



**BRIN**  
BADAN RISET  
DAN INOVASI NASIONAL

Eri Hiswara et al.



# Radiasi Radon

## Sumber, Efek, dan Proteksinya



# Radiasi Radon

## Sumber, Efek, dan Proteksinya



Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)



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

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

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

Eri Hiswara et al.



# Radiasi Radon

## Sumber, Efek, dan Proteksinya

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2024 Eri Hiswara, Nur Rahmah Hidayati, Syarifatul Ulya, Okky Agassy Firmansyah, Aqila Khansa Uthuruza Gusrinanti, Auliya Rahman, Ryan Yulma Susanto, Wildatun Zahra

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Radiasi Radon: Sumber, Efek, dan Proteksinya/Eri Hiswara, Nur Rahmah Hidayati, Syarifatul Ulya, Okky Agassy Firmansyah, Aqila Khansa Uthuruza Gusrinanti, Auliya Rahman, Ryan Yulma Susanto, & Wildatun Zahra–Jakarta: Penerbit BRIN, 2024.

xvii + 113 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-623-8372-81-2 (*e-book*)

- |                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| 1. Radiasi          | 2. Radon          |
| 3. Sumber Radiasi   | 4. Efek Kesehatan |
| 5. Proteksi Radiasi |                   |

539.2

Editor Akuisisi	: Wijananto
Copy Editor	: Sarah Fairuz
Proofreader	: Anton Surahmat & Martinus Helmiawan
Penata Isi	: Meita Safitri
Desainer Sampul	: Meita Safitri

Edisi Pertama : Agustus 2024



Diterbitkan oleh:  
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi  
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah  
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,  
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,  
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340  
Whatsapp: +62 811-1064-6770  
*E-mail*: penerbit@brin.go.id  
*Website*: penerbit.brin.go.id  
 PenerbitBRIN  
 @Penerbit\_BRIN  
 @penerbit.brin

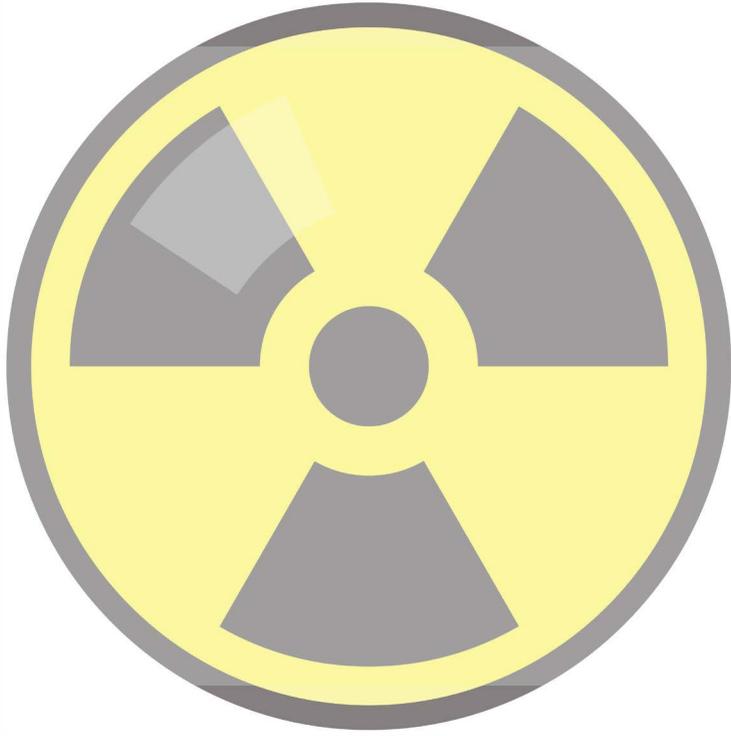
# Daftar Isi

Daftar Gambar.....	vii
Daftar Tabel.....	ix
Pengantar Penerbit.....	xi
Kata Pengantar .....	xiii
Prakata .....	xv
<b>BAB I</b> Pendahuluan.....	1
A. Sekilas tentang Radon.....	1
B. Struktur .....	3
<b>BAB II</b> Karakteristik Radon .....	5
A. Sifat Fisika dan Kimia.....	5
B. Produk Peluruhan.....	6
C. Sumber Radon .....	10
D. Standar, Rekomendasi, dan Peraturan .....	14
<b>BAB III</b> Efek Kesehatan Radon.....	17
A. Jalan Masuk ke Manusia.....	18
B. Risiko Kanker Paru-Paru .....	19

	C. Risiko Penyakit Lain.....	23
	D. Epidemiologi Radon.....	25
BAB IV	Pengukuran Radon.....	29
	A. Perangkat Pengukuran .....	29
	B. Protokol Pengukuran .....	39
	C. Dosimetri Radon.....	48
	D. Penjaminan Mutu Pengukuran Radon .....	53
BAB V	Proteksi Radiasi terhadap Radon.....	55
	A. Situasi Paparan dan Kategori Paparan .....	56
	B. Justifikasi, Optimisasi, dan Limitasi Dosis.....	57
	C. Pencegahan dan Mitigasi .....	59
	D. Proteksi Pekerja Radiasi terhadap Paparan Radon .....	66
BAB VI	Penelitian Tingkat Radon di Indonesia .....	69
	A. Tingkat Radon di Daerah Permukiman .....	70
	B. Tingkat Radon di Daerah Perkantoran .....	73
	C. Tingkat Radon di Pertambangan, Gua Wisata dan Lingkungan Lainnya.....	76
	D. Aplikasi Radon .....	79
BAB VII	Penutup .....	83
	Daftar Singkatan.....	85
	Daftar Pustaka .....	89
	Tentang Penulis .....	105
	Indeks .....	111

# Daftar Gambar

Gambar 2.1	Tabel Periodik Unsur Kimia.....	6
Gambar 2.2	Deret Uranium.....	7
Gambar 2.3	Deret Aktinium.....	8
Gambar 2.4	Deret Thorium .....	9
Gambar 2.5	Mekanisme Masuknya Radon ke Dalam Rumah .....	12
Gambar 3.1	Jalan Masuk Radon ke Tubuh Manusia .....	18
Gambar 4.1	Detektor Jejak Alfa.....	32
Gambar 4.2	Detektor Arang Aktif.....	33
Gambar 4.3	Kamar Ion Elektret.....	34
Gambar 4.4	Monitor Radon Kontinu .....	36
Gambar 5.1	Skema Tindakan Pencegahan untuk Bangunan Baru....	64
Gambar 6.1	Konsentrasi radon di udara ruangan.....	70
Gambar 6.2	Tingkat Konsentrasi Radon di Gua Wisata Lobang Jepang .....	77
Gambar 6.3	Rancangan Ruang Sintilasi dan Detektor Radon.....	81



Buku ini tidak diperjualbelikan.

## Daftar Tabel

Tabel 2.1	Tingkat acuan radon dari beberapa institusi internasional dan negara.....	16
Tabel 3.1	Risiko Kanker Paru-Paru dari Pajanan Radon pada Perokok.....	20
Tabel 3.2	Risiko Kanker Paru-Paru dari Pajanan Radon pada Non-Perokok.....	21
Tabel 4.1	Perangkat Pengukuran Radon dan Karakteristiknya .....	30
Tabel 4.2	Metode dan Perangkat Pengukuran Radon Permukiman .....	31
Tabel 4.3	Perangkat Pengukuran <i>Thoron</i> dan Karakteristiknya.....	37
Tabel 4.4	Rekomendasi Jumlah Detektor yang Dipasang di Daerah Kerja.....	43
Tabel 4.5	Perbandingan dosis serap pada paru-paru yang dihitung dengan tiga model dosimetri radon.....	52
Tabel 6.1	Hasil penelitian tingkat radon (Rn-222) di beberapa daerah permukiman di Indonesia.....	71
Tabel 6.2	Hasil penelitian tingkat radon (Rn-222) di beberapa lokasi di Sumatra Barat.....	72

Tabel 6.3	Hasil penelitian tingkat radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) di beberapa lokasi lingkungan kerja BATAN.....	74
Tabel 6.4	Hasil penelitian tingkat radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) di gua wisata di Sulawesi Selatan.....	76

# Pengantar Penerbit

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

Radon adalah gas radioaktif yang tidak berbau, berwarna, dan berasa. Radon dipancarkan sebagai hasil peluruhan radioaktif alami uranium yang dapat dijumpai di semua jenis batuan dan tanah, dan juga ditemukan di air. Radon dapat memasuki bangunan melalui retakan di lantai atau sambungan lantai-dinding, celah di sekitar pipa atau kabel, pori-pori kecil di dinding blok berongga, dinding berlubang, atau bak penampungan air atau saluran air. Tingkat radon biasanya lebih tinggi di ruang bawah tanah dan ruang terbuka yang bersentuhan dengan tanah.

Berdasarkan WHO, radon diperkirakan menjadi penyebab antara 3% hingga 14% dari seluruh kanker paru-paru. Badan Internasional

untuk Riset Kanker (IARC) menyatakan bahwa radon terbukti sebagai bahan karsinogen bagi manusia bersama dengan asap tembakau, asbes, dan benzena.

Buku ini menguraikan karakteristik radon dan beberapa aspeknya, yaitu sumber, efek, dan proteksinya. Beberapa riset tentang radon yang telah dilakukan di Indonesia juga diuraikan untuk memberikan gambaran tentang tingkat konsentrasi radon yang ada di negara ini.

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

Penerbit BRIN

# Kata Pengantar

Pada awal tahun 2023 unit kerja Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTKMMN) dari Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN) yang berada di lingkungan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) menerima mahasiswa peserta program “Merdeka Belajar Kampus Merdeka” (MBKM) dari beberapa perguruan tinggi di Indonesia. Para mahasiswa tersebut dilibatkan dalam kegiatan penelitian yang dilakukan di laboratorium dan juga dalam menyusun buku dengan topik tertentu.

Salah satu buku yang disusun adalah buku ini, buku yang membahas tentang radiasi radon. Radon merupakan salah satu topik kegiatan riset yang dilakukan oleh unit kerja PRTKMMN sejak lama, bahkan sebelum BRIN terbentuk. Seperti yang dapat dilihat pada Bab 6, unit kerja PRTKMMN yang sebelumnya berada di lingkungan Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dengan nama Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) telah melakukan pengukuran tingkat konsentrasi radon di daerah permukiman di berbagai provinsi di Indonesia. PTKMR juga bekerja sama

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan berbagai perguruan tinggi untuk mengukur radon di berbagai lokasi di Indonesia dan menjadikannya sebagai bahan riset untuk tugas akhir mahasiswa.

Mahasiswa yang terlibat dalam penyusunan buku ini adalah dua orang dari Universitas Andalas, Padang, dan dua orang dari Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh. Pengalaman dalam mengikuti kegiatan program MBKM, termasuk dalam menyusun buku ini diharapkan akan bermanfaat sebagai bekal dalam mengarungi kehidupan nyata setelah lulus dari perguruan tinggi masing-masing.

Selaku Kepala PRTKMMN, saya menyambut baik disusunnya buku *Radiasi Radon: Sumber, Efek, dan Proteksinya* yang merupakan kolaborasi antara mahasiswa peserta program MBKM dan staf PRTKMMN. Semoga kolaborasi ini dapat terus berlanjut dan makin memperkuat kerja sama antara PRTKMMN dan perguruan tinggi, khususnya dengan Unand dan Unsyiah.

Demikian, terima kasih sekali lagi atas kolaborasi yang bermanfaat bagi kedua belah pihak, yaitu perguruan tinggi dan PRTKMMN ORTN BRIN.

Jakarta, 27 November 2023

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

Dr. rer.Biol.Hum. Heru Prasetyo, M.Si.

# Prakata

Radon adalah gas radioaktif tidak berbau dan tidak berwarna yang terjadi secara alami di lingkungan. Gas radon berasal dari kerak bumi dan terdapat di udara luar, di udara tertutup seperti gua, dan di semua bangunan, termasuk daerah kerja.

Radon pertama kali ditemukan oleh Friedrich Ernst Dorn, seorang fisikawan dan profesor di Universitas Halle, Jerman, pada tahun 1900. Dorn mempelajari radon saat bekerja mengidentifikasi bahan radioaktif yang dipancarkan oleh torium dan tidak lama kemudian menemukan bahwa radium dan torium memancarkan zat radioaktif yang sama. Pertama kali disebut “emanasi” oleh Dorn dan “emanasi radium” oleh Ernest Rutherford, nama radon diadopsi dalam pertemuan ilmuwan internasional pada tahun 1923.

Saat ini radon telah menjadi topik dan isu internasional yang cukup menyita perhatian. Komite Ilmiah PBB untuk Efek Radiasi Atom (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) telah mempertimbangkan isu radon (ra-

don-222 dan radon-220) dan efeknya dalam tiga laporan komprehensif yang terbit pada tahun 2000, 2006, dan 2019. UNSCEAR merupakan suatu badan PBB yang dibentuk berdasarkan resolusi Sidang Majelis Umum PBB tahun 1955 yang bertugas untuk mengkaji tingkat, efek, dan risiko radiasi pengion di dunia.

Di Indonesia riset tentang radon telah dilakukan oleh badan-badan pemerintah seperti BATAN (Badan Tenaga Nuklir Nasional) dan LIPI (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia)—kini keduanya menjadi bagian dari BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional)—serta berbagai perguruan tinggi. Penelitian tentang tingkat radon dilakukan tidak saja di lokasi perkantoran, tetapi juga di perumahan dan pertambangan, termasuk juga digunakan sebagai basis untuk membuat sistem peringatan dini gempa bumi.

Buku ini merupakan salah satu hasil kegiatan dalam rangka program “Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM)” yang dilaksanakan di PRTKMMN, ORTN BRIN, pada semester genap 2022/2023. Peserta MBKM yang terlibat dalam penyusunan buku ini adalah mahasiswa Fakultas MIPA Universitas Andalas, Padang, dan mahasiswa Fakultas MIPA Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh.

Buku ini diharapkan dapat membantu kalangan masyarakat umum ataupun para ilmuwan dalam memahami isu radon yang ada. Literatur yang komprehensif terkait radiasi radon masih jarang ditulis di Indonesia sehingga penerbitan buku ini diharapkan dapat mengisi kekurangan tersebut.

Kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam meninjau isi buku ini, saat masih dalam bentuk rancangan awal hingga saat proses koreksi rancangan akhirnya, tim penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga. Penghargaan yang tulus juga ditujukan kepada Penerbit BRIN yang bersedia menerbitkan buku ini.

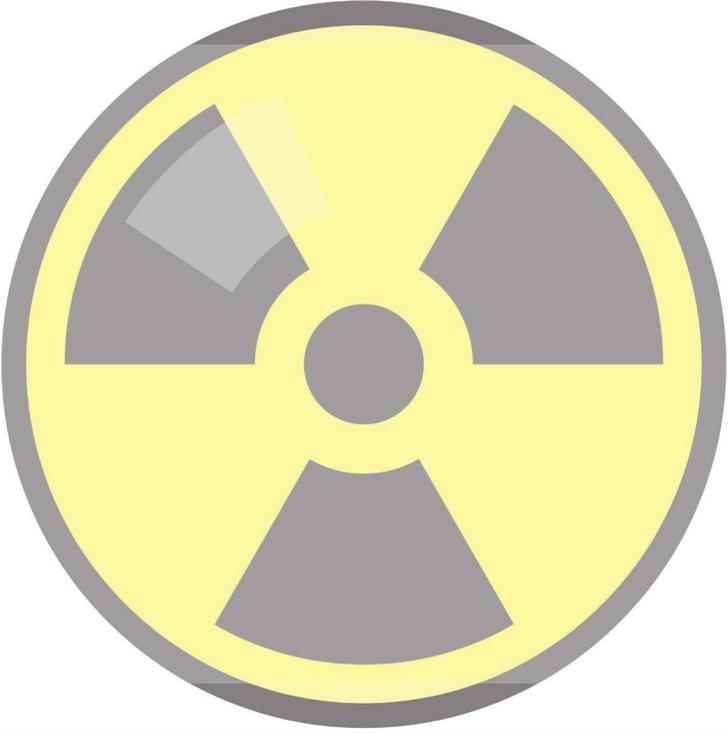
Secara khusus, kami anggota tim penulis yang berasal dari FMIPA Unand dan FMIPA Unsyiah juga mengucapkan terima kasih kepada pengelola program MBKM pada semester genap 2022/2023

yang telah menempatkan kami di PRTKMMN. Ilmu yang diperoleh serta pengalaman berinteraksi dan bekerja sama dengan para staf periset PRTKMMN sungguh sangat berharga sebagai bekal untuk kami dalam menghadapi kehidupan ini di kemudian hari.

Sebagai penutup, tim penulis mengucapkan selamat membaca, dan semoga penerbitan buku ini mencapai tujuannya.

Jakarta, 27 November 2023

Tim Penulis



Buku ini tidak diperjualbelikan.

# BAB I

## Pendahuluan

### A. Sekilas tentang Radon

Radiasi adalah pancaran energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel bermuatan. Radiasi terdiri atas dua jenis, yaitu radiasi pengion dan radiasi non-pengion. Radiasi pengion adalah radiasi yang dapat mengionisasi, atau mengeluarkan elektron, dari atom media yang dilaluinya, sedangkan radiasi non-pengion adalah radiasi yang tidak memiliki energi yang cukup untuk mengakibatkan terjadinya ionisasi pada atom media yang dilaluinya. Dalam buku ini, yang dimaksud dengan radiasi adalah radiasi pengion.

Berdasarkan sumber pancarannya, radiasi dapat berasal dari sumber alami dan sumber buatan. Sumber alami adalah sumber radiasi yang terjadi secara alamiah, sedangkan sumber buatan adalah sumber radiasi yang sengaja dibuat oleh manusia untuk kepentingan meningkatkan taraf hidup dan kesejahteraannya.

Setiap saat semua makhluk hidup di dunia ini, termasuk manusia, menerima penyinaran radiasi dari berbagai sumber, terutama dari sumber alami. Salah satu sumber alami yang senantiasa menyinari manusia adalah radon. Radon adalah gas radioaktif yang tidak memiliki warna, bau, atau rasa. Radioaktif adalah istilah untuk menunjukkan suatu sumber atau materi yang mengandung radiasi yang dapat berbentuk padat, gas, atau cair.

Radon terbentuk di dalam tanah dari uranium dan berdifusi ke atmosfer. Konsentrasi radon yang tinggi dapat menumpuk di suatu ruang tertutup seperti gedung dan dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko kanker paru-paru pada manusia yang menghirupnya.

Bagi sebagian besar manusia, tanpa disadari radon menjadi sumber pajanan radiasi terbesar sepanjang hidup mereka. Radon adalah penyebab terpenting kedua kanker paru-paru setelah merokok dan penyebab utama kanker di kalangan non-perokok. Hubungan antara pajanan radon dan kanker paru-paru patut diduga sangat kuat dan konsentrasi radon dalam tingkat menengah yang ditemukan di banyak rumah diperkirakan dapat meningkatkan risiko kanker paru-paru tersebut. Oleh karena itu, informasi mengenai radon perlu diketahui oleh masyarakat. Buku ini bertujuan memperkenalkan isu radiasi radon, baik kepada masyarakat umum maupun para ilmuwan. Buku ini diharapkan dapat memberikan informasi yang komprehensif pada masyarakat umum sehingga dapat mewaspadaai keberadaan radiasi radon di sekitar dirinya dan melakukan tindakan proteksi yang diperlukan untuk menghindari efek berbahaya radon yang tidak diinginkan.

Buku ini membahas beberapa isu radon, termasuk sumber atau materi yang memberikan pajanan radiasi radon ini. Selain itu, buku ini menguraikan efek kesehatan dari keberadaan radon di dalam tubuh manusia, metode pengukuran dan pengkajian dosis radon, proteksi yang diperlukan agar radiasi radon tidak terhirup dan masuk ke dalam tubuh manusia, dan berbagai penelitian terkait tingkat radon yang dilakukan di Indonesia.

## B. Struktur

Untuk dapat memahami radiasi radon secara komprehensif, perlu diketahui terlebih dahulu mengenai karakteristik radon sebagai suatu bahan radioaktif. Untuk itu, Bab 2 akan diawali dengan penjelasan tentang bahan radioaktif dan radioaktivitas secara umum, sifat radiasi radon secara khusus, produk peluruhan radioaktif yang membentuk radon, sumber-sumber radiasi yang ada di bumi, dan standar dan peraturan yang disusun untuk mengawasi pajanan radon agar tidak memberikan efek yang berbahaya bagi kesehatan.

Pada Bab 3 diuraikan tentang efek kesehatan radon terhadap tubuh manusia. Untuk ini, uraian diawali dengan cara atau jalan masuk radon ke tubuh manusia, dan kemudian mengenai risiko kanker yang akan dihadapi oleh manusia yang menghirup atau menelan radon ke dalam tubuhnya, risiko penyakit lain akibat penerimaan radon di dalam tubuh, dan metode epidemiologi radon yang dapat dilakukan untuk memastikan bahwa suatu penyakit yang terjadi dalam tubuh manusia benar diakibatkan oleh radon.

Metode pengukuran dan pengkajian dosis radiasi akibat radon diberikan pada Bab 4. Pembahasan dimulai dengan peralatan pengukuran yang bisa dan biasa digunakan, protokol pengukuran yang telah cukup mapan, dan metode penentuan dosis radiasi radon dari berbagai sumber. Untuk melengkapi bab mengenai pengukuran dan pengkajian ini, pada bagian akhir diberikan proses penjaminan mutu yang dapat memberikan kepercayaan atas hasil pengukuran dan pengkajian dosis radon ini.

Mengingat radon memiliki potensi bahaya yang cukup besar bagi kesehatan manusia, pada Bab 5 akan dibahas berbagai metode yang dapat digunakan untuk melakukan proteksi terhadap kemungkinan masuknya radon ke dalam tubuh manusia. Bab ini akan diawali dengan uraian mengenai prinsip proteksi radiasi secara umum dan kemudian dilanjutkan dengan uraian tentang upaya khusus yang dilakukan untuk mencegah masuknya radon tersebut ke dalam tubuh manusia.

Untuk melengkapi gambaran komprehensif mengenai radon, pada Bab 6 diberikan informasi mengenai beberapa jenis penelitian terkait tingkat radon di Indonesia yang pernah dilakukan. Penelitian tersebut meliputi penentuan tingkat radon di perumahan, di pertambangan, dan gua wisata, dan juga aplikasi tingkat radon yang dapat digunakan sebagai basis untuk membuat sistem peringatan dini gempa bumi.

Uraian diakhiri dengan Penutup pada Bab 7 yang menekankan pada pentingnya perhatian yang diberikan pada radon sebagai salah satu sumber radiasi yang memiliki potensi berbahaya bagi kesehatan manusia. Sifat radon sebagai gas yang tidak berbau dan tidak berwarna dapat dengan mudah memperdaya manusia untuk mengabaikan keberadaannya dan kemudian tanpa disadari ternyata telah menimbulkan penyakit kanker paru-paru di dalam tubuhnya.

## BAB II

# Karakteristik Radon

Radon adalah salah satu bahan radioaktif yang merupakan "anak luruh" tiga deret peluruhan radioaktif alami, yaitu deret uranium, deret aktinium, dan deret torium. Pada bab ini akan dibahas tentang karakteristik radon secara umum, tetapi tidak akan menguraikan sifat-sifat bahan radioaktif—radon termasuk di dalamnya. Pembaca diharapkan telah memahami dengan baik konsep dasar fisika dan kimia mengenai atom, senyawa, unsur, bahan radioaktif, radioaktivitas, waktu paruh, dan sebagainya.

### A. Sifat Fisika dan Kimia

Radon adalah salah satu unsur kimia dengan lambang Rn, dan merupakan gas radioaktif alami sebagai produk peluruhan radioaktif alami. Radon termasuk dalam gas mulia dengan nomor atom 86, memiliki titik lebur  $202^{\circ}\text{K}$ , titik didih  $211,5^{\circ}\text{K}$ , radius atom  $2,20 \text{ \AA}$ , radius kovalen  $1,46 \text{ \AA}$ , energi ionisasi  $1037,073 \text{ kJ mol}^{-1}$ , densitas  $0,009074 \text{ g cm}^{-3}$ , dan kapasitas panas spesifik  $94 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (RSC, t.t.).

1 H Protogen																	2 He Helium																												
3 Li Litium	4 Be Berylium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluor	10 Ne Neon																												
11 Na Natrium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminium	14 Si Silikon	15 P Phosphor	16 S Sulfur	17 Cl Klorin	18 Ar Argon																												
19 K Kalium	20 Ca Kalsium	21 Sc Skandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Kromium	25 Mn Mangan	26 Fe Besi	27 Co Kobalt	28 Ni Nikel	29 Cu Tembaga	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenik	34 Se Selenium	35 Br Bromin	36 Kr Krypton																												
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirkon	41 Nb Niobium	42 Mo Molibdenum	43 Tc Teknisiun	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rodium	46 Pd Paladium	47 Ag Perak	48 Cd Kadmium	49 In Indium	50 Sn Timah	51 Sb Antimon	52 Te Telur	53 I Iodin	54 Xe Xenon																												
55 Cs Sesium	56 Ba Barium	57 La Lantan	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platina	79 Au Emas	80 Hg Raksa	81 Tl Timbal	82 Pb Timah	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astatin	86 Rn Radon																												
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Aktin	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Uup Ununpentium	116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium	118 Og Oganesson																												
<table border="1"> <tr> <td>58 Ce Cesium</td> <td>59 Pr Praseodym</td> <td>60 Nd Neodym</td> <td>61 Pm Prometium</td> <td>62 Sm Samarium</td> <td>63 Eu Europium</td> <td>64 Gd Gadolinium</td> <td>65 Tb Terbium</td> <td>66 Dy Dysprosium</td> <td>67 Ho Holmium</td> <td>68 Er Erbium</td> <td>69 Tm Thulium</td> <td>70 Yb Ytterbium</td> <td>71 Lu Lutetium</td> </tr> <tr> <td>90 Th Thorium</td> <td>91 Pa Protaktinium</td> <td>92 U Uranium</td> <td>93 Np Neptunium</td> <td>94 Pu Plutonium</td> <td>95 Am Americium</td> <td>96 Cm Curium</td> <td>97 Bk Berkelium</td> <td>98 Cf Californium</td> <td>99 Es Einsteinium</td> <td>100 Fm Fermium</td> <td>101 Md Mendelevium</td> <td>102 No Nobelium</td> <td>103 Lr Lawrencium</td> </tr> </table>																		58 Ce Cesium	59 Pr Praseodym	60 Nd Neodym	61 Pm Prometium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium	90 Th Thorium	91 Pa Protaktinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium
58 Ce Cesium	59 Pr Praseodym	60 Nd Neodym	61 Pm Prometium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium																																
90 Th Thorium	91 Pa Protaktinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium																																

Sumber: Depositphotos (t.t.)

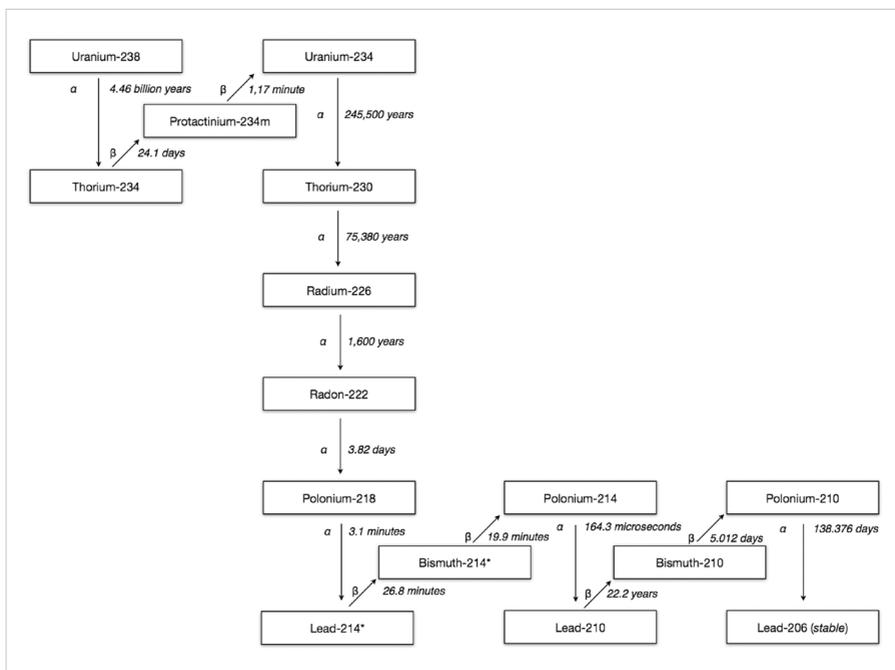
**Gambar 2.1** Tabel Periodik Unsur Kimia

Gas radon tidak dapat dideteksi oleh indera manusia karena tidak berbau, tidak berasap, dan tidak berwarna. Gambar 2.1 memperlihatkan tabel periodik unsur kimia, dengan radon sebagai gas mulia terberat berada pada kolom terakhir. Gas radon di lingkungan cenderung mengendap di daerah yang lebih rendah di mana udaranya tenang dan dapat terkonsentrasi di ruangan dan ruang bawah tanah yang berventilasi buruk karena lebih padat dari udara ( $0,009074 \text{ g cm}^{-3}$  vs  $0,001225 \text{ g cm}^{-3}$ ).

