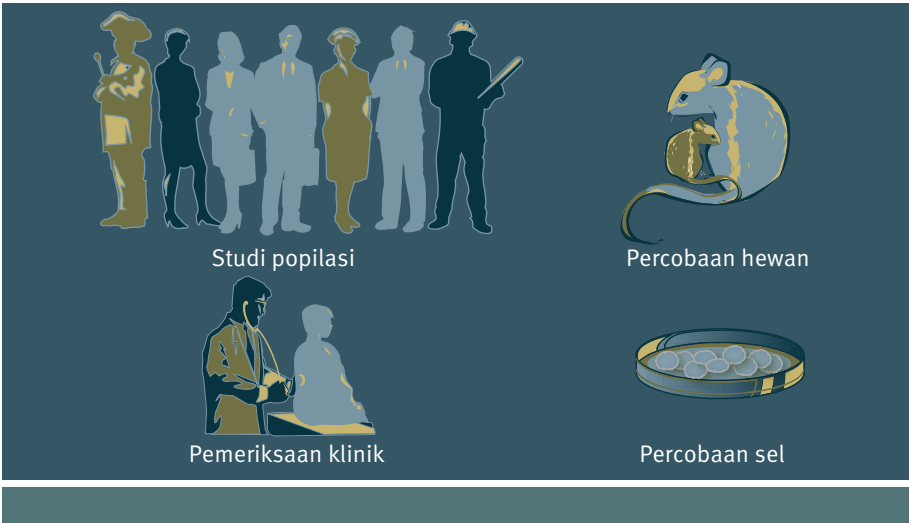
**Wilhelm Conrad Roentgen**, yang menemukan sinar-X pada tahun 1895, meninggal karena kanker usus pada tahun 1923. **Marie Curie**, yang juga terkena radiasi sepanjang karirnya, meninggal karena penyakit darah pada tahun 1934.

Dilaporkan bahwa pada akhir 1950-an, setidaknya 359 pekerja radiasi awal (terutama dokter dan ilmuwan lain) yang meninggal karena pajanan radiasi tidak menyadari akan perlunya perlindungan atau proteksi.

Tidak mengherankan bahwa mereka yang terlibat dalam penggunaan radiasi pada pasien merupakan ilmuwan pertama yang mengembangkan rekomendasi untuk proteksi radiasi pekerja. Pada 1928, X-ray International and Radium Protection Committee dibentuk selama Kongres Internasional Radiologi kedua di Stockholm dan **Rolf Sievert** terpilih sebagai ketua pertamanya. Setelah Perang Dunia Kedua—dengan memperhitungkan penggunaan baru radiasi di luar bidang kedokteran—Komite direstrukturisasi dan diganti namanya menjadi Komisi Internasional untuk Proteksi Radiologik (International Commission on Radiological Protection). Selanjutnya, antara tahun 1958 dan 1960 Rolf Sievert menjadi ketua keempat UNSCEAR, tahun-tahun dimana muncul kekhawatiran khusus tentang efek genetik pada manusia dari pengujian senjata atom.

Dengan tumbuhnya kesadaran akan risiko yang terkait dengan pajanan radiasi, abad kedua puluh menyaksikan perkembangan dalam penelitian yang intensif tentang efek radiasi pada manusia dan lingkungan. Evaluasi paling penting dari kelompok populasi yang terpajan radiasi adalah studi terhadap sekitar 86.500 orang yang selamat dari pembomatoman Hiroshima dan Nagasaki pada akhir Perang Dunia Kedua pada tahun 1945 (selanjutnya disebut sebagai *penyintas dari pembomatoman*). Selanjutnya, data tepercaya terkait efek radiasi berasal dari pengalaman dengan pasien yang teriradiasi, dan dengan pekerja yang menerima pajanan kecelakaan (misal, kecelakaan PLTN Chernobyl), dan dari percobaan hewan dan sel di laboratorium.

## Sumber informasi tentang efek radiasi



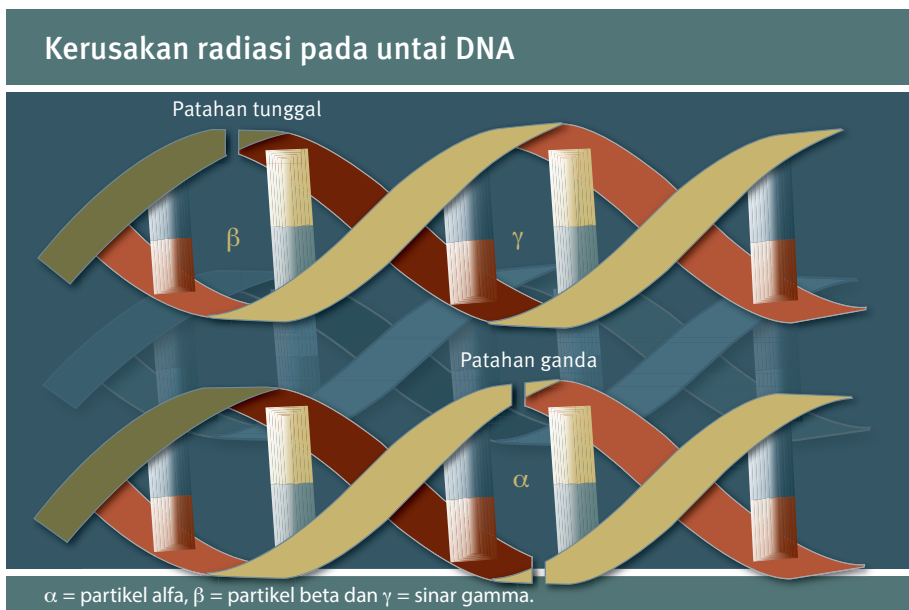
UNSCEAR mengevaluasi informasi ilmiah tentang efek pajanan radiasi pada manusia dan lingkungan dan mencoba memahami sejauh mungkin efek apa yang dapat dikaitkan dengan berbagai tingkat pajanan radiasi. Seperti disinggung sebelumnya, pajanan radiasi bergantung pada jenis radiasi, waktu penyampaiannya dan jumlah energi yang mengendap di bahan. Dalam melakukan evaluasinya, UNSCEAR saat ini menggunakan istilah *dosis rendah* untuk tingkat rata-rata di bawah 100 mGy tetapi lebih besar dari 10 mGy dan istilah *dosis sangat rendah* untuk setiap tingkat di bawah 10 mGy.

## Pita dosis yang digunakan oleh UNSCEAR

Dosis tinggi	Lebih dari ~1 Gy	Kecelakaan radiasi yang parah (misal, pemadam kebakaran di kecelakaan Chernobyl)
Dosis sedang	~100 mGy hingga ~1 Gy	Pekerja operasi pemulihan setelah kecelakaan Chernobyl
Low dose	~10 mGy hingga ~100 mGy	Beberapa penyinaran CT Scan
Dosis sangat rendah	Kurang dari ~10 mGy	Radiografi konvensional (tanpa CT)

## 2.1. Efek pada manusia

Sejak ditemukannya radiasi, lebih dari seabad penelitian radiasi yang dilakukan manusia telah menghasilkan informasi yang luas tentang mekanisme biologik bagaimana radiasi dapat mempengaruhi kesehatan. Diketahui bahwa radiasi dapat menghasilkan efek pada tingkat sel, menyebabkan kematian atau modifikasinya, biasanya karena kerusakan langsung pada untai asam deoksiribonukleat (DNA) dalam sebuah kromosom. Jika jumlah sel yang rusak atau terbunuh cukup besar, hal ini dapat menyebabkan disfungsi organ dan bahkan kematian. Selain itu, kerusakan lain pada DNA dapat terjadi tanpa membunuh sel. Kerusakan seperti ini biasanya dapat diperbaiki sepenuhnya namun, jika tidak, modifikasi yang dihasilkan— dikenal sebagai *mutasi sel*—akan tercermin pada pembelahan sel berikutnya dan pada akhirnya dapat menyebabkan kanker. Jika sel yang dimodifikasi adalah sel-sel yang meneruskan informasi herediter ke keturunan, kelainan genetik dapat muncul. Informasi tentang mekanisme biologik dan efek yang diwariskan banyak diperoleh dari percobaan laboratorium.



Berdasar pengamatan terhadap kejadiannya, efek kesehatan yang terjadi setelah pajanan radiasi didefinisikan di sini sebagai efek kesehatan dini atau tertunda. Secara umum, efek kesehatan dini terbukti melalui diagnosis gejala klinik pada individu, dan efek kesehatan yang tertunda—seperti kanker— melalui *studi epidemiologik* dengan pengamatan peningkatan kejadian patologi dalam suatu populasi. Selanjutnya, perhatian khusus diberikan di sini untuk efek pada anak dan pada embrio/janin, dan efek yang diwariskan.

## Efek kesehatan dini

Efek kesehatan dini disebabkan oleh kematian/kerusakan sel yang luas. Contohnya adalah luka bakar kulit, rambut rontok, dan gangguan kesuburan. Efek kesehatan ini ditandai dengan ambang batas yang relatif tinggi yang harus dilampaui dalam waktu singkat sebelum efek terjadi. Tingkat keparahan efek meningkat dengan meningkatnya dosis setelah ambang batas dilampaui.

Dosis akut lebih tinggi dari 50 Gy umumnya sangat merusak sistem saraf pusat sehingga kematian terjadi dalam beberapa hari. Bahkan pada dosis lebih rendah dari 8 Gy, orang menunjukkan gejala penyakit radiasi yang juga dikenal sebagai *sindroma radiasi akut*, yang dapat berupa mual, muntah, diare, kram usus, berliur, dehidrasi, kelelahan, apatis, lesu, berkeringat, demam, sakit kepala, dan tekanan darah rendah. Istilah akut mengacu pada masalah medik yang terjadi langsung setelah terpajan dibandingkan yang berkembang setelah periode berkepanjangan. Namun, korban yang awalnya terlihat dapat bertahan hidup akan meninggal karena kerusakan saluran cerna satu atau dua minggu kemudian. Dosis yang lebih rendah mungkin tidak menimbulkan cedera gastrointestinal tetapi masih menyebabkan kematian setelah beberapa bulan, terutama dari kerusakan pada sumsum tulang merah. Dosis yang lebih rendah lagi akan menunda timbulnya penyakit dan menghasilkan gejala yang kurang parah. Sekitar setengah dari mereka yang menerima dosis 2 Gy menderita muntah setelah sekitar tiga jam, tetapi ini jarang terjadi untuk dosis di bawah 1 Gy.

## Pajanan kecelakaan di kedokteran

Radioterapi melibatkan pemberian dosis tinggi ke pasien. Karena itu, pencegahan efek akut menjadi prioritas.





Untungnya, jika sumsum tulang merah dan sistem pembentuk darah lainnya menerima kurang dari 1 Gy, mereka memiliki kapasitas yang luar biasa untuk regenerasi dan dapat pulih sepenuhnya—walaupun akan ada risiko yang lebih tinggi untuk munculnya leukemia pada tahun-tahun berikutnya. Jika hanya sebagian tubuh yang terpajan, akan ada cukup sumsum tulang yang bertahan tanpa gangguan untuk menggantikan apa yang telah rusak. Percobaan pada hewan menunjukkan bahwa bahkan jika hanya sepersepuluh sumsum tulang aktif yang lolos dari penyinaran, peluang untuk bertahan hidup hampir 100 persen.

Kenyataan bahwa radiasi dapat secara langsung merusak DNA sel diterapkan untuk membunuh sel-sel ganas dengan radiasi dalam pengobatan kanker yang dikenal sebagai *radioterapi*. Jumlah total radiasi yang diterapkan dalam radioterapi bervariasi bergantung pada jenis dan stadium kanker yang sedang diobati. Dosis untuk pengobatan tumor padat umumnya berkisar antara 20 hingga 80 Gy, yang akan membahayakan pasien jika diberikan dalam dosis tunggal. Dengan demikian, untuk mengendalikan pengobatan, dosis radiasi diberikan dalam fraksi berulang sebanyak maksimal 2 Gy. Fraksinasi ini memungkinkan sel-sel jaringan normal untuk pulih, sementara sel-sel tumor terbunuh karena mereka umumnya kurang efisien dalam memperbaiki setelah menerima pajanan radiasi.

## Efek kesehatan tertunda

Efek kesehatan tertunda terjadi lama setelah pajanan. Secara umum, sebagian besar efek kesehatan tertunda juga merupakan efek stokastik, yaitu yang probabilitas terjadinya bergantung pada dosis radiasi yang diterima. Efek kesehatan ini diyakini disebabkan oleh modifikasi dalam materi genetik sel setelah pajanan radiasi. Contoh efek tertunda adalah tumor padat dan leukemia yang terjadi pada orang yang terpajan dan kelainan genetik yang terjadi pada keturunan orang yang terpajanan radiasi. Frekuensi kejadian—tetapi bukan keparahan—efek ini dalam suatu populasi akan terlihat meningkat dengan dosis yang lebih besar.

Studi epidemiologik sangat penting dalam memahami efek kesehatan tertunda setelah pajanan radiasi. Studi ini menggunakan metode statistik untuk membandingkan terjadinya efek kesehatan (misal, kanker) pada populasi yang terpajan dengan populasi yang tidak terpajan. Jika peningkatan yang cukup besar ditemukan pada populasi yang terpajan, kemungkinan terdapat keterkaitan dengan pajanan radiasi untuk populasi secara keseluruhan.

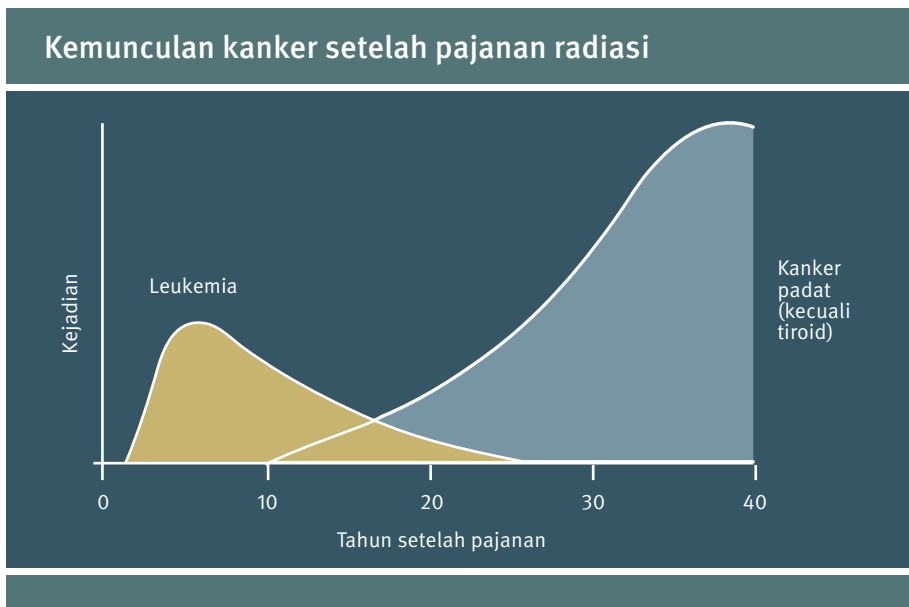
Evaluasi jangka panjang yang paling penting dari populasi yang terpajan radiasi adalah studi epidemiologik para penyintas bom atom. Studi ini adalah

yang paling komprehensif yang pernah dilakukan karena melibatkan orang dalam jumlah besar, mewakili populasi umum, dan menerima berbagai macam dosis yang tersebar cukup merata di seluruh tubuh. Perkiraan dosis yang diterima oleh kelompok ini juga relatif diketahui. Sejauh ini, penelitian telah mengungkapkan beberapa ratus kasus kanker yang lebih banyak dibandingkan dengan yang diperkirakan pada kelompok ini jika mereka tidak terpajan radiasi. Karena banyak penyintas bom atom yang masih hidup, penelitian masih terus dilanjutkan untuk melengkapi hasil evaluasi.

### Kanker

Kanker bertanggung jawab atas sekitar 20 persen dari semua kematian dan merupakan penyebab kematian paling umum di negara-negara industri setelah penyakit kardiovaskular. Sekitar empat dari sepuluh orang dalam populasi umum diperkirakan menderita kanker selama masa hidup mereka bahkan tanpa adanya pajanan radiasi. Dalam beberapa tahun terakhir, kanker yang paling umum di antara laki-laki adalah kanker paru-paru, prostat, kolorektum, lambung, dan hati, dan di antara perempuan adalah kanker payudara, kolorektum, paru-paru, leher rahim, dan kanker lambung.