## B. Produk Peluruhan

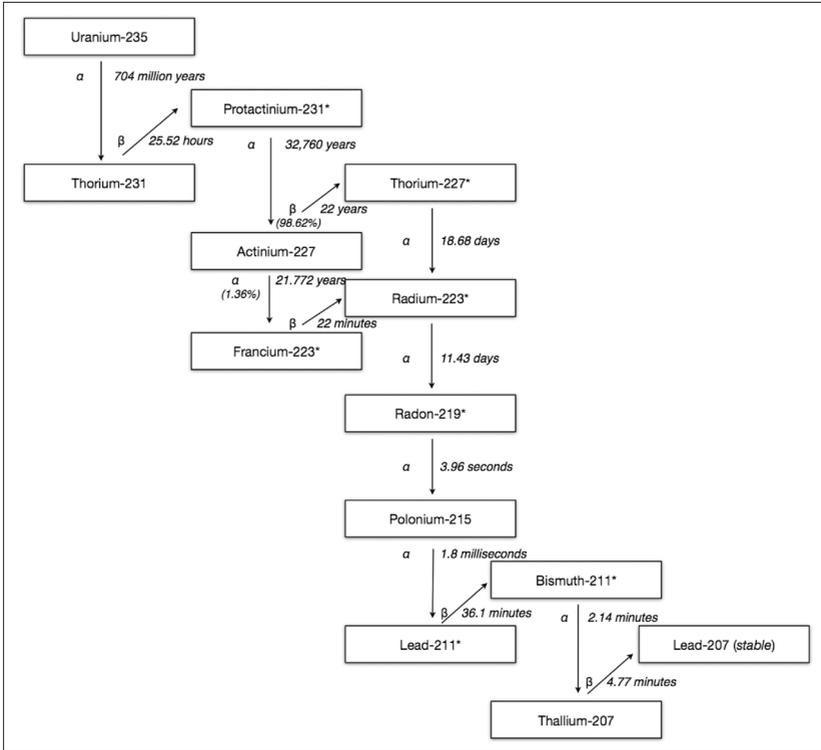
Radon terjadi secara alami dan merupakan produk peluruhan radioaktif dari deret uranium yang diawali dengan uranium-238, deret aktinium yang diawali dengan uranium-235, dan deret torium yang

diawali dengan torium-232. Dalam hal deret uranium, isotop yang dihasilkan adalah radon-222 yang memiliki waktu paruh 3,82 hari dan merupakan produk peluruhan langsung dari radium-226 (Gambar 2.2). Dalam hal deret aktinium, isotop yang dihasilkan adalah radon-219 yang memiliki waktu paruh 14,6 jam (Gambar 2.3). Dalam hal deret torium, isotop yang dihasilkan adalah radon-220 yang memiliki waktu paruh 55,6 detik dan merupakan produk peluruhan langsung dari radium-224 (Gambar 2.4).



Sumber: ICRP (2014)

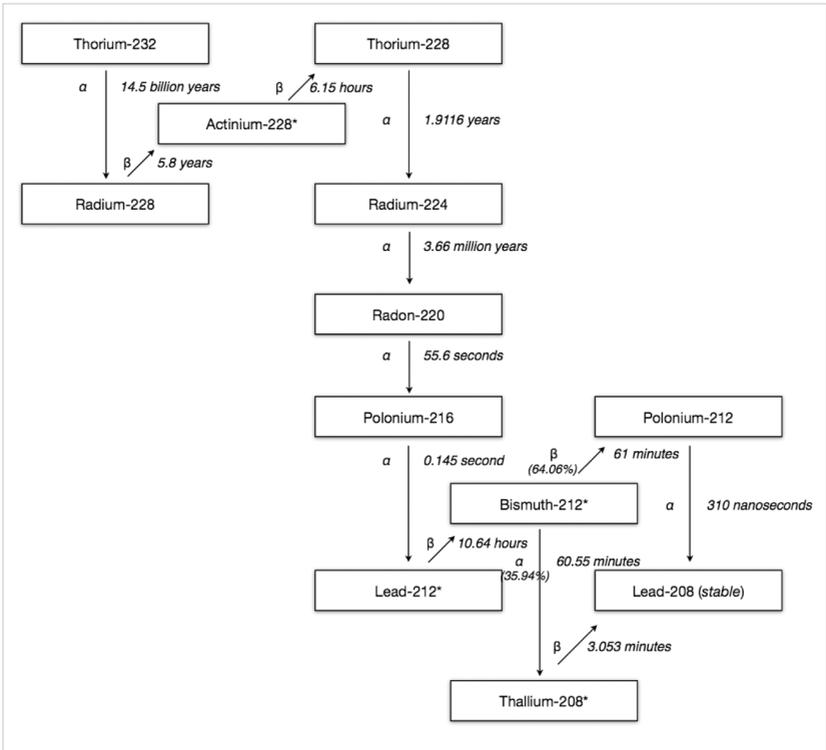
**Gambar 2.2** Deret Uranium



Sumber: ICRP (2014)

**Gambar 2.3** Deret Aktinium

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: ICRP (2014)

**Gambar 2.4** Deret Thorium

Pajanan manusia terhadap radon terutama disebabkan oleh radon-222 atau lebih tepatnya anak luruhnya yang berumur pendek. Pajanan radon-220 di udara dalam ruangan umumnya kurang signifikan karena waktu paruhnya yang singkat. Sementara itu, kontribusi radon-219 terhadap pajanan tidak signifikan karena anak luruhnya juga memiliki waktu paruh yang pendek dan karena itu tidak diperhitungkan dalam buku ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## C. Sumber Radon

Radon dapat berada di berbagai tempat, seperti di udara terbuka, di dalam gedung, di air, di bahan bangunan, dan di daerah kerja. Bagi kebanyakan orang, pajanan radon akan diterima pada saat berada di dalam ruangan di rumah, kantor, sekolah, dan gedung lainnya. Tingkat radon di rumah dan bangunan lain tersebut bergantung pada karakteristik batuan dan tanah di daerah tersebut. Tingkat radon di berbagai belahan dunia juga menjadi sangat bervariasi karena jenis batuan dan tanah di dunia sangat beragam.

### 1. Radon di Udara Terbuka

Konsentrasi radon dan anak luruhnya sangat bervariasi pada setiap area karena adanya variasi konsentrasi Ra-226 dan Th-232 yang ada di dalam tanah pada area tersebut. Konsentrasi atmosfer akan lebih besar di area yang tanahnya kaya akan Ra-226 dan Th-232. Berikut merupakan berbagai faktor yang memengaruhi konsentrasi Rn-222 di udara (Vogiannis & Nikolopoulos, 2015):

- 1) penutup tanah (misalnya trotoar, bangunan, dan vegetasi);
- 2) ketinggian atau ketinggian di atas tanah;
- 3) porositas tanah dan ukuran butir;
- 4) suhu;
- 5) tekanan atmosfer;
- 6) kelembapan tanah, curah hujan, dan tutupan salju;
- 7) kondisi atmosfer; dan
- 8) musim.

Variasi musiman dan harian konsentrasi radon di atmosfer bervariasi sesuai dengan lokasi geografis. Di negara dengan empat musim, konsentrasi di permukaan tanah akan paling tinggi selama musim gugur dan awal musim dingin, serta paling rendah selama musim semi (Di Carlo et al., 2023; Senitkova & Kraus, 2019; UNSCEAR, 2008).

Konsentrasi radon di permukaan tanah biasanya paling tinggi pada pagi hari karena pada saat itu suhu di permukaan masih relatif

dingin dibandingkan dengan di udara bebas di atasnya. Setelah matahari terbit, pemanasan menyebabkan suhu permukaan naik yang menyebabkan gas radon terangkat dan menempati volume yang lebih besar di udara bebas. Konsentrasi radon di permukaan umumnya akan tetap rendah hingga sore hari. Namun, menjelang matahari terbenam, seiring dengan mendinginnya permukaan bumi, konsentrasi radon di permukaan tanah juga mulai meningkat.

Pengukuran Rn-222 di permukaan tanah menunjukkan konsentrasi rata-rata sekitar 5–10 Bq/m<sup>3</sup>. Namun, di beberapa lokasi tertentu di dekat permukaan bumi juga dapat dijumpai konsentrasi Rn-222 dan anak luruhnya yang cukup tinggi, bahkan beberapa kali lebih besar dibandingkan dengan rata-rata. Umumnya, konsentrasi Rn-222 berkisar antara 0,7 dan 35 Bq/m<sup>3</sup>, dengan rata-rata sekitar 7 Bq/m<sup>3</sup> (Vogiannis & Nikolopoulos, 2015).

## 2. Radon di Dalam Gedung

Radon dapat memasuki gedung atau rumah melalui retakan di lantai, celah dalam konstruksi, jendela, saluran air, atau ruang di sekitar kabel dan pipa. Hal ini sangat umum terjadi di daerah beriklim sedang dan dingin karena aliran gas yang digerakkan oleh tekanan yang muncul karena bangunan biasanya memiliki tekanan yang lebih rendah dibandingkan tekanan yang ada di bawah bangunan. Radon tidak larut di udara dalam ruangan secepat di luar dan cenderung terakumulasi di ruang tertutup bangunan sehingga menjadi sumber pajanan radiasi publik yang signifikan.

Konsentrasi radon di dalam gedung cenderung berbeda antar-negara dan bahkan setiap bangunan karena perbedaan iklim, teknik konstruksi, jenis ventilasi yang disediakan, kebiasaan rumah tangga dan, terutama, geologi. Setelah dilepaskan dari bahan batuan dasar, radon melewati tanah dan mengalami pelemahan di udara sebelum memasuki bangunan. Granit, migmatit, beberapa tanah liat, dan tanah liat sangat kaya akan uranium dan radium, yang meluruh menjadi radon. Radon yang dialirkan dari tanah di bawah bangunan

merupakan sumber utama radon di udara dalam ruangan. Gambar 2.5 memperlihatkan mekanisme masuknya radon ke dalam gedung atau rumah.

Konsentrasi radon di dalam gedung bergantung pada beberapa hal berikut ini (WHO, t.t.a).

- 1) Geologi lokal, seperti kandungan dan permeabilitas uranium di batuan dan tanah di bawahnya;
- 2) Rute pergerakan radon dari tanah ke dalam gedung;
- 3) Hembusan (*exhalation*) radon dari bahan bangunan;
- 4) Tingkat pertukaran udara di dalam gedung dengan di luar gedung, yang bergantung pada konstruksi gedung, kebiasaan ventilasi penghuni, dan kededapan udara dari gedung.



Sumber: UNEP (2016)

**Gambar 2.5** Mekanisme Masuknya Radon ke Dalam Rumah

### 3. Radon di Dalam Air

Radon dapat larut dan terakumulasi di dalam sumber air tanah, seperti sumur bor di daerah geologis yang kaya uranium. Radon di dalam air dapat dilepaskan ke udara selama penggunaan air secara rutin, seperti mandi atau mencuci. Secara umum, air cenderung menjadi sumber pajanan radon yang kurang signifikan dibandingkan tanah di bawah bangunan.

Tingkat radon bisa tinggi di air tanah, terutama di area batuan granit. Tingkat radon mungkin tinggi di daerah kerja pada fasilitas pengolahan air atau fasilitas spa yang menggunakan air alami.

### 4. Radon pada bahan bangunan

Sebagian besar bahan bangunan menghasilkan radon dalam jumlah yang tidak signifikan secara alami. Namun, pada saat yang sama beberapa bahan tertentu dapat bertindak sebagai sumber pajanan radon yang signifikan. Bahan semacam itu cenderung memiliki kombinasi Ra-226 tingkat tinggi (yang meluruh menjadi radon) dan porositas tinggi, yang memungkinkan gas radon terlepas ke udara. Bahan semacam ini termasuk beton ringan dengan serpih tawas, fosfogipsum, dan batuan putih vulkanik (*tuff*). Penggunaan bahan dari bahan limbah (*tailing*) uranium sebagai pengisi di bawah bangunan juga dapat berkontribusi terhadap konsentrasi radon yang signifikan di dalam ruangan.

### 5. Radon Pada Daerah Kerja

Pajanan radon di dalam gedung yang menjadi daerah kerja cukup umum dijumpai di daerah kerja bawah tanah dan di atas tanah. Di daerah kerja bawah tanah, tingkat radon dapat meningkat karena kondisi geologis atau ventilasi yang terbatas. Daerah kerja bawah tanah yang kemungkinannya paling besar dalam memberikan dampak kesehatan dari pajanan radon adalah pekerjaan di tambang, terowongan dan ruang bawah tanah. Beberapa daerah kerja normal di atas tanah mungkin juga dapat memiliki konsentrasi radon yang tinggi yang berasal dari bebatuan yang ada di daerah kerja tersebut,

ventilasi yang buruk, atau sifat pemrosesan bahan mentah di daerah kerja yang menyebabkan radon menjadi makin mudah terpancar ke luar.

#### D. Standar, Rekomendasi, dan Peraturan

Salah satu persyaratan keselamatan pada Standar Keselamatan IAEA (IAEA, 2014) menyatakan bahwa pemerintah harus memberikan informasi mengenai tingkat radon di permukiman dan risiko kesehatan yang menyertainya dan jika perlu menetapkan dan menerapkan rencana aksi untuk mengendalikan pajanan publik akibat radon di permukiman.

Dalam kaitan dengan persyaratan keselamatan di atas, IAEA menetapkan tingkat acuan untuk Rn-222 di permukiman dan bangunan lain dengan faktor okupansi yang tinggi untuk anggota masyarakat sebesar  $300 \text{ Bq/m}^3$  (IAEA, 2014). Tingkat acuan dibuat dengan asumsi adanya faktor kesetimbangan Rn-222 sebesar 0,4 dan okupansi tahunan 7.000 jam sehingga nilai konsentrasi  $300 \text{ Bq/m}^3$  sebanding dengan dosis efektif tahunan sekitar 10 mSv.

Untuk pekerja radiasi, IAEA menyatakan bahwa badan pengawas nuklir suatu negara harus menetapkan strategi untuk proteksi terhadap Rn-222, termasuk menetapkan tingkat acuan sebesar  $1.000 \text{ Bq/m}^3$ . Jika setelah semua upaya untuk menurunkan tingkat konsentrasi radon tidak berhasil dan tetap di atas tingkat acuan, IAEA menyatakan bahwa persyaratan pajanan kerja di situasi pajanan terencana harus diterapkan.

Pada Publikasi 126 ICRP menyatakan bahwa manajemen pajanan radon didasarkan terutama pada aplikasi prinsip optimisasi dengan tingkat acuan yang sesuai (ICRP, 2014). Tingkat acuan ini harus berkaitan dengan dosis tahun dalam rentang 1-20 mSv, dan selanjutnya nilai 10 mSv dipandang sebagai *benchmark* untuk menetapkan tingkat acuan untuk pajanan radon. Dalam penerapan praktis strategi proteksi terhadap radon, nilai  $300 \text{ Bq/m}^3$  kemudian direkomendasikan sebagai tingkat acuan, baik di daerah permukiman maupun di bangunan lain, termasuk daerah kerja (ICRP, 2014).

Sebelumnya, ICRP merekomendasikan tingkat acuan konsentrasi radon di daerah permukiman dan daerah kerja masing-masing sebesar  $600 \text{ Bq/m}^3$  dan  $1.500 \text{ Bq/m}^3$  (ICRP, 2007). Rekomendasi ini didasarkan pada tingkat acuan dosis individu sebesar 10 mSv yang telah diberikan pada Publikasi 65 sebelumnya (ICRP, 1993).

WHO menetapkan nilai tingkat acuan untuk radon sebesar  $100 \text{ Bq/m}^3$  dapat dibenarkan dari perspektif kesehatan publik karena pengurangan bahaya kesehatan akibat radon yang efektif dapat diharapkan dari nilai tersebut (WHO, 2009). Namun, apabila tingkat acuan ini tidak dapat diterapkan pada suatu negara, tingkat acuan bisa dinaikkan menjadi  $300 \text{ Bq/m}^3$  yang setara dengan nilai dosis 10 mSv per tahun yang direkomendasikan ICRP. Tabel 2.1 memberikan nilai tingkat acuan yang diberikan oleh ketiga badan internasional ini, dan juga tingkat acuan yang diberlakukan di beberapa negara (WHO, t.t.b).

Seperti dapat dilihat pada Tabel 2.1, tingkat acuan yang berlaku di daerah permukiman di AS relatif lebih rendah dibandingkan dengan di negara lain, yaitu sebesar  $148 \text{ Bq/m}^3$ , sedangkan di negara-negara lain rata-rata  $200\text{--}300 \text{ Bq/m}^3$ . Penetapan nilai tingkat acuan yang rendah ini ternyata bukan didasarkan bukti empiris ilmiah, melainkan lebih disebabkan oleh pengalaman dari seorang pekerja konstruksi PLTN Limerick yang saat memasuki fasilitas membunyikan alarm monitor radiasi, padahal PLTN masih dibangun dan masih belum ada bahan bakar nuklir di sana (Rose, 2009). Setelah diselidiki, ternyata rumah si pekerja mengandung tingkat radon yang mencapai 700 kali lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat maksimum yang dipandang aman untuk manusia, yaitu  $4 \text{ pCi/L}$  atau  $148 \text{ Bq/m}^3$ .

Di Indonesia, Menteri Kesehatan telah menetapkan konsentrasi maksimum radon di lingkungan rumah sakit sebesar  $4 \text{ pCi/L}$  atau  $148 \text{ Bq/m}^3$  (Permenkes No.7, 2019), sedangkan Menteri Ketenagakerjaan mengeluarkan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018 yang pada pedoman teknisnya menetapkan standar radon dalam ruang sebesar  $<200 \text{ Bq/m}^2$  (Pedoman Permenaker No.5, 2018). Secara nasional telah ditetapkan tingkat panduan radon sebesar  $300 \text{ Bq/m}^3$

dalam rumah atau bangunan dengan tingkat okupansi yang tinggi (PP No.45, 2023). Meski tidak dinyatakan secara eksplisit, tingkat radon 300 Bq/m<sup>3</sup> yang ditetapkan pada PP tampaknya berlaku baik untuk di daerah permukiman maupun di daerah kerja.

**Tabel 2.1** Tingkat acuan radon dari beberapa institusi internasional dan negara.

	Radon di Daerah Permukiman	Radon di Daerah Kerja
Standar IAEA <sup>1</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>	1.000 Bq/m <sup>3</sup>
Rekomendasi ICRP <sup>2</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>
Rekomendasi WHO <sup>3</sup>	100 Bq/m <sup>3</sup>	100 Bq/m <sup>3</sup>
Australia <sup>4</sup>	200 Bq/m <sup>3</sup>	1.000 Bq/m <sup>3</sup>
Amerika Serikat <sup>4</sup>	148 Bq/m <sup>3</sup>	3.700 Bq/m <sup>3</sup>
Cina <sup>4</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>	1.000 Bq/m <sup>3</sup>
Inggris <sup>4</sup>	200 Bq/m <sup>3</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>
Jerman <sup>4</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>
Austria <sup>4</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>
Swiss <sup>4</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>
Irlandia <sup>4</sup>	200 Bq/m <sup>3</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>
Kanada <sup>4</sup>	200 Bq/m <sup>3</sup>	200 Bq/m <sup>3</sup>
Indonesia <sup>5</sup>	-	148 Bq/m <sup>3</sup>
Indonesia <sup>6</sup>	-	<200 Bq/m <sup>3</sup>
Indonesia <sup>7</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>	300 Bq/m <sup>3</sup>

Sumber: <sup>1</sup>IAEA (2014), <sup>2</sup>ICRP (2014), <sup>3</sup>WHO (2009), <sup>4</sup>WHO (t.t.), <sup>5</sup>Permenkes No. 7 (2019), <sup>6</sup>Pedoman Permenaker No. 5 (2018), <sup>7</sup>PP No. 45 (2023)

## BAB III

# Efek Kesehatan Radon

Berdasarkan Komite Ilmiah PBB untuk Efek Radiasi Atom (UNSCEAR), setiap individu di dunia ini setiap tahun menerima dosis radiasi dari inhalasi radon sekitar 1,26 mSv, dengan rentang antara 0,2–10 mSv (UNSCEAR, 2010). Dengan total dosis radiasi dari sumber alami sekitar 2,4 mSv, radon menyumbang lebih dari 50% dari semua pajanan radiasi manusia yang berasal dari sumber radiasi alami tersebut.

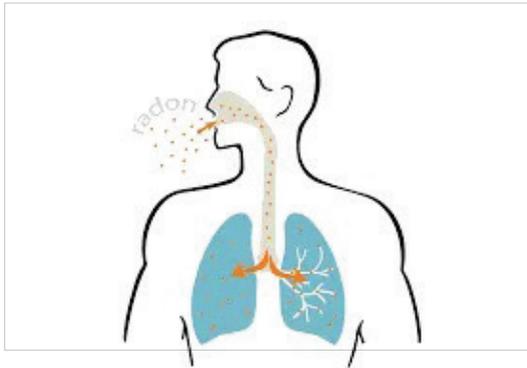
Radon merupakan penyebab terpenting kanker paru-paru setelah merokok dan penyebab utama kanker paru-paru di kalangan non-perokok. Menurut WHO (2009), radon diperkirakan menjadi penyebab antara 3% hingga 14% dari semua kanker paru-paru. Bergantung pada tingkat radon rata-rata di dalam ruangan dan prevalensi merokok, pajanan jangka panjang dapat meningkatkan risiko kanker paru-paru secara signifikan.

Risiko kanker paru-paru dari radon jauh lebih besar bagi perokok, yaitu sekitar 25 kali lebih mungkin terkena kanker paru-

paru daripada bukan perokok. Badan Internasional untuk Penelitian Kanker (IARC) mengklasifikasikan radon sebagai karsinogen manusia bersama dengan asap tembakau, asbes, dan benzena (IARC, 1988).

## A. Jalan Masuk ke Manusia

Seperti terlihat pada Gambar 3.1, radon dan anak luruhnya dapat masuk ke dalam tubuh manusia, tepatnya ke dalam paru-paru, melalui saluran pernapasan atau penelanan. Beberapa anak luruh radon, baik yang menempel maupun tidak menempel pada debu, dapat tetap berada di dalam paru-paru dan mengalami peluruhan radioaktif di dalamnya (ATSDR, 2012).



Sumber: Radon Be Gone (t.t.)

**Gambar 3.1** Jalan Masuk Radon ke Tubuh Manusia

Manusia dapat terpajan radon, terutama dengan menghirupnya, karena anak luruh radon sering menempel pada debu. Radon ada di hampir semua udara. Bergantung pada ukuran partikel, partikulat radioaktif dapat mengendap di paru-paru manusia dan memberikan dosis radiasi ke jaringan paru-paru.

Selain lewat udara, manusia juga bisa menerima pajanan radon dan anak luruhnya secara bersentuhan dengan air permukaan atau air tanah yang mengandung radon, atau dengan meminum air dari sumur yang mengandung radon.

## B. Risiko Kanker Paru-Paru

Gas radon merupakan sumber radiasi pengion yang paling penting di antara yang berasal dari alam. Ketika gas radon terhirup, partikel alfa pengion padat yang dipancarkan oleh anak luruh radon yang berumur pendek (Po-218 dan Po-214) dapat berinteraksi dengan jaringan biologis di paru-paru yang menyebabkan terjadinya kerusakan DNA.

Kanker diperkirakan dapat terjadi hanya karena adanya satu mutasi, dan penyebaran sel yang telah menyebabkan kerusakan pada DNA dapat meningkatkan kumpulan sel yang berkembang menjadi kanker. Ada kemungkinan kerusakan DNA terkait radon dapat terjadi pada setiap tingkat pajanan karena suatu partikel alfa tunggal dapat menyebabkan kerusakan genetik besar pada sel. Oleh karena itu, tidak ada konsentrasi ambang yang di bawah konsentrasi tersebut yang tidak berpotensi menyebabkan kanker paru-paru (Petermann et al., 2022; WHO, 2009).

Efek kesehatan radon, terutama kanker paru-paru, telah diteliti selama beberapa dekade. Awalnya, investigasi difokuskan pada pekerja tambang bawah tanah yang terpajan radon konsentrasi tinggi di lingkungan kerja mereka. Namun, pada awal 1980-an, beberapa survei konsentrasi radon di rumah dan bangunan lain dilakukan, dan hasil survei ini, bersama dengan perkiraan risiko berdasarkan studi pekerja tambang, memberikan bukti tidak langsung bahwa radon dapat menjadi penyebab penting kanker paru-paru pada populasi umum.

Dalam perkembangannya, upaya untuk menyelidiki secara langsung hubungan antara radon dalam ruangan dan kanker paru-paru memberikan bukti yang meyakinkan tentang peningkatan risiko kanker paru-paru yang terkait dengan radon, bahkan pada tingkat yang biasa ditemukan di gedung-gedung. Penilaian risiko radon, baik di tambang maupun di lingkungan perumahan, telah memberikan pemahaman yang jelas tentang risiko kesehatan akibat radon. Pengakuan radon sebagai salah satu karsinogen manusia oleh IARC didasarkan pada berbagai hasil riset ini.

Berdasarkan WHO (2009), radon merupakan penyebab nomor satu kanker paru di antara non-perokok, dan penyebab kedua kanker paru-paru setelah rokok. Radon bertanggung jawab atas sekitar 21.000 kematian akibat kanker paru setiap tahun. Sekitar 2.900 dari kematian ini terjadi di antara orang-orang yang tidak pernah merokok. Riset yang dilakukan EPA bersama CDC menyimpulkan bahwa semakin tinggi konsentrasi radon, makin tinggi risiko terjadinya kanker paru-paru. Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 masing-masing memberikan risiko kanker paru-paru dari pajanan radon pada perokok dan pada non-perokok.

**Tabel 3.1** Risiko Kanker Paru-Paru dari Pajanan Radon pada Perokok

Tingkat Radon*	Jika 1.000 perokok mendapat penyinaran pada tingkat ini sepanjang hidupnya	Risiko kanker dari pajanan radon dibandingkan dengan
740 mBq/L	Sekitar 260 orang dapat menderita kanker paru-paru	250 kali risiko tenggelam
370 mBq/L	Sekitar 150 orang dapat menderita kanker paru-paru	200 kali risiko meninggal dalam kebakaran rumah
296 mBq/L	Sekitar 120 orang dapat menderita kanker paru-paru	30 kali risiko meninggal karena jatuh
148 mBq/L	Sekitar 62 orang dapat menderita kanker paru-paru	5 kali risiko meninggal dalam tabrakan mobil
74 mBq/L	Sekitar 32 orang dapat menderita kanker paru-paru	6 kali risiko kematian akibat racun
48,1 mBq/L	Sekitar 20 orang dapat menderita kanker paru-paru	(Rata-rata tingkat radon di dalam ruangan)
14,8 mBq/L	-	(Rata-rata tingkat radon di luar ruangan)

\*Dikonversi dari picoCurie (pCi), dengan 1 pCi = 37 mBq.

Sumber: EPA (2016)

**Tabel 3.2** Risiko Kanker Paru-Paru dari Paparan Radon pada Non-Perokok

Tingkat Radon*	Jika 1.000 orang yang tidak pernah merokok mendapat penyinaran pada tingkat ini sepanjang hidupnya	Risiko kanker dari paparan radon dibandingkan dengan
740 mBq/L	Sekitar 36 orang dapat menderita kanker paru-paru	35 kali risiko tenggelam
370 mBq/L	Sekitar 18 orang dapat menderita kanker paru-paru	20 kali risiko meninggal dalam kebakaran rumah
296 mBq/L	Sekitar 15 orang dapat menderita kanker paru-paru	4 kali risiko meninggal karena jatuh
148 mBq/L	Sekitar 7 orang dapat menderita kanker paru-paru	Risiko meninggal dalam tabrakan mobil
74 mBq/L	Sekitar 4 orang dapat menderita kanker paru-paru	Risiko kematian akibat racun
48,1 mBq/L	Sekitar 2 orang dapat menderita kanker paru-paru	(Rata-rata tingkat radon di dalam ruangan)
14,8 mBq/L	-	(Rata-rata tingkat radon di luar ruangan)

\*Dikonversi dari picoCurie (pCi), dengan 1 pCi = 37 mBq.

Sumber: WHO (2009)

Li et al. (2020) melakukan meta-analisis terhadap data studi kaitan paparan radon permukiman dengan risiko jenis histologi kanker paru-paru yang dilakukan di Cina sampai tahun 2018. Dari studi diperoleh bahwa paparan radon permukiman tertinggi secara nyata berkaitan dengan kenaikan risiko kanker paru-paru. Semua jenis histologi kanker paru-paru berkaitan dengan radon permukiman. Kaitan terbesar terjadi dengan karsinoma paru-paru sel kecil, diikuti dengan adenokarsinoma, jenis histologi yang lain, dan karsinoma sel skuamous. Dengan kenaikan tingkat radon permukiman per 100 Bq/m<sup>3</sup>, risiko kanker paru-paru, karsinoma paru-paru sel kecil, dan adenokarsinoma naik masing-masing sebesar 11%, 19%, dan 13%. Secara keseluruhan, meta-analisis ini memberikan bukti baru adanya hubungan yang potensial antara radon yang ada di permukiman dan semua jenis histologi kanker paru-paru.

Suatu studi yang mempelajari hubungan radon di permukiman dengan kanker paru-paru pada orang yang tidak pernah merokok telah dilakukan di Spanyol (Lorenzo-González et al., 2019). Dari studi teramati adanya rasio peluang 1,73 untuk individu yang terpajan radon  $\geq 200$  Bq/m<sup>3</sup> dibandingkan dengan yang terpajan  $\leq 100$  Bq/m<sup>3</sup>. Risiko kanker paru-paru untuk adenokarsinoma tercatat 1,52 dengan menggunakan kategori yang sama untuk pajanan radon. Dari studi ini disimpulkan bahwa radon permukiman merupakan faktor risiko yang nyata untuk kanker paru-paru pada para non-perokok. Pajanan radon juga berkaitan dengan semua jenis histologi kanker paru-paru dan dengan adenokarsinoma, yang merupakan jenis histologi yang paling banyak dijumpai pada penyakit ini.

Di Korea Selatan Park et al. (2020) mengevaluasi efek kombinasi dari pajanan radon dan perokok sigaret pada kanker paru-paru. Hasil studi yang mengelompokkan kombinasi pajanan radon dan status merokok menunjukkan risiko peluang kanker paru-paru pada non-perokok dengan tingkat radon tinggi, perokok dengan tingkat radon rendah, dan perokok dengan tingkat radon tinggi masing-masing adalah 1,40; 2,42; dan 4,27 dengan acuan non-perokok dengan radon rendah. Dari studi ini disimpulkan bahwa radon permukiman dan perokok sigaret, terkait dengan meningkatnya risiko peluang terjadinya kanker paru-paru, perbedaan risiko peluang dari sisi pajanan radon lebih besar pada perokok dibandingkan dengan non-perokok.

Studi yang memperkirakan kematian akibat kanker paru-paru secara global akibat radon permukiman telah dilakukan (Gaskin et al., 2018). Studi dilakukan dengan menganalisis data dari 66 negara dan pendekatan fraksi penyebab dengan model risiko relatif berlebihan kanker paru-paru akibat radon. Studi menyimpulkan bahwa 16,5% kasus kanker paru-paru dapat dikaitkan dengan pajanan radon permukiman.

Studi untuk mempelajari limfosit darah pasien penderita kanker paru-paru yang bermukim di daerah dengan polusi udara tinggi dan tingkat radon latar yang tinggi telah dilakukan oleh Minina et al. (2018). Hasil studi menunjukkan bahwa aberasi jenis kromatid dan

aberasi jenis kromosom pada pasien kanker paru-paru meningkat signifikan dibandingkan dengan kontrol. Secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa pasien kanker paru-paru menunjukkan adanya kenaikan pada kerusakan genom akibat saling pengaruh (*interplay*) antara pajanan dan kapasitas individu dalam perbaikan DNA yang rendah, yang menyebabkan terjadinya ketidakstabilan genom.

### C. Risiko Penyakit Lain

Radon dan anak luruhnya memberikan dosis yang jauh lebih banyak ke paru-paru daripada ke organ sistemik dan saluran pencernaan. Sekalipun demikian, seperti dikutip ICRP (2010), beberapa perhitungannya menunjukkan bahwa dosis kecil dapat diterima oleh sumsum tulang merah dan organ sistemik lainnya.

Studi terhadap para pekerja tambang bawah tanah umumnya tidak menunjukkan adanya kanker berlebih selain kanker paru-paru yang terkait dengan pajanan radon. Namun, studi yang dilakukan pada sebanyak 23.043 pekerja tambang uranium di Republik Ceko menunjukkan adanya 177 kasus leukemia, limfoma, dan mieloma (Řeřicha et al., 2006). Sayangnya, hasil studi ini tidak dikonfirmasi oleh studi lain yang dilakukan di negara yang sama (Tomásek & Malatova, 2006).

Beberapa studi epidemiologi juga memperkirakan adanya kaitan pajanan radon dengan beberapa penyakit lain selain kanker paru-paru. Laurier et al. (2001) memperkirakan adanya kaitan leukemia dengan konsentrasi radon di ruangan, Evrard et al. (2006) menduga adanya kaitan leukemia mieloid akut pada anak dengan pajanan radon domestik di Perancis, sementara Raashou-Nielsen et al. (2008) memperkirakan adanya kaitan pajanan radon dengan leukemia limfoblastik akut pada anak di Denmark. Sungguhpun demikian, semua temuan studi epidemiologi ini masih dianggap lemah dan riset lebih lanjut dengan desain yang lebih baik diperlukan untuk membuktikan kebenaran semua hasil ini (ICRP, 2010)

Kaitan radon dan kanker kulit secara biologis memungkinkan karena anak luruh radon dapat menempel pada kulit dan partikel alfa pada anak luruh radon tersebut dapat menyinari lapisan luar kulit. Beberapa studi terkait hal ini telah dilakukan di Inggris (Wheeler et al., 2012), di AS (Turner et al., 2012), di Spanyol (Barbosa-Lorenzo et al., 2016) dan di Swiss (Vienneau et al., 2017). Namun, desain studi yang berbeda satu sama lain dan adanya parameter tambahan seperti variasi pajanan UV, menyulitkan pengambilan kesimpulan dari berbagai studi tersebut.

Kanker lambung juga dapat dikaitkan dengan pajanan radon. Karena saat radon yang larut dalam air masuk ke lambung, zat radioaktif ini dapat mengendap beberapa menit di organ lambung tersebut (Kendall & Smith, 2002). Minum air secara rutin sebanyak 600 liter per tahun yang mengandung 1000 Bq/L anak luruh radon bersama dengan gas radon diperkirakan akan memberikan dosis tahunan 1,5–50,4 mSv pada lambung, dibandingkan 0,1–1,26 mSv pada paru-paru (Kendall & Smith, 2002).

Di AS studi Messier dan Serre (2017) menyatakan bukti adanya peluang yang signifikan secara statistik bahwa radon air tanah dapat menyebabkan kanker lambung. Namun, kesimpulan yang definitif belum dapat diambil karena tidak ada studi lain yang dapat mendukung klaim ini.

Johnson dan Duport (2004) menduga bahwa pajanan radon dapat menjadi salah satu faktor risiko untuk penyakit kardiovaskular. Namun, studi tentang isu yang sama tidak menemukan kaitan pajanan radon dengan penyakit kardiovaskular tersebut, terutama karena adanya pengganggu yang tidak terkendali untuk faktor risiko penyakit jantung koroner lainnya yang menghalangi penafsiran dalam memperkirakan risiko (Kreuzer et al., 2006; Villeneuve et al., 2007).

Pajanan radon secara biologis juga dapat mengakibatkan penyakit serebrovaskular, atau gangguan pada pembuluh darah di otak. Lu et al. (2022) telah melakukan kajian sistematis dan meta-analisis pada pajanan kerja dan pajanan masyarakat-masyarakat dari radon.

Meskipun pada masyarakat umum dijumpai potensi adanya kaitan pajanan radon permukiman dengan risiko serebrovaskular, terdapat inkonsistensi pada pajanan kerja akibat radon. Hal terakhir diduga karena adanya perbedaan metode pengkajian radon dan isu metodologi yang lain.

Beberapa jenis kanker lain juga disebutkan mempunyai peluang mempunyai kaitan dengan pajanan radon, seperti kanker sistem saraf pusat, kanker payudara, kanker esofageal, kanker orofaring, kanker ginjal, dan kanker tiroid (Reddy et al., 2022). Namun, literatur yang ada belum dapat memberikan kesimpulan yang kuat karena beberapa hal, antara lain, hasilnya masih terbatas, terjadi kontradiksi dan inkonklusif, dan juga desain studi yang beragam dan terbatas (Reddy et al., 2022).

#### **D. Epidemiologi Radon**

Pendeteksian kenaikan risiko kanker paru-paru akibat radon merupakan sesuatu hal yang cukup sulit. Hal ini disebabkan karena berbagai parameter lain yang dapat menyebabkan terjadinya kanker paru-paru tersebut perlu dipisahkan, sehingga dapat diperoleh kesimpulan dengan tingkat kepastian yang tinggi.

Ahli radon di US Public Health Service memperkirakan sebanyak 10.000 hingga 30.000 kasus, dan kontrol sebanyak dua kalinya, diperlukan untuk melakukan studi epidemiologi kaitan radon permukiman dengan risiko kanker paru-paru yang definitif (US-EPA, t.t.). Studi radon permukiman sejauh ini baru melibatkan antara 50 dan 1.500 kasus, dan angka ini masih sangat sedikit untuk dapat memberikan informasi yang konklusif.

Studi epidemiologi pertama yang mempelajari kaitan pajanan radon dengan risiko kanker paru-paru dilakukan di AS oleh Komite Efek Biologi Radiasi Penganion dari Dewan Riset Nasional pada tahun 1988 (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation [BEIR], 1988) [revisi dari draft]. Berdasarkan permintaan Badan Proteksi Lingkungan (US-EPA) dan Komisi Pengawas Nuklir (NRC), BEIR pada fase keempat studi (yang disebut sebagai BEIR IV) melakukan

penilaian secara komprehensif terhadap pengetahuan yang tersedia tentang risiko yang terkait dengan pemancar alfa yang mengendap di bagian dalam tubuh, termasuk dari radon dan anak luruhnya.

Dari hasil studi yang dilakukan selama sekitar dua tahun, BEIR IV menyimpulkan bahwa perkiraan risiko kanker paru-paru berdasarkan pekerja tambang dapat digunakan untuk memperkirakan kaitan potensi risiko kanker paru-paru dengan peningkatan konsentrasi radon dalam ruangan. Namun, perkiraan yang diperoleh disadari masih kurang kuat. Komite mengakui bahwa perbedaan antara risiko di lingkungan pertambangan dan rumah tangga serta interaksi antara merokok dan pajanan terhadap kehamilan masih belum diketahui sepenuhnya (Committee on the BEIR, 1988).

Pada tahun 2006 UNSCEAR membuat laporan khusus kepada Sidang Majelis Umum PBB terkait pengkajian radon di permukiman dan perkantoran (UNSCEAR, 2008). Dalam laporan ini UNSCEAR menyatakan bahwa pajanan kerja radon pada pekerja tambang telah memberikan basis yang kuat dalam mengkaji risiko kanker paru-paru dan potensi pengubahnya, seperti usia saat pajanan diterima, tingkat pajanan radon, dan waktu sejak pajanan terjadi.

Simulasi studi kasus-kontrol epidemiologi skala besar untuk mengidentifikasi hubungan antara pajanan radon dan kanker paru-paru dengan adanya faktor-faktor yang mendistorsi hasil penilaian pajanan radon di permukiman telah dilakukan oleh (Onishchenko & Zhukovsky, 2017). Hasil studi menyatakan bahwa kesalahan multiplikatif dalam pengkajian pajanan individu konsentrasi radon umumnya disebabkan oleh efek gabungan dari variasi konsentrasi radon jangka panjang dan perbedaan tingkat konsentrasi radon di permukiman dan tempat lain di mana manusia berada.

Ketidakpastian pajanan radon pada hasil studi epidemiologi juga memberikan pengaruh yang cukup besar (Onishchenko & Zhukovsky, 2017). Kesalahan dalam penilaian ketidakpastian pajanan konsentrasi radon dalam studi kasus-kontrol radon di Eropa yang terkumpul telah menyebabkan terlalu rendahnya risiko relatif kejadian kanker paru-paru setidaknya sampai 1,5 kalinya.

UNSCEAR kembali memberikan laporan terkait epidemiologi radon ke Sidang Majelis Umum PBB tahun 2019 (UNSCEAR, 2020). Laporan ini lebih membahas tentang kaitan kanker paru-paru dengan pajanan radon residensial. Dari analisis masih dijumpai tingkat variabilitas dalam perkiraan risiko permukiman, misalnya berkaitan dengan kebiasaan merokok, jenis kelamin, dan ketidakpastian pajanan yang bergantung pada lamanya pengukuran.

Dari uraian di atas tampak bahwa studi epidemiologi radon memiliki ketidakpastian yang cukup besar. Untuk itu, sejak awal, studi harus dirancang secermat mungkin. Berdasarkan dokumen US-EPA (t.t.), berikut merupakan beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan saat merancang studi epidemiologi radon permukiman:

- 1) Mobilitas: Manusia banyak bergerak sepanjang hidupnya sehingga hampir tidak mungkin untuk kembali dan mengukur tingkat radon di setiap rumah tempat tinggal seseorang sebelumnya.
- 2) Perubahan kondisi perumahan: Sering waktu, rumah tua sering dihancurkan atau direnovasi sehingga pengukuran radon sebelumnya dapat dianggap tidak ada atau sangat bervariasi; tingkat radon rumah dapat berubah, menjadi lebih tinggi atau lebih rendah dari waktu ke waktu jika sistem ventilasi baru dipasang, pola hunian berbeda, atau fondasi rumah bergeser atau muncul retakan.
- 3) Riwayat yang tidak akurat: Sering kali sebagian besar penderita kanker paru-paru yang diteliti sudah meninggal atau terlalu lemah untuk dapat diwawancarai oleh periset. Hal ini menimbulkan kebergantungan informasi dari pihak kedua yang mungkin tidak akurat. Ketidakakuratan ini terutama memengaruhi hal-hal sebagai berikut.
  - a) Riwayat tempat tinggal: Seorang anak atau kerabat lainnya mungkin tidak mengetahui semua tempat tinggal yang ditempati oleh penderita kanker—terutama jika tempat tinggal tersebut jauh dalam waktu atau durasi yang relatif singkat. Bahkan, jika responden pengganti mengetahui tempat tinggalnya mereka mungkin tidak memiliki informasi

tambahan yang cukup untuk memungkinkan periset menemukan rumah tersebut.

- b) Riwayat merokok: Riwayat merokok secara historis memiliki masalah kepercayaan. Banyak orang yang meremehkan jumlah rokok yang mereka konsumsi. Sebaliknya, kerabat atau teman mungkin melebih-lebihkan riwayat merokok mereka.
- c) Lain-lain: Faktor-faktor rumit selain variasi dalam kebiasaan merokok mencakup faktor individu: genetika, gaya hidup, paparan dari karsinogen lain, dan kondisi pemanas rumah, ventilasi, dan penyejuk udara.

## **BAB IV**

# **Pengukuran Radon**

Komisi Ilmiah PBB untuk Efek Radiasi Atom (UNSCEAR) melaporkan bahwa dosis individu rata-rata yang diterima dari pajanan radiasi sumber alami di dunia adalah 2,4 mSv dengan 1,26 mSv atau 52,5%-nya berasal dari inhalasi gas radon (UNSCEAR, 2010).

Dengan kenyataan di atas, bagi kebanyakan orang radon menjadi sumber pajanan radiasi terbesar sepanjang hidupnya. Seperti diuraikan pada Bab II, radon dapat ditemukan di berbagai tempat, seperti di udara terbuka, di dalam gedung, di dalam air, pada bahan bangunan, dan di daerah kerja. Satu-satunya cara untuk mengetahui apakah suatu tempat memiliki konsentrasi radon yang tinggi adalah dengan mengukurnya.

### **A. Perangkat Pengukuran**

Pengukuran radon umumnya dapat dibedakan atas dua jenis, yaitu pengukuran jangka pendek dan pengukuran jangka panjang. Pengukuran jangka pendek biasanya dilakukan dalam waktu harian atau mingguan, sementara pengukuran jangka panjang umumnya dilakukan dalam satu musim atau lebih (beberapa bulan hingga satu tahun) (WHO, 2009).

Tabel 4.1 memperlihatkan beberapa jenis perangkat pengukuran jangka pendek dan perangkat pengukuran jangka panjang berdasarkan periode pengambilan sampelnya. Pengukuran jangka pendek radon dengan detektor arang aktif atau detektor ion elektret dapat memberikan indikasi awal tentang konsentrasi radon jangka panjang di permukiman. Namun, variasi harian dan musiman harus diperhitungkan saat melakukan pengukuran jangka pendek. Di negara dengan empat musim, konsentrasi radon tinggi umumnya terjadi saat musim dingin karena rumahnya tertutup. Sebaliknya, saat musim panas ketika jendela umumnya dibuka, konsentrasi radon terukur akan rendah. Oleh karena itu, pengukuran jangka panjang lebih dipilih dalam mengkaji konsentrasi radon rata-rata di permukiman (WHO, 2009).

Perangkat pengukuran juga dapat dibedakan atas perangkat pasif dan perangkat aktif (KSU, t.t.). Perangkat pasif tidak memerlukan daya listrik untuk berfungsi. Beberapa jenis perangkat pasif, seperti detektor arang aktif, rentan terhadap gangguan kelembapan tinggi sehingga mungkin tidak sesuai untuk digunakan di semua bangunan. Setelah digunakan, perangkat pasif dikembalikan ke laboratorium untuk dianalisis.

**Tabel 4.1** Perangkat Pengukuran Radon dan Karakteristiknya

Jenis Detektor	Pasif/ aktif	Ketidakpastian (%)*	Periode <i>Sampling</i>	Biaya
Detektor jejak alfa (ATD)	Pasif	10–25	1–12 bulan	Rendah
Detektor arang aktif (ACD)	Pasif	10–30	2–7 hari	Rendah
Kamar ion elektret (EIC)	Pasif	8–15	5 hari–1 tahun	Menengah
Perangkat integrasi elektronik (EID)	Aktif	~25	2 hari–tahun(an)	Menengah
Monitor radon kontinu (CRM)	Aktif	~10	1 jam–tahun(an)	Tinggi

Keterangan: Ketidakpastian dinyatakan untuk durasi pajanan optimal dan untuk pajanan ~200 Bq/m<sup>3</sup>.

Sumber: WHO (2009)

Perangkat aktif membutuhkan daya listrik untuk berfungsi. Beberapa perangkat aktif dapat memberikan data rentang variasi dalam periode pengukuran, sementara beberapa perangkat aktif lain dirancang untuk mendeteksi dan mengurangi sinyal pengganggu terhadap pengukuran yang dilakukan. Perangkat aktif biasanya lebih mahal dari perangkat pasif.

Tabel 4.2 memberikan pedoman dalam melakukan pengukuran radon di permukiman. Pengambilan sampel sesaat (*grab samples*) dengan perangkat, seperti sintilasi yang mengambil data selama beberapa menit dan kemudian dibawa ke laboratorium untuk dianalisis, tidak direkomendasikan di sini. Hal ini karena pengambilan sampel sesaat tidak dapat mengetahui fluktuasi konsentrasi radon dan anak luruhnya dari waktu ke waktu.

**Tabel 4.2** Metode dan Perangkat Pengukuran Radon Permukiman

Metode	Jenis Pengukuran	Perangkat
Uji awal pengukuran	<i>Sampling</i> jangka pendek	CRM, EIC, ACD
Kajian pajanan	Integrasi waktu	ATD, EIC, CRM, EID
Uji remediasi	Pemanfaatan kontinu	CRM

Sumber: WHO (2009)

Beberapa perangkat pengukuran radon yang ada, meliputi detektor gas radon, detektor anak luruh radon dengan gas tertentu, dan perangkat pengukuran radon di air.

## 1. Detektor Gas Radon

Detektor gas radon umumnya terdiri atas detektor jejak alfa, detektor arang aktif, kamar pengionan elektret, detektor integrasi elektronik, dan monitor radon kontinu.

### a. Detektor Jejak Alfa (ATD, *Alpha-Track Detector*)

ATD merupakan perangkat pengukuran radon pasif yang terbuat dari substrat plastik kecil yang berada di dalam kamar difusi yang diberi filter untuk menghalangi masuknya anak luruh radon. Plastik yang

digunakan umumnya *polyallyl diglycol carbonate* (PADC atau CR-39), selulosa nitrat (LR-115), atau bahan polikarbonat (Makrofol). Gambar 4.1 memperlihatkan contoh detektor jejak alfa.

Ketika dibentuk oleh radon atau anak luruhnya di dekat bahan deteksi, partikel alfa dapat menumbuk bahan deteksi, dan membuat area kerusakan mikroskopis yang disebut jejak alfa laten. Etsa kimia atau elektro-kimia bahan detektor plastik memperbesar ukuran jejak alfa sehingga dapat diamati dengan mikroskop dan dapat dihitung secara manual atau dengan alat penghitung otomatis. Jumlah jejak per satuan luas permukaan, setelah dikurangi jumlah latar belakang, sebanding dengan konsentrasi radon dalam Bq/m<sup>3</sup>. Faktor konversi yang diperoleh di fasilitas kalibrasi memungkinkan diubahnya rapat jejak menjadi konsentrasi radon.



Sumber: WHO (2009)

**Gambar 4.1** Detektor Jejak Alfa

Detektor jejak alfa tidak sensitif terhadap kelembapan, suhu, dan radiasi beta dan *gamma* latar belakang, tetapi pengukuran yang dilakukan pada ketinggian yang sangat tinggi (misalnya di atas 2.000 m) akan memerlukan sedikit penyesuaian karena perbedaan kepadatan udara yang dapat memengaruhi jarak yang dapat ditempuh partikel alfa (Vasudevan & McLain, 1994). Sensitivitas silang terhadap *thoron* dapat dihindari dengan menggunakan ruang difusi dengan ketahanan difusi yang besar terhadap gas yang masuk ke dalam ruang.

## b. Detektor Arang Aktif (ACD, *Activated Charcoal Detector*)

ACD bekerja dengan menghisap, atau adsorpsi, radon pada bagian aktif arang (*charcoal*). Setelah sampel radon diambil, detektor disegel agar anak luruh radon setimbang dengan radon yang dikumpulkan. Setelah tiga jam, radiasi *gamma* yang terbentuk dapat langsung diukur, atau juga pancaran radiasi alfaanya dianalisis dengan teknik cacah sintilasi cair. Gambar 4.2 memperlihatkan dua *canister* arang aktif yang terbuka dan tertutup. *Canister* yang terbuka menunjukkan jaring kawat dan cincin 'O', sedangkan yang tertutup menunjukkan selotip yang menempelkan penutupnya ke *canister*.



Sumber: Al-Azmi et al. (2012)

**Gambar 4.2** Detektor Arang Aktif

Perangkat ACD harus dikalibrasi dengan berbagai tingkat kelembapan karena responsnya dipengaruhi oleh kelembapan. Perangkat juga harus dikalibrasi pada rentang pajanan durasi dan suhu yang akan ditemui di lapangan. Metode ini hanya memberikan perkiraan konsentrasi radon rata-rata selama waktu pajanan jika perubahan konsentrasi radon kecil karena arang memungkinkan terjadinya adsorpsi dan desorpsi radon secara terus-menerus. Penggunaan penghalang difusi dapat mengurangi efek angin dan kelembapan tinggi. Detektor harus dikembalikan untuk dianalisis sesegera mungkin setelah periode pajanan yang biasanya dalam delapan hari karena radon meluruh dengan waktu paruh 3,8 hari.

### c. Kamar Pengion Elektret (EIC, *Electret Ion Chamber*)

EIC adalah perangkat pasif yang berfungsi sebagai detektor terintegrasi untuk mengukur konsentrasi gas radon rata-rata selama periode pengukuran. Elektret bertindak baik sebagai sumber medan listrik maupun sebagai sensor dalam kamar ion. Gas radon, bukan anak luruhnya, memasuki kamar ion secara difusi pasif melalui *inlet* yang berfilter. Gambar 4.3 memperlihatkan contoh kamar ion elektret yang tersedia di pasaran.



Sumber: LHI Analytical (t.t.)

**Gambar 4.3** Kamar Ion Elektret

Ion negatif, yang diproduksi di dalam kamar, dikumpulkan pada elektret bermuatan positif yang menyebabkan pengurangan muatan permukaannya. Pengukuran muatan yang berkurang selama periode pajanan merupakan ukuran ionisasi terintegrasi selama periode pengukuran. Muatan elektret dibaca sebelum dan sesudah pajanan menggunakan pembaca tegangan elektret non-kontak yang dibuat khusus. Dengan memasukkan data ini ke dalam rumus tertentu, aktivitas radon yang ada selama masa pengukuran dapat ditentukan.

Beberapa kamar ion dengan ukuran yang berbeda dan elektret dengan sensitivitas yang berbeda telah tersedia untuk berbagai situasi

pengukuran. Elektret yang lebih sensitif biasanya digunakan untuk pengukuran jangka pendek, sedangkan elektret yang kurang sensitif digunakan untuk pengukuran jangka panjang. Kedua elektret ini dikenal sebagai “integrator sejati” karena terus-menerus mengumpulkan dan merekam ion yang dihasilkan oleh peluruhan radon di dalam kamar (LHI Analytical, t.t.).

#### **d. Perangkat Integrasi Elektronik (EID, *Electronic Integrating Device*)**

Sebagian besar EID menggunakan detektor silikon zat padat di dalam kamar difusi untuk menghitung partikel alfa yang dipancarkan oleh anak luruh radon. Waktu integrasi yang lama (>2 hari) sering kali diperlukan untuk pembacaan yang stabil secara statistik pada konsentrasi radon sedang karena dimensi kamar difusi yang kecil. Sensitivitas yang lebih tinggi dapat dicapai dengan menerapkan tegangan tinggi untuk mengumpulkan anak luruh radon bermuatan elektrostatis dengan kontak langsung ke detektor. Kelembapan udara yang tinggi dapat memengaruhi pengukuran.

#### **d. Monitor Radon Kontinu (CRM, *Continuous Radon Monitors*)**

Ada beberapa jenis CRM yang tersedia secara komersial menggunakan berbagai jenis sensor, termasuk sel sintilasi, kamar pengionan arus atau pulsa, dan detektor silikon zat padat. Gambar 4.4 memperlihatkan contoh monitor radon kontinu yang banyak digunakan.