Perkembangan kanker adalah proses yang kompleks, terdiri dari beberapa tahap. Fenomena awalnya, kemungkinan besar sesuatu yang mempengaruhi sel tunggal, tampaknya menjadi pemicu, tetapi serangkaian peristiwa lain tampaknya



diperlukan sebelum sel menjadi ganas dan tumor berkembang. Kanker menjadi jelas lama setelah kerusakan pertama terjadi, setelah masa laten. Probabilitas terjadinya kanker setelah pajanan radiasi merupakan masalah utama dan dapat diperhitungkan untuk suatu kelompok individu jika kelompok tersebut menerima tingkat radiasi yang cukup tinggi untuk menyebabkan peningkatan kejadian kanker yang dapat diterima secara statistik dan ketidakpastian lainnya. Namun, kontribusi nyata radiasi sebagai penyebab kanker masih belum diketahui.

Leukemia, kanker tiroid, dan kanker tulang akan muncul pertama kali beberapa tahun setelah terjadinya pajanan radiasi, sementara sebagian besar kanker lainnya tidak muncul hingga paling sedikit 10 tahun, bahkan seringkali beberapa dekade, setelah pajanan. Namun, tidak ada satu jenis kanker yang secara unik disebabkan oleh pajanan radiasi sehingga tidak mungkin untuk membedakan tumor yang disebabkan oleh radiasi dengan yang ditimbulkan oleh banyak penyebab lain. Namun demikian, memperkirakan kemungkinan terkena kanker setelah dosis radiasi tertentu sangat penting untuk memberikan dasar ilmiah yang kuat dalam menetapkan batas pajanan.

Studi terhadap orang-orang yang menerima pengobatan medik menggunakan radiasi, orang-orang yang terpajan di tempat kerja, dan—terutama—para penyintas bom atom dapat membangun dasar pengetahuan tentang hubungan antara kanker dan pajanan radiasi. Berbagai studi tersebut menggunakan sampel orang-orang yang menerima pajanan pada banyak bagian tubuh dalam jumlah besar dan yang ditindaklanjuti dalam periode yang cukup lama. Namun demikian beberapa penelitian memiliki kelemahan yang cukup besar, terutama terkait dengan distribusi usia yang berbeda dari populasi normal dan bukti bahwa banyak dari pasien ini sudah sakit ketika menerima penyinaran dan telah menerima perawatan untuk kanker yang dideritanya.

Lebih mendasar lagi, hampir semua data didasarkan pada studi orang yang jaringannya telah menerima dosis radiasi yang cukup tinggi, satu gray atau lebih, baik dalam dosis tunggal atau dalam periode yang relatif singkat. Hanya sedikit informasi tentang efek menerima dosis rendah untuk waktu yang lama—hanya beberapa studi yang membahas efek dari dosis yang biasanya diterima oleh orang yang bekerja dengan radiasi, dan praktis tidak ada informasi langsung tentang konsekuensi pajanan yang secara rutin diterima masyarakat umum. Studi akan perlu mengikuti kondisi kesehatan sejumlah besar orang dalam periode yang lama walau pada akhirnya tetap masih terlalu sulit untuk mengamati peningkatan kejadian kanker dibandingkan dengan tingkat kanker alami.

UNSCEAR melakukan tinjauan komprehensif tentang kejadian kanker pada populasi yang terpajan radiasi, dan memperkirakan bahwa kemungkinan tamba-

han kematian akibat kanker akibat paparan radiasi di atas 100 mSv adalah sekitar 3 hingga 5 per sen per sievert.

### *Efek kesehatan lain*

Dosis radiasi tinggi yang diterima jantung akan meningkatkan kemungkinan penyakit kardiovaskular (misal, serangan jantung). Paparan ini dapat terjadi selama radioterapi, meski teknik pengobatan saat ini menghasilkan dosis jantung yang lebih rendah. Namun, tidak ada bukti ilmiah untuk menyimpulkan bahwa paparan radiasi dosis rendah menyebabkan penyakit kardiovaskular.

UNSCEAR mengakui bahwa ada peningkatan kejadian katarak di antara pekerja darurat Chernobyl, kemungkinan terkait dengan radiasi dosis tinggi. Lebih jauh, UNSCEAR juga telah mempelajari efek radiasi pada sistem kekebalan manusia pada penyintas bom atom, pada pekerja darurat di PLTN Chernobyl dan pada pasien yang menjalani pengobatan radioterapi. Efek radiasi pada sistem kekebalan tubuh dikaji dengan memperkirakan perubahan jumlah sel atau dengan menggunakan berbagai analisis fungsional. Radiasi dosis tinggi akan menekan sistem kekebalan tubuh terutama karena kerusakan limfosit. Pengurangan limfosit saat ini digunakan sebagai indikator awal untuk menentukan dosis radiasi setelah paparan akut.

### **Efek pada keturunan**

Jika kerusakan radiasi terjadi pada sel reproduksi, sperma atau sel telur, hal ini dapat menyebabkan efek pewarisan pada keturunan. Selain itu, radiasi dapat secara langsung merusak embrio atau janin yang sudah berkembang di dalam rahim. Untuk itu sangat penting untuk membedakan antara paparan radiasi orang dewasa, anak-anak dan embrio/janin. UNSCEAR telah melakukan tinjauan komprehensif tentang efek kesehatan, termasuk efek yang diwariskan, dalam berbagai kelompok ini.

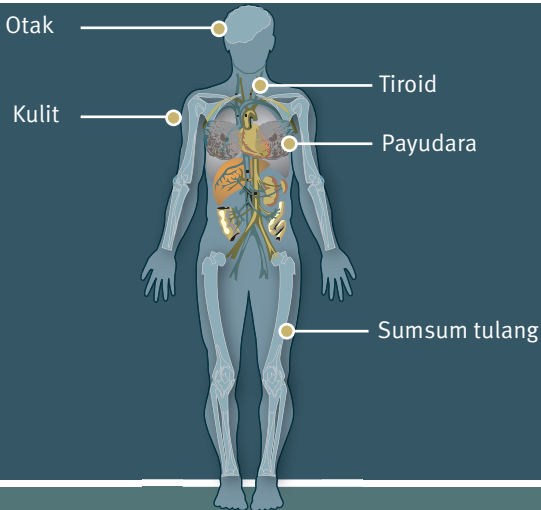
### *Efek pada anak*

Efek kesehatan pada manusia bergantung pada sejumlah faktor fisik. Karena perbedaan anatomik dan fisiologiknya, dampak paparan radiasi pada anak-anak dan orang dewasa berbeda. Lebih lanjut, karena anak-anak memiliki tubuh yang lebih kecil dan kurang terlindung oleh jaringan di atasnya, dosis ke organ internal mereka akan lebih tinggi dibandingkan pada orang dewasa untuk paparan eksternal tertentu. Juga karena anak-anak lebih pendek dibandingkan orang dewasa, anak-anak dapat menerima dosis yang lebih tinggi dari radionuklida yang mengendap di tanah.

Dalam hal pajanan internal, karena ukuran anak yang lebih kecil, dan karena itu organ-organ mereka menjadi berdekatan, radionuklida yang terkonsentrasi pada satu organ akan menyinari organ-organ lain lebih besar dibandingkan yang akan terjadi pada orang dewasa. Beberapa faktor terkait usia yang lain juga melibatkan metabolisme dan fisiologi yang membuat perbedaan besar dalam dosis pada usia yang berbeda. Beberapa radionuklida menjadi perhatian khusus terkait pajanan internal anak-anak. Kecelakaan yang melibatkan pelepasan iodium-131 radioaktif dapat menjadi sumber pajanan yang signifikan bagi tiroid. Untuk suatu masukan tertentu, dosis tiroid untuk bayi sekitar sembilan kali lebih tinggi dibandingkan untuk orang dewasa. Studi tentang kecelakaan PLTN Chernobyl telah mengkonfirmasi hubungan antara kanker tiroid dan iodium-131, yang terkonsentrasi terutama di organ ini.

Studi epidemiologik telah menunjukkan bahwa orang muda di bawah usia 20 tahun tampaknya memiliki kemungkinan sekitar dua kali lebih besar dibandingkan orang dewasa untuk menderita leukemia setelah pajanan radiasi yang sama. Lebih jauh, anak-anak di bawah 10 tahun juga sangat rentan; beberapa studi lain menunjukkan bahwa anak-anak ini akan sekitar tiga sampai empat kali lebih mungkin meninggal karena leukemia dibandingkan orang dewasa. Studi lain juga menunjukkan bahwa anak perempuan yang terpajan di bawah usia 20 tahun memiliki kemungkinan dua kali lebih besar terkena kanker payudara dibandingkan wanita dewasa. Anak-anak lebih mungkin menderita kanker setelah menerima pajanan radiasi dibandingkan orang dewasa, meski hal ini mungkin tidak muncul sampai suatu hari ketika mereka mencapai usia di saat perkembangan kanker telah menjadi jelas terdeteksi.

### Organ yang lebih radiosensitif pada nak-anak



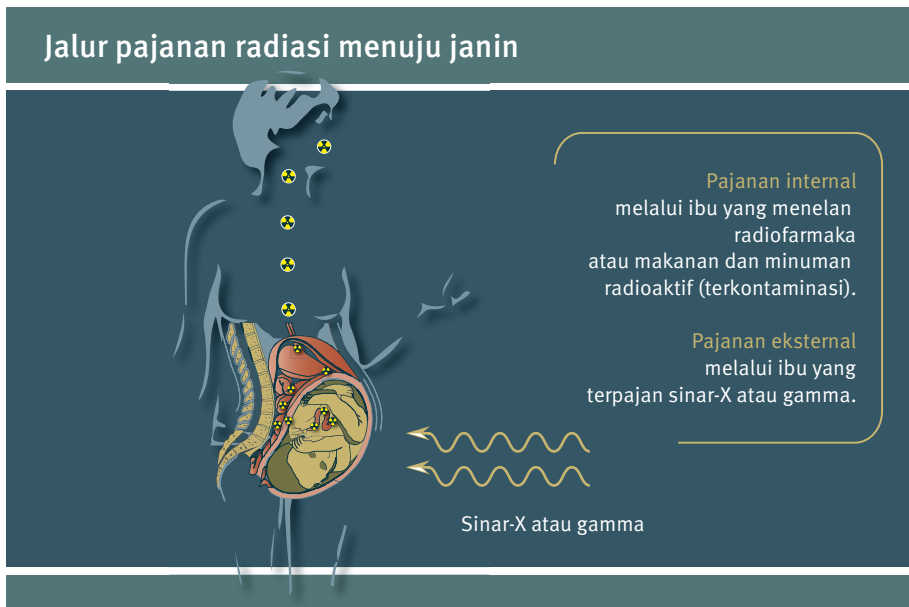
Anak-anak yang terpajan pada usia di bawah 20 tahun akan sekitar dua kali memiliki **kanker otak** dibanding orang dewasa yang terpajan dosis yang sama. Hubungan yang sama dijumpai untuk **kanker payudara** jika anak perempuan terpajan pada usia di bawah 20 tahun.

UNSCEAR telah mengkaji materi ilmiah yang menunjukkan bahwa kejadian kanker pada anak-anak lebih bervariasi dibandingkan pada orang dewasa dan bergantung pada jenis tumor, dan pada usia dan jenis kelamin anak. Istilah *radiosensitivitas* berkaitan dengan induksi kanker mengacu pada tingkat tumor yang disebabkan oleh iradiasi. Studi tentang perbedaan radiosensitivitas antara orang dewasa dan anak-anak telah menemukan bahwa anak-anak lebih sensitif terhadap perkembangan kanker tiroid, otak, kulit dan payudara, dan juga leukemia.

Perbedaan efek kesehatan dini pada anak-anak setelah pajanan dosis tinggi (seperti yang diterima pada radioterapi) cukup kompleks dan dapat dijelaskan oleh interaksi antar berbagai jaringan dan mekanisme biologik. Beberapa efek lebih jelas untuk pajanan di masa kanak-kanak daripada di masa dewasa (misal, cacat otak, katarak, dan nodul tiroid); dan ada beberapa efek yang membuat jaringan anak-anak lebih resisten (misal, paru-paru dan ovarium).

### *Efek pada anak yang belum lahir*

Embrio atau janin dapat terpajan melalui bahan radioaktif yang ditransfer oleh ibu melalui makanan dan minuman (pajanan internal) atau langsung melalui pajanan eksternal. Karena janin terlindungi dalam rahim, dosis radiasinya cenderung lebih rendah daripada dosis untuk ibunya untuk sebagian besar peristiwa pajanan radiasi. Namun, embrio dan janin sangat sensitif terhadap



radiasi, dan konsekuensi kesehatan dari pajanan bisa cukup parah, bahkan pada dosis radiasi yang lebih rendah dibandingkan yang langsung mempengaruhi ibunya. Konsekuensi semacam ini dapat berupa keterlambatan pertumbuhan, malformasi, gangguan fungsi otak, dan kanker.

Perkembangan mamalia di dalam rahim terbagi menjadi sekitar tiga tahap. Radiasi diketahui dapat membunuh janin di dalam rahim pada tahap pertama, yang berlangsung sejak pembuahan sampai pada saat ketika merembes ke dinding rahim, atau sekitar dua minggu pertama kehamilan pada manusia. Sangat sulit untuk mempelajari apa yang terjadi pada tahap ini; namun, informasi terutama dari percobaan hewan mengkonfirmasi bahwa efek fatal pada embrio awal bisa dari dosis radiasi di atas ambang batas tertentu.

Selama tahap berikutnya, berlangsung dari minggu kedua hingga kedelapan pada manusia, bahaya utamanya adalah radiasi akan menyebabkan pertumbuhan organ menjadi cacat dan bisa menyebabkan kematian pada saat kelahiran. Percobaan hewan telah menunjukkan bahwa beberapa organ (misal, mata, otak, tulang rangka) sangat rentan terhadap malformasi jika disinari tepat pada saat organ tersebut berkembang.

Kerusakan terbesar diperkirakan terjadi pada sistem saraf pusat setelah minggu kedelapan, ketika tahap ketiga dan terakhir kehamilan dimulai. Banyak kemajuan telah dibuat dalam memahami efek pajanan radiasi pada otak anak-anak yang belum lahir. Sebagai contoh, 30 anak-anak penyintas bom atom dari sekitar 1.600 yang terpajan sebelum lahir dengan dosis 1 Gy memiliki kecacatan intelektual yang parah.

Isu mengenai apakah pajanan radiasi embrio dapat menyebabkan kanker di kemudian hari masih menjadi kontroversi. Percobaan hewan sampai saat ini telah gagal menunjukkan hubungan antara keduanya. UNSCEAR telah mencoba memperkirakan seluruh risiko untuk anak-anak yang belum lahir untuk sejumlah efek iradiasi—kematian, malformasi, cacat intelektual, dan kanker. Secara keseluruhan, Komite berpendapat bahwa tidak lebih dari dua untuk setiap 1.000 anak yang lahir hidup yang telah terpajan dengan dosis seperseratus gray (0,01 Gy) dalam rahim mungkin menderita salah satu efek tersebut—dibandingkan dengan 6 persen yang menderita efek yang sama secara alami.

### *Efek terwaris*

Radiasi dapat memodifikasi sel yang meneruskan informasi terwaris ke keturunan, yang dapat menyebabkan gangguan genetik. Studi tentang gangguan seperti itu sulit karena hanya ada sedikit informasi tentang kerusakan gene-

tik yang dialami manusia melalui pajanan radiasi, sebagian karena gambaran penuh dari efek yang diwariskan memerlukan banyak generasi untuk dapat terlihat, dan sebagian karena—seperti untuk kanker— efek ini tidak bisa dibedakan dari efek yang terjadi dari penyebab lain.

Banyak dari embrio dan janin yang terkena dampak parah tidak bertahan hidup. Diperkirakan sekitar setengah dari semua keguguran memiliki susunan genetik yang abnormal. Bahkan jika mereka bertahan hidup sampai lahir, bayi dengan kelainan genetik sekitar lima kali lebih mungkin meninggal sebelum ulang tahun kelima daripada anak-anak normal.

Efek terwaris terbagi atas dua kategori utama: aberasi kromosom yang melibatkan perubahan dalam jumlah atau struktur kromosom, dan mutasi gen itu sendiri. Keduanya dapat muncul di generasi berikutnya, tetapi tidak harus selalu demikian.

Studi terhadap anak-anak yang orang tuanya merupakan penyintas bom atom tidak bisa menemukan efek terwaris. Hal ini tidak berarti bahwa tidak ada kerusakan yang berkelanjutan; hanya saja dampak tidak teramati pada pajanan radiasi menengah bahkan pada populasi yang relatif besar. Namun, studi eksperimental, pada tanaman dan hewan yang terpajan dosis tinggi, telah dengan jelas menunjukkan bahwa radiasi dapat menyebabkan efek terwaris. Manusia pastinya tidak mungkin menjadi pengecualian.