CRM bekerja dengan mengumpulkan udara untuk dianalisis menggunakan pompa kecil atau dengan membiarkan udara berdifusi ke dalam kamar sensor. Semua CRM memiliki sirkuit listrik yang menyediakan laporan ringkasan, dan rekaman sesuai dengan waktu pengukuran, yang memungkinkan penghitungan konsentrasi radon terintegrasi untuk periode tertentu.





Sumber: WHO (2009)

**Gambar 4.4** Monitor Radon Kontinu

## 2. Detektor *Thoron* dan Anak Luruh Radon

Karena waktu paruhnya sangat singkat (55,6 detik), *thoron* di lingkungan berperilaku sangat berbeda dengan radon ( $Rn-222$ ) yang memiliki waktu paruh lebih panjang (3,8 hari).. Dari berbagai studi epidemiologi dapat diketahui bahwa pajanan radon memberikan risiko kanker paru-paru, sementara pajanan *thoron* tidak memberikan risiko tersebut. Namun, saat ICRP memberikan faktor konversi dosis anak luruh radon dan *thoron* masing-masing sebesar 16,8 dan 107 nSv/Bq m<sup>-3</sup> jam (ICRP, 2017), perhatian pada pajanan *thoron* menjadi meningkat. Hal ini karena dengan nilai faktor konversi tersebut, anak luruh *thoron* yang kecil dapat memberikan dosis yang tinggi dibandingkan dengan radon.

### a. Perangkat Pengukuran *Thoron*

*Thoron* umumnya berasal dari dinding struktur dan karena waktu paruhnya yang singkat, konsentrasinya menurun saat mendekati pusat ruangan. Untuk meminimalkan kesalahan pengukuran, detektor perlu ditempatkan setidaknya 20 cm dari dinding. Untuk mengukur konsentrasi radon dan *thoron* gabungan, atau untuk mengkaji

pengaruh *thoron* pada pengukuran radon, penentuan *thoron* dapat dilakukan secara terpisah.

Tabel 4.3 memberikan perangkat pengukuran gas *thoron* yang paling banyak digunakan dan karakteristiknya. Detektor jejak ganda (DTD, *double track detector*) merupakan detektor yang dapat mengukur radon dan *thoron* secara terpisah. Metode ini menggunakan dua kamar difusi ATD, dengan kamar difusi pertama yang memiliki resistensi difusi tinggi untuk radon dan kamar difusi kedua dengan resistensi difusi rendah mendeteksi radon dan *thoron*.

**Tabel 4.3** Perangkat Pengukuran *Thoron* dan Karakteristiknya

Jenis Detektor	Pasif/ Aktif	Ketidakpas- tian (%)*	Periode <i>Sampling</i>	Biaya
Detektor jejak ganda (DTD)	Pasif	25	3–12 bulan	Rendah
Metode dua filter (TFM)	Aktif	10	10 jam	Tinggi
Monitor <i>thoron</i> kontinu (CTM)	Aktif	25	2 jam–1 tahun	Tinggi

Sumber: WHO (2009)

Dalam metode dua filter, udara melewati filter pertama (yang menahan aerosol dan anak luruh *thoron* dan radon), melintasi kamar, dan keluar melalui filter kedua (WHO, 2009). Filter keluar mengumpulkan semua anak luruh radon yang terbentuk di dalam kamar. Untuk meminimalkan kehilangan udara pada dinding kamar, laju aliran harus diatur untuk memungkinkan pembentukan anak luruh radon yang memadai di dalam kamar. Analisis aktivitas dapat dilakukan setelah pengambilan sesaat (*grab sampling*) atau saat filtrasi dengan pengukuran sintilasi atau spektroskopi alfa semikonduktor (pengukuran kontinu).

CTM bekerja dengan cara yang sama seperti CRM. Namun, karena konsentrasi *thoron* dalam ruangan tidak homogen, pengukurannya menjadi sulit dilakukan. Pengukuran untuk memisahkan radon dan *thoron* dapat dilakukan dengan menggunakan sel sintilasi

tunggal, dengan memperkirakan efisiensi pencacahan alfa untuk radionuklida yang berasosiasi dengan radon dan *thoron* menggunakan teknik Monte-Carlo (WHO, 2009).

### **b. Perangkat Pengukuran Anak Luruh Radon dan *Thoron***

Dalam situasi di mana kajian pajanan radiasi yang lebih akurat diperlukan, penentuan langsung anak luruh radon dapat dilakukan dalam bentuk konsentrasi radon ekuivalen yang setimbang, atau aktivitas setiap anak luruh. Semua metode yang tersedia didasarkan pada pengumpulan anak luruh radon pada filter dan pengukuran aktivitas selanjutnya pada filter.

Bergantung pada teknik analisis, bahan filter yang berbeda dapat digunakan. Misalnya, untuk pengukuran alfa, digunakan filter membran tempat sampel mengendap di permukaan. Contoh perangkat pengukuran anak luruh radon dan *thoron* termasuk pencacah alfa total, detektor anak luruh jejak alfa terintegrasi, dan perangkat spektrometri alfa dengan detektor sawar muka (*surface barrier*) (WHO, 2009).

### **3. Perangkat Pengukuran Radon di Dalam Air**

Keberadaan radon di air tanah disebabkan terutama oleh peluruhan radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) yang dapat dijumpai di batuan, tanah, dan sedikit dari radium yang terlarut di air. Radon juga dapat dihasilkan dari sistem distribusi air dengan konsentrasi radium tinggi dari pengendapan pada pipa besi distribusi. Risiko kanker dari lepasan radon melalui air (*shower*, cuci piring) umumnya dianggap lebih besar daripada risiko air minum yang mengandung radon (WHO, 2009).

Seperti dinyatakan WHO (2009), beberapa teknik untuk pengukuran radon di air termasuk pencacah *gamma* langsung, kamar ion elektret, dan transfer gas melalui membran. Namun, pencacahan sintilasi cair dan pencacahan de-emanasi merupakan teknik yang paling sering digunakan.

### a. Pencacahan Sintilasi Cair

Pencacahan sintilasi cair (LSC, *liquid scintillation counting*) merupakan metode yang paling sensitif dan banyak digunakan untuk mengukur radon di dalam air. Keunggulan LSC, antara lain, adalah akurasi dan presisinya yang tinggi, tingkat deteksi rendah, penyiapan sampel yang singkat, kemampuan untuk mengukur sampel dalam jumlah banyak, dan kemampuan untuk mengubah sampel tanpa pengawasan (WHO, 2009). Meskipun demikian, LSC juga memiliki kekurangan atau keterbatasan. Keterbatasan terbesar adalah harga perangkat LSC itu sendiri yang cukup tinggi, dan semua analisis harus dilakukan di laboratorium.

### b. Pencacahan De-emanasi

Pengukuran radon dalam air dengan de-emanasi melibatkan ekstraksi radon terlarut dari air menjadi gas bebas radon yang kemudian dipindahkan ke perangkat pengukur radon, seperti sel sintilasi. Untuk air yang akan dianalisis, sampel air dipindahkan ke *bubbler*. Dengan menggelembungkan (*bubbling*) sampel air dengan gas yang bebas radon (seperti nitrogen), yang volumenya lima hingga sepuluh kali lipat lebih besar dari volume cairan, de-emanasi air pada suhu normal dapat dicapai.

## B. Protokol Pengukuran

Seperti diuraikan sebelumnya pada awal bagian "Perangkat Pengukuran" di atas, pengukuran radon jangka panjang lebih disukai karena variasi temporal dua kali atau lebih sering terjadi pada pengukuran jangka pendek. Strategi dan protokol pengukuran perlu dibuat untuk mencerminkan perbedaan ini karena pengukuran radon memiliki beberapa macam tujuan. Dalam menentukan pendekatan terbaik untuk setiap situasi, pertimbangan harus diberikan pada variabilitas pengukuran dan nilai prediktif dari hasil—mengingat ketidakpastian yang muncul dari variasi spasial, temporal, dan instrumen.

Untuk memastikan pengukuran radon dapat dibandingkan dengan tingkat acuan radon yang telah ditentukan, konsentrasi radon harus diukur dengan suatu protokol pengukuran tertentu. Protokol pengukuran yang ada umumnya merupakan protokol pengukuran untuk radon permukiman dan untuk radon di perkantoran.

## **1. Pengukuran di Daerah Permukiman**

Pengukuran radon yang dilakukan di daerah permukiman harus dapat memberikan perkiraan dosis individu yang terpercaya dengan biaya rendah. Variasi temporal radon yang tinggi dalam ruangan di banyak tempat membuat pengukuran jangka pendek tidak dapat diandalkan, kecuali jika diperkirakan konsentrasi radon yang terdapat di ruangan tersebut sangat tinggi (WHO, 2009).

Pengukuran tunggal di satu ruangan di mana radon diperkirakan mencapai konsentrasi tertinggi kadang-kadang digunakan untuk memperkirakan konsentrasi radon di seluruh rumah. Pengukuran semacam ini harus dilakukan di ruangan yang sering ditempati, baik pada lantai dengan kontak tanah terbanyak jika radon gas tanah merupakan sumber utama maupun ruang yang sering ditempati dengan aliran udara paling sedikit jika bahan bangunan adalah sumber utama radon. Ketidakpastian yang ditimbulkan dari cara pengukuran ini harus dimasukkan dalam protokol pengambilan keputusan (WHO, 2009).

Protokol pengukuran radon di permukiman mencakup, antara lain, cara penanganan detektor, prosedur pengukuran, dan isian informasi yang perlu dilaporkan.

### **a. Penanganan Detektor**

Untuk memastikan bahwa pengukuran radon dilakukan seakurat mungkin, beberapa hal penting perlu diketahui (IE-EPA, 2019).

- 1) Detektor dipesan sesuai kebutuhan sehingga tidak disimpan dalam waktu lama sebelum digunakan. Detektor tidak boleh disimpan lebih dari satu tahun karena efek penuaan dan pemudaran.

- 2) Detektor bisa disimpan dalam lemari pembeku (*freezer*) jika diperlukan, sampai dikirim ke rumah-rumah yang akan diukur.
- 3) Pengidentifikasi unik harus diterapkan ke setiap detektor untuk memastikan ketertelusuran.
- 4) Detektor yang dikembalikan dari rumah yang diukur harus menyimpan pengidentifikasi uniknya dan menyertakan rincian tanggal awal dan akhir pengukuran.

#### **b. Pengukuran di Daerah Permukiman**

Konsentrasi gas radon harus diukur menggunakan detektor yang mampu mengintegrasikan pajanan radon secara kontinu selama tidak kurang dari tiga bulan. Perangkat semacam ini misalnya detektor gas radon difusi jejak alfa CR-39. Agar memperoleh hasil yang baik, detektor yang dipasang di permukiman harus (IE-EPA, 2019):

- 1) dipasang satu di kamar tidur yang biasa digunakan, dan dipasang satu lagi di ruang tamu;
- 2) hindari menempatkan detektor di samping kusen jendela, radiator, perapian, perangkat televisi, atau di dalam suatu benda;
- 3) detektor harus ditempatkan setidaknya satu meter di atas lantai, misalnya di bagian atas meja rias atau *nachkast* di samping tempat tidur;
- 4) detektor tetap berada di tempatnya tidak kurang dari 3 bulan dan tidak lebih dari 12 bulan; dan
- 5) tanggal pemasangan dan pelepasan detektor dan lokasi penempatan untuk setiap detektor harus dicatat.

#### **c. Isian Informasi**

Isian informasi terkait pemasangan detektor meliputi:

- 1) nama petugas pengukuran dan petugas yang bertanggung jawab atas laporan;
- 2) nama pemilik rumah dan juga nama penghubungnya (jika ada);
- 3) alamat lengkap rumah yang diukur;
- 4) tanggal laporan;

- 5) kode khusus setiap detektor yang tertelusuri ke hasil pengukuran kalibrasinya;
- 6) konsentrasi gas radon terukur di kedua lokasi pengukuran (ruang tidur dan ruang tamu) dalam satuan Bq/m<sup>3</sup>; dan
- 7) perbandingan dengan nilai tingkat acuan yang berlaku.

## 2. Pengukuran di Daerah Kerja

Pengukuran di daerah kerja, termasuk di bangunan yang luas lainnya, seperti sekolah, pertokoan, atau apartemen, dapat berbeda dibandingkan dengan pengukuran di permukiman yang rumahnya berdiri sendiri karena adanya perbedaan struktur bangunan, penempatan, dan operasi ventilasi dan pendingin udara (WHO, 2009).

Lantai paling bawah umumnya diukur dengan perangkat pengukuran dengan kemampuan ukur yang tinggi karena lantai mengalami kontak dengan radon yang cukup tinggi jika radon dari gas tanah menjadi sumber utama radon. Pada beberapa bangunan di suatu permukiman mungkin terjadi variasi radon antar-ruangan sehingga konsentrasi radon pada satu bangunan perlu diukur pada beberapa ruangan. Bangunan yang memiliki konsentrasi radon rata-rata yang tinggi, tetapi hanya ditempati beberapa jam, mungkin perlu diukur selama periode yang ditempati untuk menentukan apakah terdapat variasi radon harian yang signifikan.

Beberapa area di daerah kerja kadang-kadang dapat digolongkan sebagai daerah permukiman. Untuk itu, perlu diperhatikan bahwa tingkat radon yang berlaku untuk daerah kerja dan daerah permukiman cukup berbeda. Tingkat radon di daerah kerja umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan di daerah permukiman. Jika sulit untuk membedakan keduanya, tingkat acuan yang disarankan untuk digunakan adalah tingkat acuan untuk daerah permukiman (IE-EPA, 2019).

Konsentrasi gas radon di daerah kerja harus diukur dengan detektor yang mampu mengintegrasikan pajanan radon selama

periode waktu tidak kurang dari tiga bulan. Detektor yang cocok untuk ini adalah detektor CR-39 atau yang sejenisnya. Penanganan detektor yang akan dipasang di daerah kerja dan informasi hasil pengukuran sama dengan yang dilakukan di daerah permukiman, tetapi jumlah dan lokasi penempatan detektor dapat direkomendasikan sebagai berikut (IE-EPA, 2019).

- 1) Jalur masuk utama radon ke dalam gedung adalah melalui retakan dan celah di lantai sehingga ruang bawah tanah dan lantai dasar cenderung memiliki konsentrasi radon tertinggi. Oleh karena itu, survei daerah kerja biasanya dilakukan di ruang kerja yang terletak di lantai dasar dan di lantai bawah tanah.
- 2) Pengukuran di area, seperti koridor, kamar kecil, dan toilet yang kosong atau jarang ditempati tidak perlu dilakukan. Sebagai aturan umum, area yang jarang ditempati adalah area di mana seseorang tidak mungkin menghabiskan lebih dari 100 jam per tahun waktu kerja mereka.
- 3) Jumlah detektor yang direkomendasikan per daerah kerja didasarkan pada jumlah kantor atau luas lantai yang akan disurvei dan pada jenis daerah kerja. Rekomendasi jumlah detektor yang dipasang diberikan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Rekomendasi Jumlah Detektor yang Dipasang di Daerah Kerja.

Jenis Daerah Kerja	Jumlah Detektor	Contoh
Akomodasi jenis kantor	Satu untuk masing-masing kantor	Bank, sekolah, kantor pemerintahan, tempat praktek profesional
Kantor terbuka, ritel atau bengkel hingga 1.000 m <sup>2</sup> , juga area akses publik	Satu untuk setiap 200 m <sup>2</sup>	Pusat administrasi dan panggilan, industri ringan, serambi hotel
Area seluas 1.000 hingga 5.000 m <sup>2</sup>	Satu untuk setiap 400 m <sup>2</sup>	Gudang, supermarket kecil

Jenis Daerah Kerja	Jumlah Detektor	Contoh
Area sangat luas beberapa ribu m <sup>2</sup>	Satu untuk setiap area yang berbeda dengan kondisi lingkungan yang nyata berbeda. Tidak kurang dari satu untuk setiap 500 m <sup>2</sup>	Pabrik manufaktur atau pabrik proses yang besar, gudang besar
Lantai bawah tanah	Satu untuk setiap ruang terpisah, bagian atau area berapa pun ukurannya, meskipun jarang digunakan (Namun, hunian lebih dari 100 jam/tahun)	Lemari besi bank, pusat kendali mekanis dan/ atau listrik.

Sumber: IE-EPA (2019)

- 4) Jika daerah kerja terdiri atas beberapa jenis area kerja yang berbeda, setiap jenis kerja harus dipandang terpisah untuk menentukan jumlah detektor. Misalnya, di pabrik jumlah detektor yang akan dipasang di kantor harus ditentukan dengan jumlah kantor di area lantai dasar atau lantai bawah tanah, sedangkan jumlah detektor yang akan dipasang di gudang atau bengkel harus ditentukan secara independen berdasarkan luas ruang kerja (lihat Tabel 4.4).
- 5) Konsentrasi radon dapat bervariasi secara signifikan di antara bangunan yang berdekatan sehingga konsentrasi radon di gedung yang berdekatan atau bersebelahan tidak boleh dianggap sebagai indikasi konsentrasi di ruang kerja tertentu. Oleh karena itu, jika daerah kerja dibagi atas sejumlah bangunan yang berdekatan, setiap bangunan perlu disurvei secara terpisah.
- 6) Dalam hal bangunan bertingkat yang ditempati oleh lebih dari satu pemilik atau penyewa ruangan kerja, pengukuran yang dilakukan di lantai dasar dan ruang bawah tanah biasanya cukup untuk menilai kesesuaian dengan tingkat referensi untuk semua daerah kerja di dalam gedung.
- 7) Jika pemilik atau penyewa ruangan kerja yang berbeda bertanggung jawab atas beberapa lantai gedung bertingkat, pemilik atau

penyewa ruangan yang stafnya ditempatkan di lantai atas harus melakukan pengukuran radon, kecuali dapat memastikan bahwa konsentrasi radon di lantai dasar dan daerah kerja bawah tanah tidak melebihi tingkat acuan.

### 3. Rencana Aksi Nasional tentang Radon

Untuk mengurangi risiko radon terhadap populasi secara keseluruhan dan risiko terhadap individu, WHO mengusulkan agar setiap negara menyusun suatu program rencana aksi nasional tentang radon (WHO, 2009). Pengembangan program radon melibatkan pembentukan struktur organisasi yang jelas dan serangkaian komponen untuk memantau tingkat konsentrasi radon, memfasilitasi pencegahan dan mitigasi, dan menyediakan layanan komunikasi risiko radon kepada masyarakat dan pemangku kepentingan lainnya.

Beberapa negara telah menyusun rencana aksi nasional terkait radon ini. Di Inggris, selain menguraikan pengetahuan dasar radon seperti sifat, risiko kesehatan, dan distribusinya di tanah Inggris, publikasi rencana aksi menguraikan strategi yang difokuskan pada pengendalian jalur pajanan radon. Untuk bangunan baru, strategi ditujukan untuk mencegah terjadinya pajanan tinggi melalui persyaratan proteksi radon di bangunan dan daerah sekelilingnya yang memiliki potensi tingkat radon yang tinggi (PHE, 2018).

Di Swiss, rencana aksi radon nasional memuat tujuan strategi pengendalian radon dari tahun 2021 hingga tahun 2050 sebagai berikut (FOPH, 2021).

- 1) Konsentrasi radon akan diukur secara andal.
- 2) Konsentrasi radon serendah mungkin akan diupayakan untuk bangunan baru ( $100 \text{ Bq/m}^3$ ) dan kualitas udara dalam ruangan secara umum akan ditingkatkan.
- 3) Keadaan bangunan eksis akan diperbaiki secara bertahap dengan memanfaatkan sinergi dengan pekerjaan renovasi.

- 4) Anak-anak akan terlindungi dari radon melalui tindakan khusus di sekolah dan taman kanak-kanak.
- 5) Di daerah kerja, orang tidak boleh terkena pajanan lebih dari 1.000 Bq/m<sup>3</sup> secara permanen tanpa tindakan mitigasi.

Di Belgia, sejak tahun 2005 pemerintah pusat telah melangsungkan pembahasan dengan berbagai pemerintah daerah yang memiliki tingkat konsentrasi radon yang tinggi untuk mengurangnya dan melakukan tindakan pencegahan lebih lanjut (FANC, 2021). Rencana aksi radon nasional di Belgia memiliki tujuan jangka pendek dan jangka panjang. Tujuan jangka pendek terutama memberikan pelatihan teknis, mengurangi pajanan pada populasi, dan melakukan remediasi pada bangunan yang memiliki konsentrasi radon di atas tingkat acuan. Sementara itu, tujuan jangka panjang memberikan pedoman tingkat radon pada bangunan baru sebesar 100 Bq/m<sup>3</sup>, mempertahankan tingkat pajanan radon yang rendah di beberapa daerah tertentu, dan mengusahakan distribusi radon di daerah yang konsentrasi radonnya tinggi untuk mendekati distribusi di daerah dengan risiko rendah.

Di Jerman, rencana aksi radon dimaksudkan untuk secara berkelanjutan mengurangi jumlah kasus kanker paru-paru yang disebabkan oleh pajanan radon dan produk peluruhannya yang berumur pendek (BMU, 2019). Untuk mencapai tujuan ini, ruangan dan tempat kerja yang layak huni dengan konsentrasi aktivitas radon tinggi di udara perlu diidentifikasi dan diambil tindakan untuk mengurangi konsentrasi aktivitas radon rata-rata di udara dalam ruangan di gedung-gedung di seluruh Jerman. Selain itu, riset, pengembangan, pendidikan, dan pelatihan harus didorong untuk memastikan bahwa proteksi radon terbaik dapat diberikan pada masa depan dan dalam jangka panjang.

Di Australia, rencana aksi radon menguraikan strategi jangka panjang untuk mengurangi kanker paru-paru akibat radon (ARPANSA, t.t.). Rencana aksi dimaksudkan untuk meminimalkan risiko radon dengan melakukan kegiatan pada empat bidang kunci.

- 1) Meningkatkan kesadaran masyarakat dan pengelola daerah kerja mengenai potensi risiko pajanan radon, dan mendorong tindakan untuk melakukan untuk mengurangi pajanan radon tersebut.
- 2) Menilai daerah kerja dan bangunan umum yang mungkin memiliki konsentrasi radon yang tinggi.
- 3) Memberikan saran dan bimbingan kepada pengelola daerah kerja dan tempat umum yang mempunyai konsentrasi radon melebihi tingkat acuan.
- 4) Meminimalkan konsentrasi radon pada gedung-gedung baru di daerah dengan potensi radon tinggi.

Di Amerika Serikat, rencana aksi radon nasional menetapkan bahwa tujuan aksi adalah untuk menemukan, memperbaiki, dan mencegah tingkat radon yang tinggi dalam ruangan pada 8 juta bangunan pada tahun 2025, dan mencegah 3.500 kematian akibat kanker paru-paru per tahun. Berdasarkan rencana aksi ini, para pemimpin dari berbagai sektor bekerja sama untuk merencanakan, memandu, dan mempertahankan tindakan nasional untuk mencegah terjadinya pajanan radon di berbagai daerah permukiman dan perkantoran (EPA, 2021).

IAEA menyatakan bahwa rencana aksi radon nasional harus dikoordinasikan dengan program nasional lain lainnya untuk kualitas udara dalam ruangan dan efisiensi energi (IAEA, 2015). Hal ini, misalnya, untuk mencegah dibangunnya rumah dengan desain yang dikatakan hemat energi, tetapi justru mengakibatkan pertukaran udara menjadi rendah. Dengan meningkatkan efisiensi termal suatu bangunan, makin tinggi suhu udara di dalam ruangan, yang dapat mengakibatkan penurunan tekanan di dalam bangunan, makin meningkat aliran masuk Rn-222 dari tanah ke dalam bangunan.

Indonesia sampai saat ini belum memiliki rencana aksi radon nasional seperti di atas. Jika mengacu pada rencana aksi radon nasional di berbagai negara seperti yang diuraikan di atas, rencana aksi radon nasional selanjutnya diinisiasi oleh instansi pemerintah

yang melakukan tugas dan fungsi riset dalam keselamatan radiasi, yaitu Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). BRIN selanjutnya dapat melakukan kerja sama dengan berbagai perguruan tinggi untuk melaksanakan pengukuran di berbagai daerah di wilayah Indonesia. Sebelumnya, BRIN dengan perguruan tinggi dan berbagai instansi pemerintah lain yang terkait perlu menyusun perangkat pengukuran dan protokol pengukuran yang akan dipakai.

### C. Dosimetri Radon

Risiko kanker paru-paru dari anak luruh radon yang dihirup bergantung pada pajanan akumulasi anak luruh radon yang diterima jaringan paru-paru sebagai fungsi waktu atau usia. Dalam dosimetri radon digunakan besaran dan satuan khusus untuk mengarakterisasi konsentrasi radon dan anak luruh radon di udara serta pajanan inhalasi yang dihasilkannya. Selanjutnya, model dosimetri dari saluran pernapasan manusia digunakan untuk perhitungan dosis yang diserap ke jaringan target paru-paru per satuan pajanan anak luruh radon.

#### 1. Besaran dan Satuan Khusus

Konsentrasi aktivitas radon adalah aktivitas per satuan volume gas yang dinyatakan dalam satuan  $\text{Bq m}^{-3}$ . Dosis ke paru-paru terutama timbul dari inhalasi anak luruh radon di udara dan partikel alfa yang dipancarkan selama peluruhannya dan dari anak luruhnya yang berumur pendek. Karena hal ini, besaran “konsentrasi energi alfa potensial (PAEC, *potential alpha energy concentraion*)” dari campuran anak luruh radon secara historis digunakan sebagai ukuran konsentrasi yang merupakan indikator dosis dan risiko. PAEC adalah energi alfa total yang pada akhir proses dipancarkan oleh peluruhan anak luruh yang berumur pendek dalam satuan volume udara. Satuan historis dari PAEC adalah tingkat kerja (WL, *working level*). Konsentrasi 1 WL didefinisikan sebagai kombinasi dari anak luruh radon berumur

pendek dalam  $1 \text{ m}^3$  udara yang akan menghasilkan pancaran energi alfa sebesar  $1.300 \times 10^8 \text{ MeV}$  (UNSCEAR, 2020).

Karena  $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$  maka:

$$1 \text{ WL} = 1.300 \times 10^8 \text{ MeV m}^{-3} \text{ or } 2.08 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3}$$

Konsentrasi ekuivalen setimbang (EEC, *equilibrium equivalent concentration*) didefinisikan sebagai konsentrasi aktivitas radon gas dalam kesetimbangan dengan anak luruhnya yang berumur pendek yang akan memiliki konsentrasi energi alfa potensial yang sama dengan campuran non-setimbang yang ada.

Satu WL sekitar sama dengan  $3.750 \text{ Bq m}^{-3}$  dari EEC Rn-222 (gas radon) atau sekitar  $275 \text{ Bq m}^{-3}$  dari EEC Rn-220 (gas *thoron*). Dengan demikian, EEC adalah ukuran konsentrasi anak luruh radon, atau lebih tepat PAEC. EEC (dalam  $\text{Bq m}^{-3}$ ) dapat dikonversi ke PAEC melalui:

$$1 \text{ Bq m}^{-3} = 5.56 \times 10^{-9} \text{ J m}^{-3} = 2.67 \times 10^{-4} \text{ WL (Rn-222)}$$

$$1 \text{ Bq m}^{-3} = 7.56 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-3} = 3.64 \times 10^{-3} \text{ WL (Rn-220)}$$

Faktor kesetimbangan, F, didefinisikan sebagai rasio EEC terhadap konsentrasi gas radon ( $C_{\text{Rn}}$ ). Dengan kata lain, faktor kesetimbangan adalah rasio PAEC untuk campuran sebenarnya anak luruh radon dengan yang seharusnya berlaku pada kesetimbangan radioaktif:

$$\text{EEC} = F \times C_{\text{Rn}}$$

Nilai F bervariasi dari 0 (gas radon yang terdifusi keluar dari permukaan kasar mineral) hingga 1 (gas radon setelah tiga jam pada udara yang stagnan). Faktor kesetimbangan sebesar 0,4 biasanya diambil sebagai nilai bawaan (*default*).