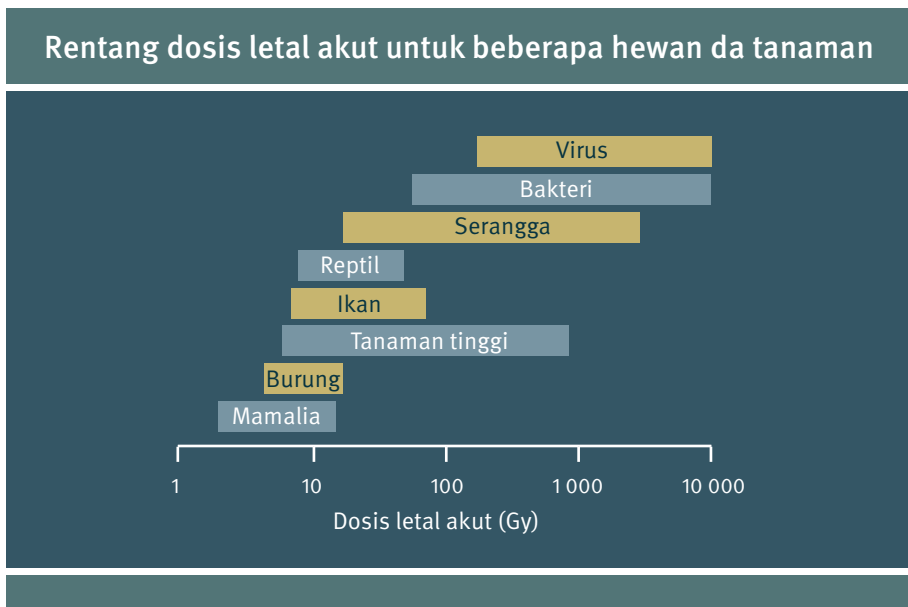
UNSCEAR hanya berkonsentrasi pada efek terwaris yang parah dan memperkirakan bahwa risiko totalnya sekitar 0,3-0,5 persen per gray—yang kurang dari sepersepuluh kemungkinan terjadinya kanker fatal—kepada generasi pertama setelah pajanan radiasi diterima.

## 2.2. Efek pada hewan dan tanaman

Efek pajanan radiasi pada hewan dan tanaman saat ini mendapat perhatian lebih besar dari sebelumnya. Pada beberapa dekade terakhir, pandangan yang berlaku adalah bahwa jika kehidupan manusia telah terlindungi, baik tanaman maupun hewan akan sama-sama terlindungi. UNSCEAR mengevaluasi efek pajanan radiasi pada tanaman dan hewan dan menemukan bahwa rentang dosis teoretik 1-10 Gy tidak akan menghasilkan efek pada populasi hewan dan tanaman, dan bahwa respons individu terhadap pajanan radiasi bervariasi (mamalia merupakan yang paling sensitif dibandingkan semua hewan). Efek-efek yang mungkin signifikan pada tingkat populasi menyangkut kesuburan, kematian dan induksi mutasi. *Perubahan reproduksi*, seperti dalam jumlah keturunan adalah indikator efek radiasi yang lebih sensitif dibandingkan kematian.



**Dosis letal** (mematikan) mewakili dosis di mana 50 persen dari subyek yang terpajan akan mati. Untuk tanaman yang terpajan dalam waktu yang relatif singkat (*akut*), dosis letalnya sekitar kurang dari 10 hingga sekitar 1.000 Gy. Secara umum, tanaman yang lebih besar akan lebih radiosensitif dibandingkan yang lebih kecil. Dosis letal berkisar antara 6 hingga 10 Gy untuk mamalia kecil dan sekitar 2,5 Gy untuk yang lebih besar. Beberapa serangga, bakteri, dan virus dapat mentoleransi dosis lebih dari 1.000 Gy.



Sumber utama informasi utama selama ini adalah hasil pengamatan yang diperoleh dari pajanan radiasi pada hewan dan tanaman di daerah sekitar PLTN Chernobyl. UNSCEAR mengevaluasi jalur yang ditempuh lingkungan saat terpajan, dan membuat pendekatan baru untuk mengkaji efek potensial dari pajanan semacam itu.

Belum lama ini UNSCEAR memperkirakan dosis dan efek pajanan radiasi pada beberapa hewan dan tanaman setelah terjadinya kecelakaan PLTN Fukushima-Daiichi dan menyimpulkan bahwa secara umum, pajanan yang ada terlalu rendah untuk menyebabkan terjadinya efek akut yang dapat diamati. Namun, perubahan pada *penanda biologik (biomarker)*, yang merupakan indikator penyakit tertentu atau keadaan fisiologik suatu organisme—khususnya untuk mamalia—tidak dapat diabaikan, meski signifikansinya pada integritas populasi organisme yang bersangkutan masih belum jelas.

Selain itu, perlu dicatat bahwa tindakan protektif dan remedial yang dilakukan untuk mengurangi pajanan pada manusia dapat memiliki dampak yang lebih signifikan. Sebagai contoh, keduanya dapat mempengaruhi barang dan layanan lingkungan, sumberdaya yang digunakan pada pertanian, kehutanan, perikanan dan pariwisata, dan fasilitas yang digunakan pada kegiatan spiritual, budaya dan hiburan.

### 2.3. Hubungan dosis dan efek radiasi

Saat membuat ringkasan mengenai hubungan antara dosis radiasi dan efek kesehatannya, UNSCEAR menekankan pentingnya membedakan antara pengamatan efek kesehatan yang ada pada populasi terpajan, dan proyeksi teoretik mengenai efek yang mungkin terjadi di masa depan. Setiap ketidakpastian dan ketidaktepatan perlu diperhitungkan untuk kedua situasi, apakah itu pada pengukuran radiasinya, statistik yang dipakai atau faktor lainnya.

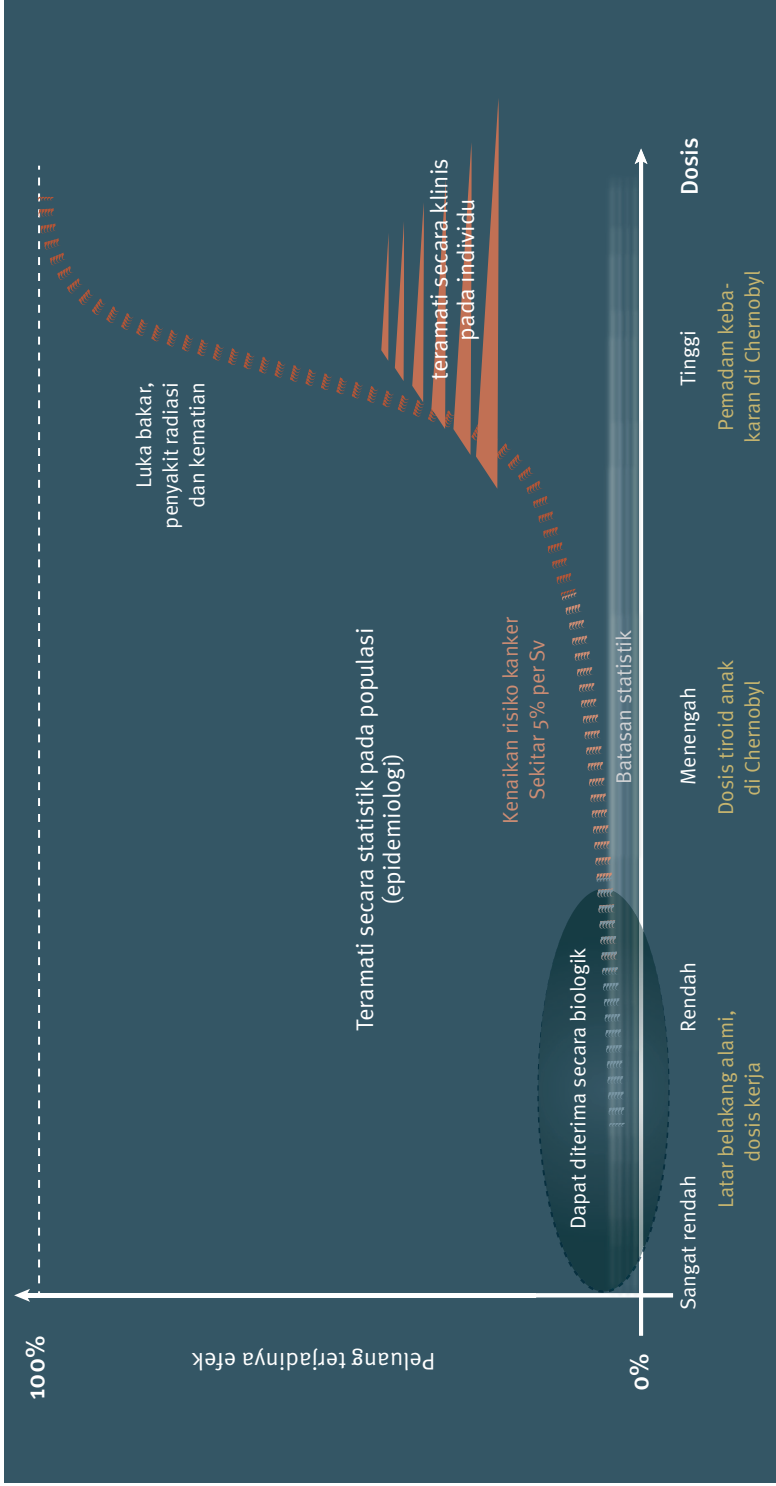
Dengan mempertimbangkan tingkat pengetahuan saat ini, efek kesehatan yang teramati dapat secara pasti dikaitkan dengan pajanan radiasi jika efek dininya (seperti luka bakar kulit) terjadi pada individu yang menerima dosis radiasi di atas 1 Gy. Dosis semacam itu dapat timbul saat terjadi kecelakaan radiasi, seperti yang diterima oleh pekerja darurat saat terjadinya kecelakaan pada PLTN Chernobyl, atau oleh pasien selama terjadinya kecelakaan pada radioterapi.

Dengan metode epidemiologik juga dapat dimungkinkan untuk mengaitkan peningkatan terjadinya efek kesehatan tertunda (seperti kanker) pada populasi yang terpajan dosis radiasi tingkat menengah jika kenaikan yang teramati cukup tinggi untuk menutup ketidakpastian yang ada. Namun, hingga saat ini belum ada biomarker yang dapat membedakan apakah suatu kanker disebabkan oleh radiasi atau bukan.

Jika tingkat pajanan radiasi cukup rendah atau sangat rendah—seperti pada tingkat pajanan radiasi lingkungan dan pajanan kerja—perubahan dalam terjadinya efek kesehatan tertunda belum dapat dikonfirmasi, mengingat adanya ketidakpastian statistik dan lainnya. Namun demikian, efek semacam ini juga tidak dapat diabaikan.

Dalam hal efek kesehatan yang mungkin terjadi di masa depan, telah ada pemahaman tentang bagaimana memperkirakan peluang terjadinya efek tersebut untuk dosis tinggi dan menengah. Namun, pada dosis rendah dan sangat rendah, perlu dibuat asumsi dan menggunakan model matematik yang sangat tidak pasti. Akibatnya, untuk dosis radiasi rendah dan sangat rendah, UNSCEAR

## Hubungan dosis radiasi dengan efek kesehatan

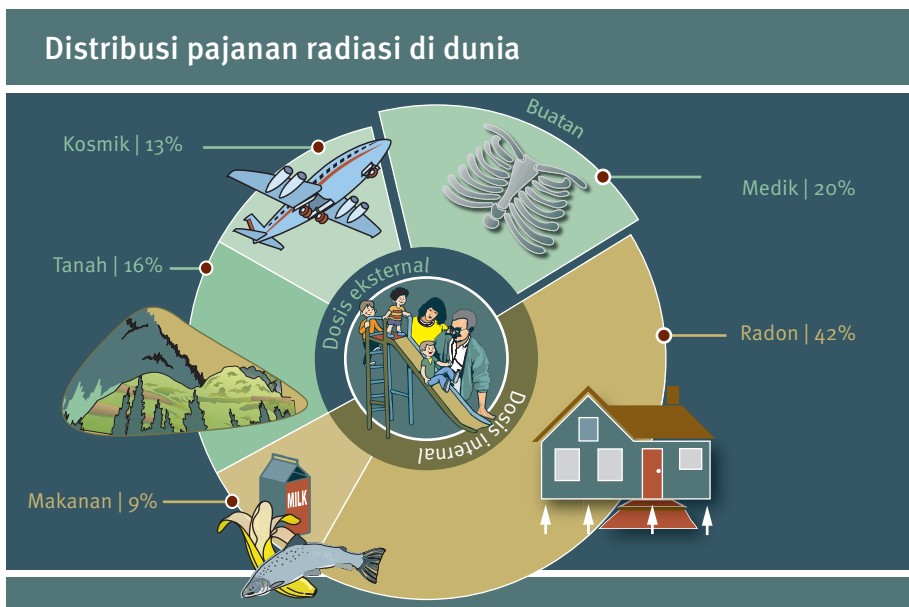


telah memilih untuk tidak menggunakan model semacam itu dalam pengkajiannya—setelah, misalnya, kecelakaan Chernobyl dan Fukushima-Daiichi—untuk memproyeksikan efek kesehatan atau kematian karena ketidakpastian dan prediksinya tidak dapat diterima. Namun demikian, untuk perbandingan kesehatan publik atau tujuan proteksi radiasi, perhitungan semacam itu dapat berguna asal ketidakpastian diperhitungkan dan keterbatasannya dinyatakan dengan jelas.

### 3. DARI MANA ASAL RADIASI?

Manusia terus menerus menerima pajanan radiasi dari berbagai sumber. Semua spesies di permukaan bumi telah ada dan berkembang di lingkungan dan telah menerima pajanan radiasi dari latar belakang alami. Belakangan, manusia dan organisme lain juga telah menerima pajanan dari sumber radiasi buatan yang dikembangkan lebih dari satu abad terakhir. Lebih dari 80 persen pajanan yang ada di bumi berasal dari sumber alami dan hanya 20 persen dari sumber buatan—terutama dari aplikasi radiasi yang digunakan di bidang kedokteran. Pada publikasi ini, pajanan radiasi dikategorikan berdasar sumbernya, dengan fokus pada yang diterima publik. Untuk tujuan pengawasan (mis. proteksi radiasi) pajanan radiasi dibedakan atas beberapa kelompok yang berbeda. Dengan demikian, informasi tambahan diberikan disini mengenai pasien—yang menerima pajanan medik radiasi—dan mengenai orang yang menerima pajanan di daerah kerja.

Cara lain untuk mengkategorikan pajanan radiasi adalah dengan melihat bagaimana radiasi tersebut menyinari manusia. Bahan radioaktif dan radiasi di lingkungan dapat menyinari tubuh manusia dari luar—*secara eksternal*. Manusia juga dapat menghirup bahan radioaktif yang ada di udara, menelannya pada makanan dan minuman atau menyerapnya melalui kulit dan luka, dan kemudian menyinari tubuh dari dalam—*secara internal*. Secara global, dosis radiasi pajanan internal dan eksternal diperkirakan sama besar.

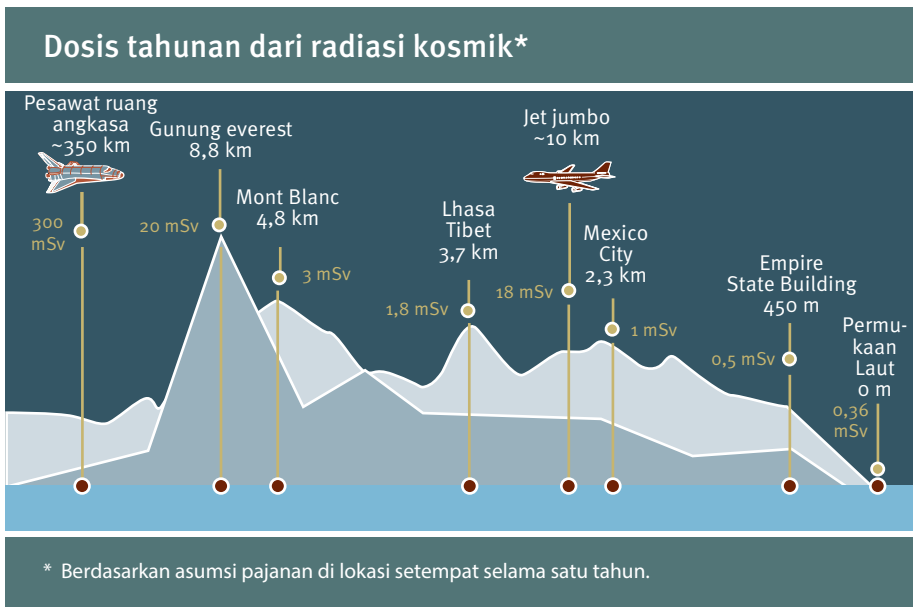


### 3.1. Sumber alami

Sejak penciptaan bumi, lingkungan planet ini telah menerima pajanan radiasi baik dari luar angkasa mau pun dari bahan radioaktif yang ada di lapisan dan inti bumi. Pajanan tersebut tidak dapat dihindari dan, kenyataannya, merupakan penyebab dari pajanan radiasi pada populasi dunia. Dosis efektif tahunan rata-rata global dari pajanan ini adalah sekitar 2,4 mSv dengan rentang dari sekitar 1 hingga lebih dari 10 mSv, bergantung pada dimana manusia tinggal. Bangunan gedung dapat memerangkap gas radioaktif tertentu, yang disebut radon, atau bahan bangunan itu sendiri mengandung radionuklida yang meningkatkan pajanan radiasi. Meski sumber ini alami, pajanan ini dapat dimodifikasi dengan pilihan yang kita buat, seperti bagaimana dan dimana kita tinggal atau apa yang kita makan dan minum.