Pajanan adalah integral waktu dari konsentrasi. Pajanan energi alfa potensial (PAE) adalah integral waktu PAEC di udara dan memiliki satuan historis tingkat kerja bulan (WLM, *working level month*). WLM didefinisikan sebagai pajanan kumulatif dari menghirup atmosfer

pada konsentrasi 1 WL untuk bulan kerja 170 jam. Hubungan antara satuan historis dan SI adalah:

$$1 \text{ WLM} = 3.54 \text{ mJ h m}^{-3}$$

$$1 \text{ mJ h m}^{-3} = 0.282 \text{ WLM}$$

Pajanan dalam EEC (dalam h Bq m<sup>-3</sup>) dapat dikonversi menjadi paparan PAE melalui hubungan:

$$1 \text{ h Bq m}^{-3} = 5.56 \times 10^{-6} \text{ mJ h m}^{-3} = 1.57 \times 10^{-6} \text{ WLM (}^{222}\text{Rn)}$$

$$1 \text{ h Bq m}^{-3} = 7.56 \times 10^{-5} \text{ mJ h m}^{-3} = 2.14 \times 10^{-5} \text{ WLM (}^{220}\text{Rn)}$$

Untuk Rn-222, jika pajanan dinyatakan dalam konsentrasi gas radon, kedua satuan saling terkait melalui faktor kesetimbangan:

$$1 \text{ WLM} = (6,38 \times 10^5 / F) \text{ h Bq m}^{-3}.$$

ICRP menyatakan bahwa WL khusus digunakan untuk menyatakan pajanan di lingkungan yang kompleks, seperti di tambang bawah tanah (ICRP, t.t.). Untuk konsentrasi <sup>222</sup>Rn di udara, besaran yang digunakan adalah Bq m<sup>-3</sup>.

## 2. Model Dosimetri

Perhitungan dosis serap ke jaringan target paru-paru per satuan pajanan anak luruh radon dapat dilakukan dengan model dosimetri saluran pernapasan manusia. Model dosimetri untuk saluran pernapasan digunakan untuk menggambarkan morfometri, fisiologi pernapasan, pengendapan bahan yang dihirup, klirens dari saluran pernapasan dan dosimetri, termasuk lokasi target jaringan dan sel yang berisiko (UNSCEAR, 2020).

Model dosimetri paru-paru dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu yang menggunakan model kompartemen semiempiris, seperti model saluran pernapasan manusia ICRP (HRTM, *human respiratory track model*) dan yang menggunakan model generasi saluran napas (Mc Laughlin, 2019). Model terakhir dapat dibagi lagi atas model generasi saluran napas deterministik dan model generasi saluran napas stokastik (UNSCEAR, 2020).

Sementara model ICRP dapat diterapkan pada inhalasi untuk setiap radionuklida, model generasi saluran napas secara khusus dikembangkan untuk dosimetri anak luruh radon. Perbedaan antara model ICRP dan model generasi saluran napas adalah (Tokonami, 2019).

- 1) Struktur paru hanya terdiri atas tiga komponen, saluran napas bronkial besar (BB), saluran napas bronkiolar kecil (bb), dan regio alveolar-interstitial (AI).
- 2) Fraksi pengendapan dalam komponen trakeobronkial (TB) ( $TB = BB + bb$ ) dan AI diperoleh melalui penyesuaian dengan data eksperimen manusia dan dinyatakan sebagai fungsi parameter partikel dan aliran. (semi-empiris).
- 3) Jalur klirens dan waktu paruh terkait mengacu pada seluruh kompartemen dan bukan pada satu generasi jalan napas.
- 4) Dosis untuk sel target bronkial dihitung untuk aktivitas alfa total dalam kompartemen tertentu dan bukan untuk aktivitas permukaan stabil (*steady state*) pada generasi saluran napas silindrik individual.

Untuk dapat dibandingkan dengan model generasi saluran napas, struktur HRTM dibagi atas tiga kompartemen, yaitu BB (saluran udara bronkial besar), bb (saluran udara bronkiolar) dan AI (daerah alveolar-interstitial). Dengan pendekatan ini, dosis serap dihitung dengan basis aktivitas alfa total yang mengendap di setiap kompartemen, dengan deposisi difusi menjadi mekanisme utama yang terlibat.

Tabel 4.4 memperlihatkan perbandingan dosis serap pada paru-paru yang dihitung dengan tiga model dosimetri RADEP/IMBA, RADOS, dan IDEAL. Model RADEP/IMBA adalah model yang didasarkan pada model HRTM ICRP, model RADOS adalah model generasi saluran napas deterministik, dan model IDEAL adalah model generasi saluran napas stokastik. Seperti terlihat pada Tabel 4.5, walaupun terdapat perbedaan dalam metodologi dan komputasinya, ketiga model menghasilkan faktor konversi dosis yang tidak jauh berbeda, meskipun prediksi dari dua model generasi saluran napas secara

konsisten lebih rendah dibandingkan dengan yang menggunakan model RADEP/IMBA.

**Tabel 4.5** Perbandingan dosis serap pada paru-paru yang dihitung dengan tiga model dosimetri radon.

Kompartemen	Mode	Dosis serap per WLM (mGy WLM <sup>-1</sup> )		
		RADEP/IMBA	RADOS	IDEAL
BB*	Tidak terikat	76,5	81,1	76,7
	Terikat	7,9	6,1	7,0
bb	Tidak terikat	25,0	10,4	4,9
	Terikat	5,6	3,3	3,3
Al	Tidak terikat	0,01	-	0,003
	Terikat	0,4	0,3	0,3

Keterangan: Dosis<sub>BB</sub> = 0,5 D<sub>bas</sub> + 0,5 D<sub>sec</sub>

Sumber: Winkler-Heil et al. (2007)

### 3. Parameter Dosimetri

Beberapa parameter yang bersifat personal dan lingkungan memengaruhi dosimetri paru-paru dari radon. Parameter yang bersifat personal, antara lain, adalah (Tokonami, 2019):

- 1) geometri ekstra-toraksik (hidung dan mulut);
- 2) struktur anatomi dan dimensi saluran napas paru-paru;
- 3) aktivitas fisik dan parameter pernapasan terkait;
- 4) kecepatan klirens bronkial;
- 5) distribusi spasial dan frekuensi sel target sensitif pada epitelium bronkial;
- 6) usia manusia yang menjadi subjek; dan
- 7) status merokok.

Adapun faktor lingkungan yang memengaruhi dosimetri, antara lain, adalah (Tokonami, 2019):

- 1) distribusi ukuran partikel terikat dan tidak terikat;
- 2) fraksi terikat dan tidak terikat; dan
- 3) konsentrasi aktivitas anak luruh radon dan distribusi spesifik nuklidanya.

## D. Penjaminan Mutu Pengukuran Radon

Penjaminan mutu merupakan konsep yang cukup luas yang mencakup semua hal yang secara individual atau secara kolektif memengaruhi mutu pengukuran. Penerapan standar dan pedoman penjaminan mutu sangat dianjurkan untuk memastikan kepercayaan terhadap hasil suatu pengukuran.

Selain penjaminan mutu, kendali mutu juga sangat dianjurkan untuk diterapkan dalam proses pengukuran. Berdasarkan ISO (2015), penjaminan mutu adalah bagian dari manajemen mutu yang fokus dalam memberikan kepercayaan bahwa persyaratan mutu akan dipenuhi, sedangkan kendali mutu adalah bagian dari manajemen mutu yang fokus dalam memenuhi persyaratan mutu.

Dalam pengukuran radon, beberapa aspek terkait penjaminan mutu dan kendali mutu yang memengaruhi pengukuran radon adalah (WHO, 2009):

- 1) rencana penjaminan mutu;
- 2) konsentrasi minimum yang dapat dideteksi;
- 3) interkomparasi;
- 4) uji kinerja dan “paku buta”;
- 5) uji buta;
- 6) metode perangkat kontinu, yang meliputi kalibrasi, latar belakang, cek internal, duplikat, interkomparasi informal, cek silang; dan
- 7) metode perangkat terintegrasi dan setimbang, yang meliputi kalibrasi, duplikat, pengukuran latar belakang laboratorium, pengukuran kendali latar belakang lapangan, *spikes*.

Selain itu, *American National Standards Institute* (ANSI) bersama dengan *American Association of Radon Scientists and Technicians* (AARST) telah menyusun standar praktis ANSI/AARST MS-QA-2019 (ANSI/AARST, 2019). Standar praktis ini menetapkan persyaratan minimum untuk sistem mutu yang dirancang untuk mengukur konsentrasi gas  $^{222}\text{Rn}$  di udara oleh para profesional dan laboratorium yang berkualifikasi, yang datanya dimaksudkan untuk

digunakan untuk menentukan kebutuhan, atau keberhasilan mitigasi radon. Standar ini berlaku untuk berbagai perangkat alat ukur radon yang digunakan untuk pengukuran di dalam ruangan, terutama di lingkungan permukiman atau bangunan yang tidak terkait dengan kepemilikan atau penanganan bahan radioaktif.

Secara internasional juga telah ada suatu organisasi yang bernama *The International Radon Measurement Association* (IRMA) (IRMA, t.t). IRMA bertujuan untuk mengumpulkan organisasi dari seluruh dunia yang melakukan pengujian radon. Salah satu persyaratan untuk menjadi anggota IRMA adalah membuktikan bahwa praktik organisasi didasarkan pada standar mutu, antara lain standar ISO 17025.

## **BAB V**

# **Proteksi Radiasi terhadap Radon**

Pada paragraf 44 dari publikasi 103 ICRP dinyatakan bahwa sistem proteksi radiologi ICRP berlaku untuk semua pajanan radiasi dari setiap sumber, apa pun ukuran dan asalnya (ICRP, 2007). Selanjutnya, paragraf 45 menyebutkan bahwa rekomendasi ICRP mencakup pajanan, baik dari sumber alami maupun buatan, dan dapat diterapkan secara keseluruhan hanya untuk situasi ketika sumber atau jalur pajanan yang mengarah ke individu dapat dikendalikan dengan cara-cara yang relevan. Sumber radiasi dalam situasi ini disebut sebagai sumber terkendali.

Mengingat jalur pajanan sejak dari sumber radiasi hingga ke individu yang terpajan dapat dikendalikan, pajanan radon di dalam ruangan dapat dikatakan sebagai sumber terkendali. Adapun untuk pajanan radon di luar ruangan, meskipun konsentrasi di permukaan tanah dapat tinggi, gas radon akan menipis melalui dispersi ke atmosfer sehingga konsentrasi di udara ambien umumnya rendah (UNSCEAR, 2010). Oleh karena itu, pajanan manusia dari radon di luar ruangan umumnya sulit untuk dikendalikan.

## A. Situasi Paparan dan Kategori Paparan

Berdasarkan Standar Keselamatan IAEA (IAEA, 2014), Rn-222 dan anak luruhnya serta Rn-220 dan anak luruhnya, di daerah kerja (selain di daerah kerja yang memanfaatkan anak luruh uranium dan anak luruh torium yang karena dapat dikendalikan menjadi dikategorikan sebagai situasi paparan terencana), di permukiman, dan bangunan lain dengan tingkat hunian tinggi oleh anggota masyarakat, dikategorikan sebagai situasi "paparan eksisting". Untuk situasi paparan eksisting ini, pemerintah harus memastikan bahwa situasi paparan yang telah diidentifikasi agar dievaluasi untuk menentukan paparan kerja dan paparan publik mana yang menjadi perhatian utama dari segi proteksi radiasi.

Di tambang uranium, radon sering dikelola dengan cara yang sama seperti situasi paparan terencana karena tambang uranium merupakan bagian dari daur bahan bakar nuklir, dan juga karena selain menerima paparan radon, pekerja juga menerima paparan kerja, seperti paparan eksternal dari radiasi *gamma* dan inhalasi atau ingesti debu (ICRP, 2014). Dalam hal ini badan pengawas setempat harus memutuskan situasi paparan radon lain mana yang melibatkan pekerja yang sejak awal dapat dianggap sebagai situasi paparan terencana.

Dalam hal kategori paparan, ICRP telah membedakan paparan atas tiga kategori, yaitu paparan medis, paparan kerja, dan paparan publik. Sebagai paparan yang dapat timbul di daerah kerja, radon bersifat adventisius, yang berarti tidak disebabkan oleh atau terkait dengan sifat pekerjaan yang dilakukan, tetapi muncul hanya melalui pekerja dan/atau bahan yang hadir di daerah kerja. Radon tidak dikelola dengan mengendalikan paparan individu karena sifat adventisius ini, tetapi dengan mengendalikan bangunan atau lokasi untuk memastikan dilakukannya proteksi secara menyeluruh pada pekerja radiasi (ICRP, 2014).

## **B. Justifikasi, Optimisasi, dan Limitasi Dosis**

Prinsip proteksi radiasi yang meliputi justifikasi, optimisasi proteksi, dan limitasi dosis berlaku untuk semua kegiatan proteksi radiasi, tidak terkecuali untuk proteksi radiasi terhadap radon. Penggunaan prinsip proteksi radiasi khusus untuk radon secara singkat akan dibahas pada subbab ini.

### **1. Justifikasi**

Pajanan radon dapat dikendalikan terutama dengan tindakan yang memodifikasi jalur pajanan, dan biasanya tidak dengan tindakan langsung pada sumbernya. Dalam keadaan ini, prinsip justifikasi digunakan dalam pengambilan keputusan mengenai diterapkan atau tidaknya strategi proteksi terhadap pajanan radon (ICRP, 2014). Keputusan ini, yang akan selalu menimbulkan beberapa kerugian, harus dapat dijustifikasi dalam pengertian bahwa keputusan tersebut harus lebih banyak membawa kebaikan daripada kerugiannya.

Tanggung jawab untuk menilai justifikasi untuk strategi proteksi radon untuk memastikan manfaat keseluruhan bagi masyarakat berada di tangan pemerintah atau otoritas nasional terkait. Karakterisasi situasi, seperti pengkajian konsentrasi radon dan identifikasi daerah rawan radon, pertimbangan tentang prioritas kesehatan masyarakat, dan faktor sosial dan ekonomi, diperlukan oleh otoritas nasional untuk menentukan perlu atau tidaknya strategi proteksi radon dijustifikasi dalam suatu negara.

### **2. Optimisasi Proteksi**

Berdasarkan prinsip optimisasi, kemungkinan terjadinya pajanan, jumlah orang yang terpajan, dan besarnya dosis individu, harus dijaga serendah mungkin, dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial (ICRP, 2007). Hal ini berarti bahwa tingkat proteksi harus sebaik mungkin dalam keadaan yang ada, memaksimalkan margin keuntungan daripada kerugian. Untuk menghindari hasil yang sangat tidak seimbang dari prosedur optimisasi ini, dosis atau risiko bagi

individu dari sumber tertentu harus dapat dibatasi. Konsep yang penting dalam optimisasi proteksi ini adalah tingkat acuan.

### a. Tingkat Acuan

Konsep tingkat acuan digunakan pada situasi pajanan darurat dan eksisting untuk mengurangi semua dosis ke tingkat yang serendah mungkin, dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial. Tingkat acuan juga merupakan tingkat dosis atau aktivitas yang di atas tingkat tersebut pajanan tidak boleh terjadi, dan bukan pembatas antara *aman* dan *bahaya* atau mencerminkan perubahan kualitatif dalam risiko kesehatan bagi individu (ICRP, 2014).

Tingkat acuan untuk situasi pajanan eksisting telah direkomendasikan dalam pita 1–20 mSv (ICRP, 2007). Nilai ini berlaku jika individu menerima manfaat langsung dari situasi pajanan, dan jika pajanan dapat dikendalikan pada sumbernya, atau dengan tindakan pada jalur pajanannya. Pajanan radon, di lain pihak, secara prinsip tidak dapat dikendalikan pada sumbernya, tetapi dapat dikendalikan melalui jalur pajanan dengan tindakan pencegahan dan mitigasi yang tidak mengganggu individu. Manusia dapat terus berada di dalam gedung tanpa perlu pindah ke gedung lain atau bahkan ke wilayah lain karena secara umum menerima manfaat langsung dari keberadaannya di dalam ruangan.

Pada publikasi 65-nya, ICRP mengadopsi nilai dosis efektif 10 mSv untuk tingkat acuan individu (ICRP, 1993). Untuk kesinambungan dan kepraktisan, ICRP tetap merekomendasikan nilai 10 mSv/tahun untuk tingkat acuan individu pada publikasi 103-nya (ICRP, 2007). Di samping itu, direkomendasikan pula penggunaan tingkat acuan turunan dalam konsentrasi radon di dalam ruangan (dalam Bq m<sup>-3</sup>), yang merupakan besaran yang dapat diukur.

### b. Tingkat Acuan Turunan untuk Radon

Tingkat acuan turunan untuk radon di permukaan diberikan sebagai 300 Bq m<sup>-3</sup> (ICRP, 2010), melanjutkan rekomendasi yang diberikan sebelumnya (ICRP, 2007). Nilai 300 Bq m<sup>-3</sup> juga diadopsi

pada publikasi Standar Keselamatan Dasar IAEA (IAEA, 2014), yang juga disponsori, dan dengan demikian juga disetujui, oleh beberapa organisasi internasional lainnya, yaitu FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, dan WHO.

ICRP merekomendasikan bahwa setiap negara menetapkan sendiri nilai tingkat acuan turunan tersebut sesuai dengan kondisi di negara mereka masing-masing karena kondisi ekonomi dan sosial antarnegara berbeda dengan tetap menggunakan proses optimisasi proteksi. Namun, ICRP merekomendasikan nilai tingkat acuan tersebut tetap dalam rentang 100–300 Bq m<sup>-3</sup>, dan meskipun risiko kanker paru-paru akibat radon lebih besar pada perokok dibandingkan dengan nonperokok, ketentuan terkait proteksi dari radon tidak perlu membedakan antara perokok dan nonperokok (IAEA, 2014).

### 3. Limitasi Dosis

Aplikasi limitasi dosis merupakan prinsip ketiga dari sistem proteksi radiasi. Prinsip ini berlaku untuk individu dan hanya untuk situasi pajanan terencana. Untuk pekerja yang sebenarnya menerima pajanan dari situasi pajanan terencana tetapi karena pekerjaannya menerima dosis radon, seperti pekerja tambang maka prinsip ini menjadi berlaku. Nilai batas dosis untuk pajanan kerja dinyatakan dalam dosis efektif 20 mSv per tahun. Ini dirata-ratakan selama periode lima tahun (atau 100 mSv dalam lima tahun), dengan ketentuan tambahan bahwa dosis efektif tidak melebihi 50 mSv dalam satu tahun tertentu.

### C. Pencegahan dan Mitigasi

Seperti telah diuraikan pada Bab II, radon, sebagai gas, bergerak dari tanah dan bebatuan melalui konveksi dan berdifusi ke lapisan atas tanah dan kemudian ke atmosfer. Radon masuk ke dalam gedung sebagai akibat dari aksi angin dan perbedaan tekanan yang disebabkan oleh kepadatan udara. Infiltrasi gas tanah merupakan sumber radon terpenting di tempat tinggal dan bangunan lainnya. Bahan bangunan dan konstruksi serta air yang diambil dari sumur merupakan sum-

ber radon lainnya, meskipun tingkat konsentrasinya cukup rendah sehingga kadang dapat diabaikan.

Di beberapa wilayah di dunia, khususnya di negara-negara dengan geologi tertentu dan dengan musim dingin yang panjang dan membekukan, beberapa rumah dapat memiliki tingkat radon yang sangat tinggi. Jika aktivitas konsentrasi radon dalam bangunan menjadi cukup besar sehingga menjadi isu bagi kesehatan masyarakat, pemerintah suatu negara harus menetapkan rencana tindakan aksi untuk mengurangi konsentrasi aktivitas radon pada bangunan yang ada dan yang akan didirikan. Salah satu unsur dari rencana tindakan aksi tersebut adalah memasukkan prosedur tindakan pencegahan dan mitigasi yang tepat ke dalam persyaratan pendirian bangunan untuk mencegah masuknya Rn-222. Otoritas bangunan dapat menentukan apakah persyaratan diberlakukan untuk semua bangunan baru, atau hanya untuk bangunan yang akan didirikan di daerah dengan tingkat radon yang tinggi.

Sistem pencegahan dan mitigasi memerlukan beberapa kriteria desain sebagai berikut (WHO, 2009):

- 1) mampu mengurangi konsentrasi radon hingga di bawah tingkat acuan;
- 2) aman dan tidak perlu diulang dari awal;
- 3) tahan lama dan berfungsi selama bangunan berdiri;
- 4) kinerja mudah dipantau;
- 5) tidak berisik dan tidak mengganggu;
- 6) pemasangan, operasi, dan pemeliharannya murah; dan
- 7) mudah untuk memasang kipas tambahan jika menggunakan sistem depresi tanah.

## 1. Tindakan Pencegahan

Strategi proteksi radon harus mencakup tindakan pencegahan hingga pengendalian pajanan radon yang dapat timbul pada masa depan. Terlepas dari lokasi di dalam ruangan, kategori individu yang ada dalam ruangan, dan jenis situasi pajanan, pajanan radon dapat diatasi

dengan mempertimbangkan masalah paparan radon selama tahap perencanaan, desain, dan konstruksi bangunan (ICRP, 2014).

Pertimbangan awal dalam tindakan pencegahan adalah dengan melakukan perencanaan lahan dan persyaratan mendirikan bangunan untuk bangunan baru. Potensi setiap bangunan untuk memiliki konsentrasi radon yang tinggi sangat bervariasi, terutama karena adanya variasi kondisi geologi. Variasi ini harus dipertimbangkan dalam proses perencanaan pembangunan (ICRP, 2014).

Persyaratan izin mendirikan bangunan (IMB), baik dari pemerintah pusat maupun daerah, pada dasarnya perlu memasukkan klausul terkait upaya pencegahan radon bagi pembangunan gedung baru. Penerapan tindakan pencegahan radon selama desain dan konstruksi bangunan dianggap sebagai cara yang paling hemat biaya. Jika diterapkan dengan benar, sejalan dengan waktu tindakan tersebut akan mengurangi tingkat radon rata-rata nasional dan mengurangi jumlah bangunan baru dengan konsentrasi radon di atas atau mendekati tingkat acuan turunan nasional (ICRP, 2014).

Biarpun demikian, persyaratan untuk memperoleh IMB di Indonesia belum memasukkan klausul semacam di atas. Di provinsi DKI Jakarta, misalnya, untuk mendapatkan IMB, hanya diperlukan persyaratan sebagai berikut (Portal DKI, t.t).

- 1) Surat permohonan.
- 2) Surat kuasa permohonan IMB jika nama yang tertera di sertifikat lebih dari satu.
- 3) Surat kuasa kepada pemilik izin pelaku teknis bangunan (IPXB) untuk bangunan rumah tinggal dengan luas bangunan di atas 200 m<sup>2</sup> atau jumlah lantai bangunan paling banyak tiga.
- 4) Identitas pemohon/penanggung jawab: KTP untuk WNI dan kartu izin tinggal terbatas (KITAS) atau paspor untuk WNA.
- 5) Akte pendirian dan SK pengesahan pendirian untuk badan hukum/badan usaha.
- 6) Bukti kepemilikan tanah.
- 7) Asli ikhtisar tanah.

- 8) Bukti pembayaran pajak bumi dan bangunan (PBB) tahun terakhir.
- 9) Dokumen dan surat terkait ketetapan rencana kota (KRK) atau surat penunjukan penanggung jawab, dan rincian teknis bangunan lainnya.
- 10) Gambar perencanaan arsitektur yang disahkan oleh unit pelaksana pelayanan terpadu satu pintu.
- 11) Gambar bangunan rumah tinggal.
- 12) IMB terdahulu beserta gambar dan lampirannya.

Secara teknis, tindakan pencegahan dapat dilakukan dengan (1) menggunakan membran kedap air secara terus-menerus yang dirancang untuk mengisolasi bangunan dari tanah di seluruh area lantai bangunan dan (2) penyediaan depresurisasi tanah atau depresurisasi *subfloor* bangunan. Pada saat yang bersamaan, semua kemungkinan jalur masuk pajanan ditutup dengan lantai pelat beton ke dalam gedung (IAEA, 2021).

#### a. Membran

Membran antara tanah dan dalam ruangan dapat digunakan sebagai strategi pencegahan radon yang berdiri sendiri atau dikombinasikan dengan teknik lain, seperti *depressurization* tanah pasif atau aktif. Membran juga dapat membantu membatasi migrasi kelembapan ke dalam ruangan.

Jenis dan ketebalan membran untuk digunakan dalam pencegahan radon dalam pembangunan gedung baru cukup banyak tersedia. Membran dipasang di bawah lempengan beton curah karena dapat menahan beton di tempatnya saat diawetkan sehingga beton tidak mengisi lapisan kerikil yang permeabel, dan dapat membantu menjembatani setiap retakan pada masa depan, yang terjadi pada beton setelah semua penyekatan terkait telah dilakukan. Membran di bawah pelat tuang tidak perlu kedap udara dan juga tidak perlu terlalu tebal selama pelat retak dan penetrasi di atas pelat disekat (IAEA, 2021).

Membran yang digunakan untuk menyekat ruang perayapan harus tahan lama dan disekat kedap udara untuk menghentikan masuknya gas tanah ke dalam struktur. Potongan-potongan membran harus tumpang tindih dengan 300 mm dan disegel satu sama lain dengan cara kedap udara permanen. Penyekatan perlu diperiksa setelah selesai pemasangannya untuk memastikan tingkat kedap udara yang tinggi untuk memastikan bahwa langkah pengurangan radon selanjutnya dapat berhasil.

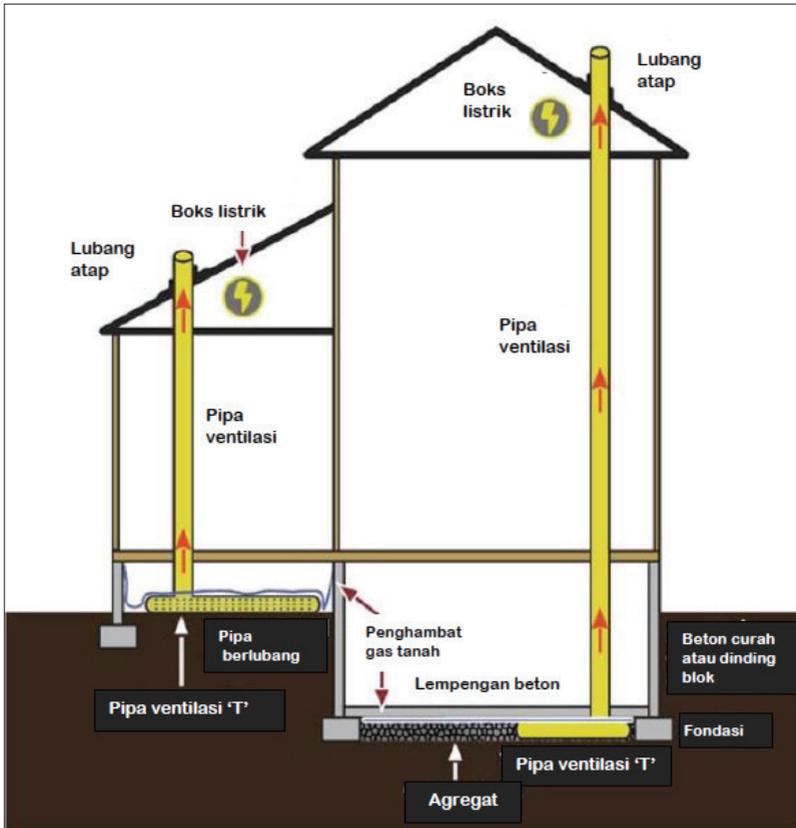
## **b. Depresurisasi Tanah Aktif dan Pasif**

Sistem depresurisasi tanah aktif atau *active soil depressurization system* (ASD) adalah metode paling populer dan sukses yang digunakan saat ini untuk menurunkan tingkat radon. Sistem ASD menurunkan tekanan tanah dengan menarik udara dan gas secara aktif dari bawah lempengan atau penghalang uap (jika tidak ada lempengan) dan mengeluarkannya di atas garis atap melalui pipa PVC (Fantech, t.t.).

Sistem depresurisasi tanah pasif atau *passive soil depressurization system* (PSD) mirip dengan ASD kecuali tidak memiliki kipas. PSD menggunakan perbedaan tekanan alami untuk menciptakan aliran udara dan mengeluarkan radon. Sistem pasif sangat membantu untuk rumah dengan tingkat radon yang rendah, tetapi tidak dapat menangani tingkat gas yang lebih tinggi (Dupage Radon, t.t.).

Komponen dasar yang diperlukan untuk memberikan depresurisasi pasif, dengan ketentuan untuk depresurisasi sub-plat aktif di masa mendatang (jika diperlukan) pada bangunan baru, seperti terlihat pada Gambar 5.1, adalah (IAEA, 2021):

- 1) boks listrik (berisi colokan dan stop kontak listrik);
- 2) lapisan permeabel;
- 3) pipa ventilasi;
- 4) lubang ventilasi atap, pipa koneksi;
- 5) penyekatan dan membran;
- 6) kipas; dan
- 7) pemantau operasi.



Sumber: IAEA (2021)

**Gambar 5.1** Skema Tindakan Pencegahan untuk Bangunan Baru

#### d. Penyekatan

Pipa dan perangkat utilitas lainnya yang melalui pelat harus disekat ke-dap udara secara permanen. Bahan penyekat harus kompatibel dengan permukaan yang digunakan. Penyekatan ini perlu diperiksa setelah selesai dipasang untuk memastikan kedekatan udara bangunan. Ini merupakan prasyarat bahwa langkah mitigasi radon lebih lanjut yang akan diambil akan berhasil (IAEA, 2021).

Penyekatan permukaan yang memisahkan ruang di dalam ruangan dengan tanah dapat menunjang kinerja upaya pencegahan lain, seperti depresurisasi aktif dan pasif. Dalam hal ini, penyekatan mengurangi hilangnya udara dari dalam ruangan yang mungkin cukup besar, dan meningkatkan pembalikan tekanan udara dari tanah ke dalam ruangan (WHO, 2009).

Semua retakan, sambungan, dan bukaan pada pelat beton harus disekat rapat secara permanen. Bahan penyekat harus kompatibel dengan permukaan yang digunakan. Bukaan yang lebarnya lebih dari 13 mm perlu diisi sebelumnya sesuai kebutuhan dengan batang pendukung atau bahan yang sebanding sebelum penyekat dipasang. Penyekatan ini perlu diperiksa setelah selesai dipasang untuk memastikan kedap udara yang sesuai tercapai sehingga memastikan bahwa langkah mitigasi radon lebih lanjut yang akan diambil akan berhasil (IAEA, 2021).

## 2. Mitigasi

Strategi proteksi radon nasional juga harus mencakup tindakan mitigasi untuk bangunan atau lokasi yang telah ada dan memiliki ruang tertutup. Pengendalian pajanan harus dipastikan sejauh mungkin melalui manajemen bangunan (atau lokasi) dan kondisi penggunaannya, terlepas dari status individu penghuninya. Tahapan utamanya adalah pengukuran dan, jika diperlukan, dilakukan tindakan protektif (ICRP, 2014).

Pengukuran radon pada suatu bangunan atau lokasi dilakukan untuk dapat memperkirakan perkiraan jangka panjang pajanan radon yang diterima penghuni bangunan. Perkiraan jangka panjang ini dilakukan mengingat adanya beberapa faktor yang memengaruhi pajanan radon, seperti tingkat hunian bangunan dan variasi konsentrasi harian atau musiman (ICRP, 2014).

Idealnya pengukuran jangka panjang sepanjang tahun lebih disukai dibandingkan perkiraan jangka pendek karena meliputi semua musim yang ada. Namun, pengukuran lebih singkat beberapa minggu atau bulan kadang dipilih karena dalam pengukuran jangka panjang

mungkin akan timbul masalah, seperti detektor berpindah tempat atau bahkan terlupakan.

Upaya utama dalam mitigasi adalah mencegah masuknya radon ke udara ruangan yang dihuni atau ditempati, dan mengeluarkannya dari udara dalam ruangan menggunakan teknik pasif ataupun aktif. Teknik mitigasi bertujuan untuk mengurangi konveksi dan difusi masuknya radon dari tanah di bawah bangunan dengan beberapa tindakan sebagai berikut (ICRP, 2014):

- 1) memperkuat kededapan udara bangunan, misalnya dengan menyekat rute masuk radon; dan
- 2) membalikkan perbedaan tekanan udara antara ruang yang ditempati di dalam ruangan dan tanah di luar melalui teknik depresurisasi tanah yang berbeda (misalnya mengurangi tekanan pada tanah di bawah bangunan, memasang sistem sedot radon, atau menerapkan tekanan berlebih di ruang bawah tanah).

Pengurangan konsentrasi radon dalam ruangan melalui pengenceran dengan udara luar adalah teknik mitigasi lain yang digunakan di permukiman. Mitigasi dapat dicapai dengan cara pasif atau aktif dengan mengatur ventilasi ruang yang ditempati. Teknik ventilasi ini mengencerkan radon setelah memasuki gedung. Ventilasi dengan kipas dapat mencairkan radon dalam ruangan setelah memasuki gedung, dan dapat mengurangi tekanan perbedaan antara tanah dan ruang yang ditempati.

Setelah mitigasi selesai dilakukan, pengukuran tingkat radon perlu dilakukan kembali untuk melihat keefektifan mitigasi. Pengukuran dilakukan dengan kondisi yang sama seperti sebelum mitigasi dikerjakan, dan sebaiknya diulang secara berkala untuk memastikan bahwa tingkat radon tetap rendah.

#### **D. Proteksi Pekerja Radiasi terhadap Paparan Radon**

Di daerah kerja di mana paparan radon pada pekerja radiasi tidak dianggap sebagai paparan kerja, pekerja diperlakukan dengan cara

yang sama seperti anggota masyarakat untuk tujuan proteksi radiasi. Namun, jika daerah kerja tidak dapat diakses oleh publik (atau jika akses publik terbatas), beberapa ketentuan khusus atau tambahan dapat ditetapkan dalam proses optimisasi sebagai bagian dari penerapan pendekatan bertahap untuk proteksi radiasi.

Beberapa ketentuan khusus atau tambahan tersebut, antara lain, adalah (ICRP, 2014):

- 1) protokol pengukuran khusus (misalnya pengukuran saat pekerja berada di daerah kerja);
- 2) penerapan khusus tingkat acuan turunan sesuai dengan parameter paparan aktual, seperti waktu hunian atau faktor kesetimbangan, dengan tetap menerapkan tingkat acuan dosis sebesar 10 mSv/tahun;
- 3) pengaturan kondisi kerja (misalnya dengan membatasi waktu hunian di beberapa tempat); dan
- 4) persyaratan terkait pelaksanaan pengukuran, komunikasi hasil pengukuran, catatan rekaman, dan kepatuhan dengan tingkat acuan.

Untuk daerah kerja di mana pajanan radon dianggap sebagai pajanan kerja, operator perusahaan dan badan pengawas perlu menentukan persyaratan yang harus dipenuhi. Persyaratan umum yang relevan untuk pajanan radon adalah sebagai berikut (ICRP, 2014).

- 1) Penetapan tingkat acuan yang sesuai, dinyatakan sebagai dosis efektif, konsentrasi radon, atau konsentrasi energi alfa potensial, dengan mempertimbangkan waktu hunian.
- 2) Penetapan daerah kerja. Meskipun klasifikasi daerah pengendalian atau supervisi tidak terlalu tepat, tetap penting untuk menentukan daerah kerja di mana pajanan kerja dapat terjadi, dan untuk mengendalikan akses ke daerah kerja tersebut.
- 3) Informasi, instruksi, dan pelatihan pekerja yang memadai.
- 4) Penggunaan alat pelindung diri dalam beberapa kasus khusus.

- 5) Pemantauan pajanan melalui pemantauan individu, pemantauan kolektif jika tidak sesuai, tidak memadai, atau tidak layak, diperkirakan dari pemantauan daerah kerja.
- 6) Rekaman pajanan.
- 7) Penyediaan pengawasan kesehatan bagi pekerja.
- 8) Promosi budaya proteksi radiasi.
- 9) Pemenuhan tingkat acuan, yang meliputi pemantauan daerah kerja dikombinasikan dengan waktu pada lokasi kerja tertentu. Pemantauan radon perorangan juga dapat digunakan, baik sebagai rata-rata kelompok maupun sebagai individual. Selain itu, nilai batas dosis untuk pekerja sebesar 20 mSv/tahun juga tidak boleh dilampaui.

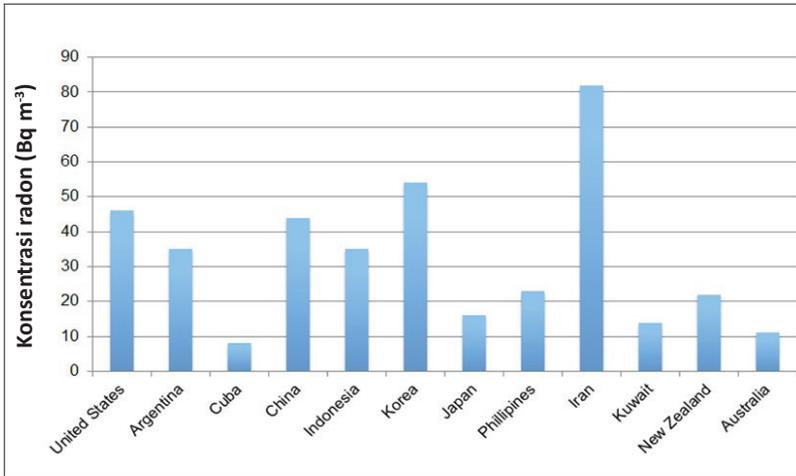
## BAB VI

# Penelitian Tingkat Radon di Indonesia

Sebagai komite ilmiah yang mendapat mandat dari Majelis Umum PBB untuk mengkaji dan melaporkan tingkat dan efek pajanan radiasi di dunia, UNSCEAR secara berkala melakukan survei untuk memperbarui data radiasi lingkungan di dunia. Hasil survei sampai tahun 2006 dipublikasikan sebagai laporan UNSCEAR 2006 (UNSCEAR, 2008).

Salah satu data yang ditampilkan pada laporan tersebut adalah konsentrasi radon di udara ruangan (*indoor air*), yang sebagian datanya diberikan pada Gambar 6.1. Data keseluruhan menunjukkan bahwa terdapat variasi konsentrasi, baik di dalam suatu negara maupun antar negara. Data dari Indonesia menunjukkan nilai konsentrasi radon sebesar  $35,1 \text{ Bq m}^{-3}$ , yang merupakan rata-rata nasional.

Dalam beberapa tahun terakhir ini penelitian tentang tingkat radon banyak dilakukan di Indonesia, baik oleh instansi pemerintah maupun perguruan tinggi. Pada Bab 6 ini akan diuraikan beberapa penelitian tersebut beserta dengan hasilnya.



Sumber: UNSCEAR (2008)

**Gambar 6.1** Konsentrasi radon di udara ruangan

## A. Tingkat Radon di Daerah Permukiman

Beberapa penelitian mengenai tingkat radon di daerah permukiman di Indonesia telah banyak dilakukan. Sebagian besar menyangkut tingkat konsentrasi di suatu daerah permukiman tertentu, tetapi ada pula yang mengambil sampel dari suatu kasus tertentu.

Jenis penelitian yang disebut terakhir adalah pengukuran konsentrasi gas radon-*thoron* dan perhitungan dosis tahunan pada permukiman penduduk di empat desa di Sumatra Utara yang terdampak letusan Gunung Sinabung tahun 2014. Penelitian yang dilakukan oleh Sitorus et al. (2016) cukup menarik karena adanya pemasangan detektor CR-39 di suatu rumah penduduk. Gunung Sinabung meletus kembali. Walaupun demikian, dari jejak nuklir yang terekam pada detektor CR-39 yang dipasang selama dua bulan tidak diperoleh konsentrasi radon dan *thoron* yang tinggi, rata-rata konsentrasi masing-masing 25,73 Bq m<sup>-3</sup> dan nihil, sementara perhitungan dosis tahunan juga hanya menghasilkan dosis sebesar 0,66 mSv/tahun untuk radon dan 0,43 mSv/tahun untuk *thoron*.

Penelitian yang menyangkut konsentrasi radon di suatu daerah permukiman sebagian besar dilakukan oleh unit kerja PTKMR yang berada di lingkungan BATAN1 yang berlokasi di Kawasan Nuklir Pasar Jumat (sekarang Kawasan Sains dan Teknologi Siwabessy) di daerah Pasar Jumat, Jakarta Selatan. Daerah permukiman yang telah diukur tingkat konsentrasi radonnya, meliputi Pulau Bali (Pudjadi et al., 2016), Sulawesi Selatan (Wahyudi et al., 2016), Aceh (Wahyudi et al., 2017), Kalimantan Barat (Wahyudi et al., 2019), Maluku Utara (Wahyudi et al., 2019), Kalimantan Selatan (Nugraha et al., 2019), Madura (Wahyudi et al., 2020), dan Maluku (Wahyudi et al., 2021).

Semua pengukuran dilakukan menggunakan alat detektor jejak nuklir CR-39 yang dipasang selama beberapa bulan tertentu di rumah penduduk setempat. Tingkat konsentrasi radon dari hasil penelitian di beberapa penelitian tersebut diberikan pada Tabel 6.1.

**Tabel 6.1** Hasil penelitian tingkat radon (Rn-222) di beberapa daerah permukiman di Indonesia.

Daerah	Rentang Tingkat Konsentrasi (Bq/m <sup>3</sup> )	Sumber
Bali	9–48	(Pudjadi et al., 2016)
Sulawesi Selatan	3,43–69,38	(Wahyudi et al., 2016)
Aceh	3,32–68,30	(Wahyudi et al., 2017)
Kalimantan Barat	3,13–69,57	(Wahyudi, KUSDIANA et al., 2019)
Maluku Utara	2,47–47,02	(Wahyudi, Winarni et al., 2019)
Kalimantan Selatan	3,10–94	(Nugraha et al., 2019)
Madura	15,11–126,93	(Wahyudi et al., 2020)
Maluku	2,56–59,65	(Wahyudi et al., 2021)

Jika dibandingkan dengan tingkat acuan sebesar 300 Bq/m<sup>3</sup> untuk radon di permukiman yang diberikan oleh IAEA dan ICRP pada Tabel

<sup>1</sup> Sejak tahun 2021 BATAN digabung dan menjadi salah satu unit kerja di lingkungan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

2.1, berbagai hasil penelitian yang diberikan pada Tabel 6.1 di atas masih di bawah tingkat acuan tersebut.

Kerja sama antara FMIPA Universitas Andalas (Unand) dan Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) BATAN telah memberikan peluang kepada para mahasiswa tingkat sarjana (S-1) Jurusan Fisika Unand untuk menyusun skripsinya dengan tema radiasi, termasuk pengukuran radon. Skripsi tersebut kemudian disusun ulang menjadi karya tulis yang diterbitkan dalam jurnal ilmiah.

Beberapa karya tulis tersebut adalah Pahrudin et al. (2022) yang melaporkan pengukuran konsentrasi gas radon dan gas *thoron* di rumah penduduk di Nagari Alam Pauh Duo, Kabupaten Solok Selatan, Wulandarisman et al. (2022) yang mengukur gas radon dan *thoron* di ruangan kelas di Kota Lubuk Basung; dan Widisaputra (Widisaputra et al., 2022) yang menentukan laju dosis efektif gas radon dan gas *thoron* di Nagari Solok Bio-Bio, Kabupaten Lima Puluh Kota.

Seperti halnya penelitian yang dilakukan oleh staf PTKMR BATAN, ketiga penelitian menggunakan detektor CR-39 yang dipasang selama beberapa bulan untuk mengukur konsentrasi radon yang diinginkan. Tabel 6.2 memberikan hasil penelitian tingkat radon di beberapa lokasi di Sumatra Barat ini.

**Tabel 6.2** Hasil penelitian tingkat radon (Rn-222) di beberapa lokasi di Sumatra Barat.

Daerah	Rentang Tingkat Konsentrasi (Bq/m <sup>3</sup> )	Sumber
Nagari Alam Pauh Duo	7–37	(Pahrudin et al., 2022)
Ruang kelas di Lubuk Basung	49–107	(Wulandarisman et al., 2022)
Nagari Solok Bio-Bio	34–749	(Widisaputra et al., 2022)

Jika dibandingkan dengan tingkat acuan pada Tabel 2.1 sebesar 300 Bq/m<sup>3</sup> untuk radon di permukiman yang diberikan oleh IAEA dan ICRP serta <200 Bq/m<sup>3</sup> untuk radon di daerah kerja yang diberikan

oleh Permenaker, beberapa hasil penelitian yang diberikan pada Tabel 6.2 di atas umumnya masih di bawah tingkat acuan tersebut.

Biarpun demikian, tingkat konsentrasi tertinggi dari penelitian di Nagari Solok Bio-Bio menunjukkan angka 749 Bq/m<sup>3</sup>, yang melampaui tingkat acuan yang diberikan. Untuk itu, sebaiknya perlu dilakukan tindakan mitigasi untuk menurunkan tingkat konsentrasi sebesar 749 Bq/m<sup>3</sup> tersebut. Sayangnya, Widasaputra et al. (2022) tidak menyinggung sama sekali perlunya dilakukan tindakan mitigasi ini.

## **B. Tingkat Radon di Daerah Perkantoran**

Di Indonesia, pengukuran radon di daerah perkantoran belum banyak dilakukan, walaupun Menteri Ketenagakerjaan telah menetapkan standar radon dalam ruang sebesar <200 Bq/m<sup>3</sup> (Pedoman Permenaker No.5, 2018). Masih terbatasnya penelitian atau pengukuran tingkat radon di perkantoran kemungkinan besar disebabkan oleh tidak adanya penegakan hukum jika terjadi pelanggaran terhadap nilai standar radon tersebut.

Salah satu pengukuran awal tingkat radon di daerah perkantoran di Indonesia adalah penentuan kadar radon di ruangan kerja yang mempunyai sistem pendingin. Pengukuran dilakukan di ISTN Jakarta dengan menggunakan detektor CR-39 yang dipasang selama 75 hari di 10 ruangan (Sutarman et al., 2003). Hasil pengukuran menunjukkan kadar radon rata-rata sebesar 41,4 Bq/m<sup>3</sup> dengan variasi dari 31,4–52,1 Bq/m<sup>3</sup>.

Pengukuran tingkat radon di lingkungan kerja BATAN telah dilakukan oleh Ginting dan Hari (2004), Laksminingpuri et al. (2018) dan Arsita et al. (2019). Ginting dan Hari (2004) mengukur konsentrasi gas radon di kawasan Pusat Penelitian Tenaga Nuklir (PPTN) Serpong dan kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan

Teknologi (Puspipstek) Serpong menggunakan alat *portable radiation monitor* model AB-5 Pylon yang dipasang pada pagi dan siang hari.

Laksminegipuri et al. (2018) mengukur konsentrasi radon-222 dalam gas tanah di kawasan nuklir Pasar Jumat pada 22 titik menggunakan alat *continuous radon gas monitor* model RAD7, sedangkan Arsita et al. (2019) mengukur konsentrasi radon di kantor pusat BATAN Jakarta, juga dengan menggunakan alat monitor gas radon RAD7.

Tabel 6.3 memperlihatkan hasil pengukuran yang dilakukan di tiga lokasi lingkungan kerja BATAN yang berbeda. Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa tingkat konsentrasi radon di ruang kerja BATAN masih di bawah tingkat acuan yang ditetapkan Kemenaker sebesar  $<200 \text{ Bq/m}^3$ , sedangkan konsentrasi radon di gas tanah tertinggi, yaitu  $85.600 \text{ Bq/m}^3$ , atau  $85,6 \text{ kBq/m}^3$ , ternyata sedikit lebih besar dibandingkan dengan rentang pengukuran yang dilakukan oleh beberapa studi di luar negeri, yaitu  $0,01\text{--}82,20 \text{ kBq/m}^3$  (Mittal et al., 2016).

**Tabel 6.3** Hasil penelitian tingkat radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) di beberapa lokasi lingkungan kerja BATAN.

Lokasi	Sampel	Rentang Tingkat Konsentrasi (Bq/m <sup>3</sup> )	Sumber
PPTN BATAN Serpong	Gas tanah	225–1303 (pagi) 336–1603 (siang)	(Ginting & Hari, 2004)
Kawasan nuklir BATAN Pasar Jumat	Gas tanah	845–85600	(Laksminegipuri et al., 2018)
Kantor Pusat BATAN Jakarta	Ruang kerja	5,40–34,00	(Arsita et al., 2019)

Penelitian tentang tingkat konsentrasi radon pada beton ringan telah dilakukan oleh Syarbaini dan Bunawas (2010). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi radon pada beton ringan (ALC, *aerated lightweight concrete*) berkisar  $8\text{--}39 \text{ Bq/kg}$ , yang lebih rendah dibandingkan dengan pada beton biasa yang berkisar  $62\text{--}83 \text{ Bq/kg}$ .

Dewi (2006) melakukan perkiraan paparan radiasi internal gas radon dari pemakaian beton ringan aerasi hebel untuk bahan bangun-

an. Penelitian dilakukan dengan mengukur konsentrasi radon yang terdifusi keluar dari beton hebel menggunakan alat *continuous radon monitor model 1027*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat konsentrasi radon dalam beton hebel non plester sebesar  $11,1 \text{ Bq/m}^3$  dan nilai laju lepasan radon sebesar  $1,12 \text{ Bq/m}^2 \text{ jam}$ . Pengecatan hebel menurunkan konsentrasi radon menjadi  $>3,7 \text{ Bq/m}^3$  dengan laju lepasan radon menjadi  $<0,37 \text{ Bq/m}^2 \text{ jam}$ .

Identifikasi konsentrasi radon pada batu bata untuk tujuan mengukur dan membandingkan konsentrasi radon sebelum dan sesudah pembakaran di beberapa pabrik batu bata di kawasan Aceh Besar telah dilakukan oleh Yufita dan Safitri (2013). Pengukuran dilakukan dengan alat *continuous radon monitor model 1027* selama 12 jam. Hasil penelitian menunjukkan nilai konsentrasi radon sebelum pembakaran berkisar  $0,72 \text{ pCi/L}$ – $1,80 \text{ pCi/L}$ , sedangkan setelah pembakaran  $0,14 \text{ pCi/L}$ – $0,52 \text{ pCi/L}$ . Penurunan konsentrasi diduga karena setelah pembakaran timbul retakan pada batu bata sehingga radon dalam batu bata dapat keluar melalui celah dari retakan tersebut.

Penelitian yang menarik tentang gas radon dari gipsum dilakukan oleh Ratnawati et al. (2017), yang menguji kandungan radioaktif torium dan kalium pada gipsum dengan alat *laser induced breakdown spectroscopy* (LIBS). Pengukuran selanjutnya menggunakan surveimeter untuk membuktikan titik di pojok ruangan yang berbahan gipsum memberikan dosis radiasi yang tinggi. Hasil pengukuran dengan LIBS kemudian dikorelasikan dengan tingkat kerja bulan (WLM).

Penggunaan WLM untuk menghitung konsentrasi radon ini sebenarnya patut dipertanyakan karena WLM hanya digunakan untuk pengukuran di tambang bawah tanah, seperti yang direkomendasikan oleh ICRP dan telah diuraikan pada Bab IV. Demikian pula bagaimana hasil pengukuran dengan LIBS dapat dikonversikan menjadi WLM juga tidak jelas. Oleh karena itu, penelitian ini sebaiknya diulang dengan menggunakan alat ukur konsentrasi radon yang tepat sehingga hasilnya dapat lebih dipercaya dan dapat dipertanggungjawabkan.

### C. Tingkat Radon di Pertambangan, Gua Wisata dan Lingkungan Lainnya

Kegiatan penelitian eksplorasi sumber daya uranium di Indonesia telah dilakukan di daerah Kalan, Kalimantan Barat. Penelitian tentang tingkat konsentrasi radon di Terowongan Remaja sebagai salah satu terowongan eksplorasi uranium tersebut telah dilakukan oleh Noor et al. (2020). Pengukuran radon dilakukan dengan detektor RADUET merk Radosys yang berisi detektor CR-39. Konsentrasi radon yang dijumpai cukup tinggi, yaitu berkisar antara 188,84 hingga 495,86 Bq/m<sup>3</sup>. Tindakan mitigasi telah dilakukan dengan memasang pipa ventilasi untuk mengalirkan udara luar ke dalam terowongan karena nilai tertinggi melampaui tingkat acuan 300 Bq/m<sup>3</sup>.

Penelitian konsentrasi radon pada gua wisata telah dilakukan oleh Akmal et al. (2015) di Gua Mimpi dan Gua Batu yang terletak di Taman Nasional Bantimurung, Sulawesi Selatan dan oleh Dewang et al. (2018) di gua di daerah Ke'te'Kesu Kabupaten Toraja Utara, juga di Sulawesi Selatan. Kedua penelitian menggunakan alat detektor CR-39 yang dipasang selama beberapa waktu tertentu. Hasil pengukuran kedua penelitian diberikan pada Tabel 6.4.

**Tabel 6.4** Hasil penelitian tingkat radon (<sup>222</sup>Rn) di gua wisata di Sulawesi Selatan.

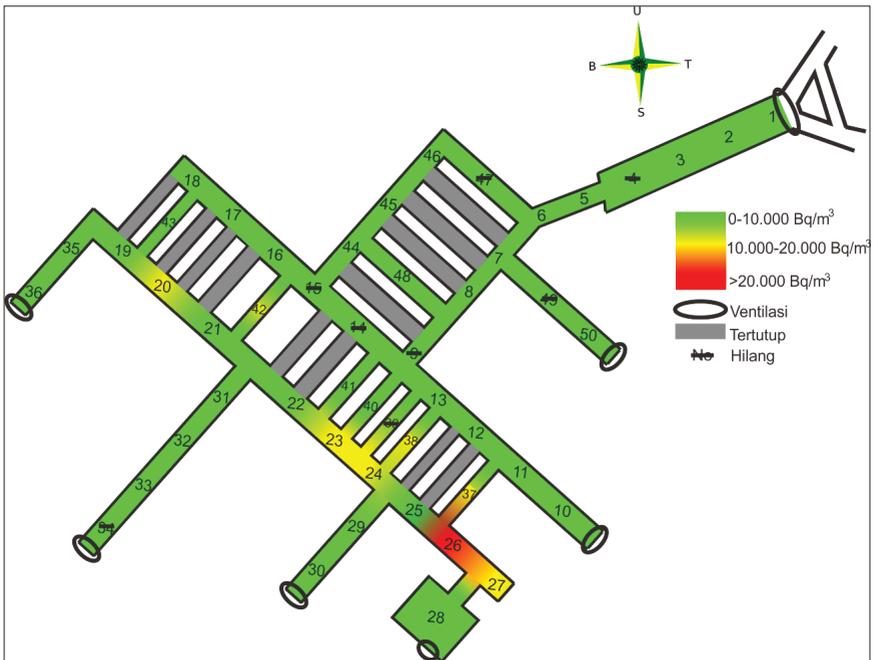
Lokasi	Rata-rata dan Rentang Tingkat Konsentrasi (Bq/m <sup>3</sup> )	Sumber
Gua Mimpi dan Gua Batu, Bantimurung	351,5 dan 234,21*	(Akmal et al., 2015)
Gua Ke'te'Kesu, Toraja Utara	1683–21.247	(Dewang et al., 2018)

Keterangan: Dikonversi dari 9,50 pCi/L dan 6,33 pCi/L.

Putri et al. (2020) telah melakukan pengukuran tingkat konsentrasi radon di gua wisata Lobang Jepang, Bukittinggi, Sumatra Barat. Penelitian ini juga menggunakan alat detektor CR-39 yang dipasang selama 14 hari di sepanjang lintasan gua wisata. Hasil pengukuran memperlihatkan rentang tingkat konsentrasi radon sebesar 2469,87

$\text{Bq/m}^3$ –80641,18  $\text{Bq/m}^3$ . Nilai tingkat konsentrasi radon di gua Lobang Jepang ini juga masih dalam rentang konsentrasi 0,01–82,20  $\text{kBq/m}^3$  di beberapa negara yang diberikan oleh Mittal et al. (2016).