#### Sumber kosmik

Sinar kosmik merupakan sumber alami terbesar dari pajanan radiasi eksternal. Sebagian besar sinar kosmik berasal dari ruang antar bintang, dan sebagian di antaranya berasal dari matahari selama terjadinya suar matahari. Sinar ini menyinari bumi secara langsung, dan berinteraksi dengan atmosfer untuk menghasilkan berbagai jenis radiasi dan bahan radioaktif. Sinar kosmik merupakan sumber radiasi yang dominan di ruang angkasa. Walau atmosfer dan medan magnet bumi menurunkan sebagian tingkat radiasi kosmik, beberapa



bagian bumi lebih terpajan dibandingkan bagian lainnya. Karena radiasi kosmik dibelokkan oleh medan magnet di kutub utara dan selatan, kedua kutub menerima radiasi ini lebih besar dibandingkan dengan di daerah ekuator.

Selain itu, tingkat pajanan meningkat dengan ketinggian karena udara yang lebih renggang di atas mengurangi fungsinya sebagai penahan radiasi. Dengan demikian, orang yang tinggal di permukaan laut secara rata-rata menerima dosis efektif sekitar 0,3 mSv per tahun dari sumber radiasi kosmik, atau sekitar 10–15% dosis totalnya berasal dari sumber alami. Mereka yang tinggal di atas ketinggian 2.000 meter menerima dosis radiasi beberapa kali lebih besar. Penumpang pesawat dapat menerima dosis lebih tinggi karena pajanan radiasi dari sumber kosmik tidak hanya bergantung pada ketinggian tetapi juga pada lamanya penerbangan. Misalnya, pada ketinggian jelajah, dosis efektif rata-rata adalah 0,03-0,08 mSv untuk penerbangan 10 jam. Dengan kata lain, penerbangan pulang pergi New York–Paris akan membuat seseorang terpajan sekitar 0,05 mSv. Dosis sebesar ini kira-kira sama dengan dosis efektif yang diterima pasien dari pemeriksaan sinar-X dada rutin. Meskipun perkiraan dosis efektif yang diterima oleh penumpang individu selama penerbangan cukup rendah, dosis kolektif mungkin cukup tinggi karena banyaknya jumlah penumpang dan penerbangan di seluruh dunia.

## PAJANAN DI DAERAH KERJA

---

Dosis dari sumber kosmik sangat penting bagi orang yang sering bepergian seperti pilot dan awak kabin, yang menerima dosis rata-rata sekitar 2-3 mSv per tahun. Dosis radiasi juga telah diukur pada sejumlah misi ruang angkasa. Dosis untuk misi singkat berada di rentang 2-27 mSv, bergantung pada aktivitas yang sedang terjadi matahari. Namun, seorang astronot yang bertugas dalam misi yang berlangsung selama empat bulan di Stasiun Ruang Angkasa Internasional (International Space Station) yang mengorbit bumi di ketinggian 350 km akan menerima dosis efektif sekitar 100 mSv.

## Sumber terestrial

### *Tanah*

Semua materi yang berada di dalam atau di permukaan Bumi mengandung *radionuklida primordial*. Radionuklida yang berumur sangat panjang dijumpai di bumi—seperti potassium-40, uranium-238 dan thorium-232—bersama dengan radionuklida yang peluruhannya—seperti radium-226 dan radon-222—telah memancarkan radiasi sejak sebelum bumi mengambil bentuknya yang sekarang. UNSCEAR menghitung bahwa setiap orang di seluruh dunia secara

rata-rata menerima dosis efektif sekitar 0,48 mSv setiap tahun sebagai pajanan eksternal dari sumber eksternal.

Pajanan eksternal bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lain. Studi di Prancis, Jerman, Italia, Jepang dan Amerika Serikat, misalnya, memperkirakan sekitar 95 persen populasinya tinggal di daerah dimana dosis tahunan rata-rata luar ruangan bervariasi dari 0,3 hingga 0,6 mSv. Namun, di beberapa tempat di negara-negara tersebut, manusia dapat menerima dosis lebih besar dari 1 mSv per tahun. Di tempat lain di dunia juga terdapat daerah dimana sumber terestrialnya cukup tinggi. Sebagai contoh, di pantai barat daya Kerala, India, daerah dengan populasi padat dan panjang 55 km yang mengandung pasir yang kaya thorium, penduduk disana menerima sekitar 3,8 mSv per tahun. Daerah lain dengan tingkat sumber radiasi terestrial alami tinggi diketahui ada di Brazil, Cina, Republik Islam Iran, Madagaskar dan Nigeria.

### *Gas radon*

Radon-222 adalah radionuklida dalam bentuk gas yang terpancar dari tanah. Radionuklida ini dihasilkan dari deret peluruhan uranium-238 yang ada di batuan dan tanah bumi. Jika dihirup, beberapa anak luruh radon yang berumur singkat—terutama polonium-218 dan -214—tetap tinggal di paru-paru dan menyinari sel di saluran nafas dengan partikel alfa. Radon, dengan demikian, merupakan penyebab utama kanker paru pada perokok dan bukan perokok. Namun, perokok lebih rentan karena interaksi yang kuat antara rokok dan pajanan radon.

Radon berada di semua atmosfer, dan dapat merembes langsung ke dalam bangunan melalui ruang bawah tanah dan lantai, dimana *konsentrasinya*—jumlah aktivitas dalam peluruhan per waktu dalam volume udara—dapat mengumpul. Pada saat suhu rumah naik, udara hangat akan terangkat dan terlepas di bagian atas rumah melalui jendela atau kisi-kisi terbuka, dan menciptakan tekanan rendah di lantai bawah dan ruang bawah tanah. Keadaan ini selanjutnya menyebabkan tersedotnya radon dari lapisan tanah melalui celah dan retak (misalnya, di bagian masuk pipa air) di bagian bawah rumah.

Konsentrasi rata-rata di seluruh dunia dari radon di dalam ruangan (indoor) sekitar 50 Bq/m<sup>3</sup>. Namun, nilai ini sebenarnya sangat bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lain. Secara umum, konsentrasi rata-rata di suatu negara memiliki rentang dari kurang dari 10 Bq/m<sup>3</sup> di Siprus, Mesir dan Kuba hingga lebih dari 100 Bq/m<sup>3</sup> di Republik Ceko, Finlandia dan Luksemburg. Di beberapa negara seperti Kanada, Swedia dan Swiss terdapat rumah dengan konsentrasi antara 1.000 dan 10.000 Bq/m<sup>3</sup>. Namun, proporsi rumah dengan konsentrasi yang sangat tinggi seperti itu sangat sedikit. Beberapa faktor yang menyebab-



kan variasi ini adalah struktur geologi lokal di bawah lokasi, permeabilitas tanah, bahan bangunan dan ventilasi bangunan.



Secara khusus, ventilasi yang bergantung pada iklim merupakan faktor kunci. Jika bangunan memiliki ventilasi yang baik, seperti di iklim tropik, pengumpulan radon akan sangat rendah. Namun, di iklim sedang atau dingin, dimana bangunan cenderung memiliki ventilasi sedikit, konsentrasi radon dapat cukup besar. Karena itu, efek ventilasi sangat penting dalam merancang bangunan yang efisien energi. Program pengukuran besar-besaran telah dilakukan di banyak negara dan telah menjadi dasar dalam menerapkan langkah-langkah untuk mengurangi konsentrasi radon di dalam ruangan.

Tingkat radon di air biasanya sangat rendah namun beberapa sumber—misalnya sumur dalam di Helsinki, Finlandia, dan di Hot Springs, Arkansas, AS—memiliki konsentrasi yang sangat tinggi. Radon di air dapat menambah kenaikan konsentrasi radon di udara—terutama di kamar mandi saat mandi pancuran. Namun, UNSCEAR menyimpulkan bahwa kontribusi dosis dari radon yang terelan dari air minum cukup kecil dibandingkan dengan yang terhirup. UNSCEAR memperkirakan bahwa dosis efektif tahunan rata-rata dari radon adalah 1,3 mSv, yang mewakili setengah dari yang diterima publik dari semua sumber radiasi alami.

## PAJANAN DI DAERAH KERJA

---

Di beberapa daerah kerja, penghirupan gas radon mendominasi pajanan kerja radiasi. Radon merupakan sumber utama pajanan radiasi di semua jenis tambang bawah tanah. Dosis efektif rata-rata tahunan pada pekerja tambang batubara sekitar 2,4 mSv dan untuk pekerja tambang lain sekitar 3 mSv. Di industri nuklir, dosis efektif rata-rata tahunan pada pekerja sekitar 1 mSv, terutama dari pajanan radon di tambang uranium.

### Sumber di makanan dan minuman

Makanan dan minuman dapat mengandung radionuklida primordial dan lainnya, terutama dari sumber alami. Radionuklida dapat ditransfer ke tanaman dan kemudian ke hewan dari batuan dan mineral yang ada di tanah dan air. Dengan demikian, dosis bervariasi bergantung pada konsentrasi radionuklida di dalam makanan dan air, dan pada pola makan setempat.

Sebagai contoh, ikan dan kerang memiliki kadar timbal-210 dan polonium-210 yang relatif tinggi sehingga orang yang mengkonsumsi makanan laut dalam jumlah besar akan mungkin menerima dosis yang agak lebih tinggi dibandingkan populasi umum. Dosis yang relatif lebih tinggi juga diterima oleh orang-orang yang tinggal di daerah Arktik yang mengkonsumsi daging rusa dalam jumlah besar. Rusa kutub di Arktik mengandung konsentrasi polonium-210 yang relatif tinggi, terakumulasi dalam lumut yang mereka makan. UNSCEAR memperkirakan bahwa dosis efektif rata-rata dari sumber alami dalam makanan dan minuman adalah 0,3 mSv, terutama karena kalium-40 dan radionuklida dari deret uranium-238 dan thorium-232.

Radionuklida dari sumber buatan dapat hadir dalam bahan makanan selain radionuklida dari sumber alami. Namun, kontribusi dosis dari pembuangan resmi radionuklida ini ke lingkungan biasanya sangat kecil.

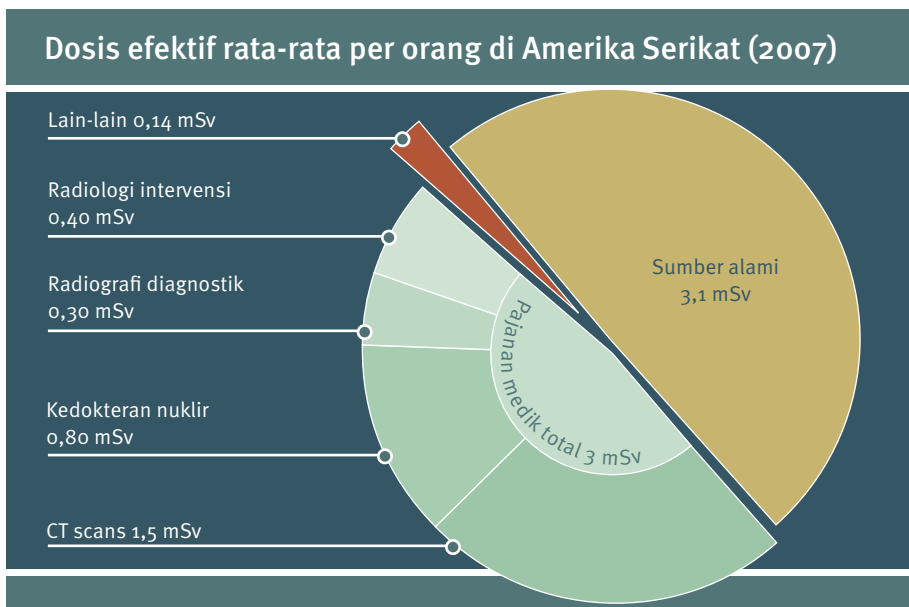
### 3.2. Sumber buatan

Penggunaan radiasi telah meningkat secara signifikan selama beberapa dekade terakhir ketika para ilmuwan mempelajari penggunaan energi atom untuk berbagai keperluan, dari militer hingga aplikasi medik (misalnya, perawatan kanker), dan dari produksi listrik hingga aplikasi domestik (misalnya, detektor asap). Sumber-sumber radiasi ini dan sumber buatan lainnya menambah dosis radiasi dari sumber alami untuk individu dan populasi global.

Dosis individual dari sumber radiasi buatan juga sangat bervariasi. Kebanyakan orang menerima dosis yang relatif kecil dari sumber tersebut tetapi beberapa menerima berkali-kali lipat dari rata-rata. Sumber radiasi buatan umumnya dapat dikendalikan dengan baik dengan melakukan tindakan proteksi radiasi.

## Aplikasi medik

Penggunaan radiasi dalam pengobatan untuk mendiagnosis dan mengobati penyakit tertentu memainkan peran yang sangat penting sehingga saat ini menjadi sumber pajanan buatan utama di dunia. Aplikasi ini rata-rata memberikan sumbangan 98 persen dari pajanan radiasi dari semua sumber buatan dan, setelah sumber alami, merupakan penyumbang terbesar kedua terhadap pajanan populasi di seluruh dunia, mewakili sekitar 20 persen dari total pajanan populasi dunia. Sebagian besar pajanan ini berlangsung di negara-negara industri, di mana sumber daya untuk perawatan medik tersedia lebih banyak dan, oleh karena itu, peralatan radiologi digunakan jauh lebih luas. Di beberapa negara, aplikasi medik radiasi bahkan menghasilkan dosis efektif rata-rata tahunan dari penggunaan medik yang hampir sama dengan yang berasal dari sumber alami.



Pajanan medik memiliki perbedaan yang cukup besar dibandingkan sebagian besar jenis pajanan lainnya. Pajanan medik biasanya hanya menyinari sebagian dari tubuh, sementara pajanan lain lebih banyak menyinari seluruh

tubuh. Selain itu, distribusi usia pasien biasanya mencapai usia yang lebih tua dibandingkan populasi umum. Dosis yang dihasilkan dari pajanan medik harus dibandingkan dengan yang dari sumber lain dengan sangat hati-hati, mengingat pasien menerima manfaat langsung dari pajanan yang diterimanya.

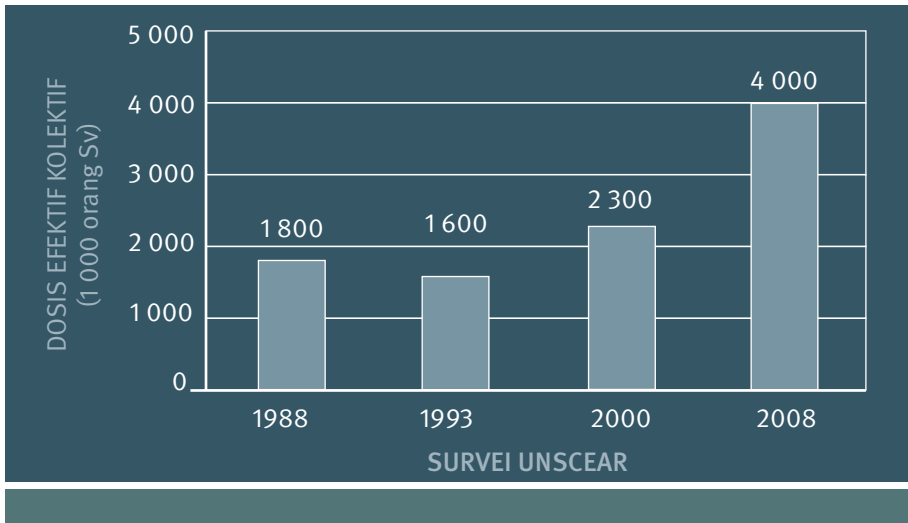
Meningkatnya urbanisasi, bersama dengan peningkatan standar hidup secara bertahap, menyebabkan perawatan kesehatan dapat diakses oleh lebih banyak orang. Sebagai akibatnya, dosis populasi akibat pajanan medik terus meningkat di seluruh dunia. UNSCEAR secara berkala telah mengumpulkan informasi tentang prosedur diagnostik dan terapi. Berdasar survei untuk periode 1997-2007, sekitar 3,6 miliar prosedur radiasi medik dilakukan setiap tahun di seluruh dunia, dibandingkan dengan 2,5 miliar pada periode survei sebelumnya untuk periode 1991-1996, yang merupakan peningkatan hampir 50 persen.

Kategori umum utama praktik medik yang melibatkan radiasi adalah radiologi (termasuk prosedur intervensi), kedokteran nuklir dan radioterapi. Penggunaan lain yang tidak dievaluasi secara berkala oleh UNSCEAR adalah program penapisan kesehatan, dan keikutsertaan sukarela dalam program penelitian medik, biomedik, diagnostik atau terapi.

**Radiologi diagnostik** adalah analisis citra yang diperoleh menggunakan sinar-X, seperti dalam radiografi sederhana (seperti sinar-X dada atau gigi), fluoroskopi (seperti dengan *barium meal* atau *enema*) dan tomografi terkomputasi(CT). Modalitas pencitraan yang menggunakan radiasi non-pengion, seperti ultrasound atau resonansi magnet, tidak ditangani oleh UNSCEAR. **Radiologi intervensi** menggunakan prosedur invasif minimal dengan panduan citra untuk mendiagnosis dan mengobati penyakit (seperti untuk memandu kateter dalam pembuluh darah).

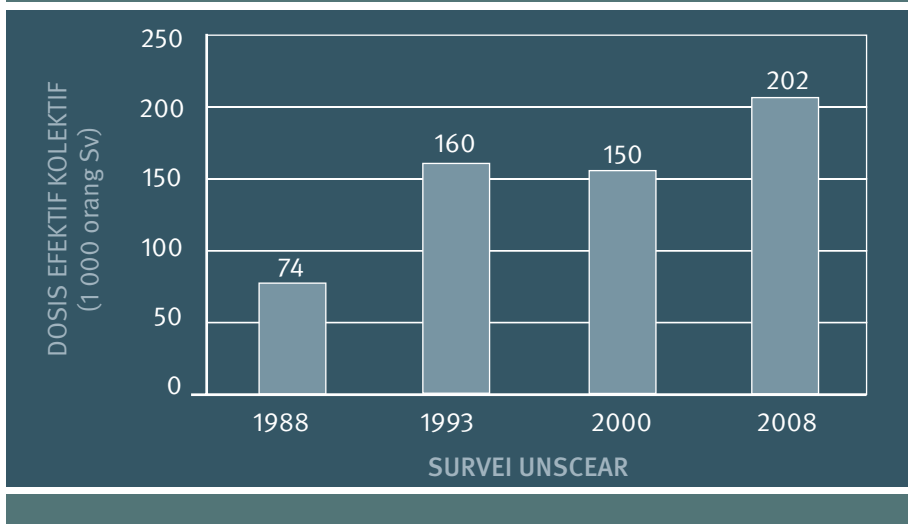
Karena penggunaan CT yang makin luas dan signifikannya dosis per pemeriksaan, dosis efektif rata-rata global dari prosedur radiologik diagnostik hampir dua kali lipat dari 0,35 mSv pada tahun 1988 menjadi 0,62 mSv pada tahun 2007. Menurut survei terbaru UNSCEAR, pemindaian CT saat ini menyumbang 43 persen dari dosis kolektif total karena radiologi. Angka ini bervariasi dari satu daerah ke daerah lain. Sekitar dua pertiga dari semua prosedur radiologik diterima oleh 25 persen populasi dunia yang tinggal di negara-negara industri. Untuk 75 persen populasi dunia sisanya, frekuensi prosedur tahunan tetap konstan, bahkan untuk pemeriksaan sinar-X gigi sederhana.

## Pajanan global dari radiologi (1988–2008)



**Kedokteran nuklir** adalah prosedur yang memasukkan zat radioaktif *terbuka* (yaitu, larut dan tidak dikemas) ke dalam tubuh, umumnya untuk mendapatkan citra yang memberikan informasi tentang struktur atau fungsi organ, dan sedikit lebih jarang untuk mengobati penyakit tertentu, seperti hipertiroidisme dan kanker tiroid. Pada prosedur kedokteran nuklir ini radionuklida dimodifikasi

## Pajanan global dari kedokteran nuklir (1988–2008)



untuk membentuk radiofarmaka yang biasanya diberikan secara intravena atau oral. Radionuklida kemudian menyebar dalam tubuh sesuai dengan karakteristik fisik atau kimia yang memungkinkan pemindaian. Dengan demikian, radiasi yang dipancarkan dari radionuklida dalam tubuh dianalisis untuk menghasilkan citra diagnostik atau digunakan untuk mengobati penyakit.

Jumlah prosedur kedokteran nuklir diagnostik meningkat di seluruh dunia dari sekitar 24 juta pada tahun 1988 menjadi sekitar 33 juta pada tahun 2007. Hal ini mengakibatkan peningkatan yang signifikan dalam dosis efektif kolektif tahunan dari 74.000 menjadi 202.000 orang Sv. Aplikasi terapi dalam kedokteran nuklir modern juga meningkat, mencapai sekitar 0,9 juta pasien setiap tahun di seluruh dunia. Penggunaan kedokteran nuklir juga sangat tidak merata, dengan 90 persen pemeriksaan terjadi di negara-negara industri.

**Terapi radiasi** (juga disebut *radioterapi*) menggunakan radiasi untuk mengobati berbagai penyakit, biasanya kanker, tetapi juga tumor jinak. Radioterapi eksternal mengacu pada perawatan pasien menggunakan sumber radiasi yang berada di luar tubuh pasien dan disebut *teleterapi*. Teleterapi menggunakan mesin yang berisi sumber radioaktif tinggi (biasanya kobalt-60) atau mesin bertegangan tinggi yang menghasilkan radiasi (misal, akselerator linier). Pengobatan juga dapat dilakukan dengan memasukkan sumber radioaktif logam atau tertutup, baik sementara atau permanen, dalam pasien dan ini disebut *brakiterapi*.

Di seluruh dunia, diperkirakan 5,1 juta pasien mendapat tindakan radioterapi setiap tahun selama periode 1997-2007, naik dari sekitar 4,3 juta pada tahun 1988. Sekitar 4,7 juta menjalani tindakan teleterapi dan 0,4 juta mendapat tindakan brakiterapi. Sekitar 25 persen dari populasi yang tinggal di negara industri menerima 70 persen tindakan radioterapi di seluruh dunia dan 40 persen dari semua prosedur brakiterapi.

## PAJANAN DI DAERAH KERJA

---

Karena jumlah total prosedur radiologi medik telah bertambah secara signifikan pada dekade terakhir, jumlah pekerja yang terlibat juga makin meningkat. Jumlah pekerja melampaui 7 juta orang dan menerima dosis efektif tahunan sekitar 0,5 mSv per pekerja. Pada radiologi intervensi dan kedokteran nuklir, staf medik dapat menerima dosis yang lebih tinggi dibandingkan rata-rata.

## *Kecelakaan dalam aplikasi medik*

Beberapa aplikasi radiasi medik (misal, radioterapi, radiologi intervensi, dan kedokteran nuklir) melibatkan pemberian dosis radiasi tinggi kepada pasien. Bila diterapkan secara keliru, pemberian dosis ini dapat menyebabkan kerusakan serius atau bahkan kematian. Orang-orang yang berisiko tidak hanya pasien, tetapi juga dokter dan staf lain yang ada di sekitarnya. Kesalahan manusia telah menjadi penyebab paling umum dari kecelakaan ini. Contohnya termasuk memberikan dosis yang salah karena kesalahan perencanaan tindakan, kegagalan untuk menggunakan peralatan dengan benar, dan menyinari organ yang salah atau, kadang-kadang, bahkan pasien yang salah.

Walau pun kecelakaan radioterapi yang serius jarang terjadi, lebih dari 100 kecelakaan telah terdata. UNSCEAR telah mengkaji 29 laporan kecelakaan sejak tahun 1967 yang menyebabkan 45 kematian dan 613 cedera. Namun, ada kemungkinan bahwa beberapa kematian dan banyak cedera tidak atau belum dilaporkan.

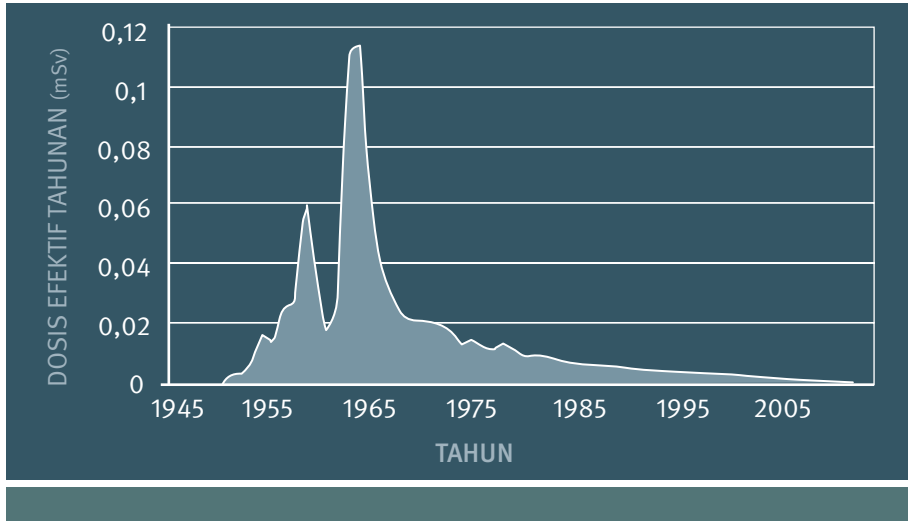
Tidak hanya pajanan berlebih tetapi pajanan kurang juga memiliki konsekuensi serius, ketika pasien menerima dosis radiasi yang tidak mencukupi untuk melakukan tindakan terhadap penyakit yang mengancam jiwa. Program jaminan mutu dapat membantu mempertahankan standar praktik yang tinggi dan konsisten untuk meminimalkan risiko kecelakaan semacam itu.

## **Senjata nuklir**

Pada tahun 1945, selama tahap akhir Perang Dunia Kedua, dua bom atom dijatuhkan di kota-kota Jepang—Hiroshima pada 6 Agustus dan Nagasaki pada 9 Agustus. Ledakan kedua bom menewaskan hampir 130.000 orang. Peristiwa ini menjadi satu-satunya penggunaan senjata nuklir untuk peperangan dalam sejarah. Namun, setelah 1945, banyak senjata nuklir diuji di atmosfer, sebagian besar di belahan bumi utara. Periode pengujian paling banyak adalah antara tahun 1952 dan 1962. Secara keseluruhan, lebih dari 500 uji dilakukan, yang menghasilkan total sekitar 430 megaton setara trinitrotoluene (TNT), dengan pengujian terakhir dilakukan pada tahun 1980. Orang-orang di seluruh dunia terpajan radiasi dari jatuhnya radioaktif akibat pengujian senjata nuklir ini. Untuk menanggapi kekhawatiran tentang pajanan radiasi bagi manusia dan lingkungan, UNSCEAR didirikan pada tahun 1955.

Dosis efektif rata-rata tahunan yang diperkirakan karena jatuhnya radioaktif global dari pengujian senjata nuklir di atmosfer yang tertinggi sebesar 0,11 mSv terjadi pada tahun 1963, dan kemudian turun ke tingkat saat ini sekitar 0,005 mSv. Pajanan ini akan menurun hanya sangat lambat di masa depan karena sebagian besar disebabkan oleh radionuklida karbon-14 yang berumur panjang.

## Pajanan rata-rata dunia per orang dari jatuhnya uji senjata nuklir



Sebanyak 50 persen dari total jatuhnya yang dihasilkan oleh uji permukaan didapatkan di lokasi setempat pada jarak sekitar 100 km dari lokasi uji. Orang-orang yang tinggal di dekat lokasi uji terpajan terutama dari jatuhnya setempat. Namun, karena uji dilakukan di daerah yang relatif terpencil, populasi setempat yang terpajan cukup kecil dan tidak berkontribusi secara signifikan terhadap dosis kolektif global. Namun demikian, orang-orang yang hidup pada arah angin bertiup dari lokasi pengujian menerima dosis yang jauh lebih tinggi dibandingkan rata-rata.

Laporan pertama UNSCEAR pada tahun 1958 meletakkan dasar ilmiah untuk perundingan *Perjanjian Pelarangan Uji Senjata Nuklir di Atmosfer, di Luar Angkasa dan di Bawah Air* (Treaty Banning Nuclear Weapon Tests in the Atmosphere, in Outer Space and under Water). Setelah Perjanjian Larangan Uji Parsial ini ditandatangani pada tahun 1963, sekitar 50 uji dilakukan di bawah tanah setiap tahun hingga tahun 1990-an; beberapa uji juga telah dilakukan setelah itu. Sebagian besar uji ini memiliki hasil nuklir jauh lebih rendah daripada uji atmosfer, dan setiap serpihan radioaktif biasanya ditampung kecuali gas yang mungkin bisa keluar atau bocor ke atmosfer. Walaupun uji ini menghasilkan residu radioaktif dalam jumlah yang sangat besar, publik diharapkan tidak akan terpajan karena uji terletak jauh di bawah tanah dan pada dasarnya menyatu dengan batuan induk.

Ada kekhawatiran terkait penggunaan kembali daerah uji coba nuklir (misal, untuk penggembalaan hewan atau ditanami untuk pertanian), karena beberapa telah dihuni kembali. Dosis dari residu radioaktif di beberapa lokasi, misalnya



di daerah tertentu di lokasi uji Semipalatinsk di Kazakhstan saat ini, atau di daerah yang lebih besar seperti di Atol Mururoa dan Fangataufa di Polinesia Prancis, sebenarnya sangat kecil dan hanya sepersekian dari pajanan latar belakang normal terhadap populasi yang kembali menempati lokasi. Namun di daerah lain seperti di Kepulauan Marshall dan Maralinga, masing-masing tempat Amerika Serikat dan Inggris melakukan uji coba senjata nuklirnya, pajanan pada populasi yang tinggal di daerah tersebut akan bergantung pada pola makan dan gaya hidupnya.

## Reaktor nuklir

Ketika isotop uranium atau plutonium ditabrak oleh neutron, inti membelah menjadi dua inti yang lebih kecil dengan proses yang disebut fisi nuklir, yang melepaskan energi beserta dua atau lebih neutron. Neutron yang dilepaskan juga dapat menabrak inti uranium atau plutonium lainnya dan menyebabkan inti tersebut membelah, melepaskan lebih banyak neutron, yang pada gilirannya dapat membelah lebih banyak inti. Kejadian ini disebut reaksi berantai. Kedua isotop ini biasanya digunakan sebagai bahan bakar dalam reaktor nuklir, di mana reaksi berantai dikendalikan untuk menghentikan tabrakannya jika terlalu cepat.

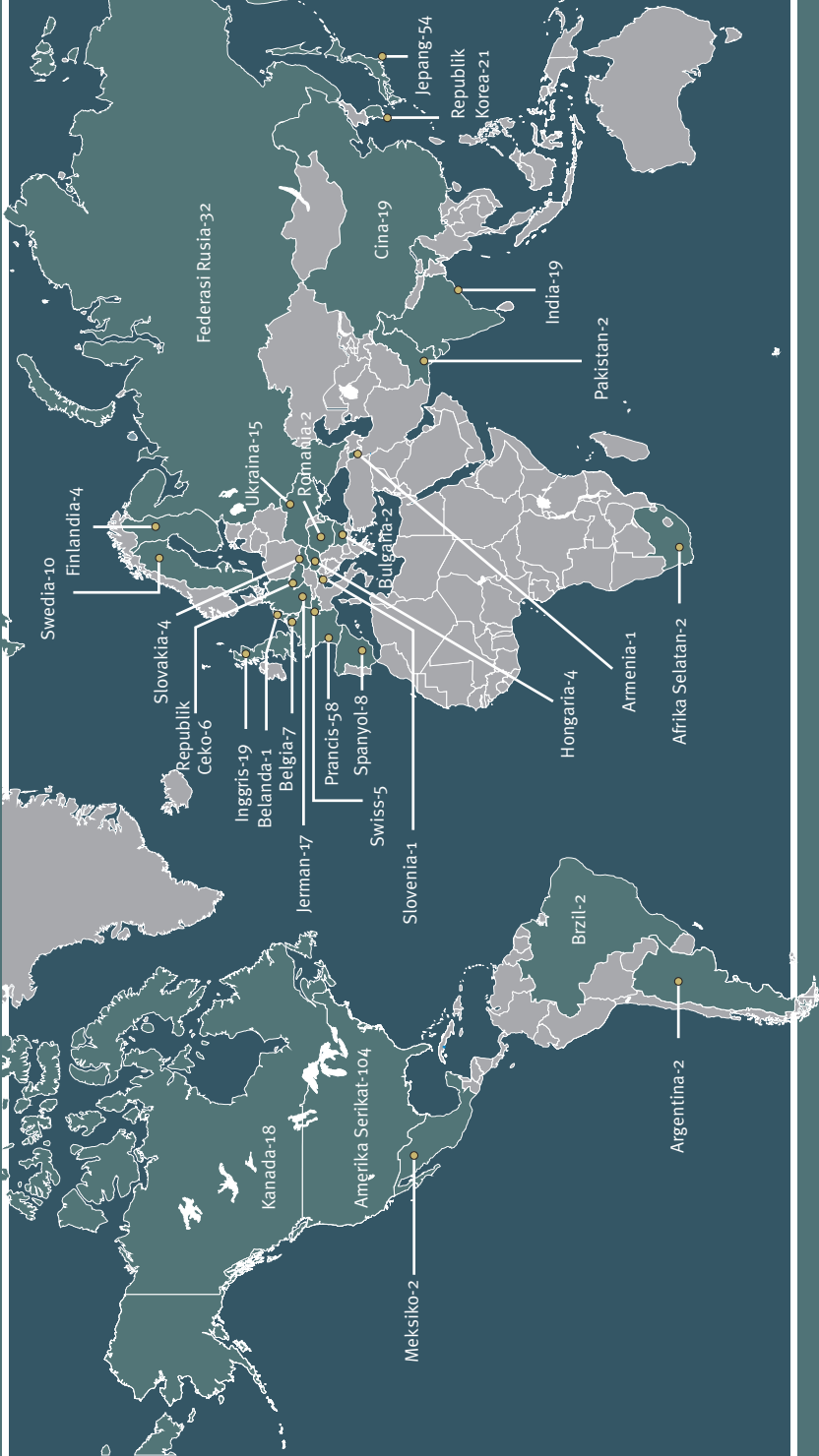
Energi yang dilepaskan dari fisi dalam reaktor nuklir dapat digunakan untuk menghasilkan listrik di pembangkit listrik tenaga nuklir. Namun, ada juga reaktor riset untuk menguji bahan bakar nuklir dan berbagai jenis bahan, untuk penelitian dalam fisika dan biologi nuklir, dan untuk produksi radionuklida yang digunakan dalam kedokteran dan industri. Meskipun ada perbedaan antara kedua jenis reaktor, keduanya membutuhkan proses industri seperti penambangan uranium dan pembuangan limbah radioaktif, yang dapat menimbulkan pajanan kerja dan publik.