Secara lebih rinci, Putri et al. (2020) melaporkan hasil pengukuran tingkat konsentrasi radon pada lorong yang terdapat pada Gua Lobang Jepang. Gambar 6.2 memperlihatkan titik-titik pengukuran pada lorong dan tingkat konsentrasi radon pada titik tersebut. Warna hijau memiliki rentang konsentrasi 0–10.000  $\text{Bq/m}^3$ , warna kuning 10.000–20.000  $\text{Bq/m}^3$ , dan warna merah >20.000  $\text{Bq/m}^3$ . Pada titik pengukuran No.26 terdeteksi konsentrasi radon tertinggi karena pada titik tersebut terdapat batuan alami yang belum dilapisi oleh semen. Selain itu, udara disana juga terkungkung sehingga tidak terjadi pertukaran udara.



Sumber: Putri et al. (2020)

**Gambar 6.2** Tingkat Konsentrasi Radon di Gua Wisata Lobang Jepang

Kawasan wisata lain yang pernah diukur tingkat konsentrasi radonnya adalah pemandian air panas. Nugraha et al. (2021) telah mengukur konsentrasi radon di pemandian air panas Ciater di Subang; Ciwidey dan Pangalengan di Bandung; serta Cipanas dan Darajat di Garut; yang keseluruhannya berada di provinsi Jawa Barat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat konsentrasi radon pada pemandian air panas ini berkisar dari 0,26 hingga 31 Bq/L (atau 9,62 hingga 1.147 Bq/m<sup>3</sup>).

Pulau Bangka dan Belitung dikenal sebagai salah satu lokasi di Indonesia yang memiliki tingkat radioaktif alam yang tinggi karena adanya tambang timah beserta mineral ikutan lainnya (Syarbaini et al., 2015). Laju ekshalasi radon dan *thoron* dari permukaan tanah di kedua pulau ini telah diteliti oleh Syarbaini dan Pudjadi (2015). Pengukuran dilakukan dengan alat *continuous radon gas monitor* model RAD7. Hasil penelitian menunjukkan laju ekshalasi radon dan *thoron* di pulau Bangka-Belitung masing-masing mencapai rata-rata 48,11 Bq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> dan 2008 Bq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, yang melebihi rata-rata dunia sebesar 26,2 mBq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> dan 1000 mBq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> seperti yang dilaporkan UNSCEAR (2000).

Selain pulau Bangka dan Belitung, daerah Mamuju, Sulawesi Barat, juga dikenal sebagai dengan tingkat radioaktif alam yang tinggi (Nugraha et al., 2021). Konsentrasi radon di Takandaeng, Mamuju, telah diteliti oleh Saputra et al. (2020). Pengukuran dilakukan dengan alat detektor CR-39 yang dipasang selama satu tahun. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi radon, *thoron*, dan anak luruh *thoron* di dalam ruangan sebesar 42–490 Bq/m<sup>3</sup>, 20–618 Bq/m<sup>3</sup>, dan 4–40 Bq/m<sup>3</sup>. Sementara itu, di luar ruangan masing-masing sebesar 49–435 Bq/m<sup>3</sup>, 23–457 Bq/m<sup>3</sup>, dan 4–37 Bq/m<sup>3</sup>. Dari data ini terlihat bahwa konsentrasi radon, *thoron*, dan anak luruh *thoron* di dalam ruangan relatif sama dengan konsentrasi di luar ruangan.

Analisis radon dan *thoron* pada gas tanah telah dilakukan di lapangan panas bumi Rajabasa oleh Haerudin et al. (2013). Penelitian dilakukan dalam rangka menentukan zona sesar yang terkubur di bawah lapisan tanah penutup. Peta kontur rasio radon dan *thoron*

menunjukkan bahwa sistem sesar kedua tidak hanya menunjukkan adanya zona sesar/patah, namun juga perluasan sesar/patah dari kedalaman ke permukaan.

Selain di lokasi khusus, seperti di pertambangan, tempat wisata, dan kawasan yang mengandung radioaktif alam tinggi, penelitian tingkat radon di tempat umum juga telah dilakukan. Azhari et al. (2019) mengukur konsentrasi radon di daerah Gunung Masigit, Bandung Barat. Sampel air diambil dan diukur dengan detektor radon RAD7. Hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi radon dari sumber mata air Kampung Cisalada sebesar  $2.030 \text{ Bq/m}^3$ , dari air sumur Kampung Giri Mulya sebesar  $1.140 \text{ Bq/m}^3$ , dan dari mata air daerah Kampung Pamucatan sebesar  $705 \text{ Bq/m}^3$ .

#### D. Aplikasi Radon

Selain diukur tingkat konsentrasinya untuk memperkirakan dampak kesehatan yang dapat timbul, radon juga telah digunakan untuk menentukan permeabilitas suatu kawasan dalam kegiatan eksplorasi panas bumi. Haerudin et al. (2013) mengukur konsentrasi radon pada gas tanah untuk menentukan zona permeabel di lapangan panas bumi di Rajabasa, Lampung. Dari peta kontur anomali radon dibuat simulasi migrasi radon dari sumber ke permukaan. Berdasarkan simulasi, lebar patahan sekitar  $2.800 \text{ m}$ , kecepatan fluida  $0,08 \text{ m/detik}$ , dan konsentrasi radon  $860.000 \text{ Bq/m}^3$ .

Nurohman et al. (2016) memanfaatkan keberadaan radon untuk menentukan zona permeabel dalam bentuk zona rekahan atau patahan di Gunung Papandayaan, Jawa Barat. Hasil penelitian memberikan gambaran zona permeabel dengan adanya nilai konsentrasi radon yang tinggi ( $>1.449,12 \text{ Bq/m}^3$ ) di sekitar kawah Gunung Papandayan. Selain itu, rasio *thoron*/radon yang relatif tinggi (153–225,41) mengindikasikan adanya sumber radon dangkal di punggung utara kawah, yang berimplikasi kepada kelurusan struktur geologi yang tidak terlalu dalam ke bawah permukaan.

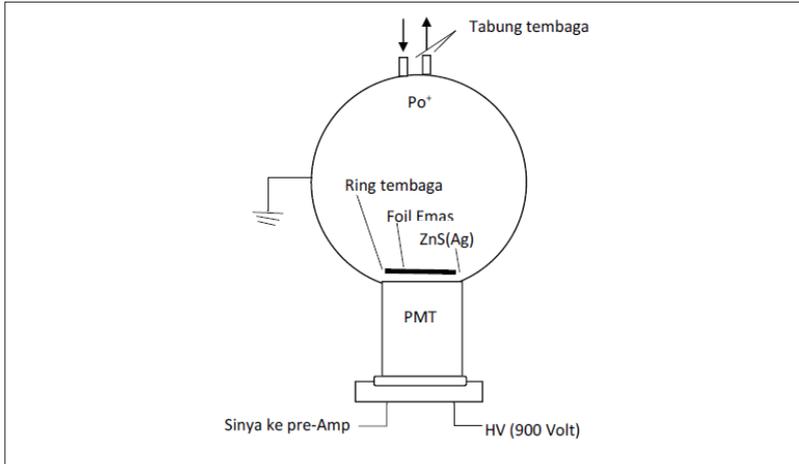
Prasetio et al. (2020) juga menggunakan metode yang sama di kawasan Gunung Tampomas, Jawa Barat. Hasil penelitian memberikan data bahwa sebagian besar lokasi dengan konsentrasi radon yang tinggi dan anomali letaknya tidak berdekatan dengan kelurusan struktur. Selain itu, tidak ada indikasi korelasi antara konsentrasi radon dan elevasi pengukuran. Proses perpindahan radon dari reservoir ke permukaan diperkirakan melalui mekanisme gas pembawa yang berasal dari reservoir panas bumi melalui zona permeabel.

Aplikasi radon yang lain adalah untuk menganalisis aktivitas kegempaan serta munculnya prekursor gempa lokal. Sunardi et al. (2018) melakukan analisis tersebut dengan memantau anomali gas radon di daerah Pundong dan Piyungan di laju patahan Opak. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan pancaran gas radon yang berkorelasi dengan kenaikan frekuensi kejadian gempa.

Perubahan konsentrasi gas radon juga digunakan untuk menjadi sistem peringatan dini terjadinya gempa bumi (Pratama & Hawibowo, 2021). Berdasarkan analisis korelasi antara konsentrasi gas radon yang terukur di dekat patahan sekitar Yogyakarta dan gempa bumi yang terjadi dari Sumatra hingga Nusa Tenggara Timur (NTT), beberapa algoritma berhasil dibuat, dan sekitar 34 dari 51 gempa bumi berhasil diprediksi. Ketepatan prediksi adalah 51,52% dengan tingkat akurasi 66,67% bahwa gempa bumi akan terjadi dalam waktu 1–3 hari kedepan.

Untuk dapat melakukan pengukuran konsentrasi radon di dalam air tanah pada waktu yang sama (*real time*), Andrian dan Makhsun (2022) merancang dan membuat prototipe sistem pencacah konsentrasi gas radon yang menggunakan detektor sintilasi ZnS(Ag) sebagai bahan aktifnya. Gambar 6.3 memperlihatkan bagan ruang sintilasi dan detektor dari rancangan yang dibuat.

Pada Gambar 6.3 tersebut terlihat sistem pencacah yang terdiri atas tabung foto pengganda (PMT), sintilator ZnS(Ag) yang mengukur radiasi alfa yang dipancarkan oleh anak luruh radon, keping (*foil*) emas dan ring tembaga, yang dihubungkan ke tegangan tinggi dan



Sumber: Andrian & Makhsun (2022)

**Gambar 6.3** Rancangan Ruang Sintilasi dan Detektor Radon

pre-amp. Setelah melalui penguat, data dari *pre-amp* data diunggah ke modul GSM, internet, dan selanjutnya dapat ditampilkan pada web.

Kalibrasi terhadap sistem pencacah dilakukan dengan pengukuran menggunakan sumber radiasi yang sama yang diukur dengan sistem pencacah radon RAD-7. Hasil kalibrasi menunjukkan nilai efisiensi sebesar 0,0017 pada pengukuran gas radon menggunakan alat cacah yang dirancang.

Aplikasi lain dari gas radon adalah untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi pencemaran *light nonaqueous phase liquid* (LNAPL) di dalam air tanah (Cecconi et al., 2023). *Nonaqueous phase liquid* (NAPL) merupakan jenis kontaminan hidrokarbon yang memiliki karakteristik tidak larut dalam air, sedangkan LNAPL adalah jenis NAPL yang memiliki densitas lebih kecil dari pada densitas air (Setyaningsih, 2010).

LNAPL berkaitan erat dengan dengan produksi minyak. Sebagai contoh, rembesan dari tumpahan bensin, minyak tanah atau minyak disel dapat dikategorikan sebagai LNAPL yang bergerak menuju air tanah. Pencemaran dari minyak disel hanya akan terkonsentrasi pada

permukaan air tanah, sedangkan perubahan karakteristik kimia dan biologi tanah hanya akan terjadi pada batas kedalaman tertentu.

Hasil studi lain menunjukkan bahwa aktivitas radon dalam gas tanah atau air pada daerah yang mengandung LNAPL akan lebih rendah dibandingkan dari daerah sekitarnya tanpa LNAPL (nilai *background* radon) (Schubert, 2015). Oleh karena itu, ini dimungkinkan untuk mengidentifikasi dan mengukur LNAPL di bawah permukaan tanah dengan memantau radon dalam gas tanah atau air dan menentukan defisit radon antara kedua zona tersebut (Castelluccio et al., 2018). Proses identifikasi pencemaran ini dilakukan dengan menggunakan teknik “pengurangan radon” (*radon deficit*).

## BAB VII

# Penutup

Radon merupakan salah satu sumber radioaktif alami yang berada dalam bentuk gas. Radon tidak berbau, tidak berasap, dan tidak berwarna sehingga keberadaannya tidak dapat dideteksi oleh indera manusia. Namun, jika masuk ke dalam paru-paru, radon akan sangat berbahaya karena anak luruhnya dapat menyinari paru-paru. Kenyataannya, WHO menyatakan bahwa radon merupakan penyebab terpenting kanker paru-paru setelah merokok.

Berbagai standar dan rekomendasi internasional terkait pajanan radon telah diberikan oleh ICRP, WHO, dan IAEA, sementara di tingkat nasional berbagai negara juga telah memberikan tingkat acuan konsentrasi radon di negara masing-masing, yang apabila dilampaui, akan dilakukan suatu tindakan mitigasi.

Di Indonesia nilai tingkat acuan juga telah ditetapkan oleh Kementerian Ketenagakerjaan untuk radon di dalam ruangan pada tahun 2018, sedangkan Kementerian Kesehatan telah menetapkan konsentrasi radon di lingkungan rumah sakit pada tahun 2019. Peraturan Pemerintah Nomor 45 Tahun 2023 juga telah menetapkan

tingkat acuan yang berlaku, baik untuk daerah permukiman maupun untuk daerah kerja.

Sayangnya, ketentuan terkait pajanan radon di Indonesia di atas belum diakomodasi dalam persyaratan izin mendirikan bangunan. Penelitian komprehensif terkait pajanan radon di daerah permukiman dan di perkantoran di Indonesia juga belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, tingkat konsentrasi radon secara umum di Indonesia tidak atau belum dapat diketahui.

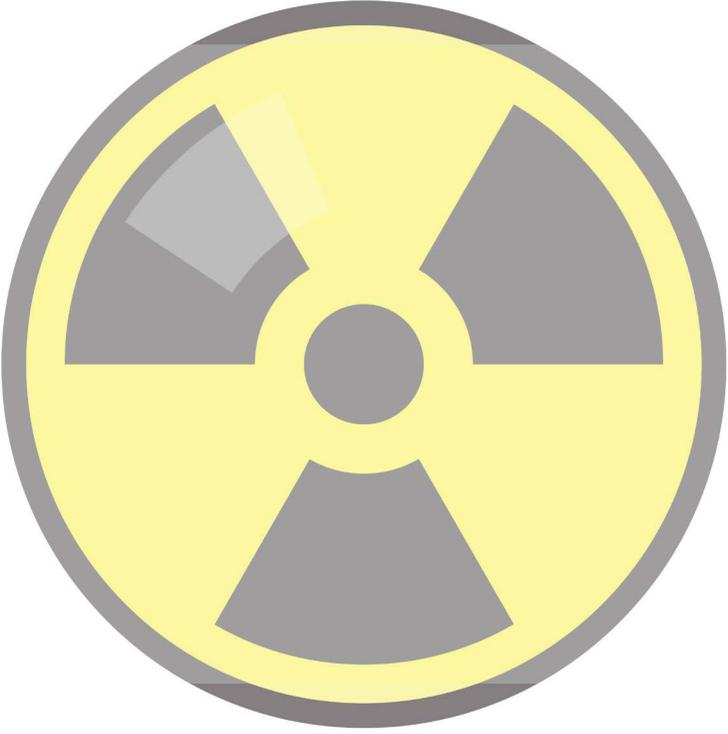
Dengan demikian, penelitian sporadis telah dilakukan oleh beberapa tenaga peneliti baik dari instansi riset maupun dari perguruan tinggi sehingga semua penelitian tersebut dapat lebih terkoordinasi. Suatu program nasional untuk mengukur pajanan radon perlu disusun dan dilaksanakan. Program nasional pengukuran radon perlu dilakukan dengan melibatkan berbagai institusi, seperti Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAP-ETEN), Kementerian Kesehatan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), pemerintah daerah, perguruan tinggi, dan berbagai pemangku kepentingan lainnya.

# Daftar Singkatan

AARST	: American Association of Radon Scientists and Technicians
ASD	: <i>active soil depressurization</i>
ATD	: <i>alpha-track detector</i>
ACD	: <i>Activated Charcoal Detector</i>
ANSI	: American National Standards Institute
ATSDR	: Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BAPETEN	: Badan Pengawas Tenaga Nuklir
BATAN	: Badan Tenaga Nuklir Nasional
BEIR	: Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation
BRIN	: Badan Riset dan Inovasi Nasional
Bq	: Becquerel
CDC	: Centers for Disease Control and Prevention
CR-39	: <i>Columbia-Resin #39</i>
CRM	: <i>continuous radon monitors</i>
CTM	: <i>continuous thoron monitor</i>
DNA	: <i>deoxyribonucleic acid</i>
DTD	: <i>double track detector</i>

EEC	: <i>equilibrium equivalent concentration</i>
EIC	: <i>electret ion chamber</i>
EID	: electronic integrating device
EPA	: Environmental Protection Agency
FAO	: Food and Agriculture Organization
HRTM	: <i>human respiratory track model</i>
IAEA	: International Atomic Energy Agency
IARC	: The International Agency for Research on Cancer
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
IE-EPA	: Ireland Environmental Protection Agency
ILO	: International Labor Organization
IRMA	: The International Radon Measurement Association
ISO	: International Organization for Standardization
LSC	: <i>liquid scintillation counting</i>
MBKM	: Merdeka Belajar Kampus Merdeka
MIPA	: matematika dan ilmu pengetahuan alam
NRC	: Nuclear Regulatory Commission
OECD/NEA	: Nuclear Energy Agency of Organization for Economic Co-operation and Development
ORTN	: organisasi riset tenaga nuklir
PADC	: <i>polyallyl diglycol carbonate</i>
PAEC	: <i>potential alpha energy concentration</i>
PBB	: Perserikatan Bangsa-Bangsa
PAHO	: Pan American Health Organization
PRTKMMN	: Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir
PSD	: Passive Soil Depressurization
SI	: international system of units
TFM	: <i>two-filter method</i>
WL	: <i>working level</i>

WLM : *working level month*  
UNEP : United Nations Environment Programme  
UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of  
Atomic Radiation  
UV : ultraviolet  
WHO : World Health Organization



Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Daftar Pustaka

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2012). Draft toxicological profile for radon: Agency for toxic substances and disease registry (ATSDR). *Department of Health and Human Services*. [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158784/pdf/Bookshelf\\_NBK158784.pdf](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158784/pdf/Bookshelf_NBK158784.pdf)
- Akmal, A. S., Dewang, S., Abdullah, B., & Syarbaini. (2015). *Analisis kandungan radiasi radon dan thoron di gua mimpi dan gua batu (gua wisata) Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung Kab. Maros Sulawesi Selatan Makassar*.
- Al-Azmi, D., Mustapha, A. O., & Karunakara, N. (2012). Radon adsorbed in activated charcoal-a simple and safe radiation source for teaching practical radioactivity in schools and colleges. *Physics Education*, 47(4), 471–475. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/47/4/471>
- Andrian, T., & Makhsun. (2022). Sistem monitoring konsentrasi gas radon di air tanah secara real-time untuk deteksi dini gempa bumi. *Sustainable Environmental and Optimizing Industry Journal*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.36441/seoi.v4i1.752>

- ANSI/AARST. (2019). *Radon measurement systems quality assurance*. ANSI/AARST MS-QA-2019. <https://blog.ansi.org/2019/08/radon-measurement-quality-assurance-aarst/>
- ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency). (t.t.). Australian radon action plan. Diakses pada 3 April 2024, dari <https://www.arpansa.gov.au/research-and-expertise/australian-radon-action-plan>
- Arsita, Tahir, D., Pradana, R., & Mellawati, J. (2019). Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) radioactivity level at the BATAN workplace using RAD7 level radioaktivitas radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) di lingkungan kerja. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop Dan Radiasi*, 7(16), 107–112. <https://doi.org/10.17146/jair.2020.16.2.6000>
- Azhari, A., Susilo, I. R. O. P., Bintarsih, B., Lubis, R. F., & Sitam, S. (2019). Dosis rata-rata harian dan efektif tahunan radon air tanah pada daerah Gunung Masigit, Kecamatan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat, Indonesia. *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 29(2), 163–170. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2019.v29.1020>
- Barbosa-Lorenzo, R., Barros-Dios, J. M., Raíces Aldrey, M., Cerdeira Caramés, S., & Ruano-Ravina, A. (2016). Residential radon and cancers other than lung cancer: A cohort study in Galicia, a Spanish radon-prone area. *European Journal of Epidemiology*, 31(4), 437–441. <https://doi.org/10.1007/s10654-016-0134-x>
- BMU (Federal Ministry for the Environment, Conservation and Nuclear Safety). (2019). Radon action plan for the sustainable reduction of radon exposure. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/radonmassnahmenplan\\_en\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/radonmassnahmenplan_en_bf.pdf)
- Castelluccio, M., Agrahari, S., De Simone, G., Pompili, F., Lucchetti, C., Sengupta, D., Galli, G., Friello, P., Curatolo, P., Giorgi, R., & Tuccimei, P. (2018). Using a multi-method approach based on soil radon deficit, resistivity, and induced polarization measurements to monitor non-aqueous phase liquid contamination in two study areas in Italy and India. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13), 12515–12527. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1429-0>

- Cecconi, A., Verginelli, I., Baciocchi, R., Lanari, C., Villani, F., & Bonfedi, G. (2023). Using groundwater monitoring wells for rapid application of soil gas radon deficit technique to evaluate residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*, 258(June), 104241. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104241>
- Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR). (1988). Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. In *National Academy Press*. [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218125/pdf/Bookshelf\\_NBK218125.pdf](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218125/pdf/Bookshelf_NBK218125.pdf)
- Depositphotos. (t.t.). *Gambar vektor stok gas mulia*. Diakses pada 3 Januari 2023 dari <https://id.depositphotos.com/vector-images/gas-mulia.html>
- Dewang, S., M, M., B, A., Bannu, & Syarbaini. (2018). Pengukuran radio aktivitas alam dalam gua menggunakan detektor jejak nuklir CR-39. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Makassar*, 163–167. [http://103.195.142.203/storage/dokumen/artikel-1625029622-Prosiding%20SNF%20Makassar%202018%20-%20Fisika%20FMIPA%20Unhas\\_compressed.pdf](http://103.195.142.203/storage/dokumen/artikel-1625029622-Prosiding%20SNF%20Makassar%202018%20-%20Fisika%20FMIPA%20Unhas_compressed.pdf)
- Dewi, P. A. (2006). *Perkiraan paparan radiasi internal gas radon dari pemakaian beton ringan aerasi hebel untuk bahan bangunan*. Tugas Akhir S1 FMIPA IPB. Diakses pada 23 April 2023 dari <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/46343?show=full>
- Di Carlo, C., Ampollini, M., Antignani, S., Caprio, M., Carpentieri, C., Caccia, B., & Bochicchio, F. (2023). Extreme reverse seasonal variations of indoor radon concentration and possible implications on some measurement protocols and remedial strategies. *Environmental Pollution*, 327(January), 121480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121480>
- Dupage Radon. (t.t.). *Passive vs. active radon mitigation systems: What's best?* Diakses pada 5 Januari 2023 dari <https://dupageradon.com/passive-vs-active-radon-mitigation-systems-whats-best/>
- EPA (Environmental Protection Agency) (2021). The national radon action plan 2021-2025. <http://www.radonleaders.org/sites/default/files/2022-01/NRAP-2021-2025-Action-Plan-508.pdf>

- Evrard, A. S., Hémon, D., Billon, S., Laurier, D., Jouglu, E., Tirmarche, M., & Clavel, J. (2006). Childhood leukemia incidence and exposure to indoor radon, terrestrial and cosmic gamma radiation. *Health Physics*, 90(6), 569–579. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000198787.93305.35>
- FANC (Federal Agency for Nuclear Control). (2021). Belgian national radon action plan 2020-2025. <https://fanc.fgov.be/nl/system/files/2021-09-22-belgian-national-radon-action-plan-2020-2025-en-v2.pdf>
- Fantech. (t.t.). *Active soil depressurization*. Diakses pada 14 Maret 2023 dari <https://www.fantech.net/our-solutions/radon/what-is-radon/radon-professionals/active-soil-depressurization/>
- FOPH (Federal Office of Public Health). (2021). Radon Action Plan 2021-2030. <https://www.bag.admin.ch/bag/en/home/strategie-und-politik/politische-auftraege-und-aktionsplaene/radonaktionsplan.html>
- Gaskin, J., Coyle, D., Whyte, J., & Krewksi, D. (2018). Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential radon. *Environmental Health Perspectives*, 126(5), 1–8. <https://doi.org/10.1289/EHP2503>
- Ginting, T., & Hari, B. (2004). Artikel Konsentrasi Gas Radon Di Permukaan Tanah Di Daerah PPTN Serpong dan Puspitek. *Buletin Limbah*, 8(2), 24–36. <https://jurnal.batan.go.id/index.php/bl/article/view/731/0>
- Haerudin, N., Wahyudi, & Suryanto, W. (2013). Radon and thoron analysis of soil gas survey case study of Rajabasa geothermal field. *AIP Conference Proceedings*, 1554, 218–221. <https://doi.org/10.1063/1.4820324>
- IAEA. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources : International Basic Safety Standards* (Safety Standards Series No. GSR Part 3). <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>
- IAEA. (2015). *Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation*. (Safety Standards Series No. SSG-32). <https://www.iaea.org/publications/10671/protection-of-the-public-against-exposure-indoors-due-to-radon-and-other-natural-sources-of-radiation>

- IAEA. (2021). *Protection against exposure due to radon indoors and gamma radiation from construction materials – Methods of prevention and mitigation*. (IAEA-TECDOC-1951). <https://www.iaea.org/publications/14817/protection-against-exposure-due-to-radon-indoors-and-gamma-radiation-from-construction-materials-methods-of-prevention-and-mitigation>
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (1988). Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Man Made Mineral Fibres and Radon. *IARC Scientific Publications*, 43, 173–259.
- ICRP. (1993). *Protection against radon-222 at home and at work*. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2065>
- ICRP. (2007). *The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection*. (ICRP Publication 103). Ann. ICRP 37(2–4). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>
- ICRP. (2010). *Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon*. (ICRP Publication 115). Ann. ICRP 40(1). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20115>
- ICRP. (2014). *Radiological protection against radon exposure*. (ICRP Publication 126). Ann. ICRP 43(3). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20126>
- ICRP. (2017). *Occupational intakes of radionuclides: Part 3*. (ICRP Publication 137). Ann. ICRP 45(3/4). <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20137>
- ICRP. (t.t.). *Summary of ICRP recommendations on radon*. Diakses 22 Januari 2023, dari <http://www.icrpaedia.org/images/f/fd/ICRPRadonSummary.pdf>
- Ireland Environmental Protection Agency (IE-EPA). (2019). *EPA protocol for the measurement of radon in homes & workplaces*. May 2019. [https://www.epa.ie/publications/monitoring--assessment/radon/Measurement-Protocol-Homes-and-Workplaces\\_May-2019.pdf](https://www.epa.ie/publications/monitoring--assessment/radon/Measurement-Protocol-Homes-and-Workplaces_May-2019.pdf)
- International Radon Measurement Association (IRMA). (t.t.). *Promoting quality standards for radon measurements laboratories*. Diakses pada 23 April 2023 dari <https://www.irma-radon.org/>

- International Organization for Standardization. (ISO). (2015). *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2015)*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>
- Johnson, J. R., & Dupont, P. (2004). *Cardiovascular mortality caused by exposure to radon*. <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/irpa/2004/files/1e9.pdf>
- Kansas State University (KSU). (t.t.). *National radon program services: Testing devices*. Diakses pada 2 Januari 2023 dari <https://sosradon.org/devices>
- Kendall, G. M., & Smith, T. J. (2002). Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection*, 22(4), 389–406. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/22/4/304>
- Kreuzer, M., Kreisheimer, M., Kandel, M., Schnelzer, M., Tschense, A., & Grosche, B. (2006). Mortality from cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study, 1946-1998. *Radiation and Environmental Biophysics*, 45(3), 159–166. <https://doi.org/10.1007/s00411-006-0056-1>
- Laksminingpuri, N., Prasetyo, R., & Nurfadhlini. (2018). Distribusi radioisotop radon-222 dalam gas tanah di kawasan nuklir Pasar Jumat. *Prosiding Seminar Nasional APISORA*, 126–130. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/51/070/51070254.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/51/070/51070254.pdf)
- Laurier, D., Valenty, M., & Tirmarche, M. (2001). Radon exposure and the risk of leukemia: A review of epidemiological studies. *Health Physics*, 81(3), 272–288. <https://doi.org/10.1097/00004032-200109000-00009>
- LHI Analytical. (t.t.). *How e-perms® work*. Diakses pada 1 Maret 2023 dari <http://www.lhianalytical.com/Radon-Professional-Services/How-EPerms-Work.aspx>
- Li, C., Wang, C., Yu, J., Fan, Y., Liu, D., Zhou, W., & Shi, T. (2020). Residential radon and histological types of lung cancer: A meta-analysis of case-control studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041457>