### *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) komersial pertama di dunia pada skala untuk industri, Calder Hall, dibangun pada tahun 1956 di Inggris, dan sejak saat itu, pembangkitan energi listrik oleh PLTN telah tumbuh pesat. Meskipun penutupan (decommissioning) reaktor tua makin banyak, produksi energi listrik dari PLTN terus tumbuh. Pada akhir 2010, sekitar 440 reaktor daya beroperasi di 29 negara, menyediakan sekitar 10 persen pembangkit listrik global, dan 240 reaktor riset tersebar luas di 56 negara di dunia.

Meskipun produksi listrik dengan menggunakan tenaga nuklir seringkali kontroversial, dalam operasi normal PLTN memberikan kontribusi yang sangat kecil terhadap pajanan radiasi global. Selain itu, tingkat pajanan radiasi sangat bervariasi dari satu jenis PLTN ke yang lain, antara lokasi yang berbeda dan dari waktu ke waktu.

## PLTN di dunia (2010)



Tingkat pajanan akibat pelepasan normal dari reaktor cenderung menurun meskipun produksi listrik dari PLTN terus meningkat. Hal ini sebagian karena penyempurnaan teknologi dan sebagian lagi karena penerapan proteksi radiasi yang lebih ketat. Secara umum, pelepasan dari fasilitas nuklir menimbulkan dosis radiasi yang sangat rendah. Dosis kolektif tahunan untuk populasi di sekitar PLTN diperkirakan 75 orang-Sv. Dengan demikian, seseorang yang tinggal di sekitar PLTN secara rata-rata terpapar dosis efektif tahunan sekitar 0,0001 mSv.

Komponen dominan untuk pajanan radiasi dari daur operasi tenaga nuklir adalah penambangan. Penambangan dan pemurnian uranium menghasilkan residu dalam jumlah besar dalam bentuk tailing, yang mengandung kadar radionuklida alami yang cukup tinggi. Pada tahun 2003, total produksi uranium dunia telah mencapai sekitar dua juta ton sementara tailing yang dihasilkan mencapai lebih dari dua miliar ton. Tumpukan tailing saat ini terpelihara dengan baik, tetapi masih banyak tambang lama yang terbengkalai dan hanya sedikit yang telah menjalani perbaikan. UNSCEAR memperkirakan dosis kolektif tahunan saat ini untuk kelompok populasi di sekitar lokasi tambang, fasilitas pemurnian dan tumpukan tailing berada di sekitar 50-60 orang-Sv.

Bahan bakar bekas dari reaktor dapat diolah ulang untuk mengambil uranium dan plutonium sisa untuk digunakan kembali. Sebagian besar bahan bakar bekas saat ini disimpan dalam penyimpanan sementara tetapi sekitar sepertiganya saat ini sudah diolah ulang. Dosis kolektif tahunan karena pengolahan ulang diperkirakan berkisar antara 20-30 orang-Sv.

Limbah tingkat rendah dan sebagian tingkat menengah saat ini dibuang di fasilitas dekat permukaan meskipun, di masa lalu, limbah kadang-kadang dibuang di laut. Baik limbah tingkat tinggi dari pengolahan ulang dan bahan bakar bekas (jika tidak diolah ulang) disimpan tetapi pada akhirnya perlu dibuang. Pembuangan limbah yang benar tidak akan memunculkan pajanan bagi manusia bahkan di masa mendatang.

## PAJANAN DI DAERAH KERJA

---

Dalam industri nuklir, pelepasan radon di tambang uranium bawah tanah memberikan kontribusi besar bagi pajanan kerja. Ekstraksi dan pengolahan bijih radioaktif yang mungkin mengandung radionuklida tingkat tinggi merupakan kegiatan yang banyak dilakukan. Dosis efektif tahunan rata-rata per pekerja di industri nuklir secara bertahap telah menurun sejak tahun 1970-an, dari 4,4 mSv menjadi 1 mSv saat ini. Hal ini terutama karena pengurangan yang signifikan dalam penambangan uranium ditambah dengan teknik penambangan dan ventilasi yang lebih baik.

## Pengolahan utama di industri nuklir

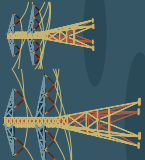
**Konversi, pengayaan dan pemurnian** menyiapkan uranium untuk digunakan sebagai bahan bakar



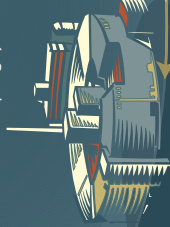
**Fabrikasi bahan bakar** menghasilkan batang bahan bakar, umumnya dari uranium dalam pelet keramik, terbungkus dalam tabung-logam



**Reaktor daya dan riset**, dimana inti atom uranium terbelah (fisi) dan melepaskan energy yang digunakan untuk memanaskan air.



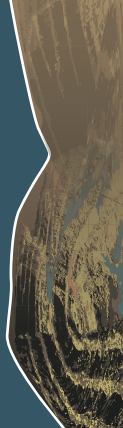
**Pengolahan ulang uranium dan plutonium** dari bahan bakar bekas dapat didaur ulang sebagai bahan bakar setelah konversi dan pengayaan.



**Penggilingan** ekstrak uranium dari bijih. Residu menjadi tailing, yang mengandung radionuklida berumur panjang dengan konsentrasi rendah.



**Uranium alam** diekstraksi terutama oleh tambah terbuka atau bawah tanah.



**Radioisotop yang** dihasilkan di reaktor dapat dipisahkan untuk digunakan di kedokteran dan industri.



**Limbah tingkat rendah** dan menengah sebagian besar dibuang pada lokasi pembuangan tanah dangkal di sekitartapak PLTN.



**Limbah tingkat tinggi** termasuk bahan bakar bekas saat ini disimpan sementara sebelum dibuang final pada lokasi geologi dalam.



Tempat pembuangan Geologik dalam

Penyimpanan permukaan

Kedalaman dangkal dan menengah

## *Kecelakaan di fasilitas nuklir*

Tingkat pajanan selama operasi normal fasilitas sipil industri nuklir sangat rendah. Namun, ada beberapa kecelakaan serius yang mendapat perhatian luas dari publik dan yang konsekuensinya telah dikaji oleh UNSCEAR. Contoh kecelakaan termasuk di fasilitas penelitian Vinca di bekas Yugoslavia pada tahun 1958, PLTN Three Mile Island di Amerika Serikat pada tahun 1979, dan fasilitas konversi bahan bakar di Tokai-Mura di Jepang pada tahun 1999.

Tiga puluh lima kecelakaan radiasi parah di fasilitas nuklir antara 1945 dan 2007 mengakibatkan kematian atau cedera serius pada karyawan, dan tujuh kecelakaan menyebabkan pelepasan bahan radioaktif ke luar lokasi dan terdeteksinya pajanan radiasi pada populasi. Kecelakaan parah di fasilitas yang terkait dengan program senjata nuklir juga telah terjadi. Di luar kecelakaan PLTN Chernobyl tahun 1986 dan kecelakaan PLTN Fukushima- Daiichi tahun 2011—yang akan dibahas berikutnya—32 kematian dan 61 kasus cedera terkait radiasi yang memerlukan perawatan medik juga telah terjadi.

Kecelakaan paling serius di instalasi sipil sebelum yang terjadi di Chernobyl adalah di PLTN Three Mile Island pada 28 Maret 1979. Serangkaian peristiwa menyebabkan pelelehan parsial inti reaktor. Kecelakaan ini melepaskan sejumlah besar produk fisi dan radionuklida dari inti reaktor yang rusak ke bangunan penahan, tetapi relatif sedikit ke lingkungan dan pajanan publik yang dihasilkan sangat rendah.

## *Kecelakaan PLTN Chernobyl*

Kecelakaan di PLTN Chernobyl pada tanggal 26 April 1986 tidak hanya yang paling parah dalam sejarah PLTN sipil, tetapi juga yang paling serius dalam hal pajanan radiasi pada populasi umum. Dosis kolektif dari kecelakaan berkali-kali lebih besar dibandingkan dosis kolektif gabungan dari semua kecelakaan radiasi lainnya.

Dua orang pekerja meninggal karena trauma segera setelahnya, dan 134 orang menderita sindroma radiasi akut, yang terbukti fatal bagi 28 di antaranya. Cedera kulit dan katarak terkait radiasi merupakan masalah utama bagi para penyintas. Selain pekerja darurat, beberapa ratus ribu orang kemudian menjalani operasi pemulihan. Terlepas dari peningkatan nyata dalam terjadinya leukemia dan katarak di antara mereka yang menerima dosis tinggi pada tahun 1986 dan 1987, tidak ada bukti yang konsisten sampai saat ini mengenai efek kesehatan lain yang terkait radiasi pada kelompok ini.

Kecelakaan ini menyebabkan terjadinya pelepasan radioaktif terbesar yang tidak terkontrol ke lingkungan yang pernah tercatat untuk suatu fasilitas sipil; zat radioaktif dalam jumlah besar dilepaskan ke atmosfer selama sekitar 10 hari. Awan radioaktif yang diciptakan oleh kecelakaan itu tersebar di seluruh belahan bumi utara dan mengendapkan sejumlah besar bahan radioaktif ke wilayah yang luas di bekas negara Uni Soviet dan bagian lain Eropa, mencemari tanah dan air terutama di negara Belarus saat ini, Federasi Rusia dan Ukraina, dan menyebabkan gangguan sosial dan ekonomi yang serius bagi sebagian besar populasi.

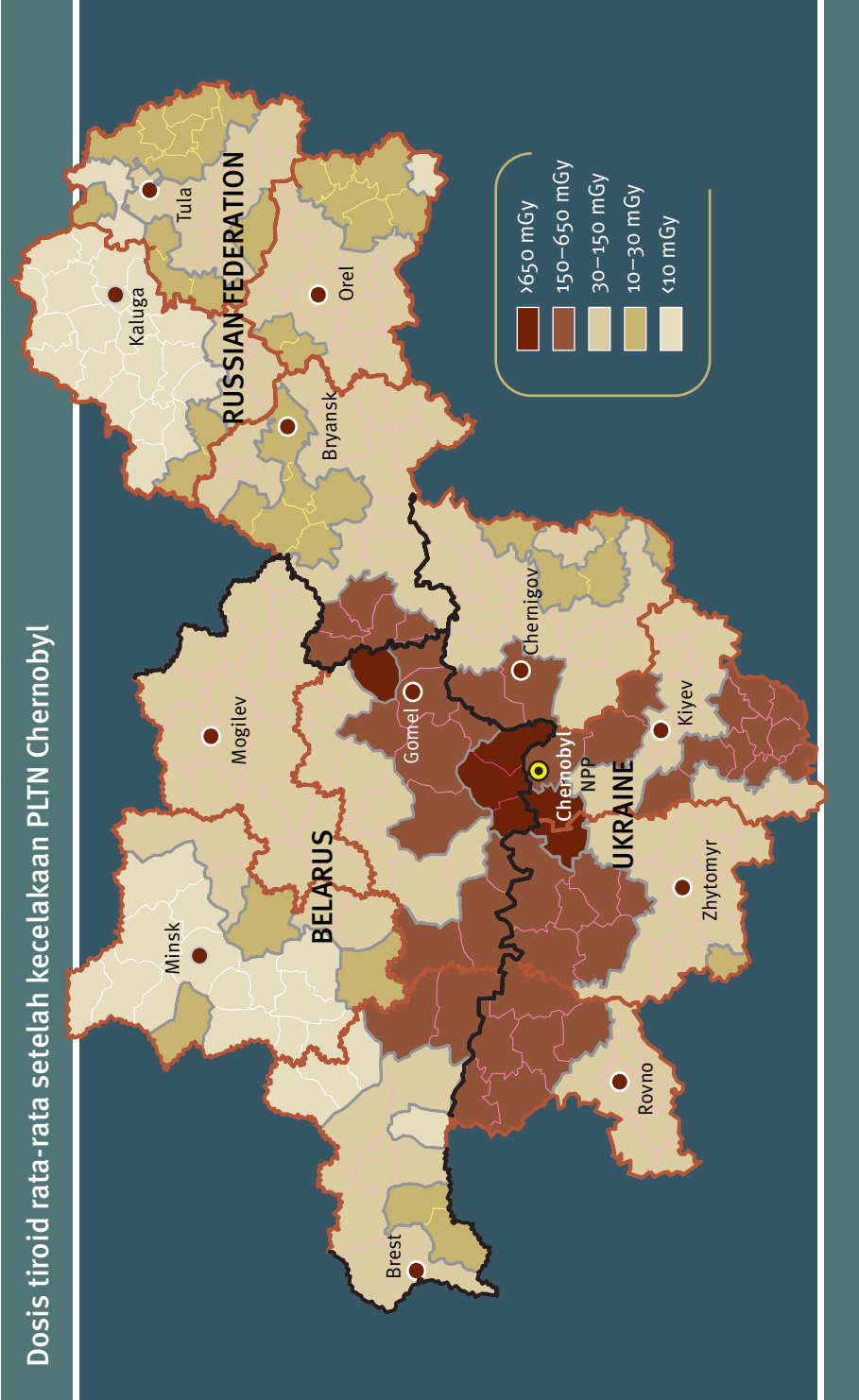
Kontaminasi susu segar dengan radionuklida berumur pendek iodin-131 (dengan waktu paro delapan hari) dan kurangnya tindakan pencegahan yang cepat menyebabkan terjadinya dosis tiroid yang sangat tinggi, terutama pada anak-anak, di beberapa daerah di bekas negara Uni Soviet. Sejak awal 1990-an, kejadian kanker tiroid di antara orang-orang ini yang terpajan saat masa anak-anak atau remaja pada tahun 1986 telah meningkat di Belarus, Ukraina dan empat daerah yang paling terkena dampak di negara Federasi Rusia. Selama periode 1991-2005, lebih dari 6.000 kasus telah dilaporkan; dan dari jumlah tersebut, 15 kasus terbukti fatal.

Dalam jangka panjang, populasi umum juga terpajan radiasi, baik secara eksternal dari radioaktif yang mengendap maupun secara internal dari konsumsi bahan makanan yang terkontaminasi, terutama dari cesium-137 (dengan waktu paro 30 tahun). Namun, dosis radiasi jangka panjang yang dihasilkan relatif rendah, dosis efektif rata-rata individu selama periode 1986-2005 di wilayah yang terkontaminasi di Belarus, Federasi Rusia dan Ukraina adalah 9 mSv. Tingkat dosis sebesar ini tidak akan menyebabkan efek kesehatan yang substansial pada populasi umum. Namun, gangguan parah yang disebabkan oleh kecelakaan telah menyebabkan dampak sosial dan ekonomi yang besar dan kesusahan besar bagi populasi yang terkena dampak.

UNSCEAR telah mempelajari konsekuensi radiologik dari kecelakaan secara rinci dalam beberapa laporan. Komunitas internasional telah melakukan upaya yang belum pernah dilakukan sebelumnya untuk mengkaji besar dan karakteristik dari konsekuensi kecelakaan secara umum dan di beberapa fokus kajian yang berbeda untuk meningkatkan pemahaman tentang konsekuensi radiologik dan konsekuensi lain dari kecelakaan dan membantu dalam meringankan konsekuensi tersebut.

Pada dasarnya, penelitian sejak 1986 menunjukkan bahwa orang yang terpajan iodin-131 saat masa anak-anak dan pekerja operasi darurat dan pemulihan yang menerima radiasi dosis tinggi berisiko lebih tinggi terkena dampak radiasi.

Dosis tiroid rata-rata setelah kecelakaan PLTN Chernobyl



Namun, sebagian besar penduduk daerah terpajan dengan tingkat radiasi yang rendah yang sebanding dengan, atau beberapa kali lebih tinggi, dibandingkan tingkat radiasi latar belakang alami tahunan.

### *Kecelakaan PLTN Fukushima-Daiichi*

Setelah gempa bumi besar di Jepang Timur yang berkekuatan 9,0 dan tsunami di pantai timur Jepang utara pada 11 Maret 2011, PLTN Fukushima-Daiichi rusak parah dan bahan radioaktif terlepas ke lingkungan. Hampir 85.000 penduduk dalam jarak 20 km di sekitar lokasi PLTN dan beberapa daerah terdekat dievakuasi sebagai tindakan pencegahan antara 11- 15 Maret, sementara penduduk yang tinggal 20-30 km dari stasiun itu berlindung di rumah mereka. Selanjutnya, pada bulan April 2011, evakuasi 10.000 orang lainnya yang tinggal lebih jauh ke barat laut dari lokasi PLTN direkomendasikan karena tingginya kadar radionuklida di tanah. Evakuasi ini sangat mengurangi tingkat pajanan yang akan diterima oleh mereka yang terkena dampak. Konsumsi air dan bahan makanan tertentu sementara dibatasi untuk membatasi pajanan radiasi masyarakat. Saat mengelola situasi darurat di PLTN ini, beberapa staf operasional dan personil tanggap darurat menerima pajanan radiasi.

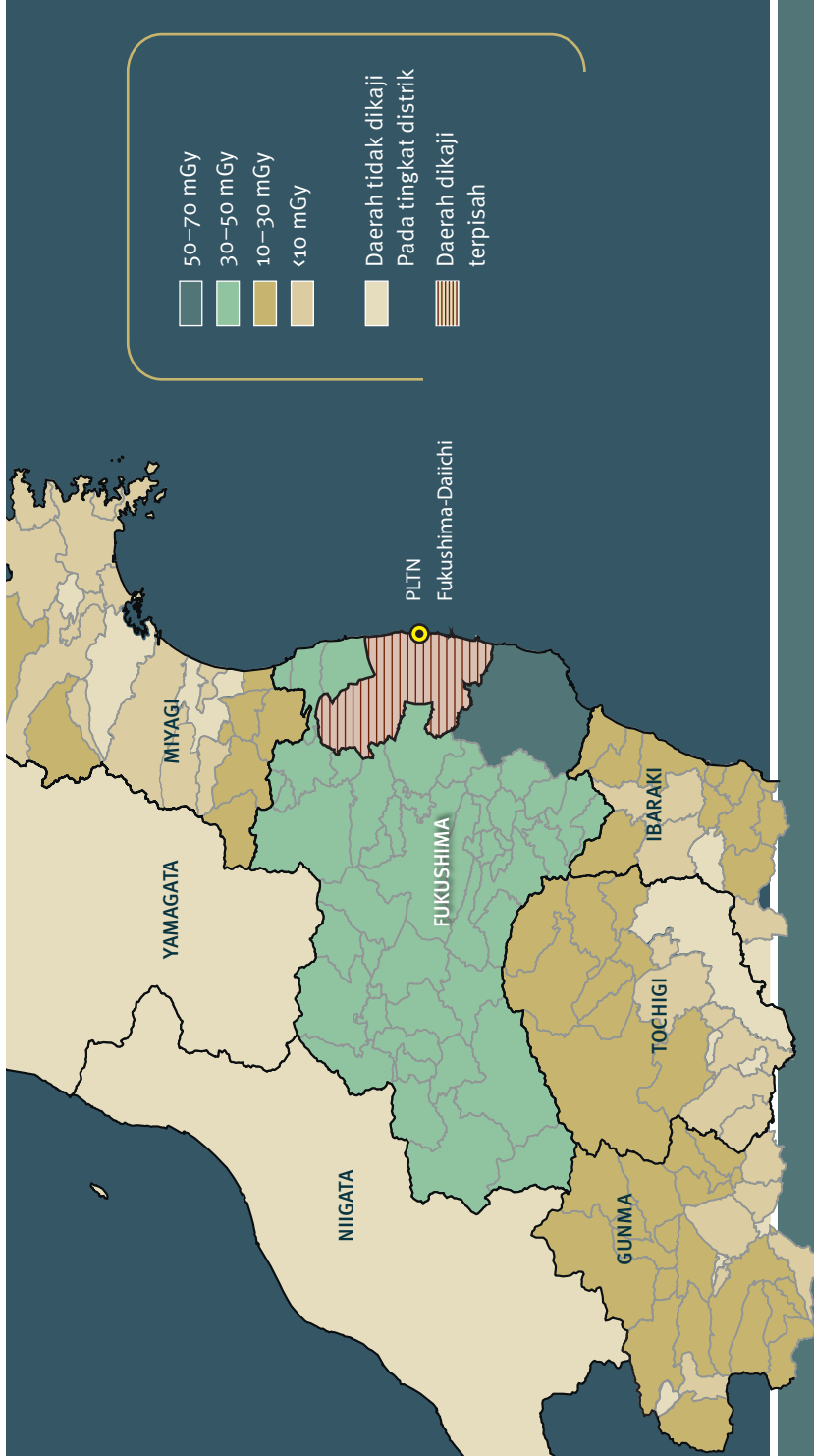
UNSCEAR melakukan pengkajian terhadap dosis radiasi dan efek yang terkait pada kesehatan dan lingkungan. Sekitar 25.000 pekerja telah terlibat dalam mitigasi dan kegiatan lainnya di lokasi PLTN Fukushima-Daiichi selama satu setengah tahun pertama setelah kecelakaan. Dosis efektif rata-rata pada para pekerja ini pada saat itu adalah sekitar 12 mSv. Namun, 6 pekerja menerima dosis total kumulatif lebih dari 250 mSv; dosis total tertinggi yang dilaporkan adalah 680 mSv untuk satu pekerja terutama yang diterima dari pajanan internal (sekitar 90 persen). Dua belas pekerja diperkirakan telah menerima dosis tiroid dalam kisaran 2-12 Gy. Tidak ada kematian terkait radiasi atau penyakit akut yang diamati di antara para pekerja yang terpajan radiasi dari kecelakaan ini.

Dosis efektif rata-rata untuk orang dewasa di daerah yang dievakuasi di Prefektur Fukushima berkisar dari 1 mSv hingga sekitar 10 mSv pada tahun pertama setelah kecelakaan. Dosis efektif untuk bayi berusia satu tahun diperkirakan sekitar dua kali lebih tinggi. Untuk daerah di Prefektur Fukushima yang tidak dievakuasi dan untuk prefektur di sebelahnya, dosisnya lebih rendah.

Perkiraan dosis rata-rata pada tiroid, terutama dari iodin-131, di antara mereka yang paling terpajan, berkisar hingga 35 mGy untuk orang dewasa dan hingga 80 mGy untuk bayi berusia satu tahun. Dosis tahunan pada tiroid, terutama dari sumber radiasi alami eksternal, biasanya berkisar 1 mGy. UNSCEAR menyimpulkan kemungkinan teoretis bahwa risiko kanker tiroid di antara kelompok anak-anak



## Dosis tiroid rata-rata untuk bayi setelah kecelakaan PLTN Fukushima-Daiichi



yang paling terpajan radiasi dapat meningkat. Namun, kanker tiroid merupakan penyakit yang jarang dijumpai di kalangan anak kecil sehingga secara statistik tidak ada efek yang dapat diamati pada kelompok ini.

Sementara perbandingan dibuat dengan bencana Chernobyl, kecelakaan nuklir Fukushima-Daiichi sangat berbeda dalam hal jenis reaktor, cara kecelakaan itu terjadi, karakteristik pelepasan radionuklida dan dispersinya, dan tindakan protektif yang diambil. Dalam kedua kasus, sejumlah besar iodin-131 dan sesium-137—dua radionuklida paling signifikan dari perspektif pajanan setelah kecelakaan nuklir—dilepaskan ke lingkungan. Pelepasan iodin-131 dan sesium-137 dari kecelakaan Fukushima-Daiichi dibandingkan dengan kecelakaan Chernobyl masing-masing sekitar 10 dan 20 persen.

### **Aplikasi industri dan lainnya**

Sumber radiasi juga digunakan dalam spektrum luas untuk aplikasi di bidang industri. Aplikasi ini meliputi iradiasi industri yang digunakan untuk mensterilkan produk medik dan farmaka, mengawetkan bahan makanan atau membasmi kutu serangga; radiografi industri yang digunakan untuk memeriksa cacat pada sambungan logam yang dilas; pemancar alfa atau beta yang digunakan dalam senyawa pemendar pada sisi luar senjata dan sebagai sumber cahaya redup untuk tanda keluar dan penerang peta; sumber radioaktif atau pesawat sinar-X mini yang digunakan dalam logging sumur untuk mengukur karakteristik geologik dalam lubang bor yang dibor untuk eksplorasi mineral, minyak atau gas; sumber radioaktif yang digunakan dalam perangkat untuk mengukur ketebalan, kelembaban, kepadatan, dan tingkat material; dan sumber radioaktif tertutup lainnya yang digunakan dalam penelitian.

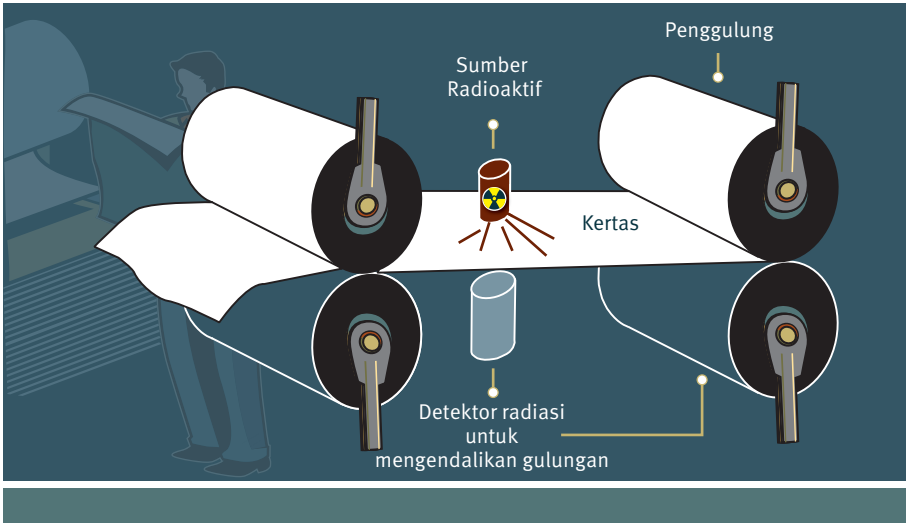
Meskipun penggunaannya tersebar luas, produksi radionuklida untuk digunakan di bidang industri dan medik hanya menyebabkan tingkat pajanan yang sangat rendah bagi masyarakat umum. Namun dalam hal kecelakaan, daerah yang lebih sempit dan terbatas dapat terkontaminasi dan menimbulkan tingkat pajanan yang tinggi.

### **PAJANAN DI TEMPAT KERJA**

---

Jumlah pekerja pada penggunaan radiasi di bidang industri sekitar satu juta pada awal tahun 2000-an dengan dosis efektif rata-rata tahunan per pekerja sebesar 0,3 mSv..

## Perangkat pengukur ketebalan menggunakan radiasi



### *Bahan radioaktif yang terjadi secara alami*

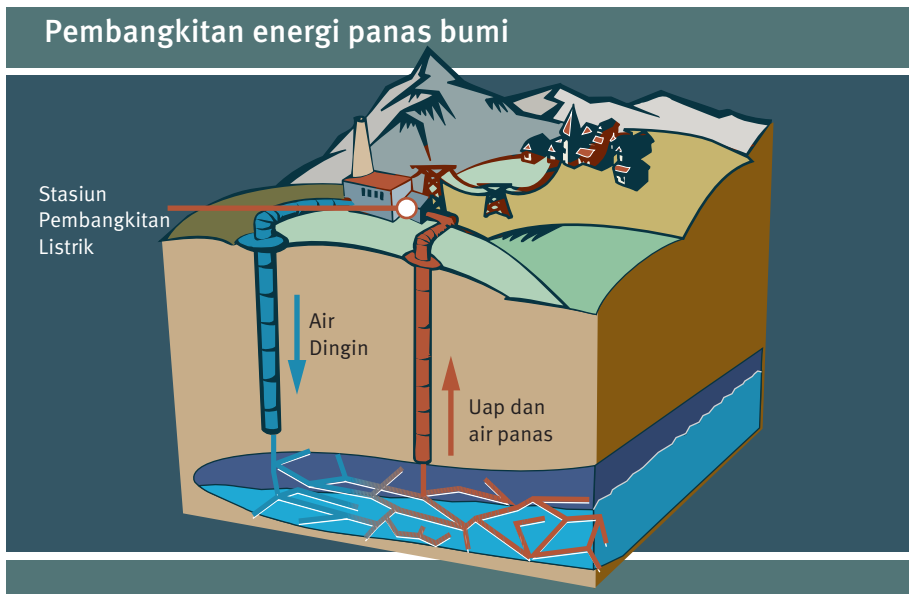
Walaupun tidak terkait dengan penggunaan energi nuklir, beberapa jenis fasilitas di dunia ini dapat membuat publik menerima radiasi karena meningkatnya konsentrasi *bahan radioaktif yang terjadi secara alami* (NORM, naturally occurring radioactive material) dalam produk industri, produk sampingan dan limbahnya. Fasilitas semacam ini yang paling penting adalah penambangan dan pengolahan mineral.

Kegiatan yang terkait dengan ekstraksi dan pengolahan bijih juga dapat menyebabkan peningkatan tingkat NORM. Kegiatan-kegiatan ini termasuk penambangan logam dan peleburan; produksi fosfat; penambangan batubara dan pembangkit listrik dari pembakaran batu bara; pengeboran minyak dan gas; industri tanah jarang dan titanium oksida; industri zirkonium dan keramik; dan aplikasi yang menggunakan radionuklida yang terjadi secara alami (biasanya isotop radium dan thorium).

Batubara, misalnya, mengandung jejak radionuklida primordial. Pembakaran batubara melepaskan radionuklida ini ke lingkungan yang kemudian dapat memberikan paparan radiasi pada manusia. Hal ini berarti bahwa untuk setiap gigawatt-tahun energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga batubara dunia, dosis kolektif pada populasi dunia diperkirakan meningkat sekitar 20 orang-Sv per tahun. Selain itu, debu terbangnya (residu yang dihasilkan dalam pembakaran) telah digunakan dalam penimbunan tanah dan konstruksi jalan,

walau penggunaannya untuk konstruksi bangunan menghasilkan pajanan radiasi dari iradiasi langsung dan inhalasi radon. Selain itu, membuang abu terbang dapat menambah tingkat pajanan radiasi di sekitar lokasi pembuangan.

Pembangkitan energi panas bumi adalah sumber lain pajanan radiasi pada publik. Kolam uap dan air panas bawah tanah dibendung untuk menghasilkan listrik atau untuk memanaskan bangunan. Perkiraan emisi dari penggunaan teknologi ini di Italia dan Amerika Serikat menunjukkan bahwa panas bumi menghasilkan sekitar 10 persen dari dosis kolektif per gigawatt-tahun listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga batubara. Energi panas bumi saat ini memiliki kontribusi yang relatif kecil untuk produksi energi dunia dan karena itu juga untuk pajanan radiasi global.



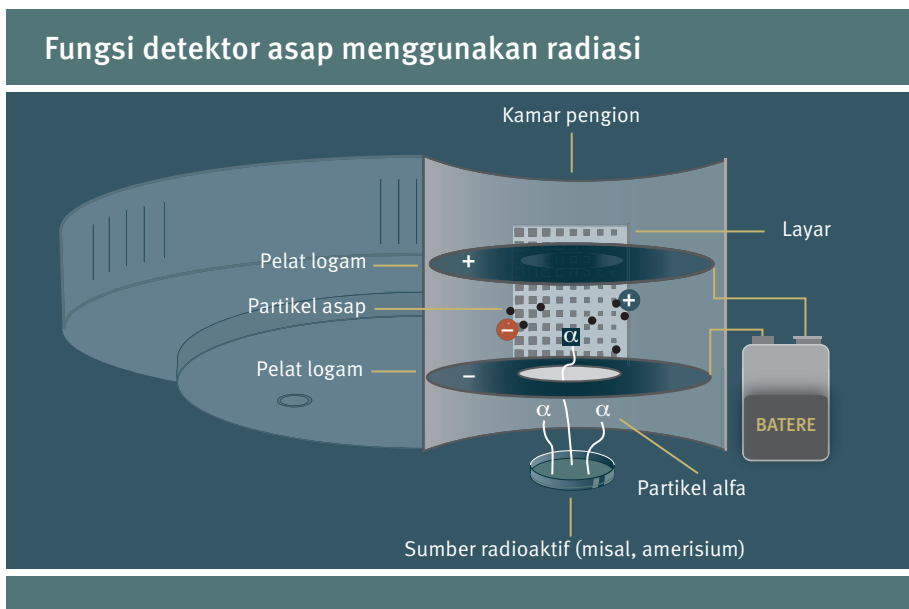
Berbagai hasil kegiatan manusia lainnya dapat membuat orang terpajan NORM, seperti lumpur dari pengolahan air yang digunakan pada pertanian. Namun, tingkat pajanan publiknya sangat rendah, sekitar kurang dari seperseribu mSv per tahun.

Produk sampingan dari pengayaan uranium adalah uranium deplesi, yang kurang radioaktif dari uranium alam. Uranium deplesi telah digunakan untuk keperluan sipil dan militer selama bertahun-tahun. Karena kepadatannya yang tinggi, uranium deplesi digunakan pada perisai radiasi atau sebagai penyeimbang di pesawat. Penggunaan militer dari uranium deplesi, terutama dalam amunisi penembus besi, telah menimbulkan kekhawatiran tentang kontaminasi residunya. Kecuali untuk beberapa penggunaan tertentu, seperti untuk tempat penyimpanan jangka

panjang, paparan radiasi dari uranium deplesi sangat rendah. Bahkan, toksisitas kimia sebenarnya merupakan sifat yang paling berbahaya dari uranium deplesi ini.

### *Produk konsumen*

Sejumlah produk yang dibeli untuk penggunaan sehari-hari mengandung radionuklida tingkat rendah, yang sengaja ditambahkan untuk memanfaatkan sifat kimia atau radioaktifnya. Secara historis, radionuklida yang paling banyak digunakan untuk produk konsumen agar bercahaya adalah radium-226. Penggunaan radium-226 ini berakhir beberapa dekade yang lalu setelah digantikan oleh promethium-147 dan hidrogen-3 (tritium), yang kurang radiotoksik. Namun demikian, untuk jam atau arloji yang mengandung senyawa tritium, kebocoran tritium dapat terjadi karena tritium bersifat sangat mobile. Namun, tritium hanya memancarkan partikel beta yang sangat lemah yang tidak dapat menembus kulit, sehingga tritium hanya memberi paparan pada manusia jika masuk ke dalam tubuh.



Beberapa detektor asap modern terdiri atas ruang pengion dengan keping kecil amerisium-241, yang merupakan pemancar partikel alfa dan menghasilkan arus ion yang konstan. Udara sekitar dapat dengan bebas masuk ke detektor dan jika asap memasuki detektor, arus ion akan terganggu dan memicu berbunyinya alarm.

Radioaktivitas sumber amerisium dalam detektor asap sangat rendah. Amerisium meluruh sangat lambat dengan paruh sekitar 432 tahun. Hal ini berarti bahwa besar radioaktivitas pada detektor—pada akhir penggunaan 10 tahun—tetap se-

perti semula. Selama sumber amerisium tetap dalam detektor, pajanan dapat diabaikan. Meskipun dapat dideteksi dengan peralatan sensitif, tingkat pajanan yang diterima dari produk ini sangat rendah. Seseorang yang berdiri dua meter dari detektor selama delapan jam dalam sehari diperkirakan menerima dosis kurang dari 0,0001 mSv per tahun.

### *Kecelakaan industri*

Kecelakaan yang melibatkan sumber radioaktif industri terjadi lebih sering dibandingkan di PLTN. Namun demikian, kecelakaan ini biasanya tidak menarik banyak perhatian meskipun dapat menyebabkan pajanan radiasi yang cukup besar baik untuk pekerja maupun untuk anggota masyarakat.

Antara tahun 1945 dan 2007 dilaporkan terjadi sekitar 80 kecelakaan di fasilitas industri yang menggunakan sumber radiasi, akselerator, dan perangkat sinar-X. Sembilan kematian dilaporkan dalam kecelakaan ini, dan 120 pekerja terluka. Sindrom radiasi akut dialami oleh beberapa pekerja yang terluka. Tangan merupakan tempat yang sering mengalami luka, dan seringkali harus diamputasi. UNSCEAR menduga beberapa kecelakaan di fasilitas industri yang mengakibatkan kematian dan cedera tidak dilaporkan.

Penyebab dan akibat dari kecelakaan semacam ini banyak dan beragam. Hanya dua contoh yang dikutip di sini. Pada 1978, di Louisiana, Amerika Serikat, seorang radiografer industri yang bekerja pada sebuah tongkang mengalami cedera akibat radiasi pada tangan kirinya dari sumber iridium-192 dengan aktivitas 3,7 TBq, dan mungkin disebabkan oleh dosimeter yang digunakannya tidak berfungsi. Sekitar tiga minggu kemudian, tangannya memerah dan membengkak, dan kemudian lepuh kulit muncul, dan sembuh dalam 5-8 minggu. Namun enam bulan kemudian, jari telunjuknya harus diamputasi sebagian. Kemudian, pada tahun 1990, di Shanghai, Cina, karena tindakan keselamatan yang tidak tepat, tujuh pekerja terpajan radiasi dari sumber kobalt-60 di fasilitas industri. Satu pekerja, dengan dosis diperkirakan 12 Gy, meninggal 25 hari setelah pajanan. Yang kedua, yang dosisnya diperkirakan 11 Gy, meninggal 90 hari setelah pajanan. Lima pekerja lainnya diperkirakan menerima dosis antara 2 hingga 5 Gy dan dapat pulih setelah menjalani perawatan medik.

### *Sumber takbertuan*

Antara 1966 dan 2007, 31 kecelakaan terkait dengan sumber radioaktif yang hilang, dicuri, atau ditinggalkan, atau yang dikenal sebagai *sumber takbertuan* (orphan sources). Berbagai kecelakaan ini telah mengakibatkan kematian 42 anggota masyarakat, termasuk anak-anak. Selain itu, sindrom radiasi akut, cedera lokal

yang serius, kontaminasi internal atau masalah psikologis memerlukan perawatan medik untuk ratusan orang. Enam kecelakaan dikaitkan dengan unit radioterapi medik yang ditinggalkan.

Jumlah yang tepat dari sumber takbertuan yang ada di dunia tidak diketahui dengan pasti, namun diperkirakan mencapai ribuan. Komisi Pengaturan Nuklir Amerika Serikat (*US Nuclear Regulatory Commission*) melaporkan bahwa perusahaan-perusahaan di Amerika Serikat kehilangan jejak hampir 1.500 sumber radioaktif antara tahun 1996 dan 2008, dengan lebih dari setengahnya tidak pernah ditemukan kembali. Sebuah studi oleh Uni Eropa memperkirakan bahwa hingga 70 sumber hilang setiap tahun dari kendali pengawasan di dalam batas wilayahnya. Meskipun sebagian besar sumber ini tidak menimbulkan bahaya radiologik yang signifikan, kecelakaan merupakan kekhawatiran terbesar bagi sumber takbertuan.

### Perkiraan kecelakaan radiasi yang serius di seluruh dunia\*

Jenis kecelakaan	1945–1965	1966–1986	1987–2007
Kecelakaan pada fasilitas nuklir	19	12	4
Kecelakaan industri	2	50	28
Kecelakaan sumber takbertuan	3	15	16
Kecelakaan di perguruan tinggi/ penelitian	2	16	4
Kecelakaan di kedokteran	Tidak diketahui	18	14

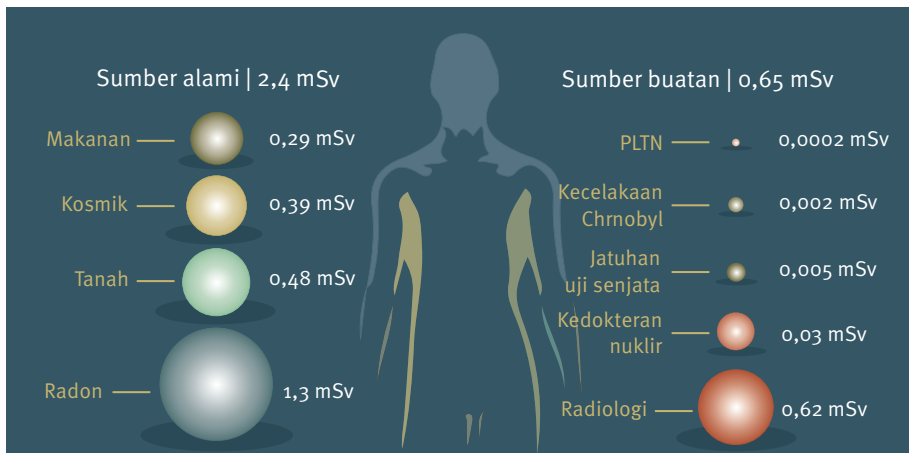
\* Berdasarkan kecelakaan yang telah dilaporkan secara resmi atau dipublikasikan. Diperkirakan bahwa jumlah kecelakaan yang tidak dilaporkan, terutama di bidang kedokteran, jauh lebih besar.

Sumber tertutup atau wadahnya bisa menarik bagi orang yang berdagang logam bekas karena tampak seperti terbuat dari logam berharga dan juga tidak menampilkan label peringatan radiasi. Kasus-kasus di mana pekerja yang tidak menaruh curiga atau bahkan anggota masyarakat yang merusak sumber radiasi telah menyebabkan cedera serius dan dalam beberapa kasus bahkan kematian, seperti yang terjadi di Goiânia, Brasil pada tahun 1987. Perangkat teleterapi yang ditinggalkan berisi sesium-137 yang sangat radioaktif (50,9 TBq) dicuri dan kapsul sumbernya pecah terbuka. Selama dua minggu berikutnya, serbuk sesium klorida larut tersebar ke seluruh halaman dan rumah di sekitarnya. Akibatnya, banyak orang menderita penyakit dan luka pada kulit, dan 110.000 orang harus dipantau untuk kontaminasi radioaktif karena banyak dari mereka terkontaminasi internal dengan sesium-137. Karena kecelakaan ini empat orang meninggal, termasuk satu orang anak.

### 3.3. Paparan radiasi rata-rata untuk publik dan pekerja

Paparan radiasi publik dari sumber alami pada umumnya mendominasi paparan total. UNSCEAR memperkirakan dosis efektif tahunan rata-rata untuk seseorang sekitar 3 mSv. Secara rata-rata, dosis tahunan dari sumber alami adalah 2,4 mSv dengan dua pertiganya berasal dari zat radioaktif di udara yang dihirup, makanan yang dikonsumsi, dan air yang diminum. Sumber utama paparan dari sumber buatan adalah radiasi yang digunakan di bidang kedokteran, dengan dosis efektif tahunan rata-rata individu 0,62 mSv. Paparan radiologi medik bervariasi berdasarkan wilayah, negara, dan sistem pelayanan kesehatannya. UNSCEAR memperkirakan dosis efektif tahunan rata-rata dari aplikasi medik radiasi di negara-negara industri sebesar 1,9 mSv dan di negara-negara non-industri sekitar 0,32 mSv. Namun, angka-angka ini mungkin sangat bervariasi (misalnya, di Amerika Serikat dengan 3 mSv atau di Kenya dengan hanya 0,05 mSv).

#### Paparan publik rata-rata oleh sumber radiasi\*



\* Perkiraan dosis efektif pada seseorang dalam setahun dibulatkan (rata-rata dunia).

Sampai tahun 1990-an, fokus perhatian untuk paparan pada pekerja adalah pada sumber radiasi buatan. Namun demikian, saat ini, disadari bahwa sejumlah besar pekerja terpapar pada sumber radiasi alami, terutama di industri pertambangan. Untuk pekerjaan tertentu di sektor pertambangan, penghirupan gas radon mendominasi paparan radiasi di tempat kerja. Sementara pelepasan radon di tambang uranium bawah tanah memberikan kontribusi besar pada paparan kerja pada sisi industri nuklir, dosis efektif rata-rata tahunan pada seorang pekerja di industri nuklir secara keseluruhan telah menurun dari 4,4 mSv pada 1970-an menjadi seki-



tar 1 mSv pada saat ini . Namun, dosis efektif rata-rata tahunan untuk penambang batubara masih sekitar 2,4 mSv dan untuk penambang lain sekitar 3 mSv.

Perkiraan jumlah total pekerja yang dipantau saat ini adalah sekitar 23 juta di seluruh dunia, dengan 10 juta di antaranya terpajan sumber buatan. Tiga dari empat pekerja yang terpajan sumber buatan bekerja di sektor medik, dengan dosis efektif tahunan per pekerja 0,5 mSv. Evaluasi kecenderungan dosis efektif tahunan rata-rata per pekerja menunjukkan peningkatan pajanan dari sumber alami terutama akibat penambangan dan penurunan pajanan dari sumber buatan terutama karena keberhasilan dalam penerapan tindakan proteksi radiasi yang dilakukan.

Kecenderungan pajanan radiologik global pada pekerja (mSv)*				
Dekade	1970-an	1980-an	1990-an	2000-an
<b>Sumber alami</b>				
Awak pesawat	—	3,0	3,0	3,0
Tambang batubara	—	0,9	0,7	2,4
Tambang lain**	—	1,0	2,7	3,0
Lain-lain	—	6,0	4,8	4,8
<b>Total</b>	—	1,7	1,8	2,9
<b>Sumber buatan</b>				
Penggunaan medik	0,8	0,6	0,3	0,5
Industri nuklir	4,4	3,7	1,8	1,0
Industri lain	1,6	1,4	0,5	0,3
Lain-lain	1,1	0,6	0,2	0,1
<b>Total</b>	1,7	1,4	0,6	0,5

\* Perkiraan dosis efektif rata-rata per pekerja dalam satu tahun.  
 \*\* Tambang uranium termasuk dalam industri nuklir.

## PUBLIKASI UNSCEAR

Sejak pembentukannya, Komite Ilmiah PBB untuk Efek Radiasi Atom (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) telah menerbitkan lebih dari 25 laporan utama dengan lebih dari 100 lampiran ilmiah, yang merupakan sumber utama terkemuka dalam mengevaluasi paparan radiasi dari uji coba senjata nuklir dan produksi listrik dari PLTN, penggunaan medik radiasi, sumber radiasi di tempat kerja dan sumber alami. Publikasi juga mengevaluasi rincian studi mengenai kanker akibat radiasi dan penyakit terwaris, dan mengkaji konsekuensi radiologik dari kecelakaan pada kesehatan dan lingkungan. Laporan UNSCEAR dan lampiran ilmiahnya diterbitkan sebagai publikasi PBB yang dijual (*unp.un.org*) dan sebagai publikasi elektronik yang dapat diunduh bebas (*unscear.org*) untuk menyebarkan temuan yang bermanfaat bagi Negara Anggota PBB, komunitas ilmiah dan publik.

Tanggapan dan komentar terhadap publikasi ini sangat dihargai dan dapat dikirim ke:

UNSCEAR secretariat  
Vienna International Centre  
P.O. Box 500  
1400 Vienna, Austria  
E-mail: [unscear@unscear.org](mailto:unscear@unscear.org)



Pada tahun 1955, Sidang Majelis Umum Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) membentuk Komite Ilmiah untuk Efek Radiasi Atom (*UNSCEAR, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*).

Pembentukan Komite ini merupakan respons terhadap kekhawatiran tentang efek radiasi pengion pada kesehatan manusia dan lingkungan karena saat itu jatuhnya dari pengujian senjata nuklir di atmosfer telah sampai di manusia melalui udara, air dan makanan. Laporan pertama UNSCEAR menjadi dasar ilmiah untuk merundingkan Perjanjian Pelarangan Uji Senjata Nuklir Parsial (*Partial Test Ban Treaty*) yang melarang pengujian senjata nuklir atmosfer pada tahun 1963.

Publikasi ini menyajikan secara obyektif pengetahuan mutakhir mengenai tingkat dan efek radiasi sedemikian rupa sehingga dapat diakses oleh pembaca umum. Materi publikasi ini didasarkan pada laporan ilmiah, yang digunakan sebagai sumber utama informasi.



UNEP