- Lorenzo-González, M., Ruano-Ravina, A., Torres-Durán, M., Kelsey, K. T., Provencio, M., Parente-Lamelas, I., Leiro-Fernández, V., Vidal-García, I., Castro-Añón, O., Martínez, C., Golpe-Gómez, A., Zapata-Cachafeiro, M., Piñeiro-Lamas, M., Pérez-Ríos, M., Abal-Arca, J., Montero-Martínez, C., Fernández-Villar, A., & Barros-Dios, J. M. (2019). Lung cancer and residential radon in never-smokers: A pooling study in the Northwest of Spain. *Environmental Research*, 172(March), 713–718. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.011>
- Lu, L., Zhang, Y., Chen, C., Field, R. W., & Kahe, K. (2022). Radon exposure and risk of cerebrovascular disease: a systematic review and meta-analysis in occupational and general population studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(30), 45031–45043. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20241-x>
- Mc Laughlin, J. P. (2019). Dosimetric and epidemiological approaches to radon lung cancer risk assessment. *Radiation Protection Dosimetry*, 184(3–4), 285–289. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz082>
- Messier, K. P., & Serre, M. L. (2017). Lung and stomach cancer associations with groundwater radon in North Carolina, USA. *International Journal of Epidemiology*, 46(2), 676–685. <https://doi.org/10.1093/ije/dyw128>
- Minina, V. I., Sinitsky, M. Y., Druzhinin, V. G., Fucic, A., Bakanova, M. L., Ryzhkova, A. V., Savchenko, Y. A., Timofeeva, A. A., Titov, R. A., Voronina, E. N., Volobaev, V. P., & Titov, V. A. (2018). Chromosome aberrations in peripheral blood lymphocytes of lung cancer patients exposed to radon and air pollution. *European Journal of Cancer Prevention*, 27(1), 6–12. <https://doi.org/10.1097/CEJ.0000000000000270>
- Mittal, S., Rani, A., & Mehra, R. (2016). Estimation of radon concentration in soil and groundwater samples of Northern Rajasthan, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(2), 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.10.006>
- Noor, T., Tejamaya, M., Saputra, M. A., & Purwanti, T. (2020). Kajian risiko pajanan sinar gama dan radon pada pekerja di area terowongan eksplorasi uranium remaja, Kalimantan Barat. *Eksplorium*, 41(2), 151. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2020.41.2.5882>

- Nugraha, E. D., Hosoda, M., Kusdiana, Untara, Mellawati, J., Nurokhim, Tamakuma, Y., Ikram, A., Syaifudin, M., Yamada, R., Akata, N., Sasaki, M., Furukawa, M., Yoshinaga, S., Yamaguchi, M., Miura, T., Kashiwakura, I., & Tokonami, S. (2021). Comprehensive exposure assessments from the viewpoint of health in a unique high natural background radiation area, Mamuju, Indonesia. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93983-2>
- Nugraha, E. D., Hosoda, M., Mellawati, J., Untara, U., Rosianna, I., Tamakuma, Y., Modibo, O. B., Kranrod, C., Kusdiana, K., & Tokonami, S. (2021). Radon activity concentrations in natural hot spring water: Dose assessment and health perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(3), 1–8. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030920>
- Nugraha, E. D., Wahyudi, K., & Iskandar, D. (2019). Radon concentrations in dwelling of south kalimantan, Indonesia. *Radiation Protection Dosimetry*, *184*(3–4), 463–465. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz089>
- Nurohman, H., Bakti, H., Indarto, S., Permana, H., Yuliyanti, A., A. K. A., & Gaffar, E. Z. (2016). Zona Permeabel Di Kawah Gunung Papandayan Berdasarkan Gas Radon Dan Thoron. *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan*, *26*(2), 131. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2016.v26.274>
- Onishchenko, A., & Zhukovsky, M. (2017). The role of confounding factors in a radon epidemiological study. *Radiat. Hygiene*, *10*(1), 74. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-65-75>
- Pahrudin, Milvita, D., & Wahyudi. (2022). Pengukuran konsentrasi gas radon (222 Rn) dan thoron (220 Rn) menggunakan detektor CR-39 pada rumah penduduk. *Jurnal Fisika Unand*, *11*(3), 354–359.
- Park, E. J., Lee, H., Kim, H. C., Sheen, S. S., Koh, S. B., Park, K. S., Cho, N. H., Lee, C. M., & Kang, D. R. (2020). Residential radon exposure and cigarette smoking in association with lung cancer: A matched case-control study in Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(8), 1–9. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082946>
- Pedoman Teknis Penerapan K3 Lingkungan Kerja (Pedoman Permenaker) Nomor 5 Tahun 2018. (2018). <https://katigaku.top/wp-content/uploads/2018/07/Pedoman-Permenaker-No.5-Th.-2018-13072018.pdf>

- Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Perka BAPETEN) Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Pada Pemanfaatan Tenaga Nuklir. (2013). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/peraturan-kepala-badan-no-4-tahun-2013-tentang-keselamatan-radiasi-dalam-pemanfaatan-tenaga-nuklir>
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2019 tentang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit. (2019). [https://yankes.kemkes.go.id/unduhuan/fileunduhuan\\_1658478203\\_829878.pdf](https://yankes.kemkes.go.id/unduhuan/fileunduhuan_1658478203_829878.pdf)
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif. (2023). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/peraturan-pemerintah-no-45-tahun-2023-tentang-keselamatan-radiasi-pengion-dan-keamanan-zat-radioaktif>
- Petermann, E., Bossew, P., & Hoffmann, B. (2022). Radon hazard vs. radon risk - On the effectiveness of radon priority areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 244–245(August 2021), 106833. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106833>
- Portal resmi provinsi DKI Jakarta (Portal DKI). (t.t.). Perizinan bangunan. Diakses pada 26 April 2023 dari: <https://www.jakarta.go.id/perizinan-bangunan>
- Prasetyo, R., Laksminingpuri, N., & Pujiindiyati, E. R. (2020). Konsentrasi radon-222 dalam gas tanah untuk deteksi distribusi permeabilitas di daerah panas bumi tampomas, Jawa Barat. *Eksplorium*, 41(1), 53. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2020.41.1.5642>
- Pratama, T. O., & Hawibowo, S. (2021). Deterministic system for earthquake early warning system based on radon gas concentration anomaly at Yogyakarta. *AIP Conference Proceedings*, 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0037683>
- Public Health England (PHE). (2018). UK national radon action plan. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5c1917e7ed915d0b753d1568/UK\\_National\\_Radon\\_Action\\_Plan.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5c1917e7ed915d0b753d1568/UK_National_Radon_Action_Plan.pdf)

- Pudjadi, E., Wahyudi, Warsona, A., & Syarbaini. (2016). Measurement of Indoor radon-*thoron* concentration in dwellings of Bali Island, Indonesia. *2nd International Conference on the Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (SERIR2) & 14th Biennial Conference of the South Pacific Environmental Radioactivity Association, September, 186–192*. BATAN.
- Putri, S., Milvita, D., & Wahyudi, W. (2020). Analisis konsentrasi gas radon (Rn-222) menggunakan detektor jejak nuklir CR-39 di objek wisata Lobang Jepang Bukittinggi. *Jurnal Fisika Unand*, 9(2), 250–256. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.2.250-256.2020>
- Raashou-Nielsen, O., Andersen, C.E., Andersen, H.P., Gravesen, P., Lind, M., Schüz, J., & Ulbak, K. (2008). Domestic radon and childhood cancer in Denmark. *Epidemiology* 19, 536-543. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e318176bfcd>
- Radon Be Gone (t.t.). *Breathing in radon*. Diakses 5 Januari 2023 dari <https://www.radonbegone.com/breathing-in-radon/>
- Radon Competence Centre. (t.t.). *Radon-measurement and evaluation*. Diakses pada 3 April 2024, dari <https://www.radon.gv.at/en/information-about-radon/downloads/dach-brochures/radon-measurement-and-evaluation>
- Ratnawati, I. G. A., Sutapa, G. N., & Ratini, N. N. (2017). Distribusi gas radon di ruangan berbahan gipsum dan resiko kanker paru-paru. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi IV (Senastek IV)*. <http://erepo.unud.ac.id/id/eprint/23401/1/d2e00d5ecc090893dee59010dc817a74.pdf>
- Řeřicha, V., Kulich, M., Řeřicha, R., Shore, D.L., & Sandler, D.P. (2006). Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: A case-cohort study. *Environ. Health Perspect.* 114, 818-822. <https://doi.org/10.1289/ehp.8476>.
- Reddy, A., Conde, C., Peterson, C., & Nugent, K. (2022). Residential radon exposure and cancer. *Oncology Reviews*, 16(1). <https://doi.org/10.4081/oncol.2022.558>
- Rose, J. (2009). Have you heard the story of Stanley Watras? <https://activerain.com/blogsview/1100259/have-you-heard-the-story-of-stanley-watras->

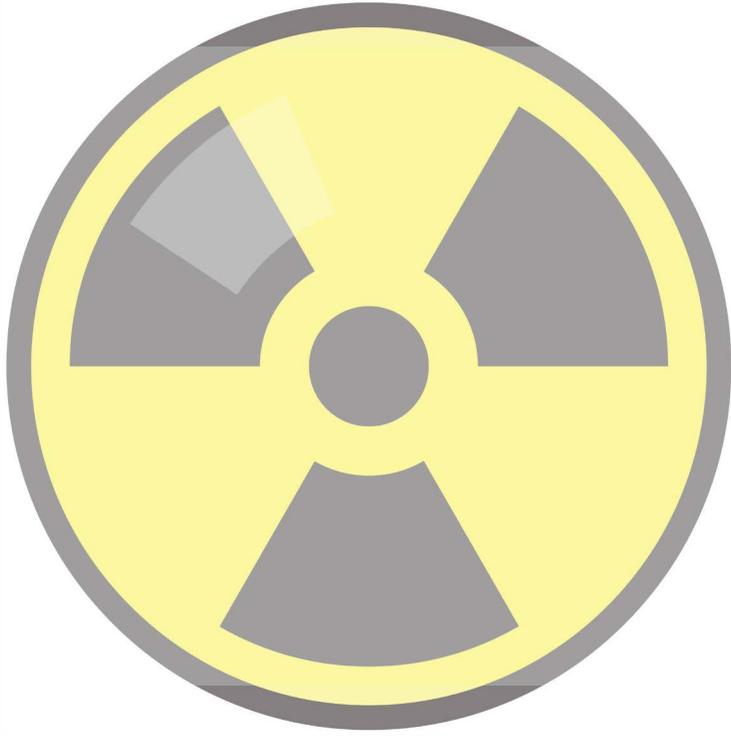
- Royal Society of Chemistry (RSC). (t.t.). *Radon*. Diakses pada 2 Januari 2023 dari <https://www.rsc.org/periodic-table/element/86/radon>
- Saputra, M.A., Nugraha, E.D., Purwanti, T., Arifianto, R., Laksmana, R.I., Hutabarat, R.P., Hosoda, M., Tokonami, S. (2020). *Nukleonika*, 65(2), 89–94. <https://doi.org/10.2478/nuka-2020-0013>
- Schubert, M. (2015). Using radon as environmental tracer for the assessment of subsurface Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL) contamination – A review. *European Physical Journal: Special Topics*, 224(4), 717–730. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02402-3>
- Senitkova, I. J., & Kraus, M. (2019). Seasonal and floor variations of indoor radon concentration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 221(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012127>
- Setyaningsih, W. (2010). Model pergerakan bahan pencemar minyak disel pada akuifer batupasir formasi volkanik merapi muda. *Jurnal Geografi*, 7(2), 75–87.
- Sitorus, M., Sembiring, T., & Pudjadi, E. (2016). Konsentrasi radiasi gas radon – *thoron* pada erupsi Gunung Sinabung dengan detector CR – 39. *Jurnal Ikatan Alumni Fisika*, 2(1), 55. <https://doi.org/10.24114/jiaf.v2i1.4373>
- Sunardi, B., Rohadi, S., Muslim, B., Ngadmanto, D., Susilanto, P., Pakpahan, S., Kurniawan, T., & Prayogo, A. S. (2018). Variasi gas radon dan aktivitas kegempaan di sekitar patahan Opakt. *Journal of Environment and Geological Hazards*, 9(1), 11–20. <https://doi.org/10.34126/jlbg.v9i1.166>
- Sutarman, Warsona, A., Novia, S., & Luhantara. (2003). Penentuan kadar gas radon pada beberapa tempat berpendingin di ISTN Jakarta menggunakan detektor jejak nuklir CR-39. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, P3TM BATAN, Yogyakarta, 8 Juli 2003.
- Syarbaini, S., & Bunawas, B. (2010). Studi penurunan konsentrasi gas radon dalam ruangan menggunakan beton ringan. *Jurnal Permukiman*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.31815/jp.2010.5.1-6>

- Syarbaini, Iskandar, D., & Kusdiana. (2015). Perkiraan dosis radiasi yang diterima publik di provinsi Bangka Belitung. *Jurnal Ekologi Kesehatan Vol., 14*(4), 318–333. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/1856/1/2015%20Syarbaini%20Jurnal%20Ekologi%20Kesehatan.pdf>
- Syarbaini, & Pudjadi, E. (2015). Radon and *thoron* exhalation rates from surface soil of Bangka - Belitung Islands, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience, 2*(1), 35–42. <https://doi.org/10.17014/ijog.2.1.35-42>
- Tokonami, S. (2019). *Dosimetric approach in defining dose conversion factors for radon and historical overview*. [https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared Documents/Radiation Protection/TM on radon dose conversion factors, 1–4 October 2019/03 - Dosimetric approach - S\\_Tokonami.pdf](https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared Documents/Radiation Protection/TM on radon dose conversion factors, 1–4 October 2019/03 - Dosimetric approach - S_Tokonami.pdf)
- Tomášek, L., & Malatova, I. (2006). Leukaemia and lymphoma among Czech uranium miners. *Medical Radiology and Radiation Safety 51*(5), 74–79. [https://www.researchgate.net/publication/237710189\\_Leukaemia\\_and\\_lymphoma\\_among\\_Czech\\_uranium\\_miners](https://www.researchgate.net/publication/237710189_Leukaemia_and_lymphoma_among_Czech_uranium_miners)
- Turner, M. C., Krewski, D., Chen, Y., Pope, C. A., Gapstur, S. M., & Thun, M. J. (2012). Radon and nonrespiratory mortality in the American cancer society cohort. *American Journal of Epidemiology, 176*(9), 808–814. <https://doi.org/10.1093/aje/kws198>
- United Nations Environmental Programme (UNEP). (2016). *Radiation Effects and Sources*. <http://www.unscear.org/unsear/en/publications/radiation-effects-and-sources.html>
- UNSCEAR. (2000). *UNSCEAR 2000 report to the general assembly with scientific annexes*. Annex B: Exposures from natural radiation sources. United Nations. [https://www.unscear.org/unsear/uploads/documents/publications/UNSCEAR\\_2000\\_Annex-B.pdf](https://www.unscear.org/unsear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2000_Annex-B.pdf)
- UNSCEAR. (2008). *UNSCEAR 2006 report to the general assembly with scientific annexes*. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. United Nations. [https://www.unscear.org/unsear/uploads/documents/publications/UNSCEAR\\_2006\\_Annex-E-CORR.pdf](https://www.unscear.org/unsear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2006_Annex-E-CORR.pdf)
- UNSCEAR. (2010). *UNSCEAR 2008 report to the general assembly, with scientific annexes*. Volume I: Sources. United Nations. [http://www.unscear.org/unsear/uploads/documents/unsear-reports/UNSCEAR\\_2008\\_Report\\_Vol.I-CORR.pdf](http://www.unscear.org/unsear/uploads/documents/unsear-reports/UNSCEAR_2008_Report_Vol.I-CORR.pdf)

- UNSCEAR. (2020). *UNSCEAR 2019 report to the general assembly, with scientific annexes*. Annex B: Lung cancer from exposure to radon. United Nations. [https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR\\_2019\\_Annex-B.pdf](https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2019_Annex-B.pdf)
- US-EPA. (2016). *A citizen's guide to radon, the guide to protecting yourself and your family from radon indoor*. EPA 402/K-12/002. [https://www.epa.gov/sites/default/files/201612/documents/2016\\_a\\_citizens\\_guide\\_to\\_radon.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/201612/documents/2016_a_citizens_guide_to_radon.pdf)
- US-EPA. (t.t.). *Describe the radon epidemiological studies?* Diakses pada 28 Februari 2023 dari <https://www.epa.gov/radon/describe-radon-epidemiological-studies>
- Vasudevan, L., & McLain, M. E. (1994). Atmospheric pressure effects on the calibration constant of alpha-track radon detectors. *Health Physics*, 66(3), 318–326. <https://doi.org/10.1097/00004032-199403000-00013>
- Vienneau, D., De Hoogh, K., Hauri, D., Vicedo-Cabrera, A. M., Schindler, C., Huss, A., & Rösli, M. (2017). Effects of radon and UV exposure on skin cancer mortality in Switzerland. *Environmental Health Perspectives*, 125(6), 1–8. <https://doi.org/10.1289/EHP825>
- Villeneuve, P. J., Lane, R. S. D., & Morrison, H. I. (2007). Coronary heart disease mortality and radon exposure in the Newfoundland fluorspar miners' cohort, 1950-2001. *Radiation and Environmental Biophysics*, 46(3), 291–296. <https://doi.org/10.1007/s00411-007-0108-1>
- Vogiannis, E. G., & Nikolopoulos, D. (2015). Radon sources and associated risk in terms of exposure and dose. *Frontiers in Public Health*, 2(JAN), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00207>
- Wahyudi, Kusdiana, & Iskandar, D. (2016). Mapping of indoor radon concentration in houses located in South Sulawesi Province. *Proceedings 2nd International Conference on the Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (SERIR 2016) in Conjunction with 14th Biennial Conference of the South Pacific Environmental Radioactivity Association (SPERA), December*, 5–9.
- Wahyudi, W., Iskandar, D., Safitri, R., & Kusdiana, K. (2017). Determination of radon concentrations in dwelling in Aceh. *Jurnal Natural*, 17(2), 96–101. <https://doi.org/10.24815/jn.v17i2.8154>

- Wahyudi, Kusdiana, Wiyono, M., & Iskandar, D. (2019). Analisis dosis radiasi alam dari paparan radon dan radiasi gamma di rumah penduduk Di Kalimantan Barat. *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir*, 22(2), 63. <https://doi.org/10.17146/gnd.2019.22.2.5094>
- Wahyudi, Winarni, I. D., Kusdiana & Widyaningsih, O.D. (2019). Konsentrasi radon dalam rumah (indoor) di wilayah Maluku Utara. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Nuklir, October*. [https://www.researchgate.net/profile/Wahyudi-Wahyudi-10/publication/344519436\\_Konsentrasi\\_Radon\\_Dalam\\_Rumah\\_indoor\\_di\\_Wilayah\\_Maluku\\_Utara/links/5f7de61292851c14bc664e4/Konsentrasi-Radon-Dalam-Rumah-indoor-di-Wilayah-Maluku-Utara.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wahyudi-Wahyudi-10/publication/344519436_Konsentrasi_Radon_Dalam_Rumah_indoor_di_Wilayah_Maluku_Utara/links/5f7de61292851c14bc664e4/Konsentrasi-Radon-Dalam-Rumah-indoor-di-Wilayah-Maluku-Utara.pdf)
- Wahyudi, Winarni, I. D., & Wiyono, M. (2020). Indoor radon measurements in Madura dwellings. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012012>
- Wahyudi, W., Ilma, D. W., Muji, W., & Kusdiana, K. (2021). Analysis of radon concentration and gamma dose rate in residential houses of Ambon and Seram Islands, Maluku. *Jurnal Natural*, 21(1), 17–22. <https://doi.org/10.24815/jn.v21i1.18140>
- Wheeler, B. W., Allen, J., Depledge, M. H., & Curnow, A. (2012). Radon and skin cancer in southwest England: An ecologic study. *Epidemiology*, 23(1), 44–52. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31823b6139>
- WHO. (2009). *WHO handbook of indoor radon a public health perspective*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>
- WHO. (t.t.a). *Radon*. Diakses pada 27 Januari 2023 dari <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- WHO. (t.t.b). *Global health observatory data repository: National radon reference levels, data by country*. Diakses pada 1 April 2023 dari <https://apps.who.int/gho/data/view.main.RADON03v>
- WHO. (t.t.c). *Existence of national radon action plan*. Diakses pada 3 April 2024 dari <https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/gho-phe-radon-database-existence-of-national-radon-action-plan>

- Widisaputra, M. R., Milvita, D., & Kusdiana, K. (2022). Penentuan laju dosis efektif gas radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) dan gas *thoron* ( $^{220}\text{Rn}$ ) menggunakan CR-39 di Nagari Solok Bio-Bio, kabupaten 50 kota, Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.1.1-7.2023>
- Winkler-Heil, R., Hofmann, W., Marsh, J., & Birchall, A. (2007). Comparison of radon lung dosimetry models for the estimation of dose uncertainties. *Radiation Protection Dosimetry*, 127(1–4), 27–30. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm339>
- Wulandarisman, M., Milvita, D., & Wahyudi, W. (2022). Pengukuran konsentrasi gas radon ( $\text{Rn-222}$ ) dan gas *thoron* ( $\text{Rn-220}$ ) menggunakan detektor CR-39 pada ruangan kelas di Kota Lubuk Basung. *Jurnal Fisika Unand*, 11(1), 113–118. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.1.113-118.2022>
- Yufita, E., & Safitri, R. (2013). Identifikasi kandungan radon ( $\text{Rn-222}$ ) pada bahan bangunan batu bata di kawasan Aceh Besar. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 1(2), 207–214. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v1i2.960>



Buku ini tidak diperjualbelikan.

## Tentang Penulis



### Eri Hiswara

Penulis adalah salah seorang staf periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak 2021. Sebelumnya, penulis merupakan staf peneliti di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sejak tahun 1984. Penulis menamatkan pendidikan sarjana fisika (S-1) di FMIPA UI, dan master (S-2) di University of Surrey, Guildford, Inggris, keduanya pada jurusan Fisika. Pada tahun 2003–2007 penulis sempat menjadi atase ilmu pengetahuan di KBRI/PTRI Wina. Selain aktif sebagai periset, penulis juga menjadi staf pengajar luar biasa pada Program Pendidikan Dokter Spesialis (PPDS) Radiologi di FKUI untuk mata ajar Fisika dan Proteksi Radiasi serta di Sekolah Tinggi Intelijen Negara (STIN) untuk mata ajar Nuklir, Biologi dan Kimia (NUBIKA), dengan kekhususan pada Keselamatan dan Keamanan Nuklir dan Radiasi. Penulis adalah anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), Perkumpulan Ahli Proteksi Radiasi Indonesia (APRI), dan Health Physics Society (HPS). *E-mail*: erih001@brin.go.id.



## Nur Rahmah Hidayati

Penulis lahir Yogyakarta, 8 Agustus 1969. Penulis adalah kepala kelompok dosimetri pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak 2021. Penulis menamatkan Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir BATAN 2005. Pada tahun 2010–2012 penulis melanjutkan pendidikan pada bidang Medical Radiation Physics di University of Wollongong, Australia. Selain aktif sebagai periset, penulis juga menjadi staf pengajar luar biasa pada Program Pendidikan Dokter Spesialis (PPDS) Radiologi di FKUI. Selain itu, penulis juga sebagai dosen tamu pada Internal Dosimetry, TC on Candidate of Medical Physics, Hasanuddin University dan Universitas Diponegoro. *E-mail*: nurr001@brin.go.id.



## Syarifatul Ulya

Penulis lahir di Demak pada tanggal 10 Agustus 1992, dan memperoleh gelar sarjana fisika dari Universitas Negeri Semarang pada tahun 2014. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan pada program magister fisika di Universitas Indonesia dan lulus pada tahun 2016. Setelah itu penulis mengikuti program residensi fisika medis spesialis di Universitas Indonesia dalam kerangka IAEA RCA Project RAS/6/077. Pada awal tahun 2021 penulis menjadi pegawai di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Dengan bergabungnya BATAN ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada September 2021, penulis kemudian menjadi staf periset di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTKMMN) di BRIN. Beberapa pendidikan tambahan yang pernah

diperolehnya adalah Training Course on Enhancing Emergency Preparedness and Response Capabilities in ASEAN Region in Radiation Monitoring and Dose Assessment pada proyek RCA-ASEANTOM pada tahun 2023, ICTP/IAEA Workshop on Radiotherapy Dosimetry Audits Methodologies di Italia pada tahun 2022, Winter School on Dosimetry-Guided Treatment Planning for Radionuclide Therapy (EFOMP) pada tahun 2021, ASEAN Trainer Training Course on Advanced Radiotherapy di Korea Selatan pada tahun 2019, dan Particle Therapy Workshop, ACPSEM, di Australia pada tahun 2018. *E-mail:* syar015@brin.go.id.



### **Okky Agassy Firmansyah**

Penulis lahir di Kabupaten Nganjuk pada tanggal 11 Juni 1993. Penulis meneruskan jenjang kuliah di Jurusan D-3 Metrologi dan Instrumentasi ITS Surabaya, yang kemudian dilanjutkan dengan program lintas jalur (LJ) ke sarjana di Teknik Fisika ITS Surabaya. Pada tahun 2021 penulis mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan pendidikan S-2 di University of Science and Technology (UST) Korea Selatan. Bidang minat yang ditekuni oleh penulis adalah dosimetri dan metrologi radiasi pengion. *E-mail:* okky001@brin.go.id.



### **Aqila Khansa Uthuruzza Gusrinanti**

Penulis adalah salah seorang mahasiswi aktif semester 7 pada Jurusan Fisika di Universitas Syiah Kuala dengan IPK 3,33. Penulis aktif berorganisasi dan dapat bekerja sama dengan baik, serta tertarik dengan bidang fisika medis. Penulis lahir pada tanggal 17 Mei 2003 di Palembang, Sumatera Selatan, dan menamatkan pendidikan menengah di SMA Negeri 2 Banda Aceh pada tahun 2020. Penulis aktif di berbagai

organisasi saat di SMA ataupun kampus. Beberapa organisasi yang penulis ikuti adalah Himpunan Mahasiswa Fisika, Badan Eksekutif Mahasiswa, dan KSR-PMI USK. Saat ini penulis menjabat sebagai Ketua Divisi Humas KSR-PMI USK periode 2023. Penulis juga pernah menjadi tutor mata kuliah Pengantar Fisika pada tahun 2021. *E-mail*: kanshaaqilla1@gmail.com.



### **Auliya Rahman**

Penulis adalah seorang mahasiswi S-1 Program Studi Fisika dengan fokus Fisika Medis di Universitas Andalas. Penulis lahir di Tiku, 24 Juli 2001. Pada awal tahun 2023, penulis berkesempatan mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis ditempatkan di kelompok dosimetri pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTKMMN) di Kawasan Sains dan Teknologi Siwabessy, Pasar Jumat, Jakarta Selatan. Hal itu adalah pengalaman baru bagi penulis untuk terlibat dalam suatu proses pembuatan buku. Oleh karena itu, penulis berterima kasih atas kesempatan yang diberikan selama perkuliahan. Penulis aktif mengikuti beberapa kegiatan organisasi dan kepanitiaan di kampus, diantaranya sebagai staf kesekretariatan keluarga mahasiswa wirausaha (KMW) (2023), staf konsumsi pada *event* Physics Festival ke 24 (2023), MC *event* Tutor Gratis HIMAFI (2022). *E-mail*: aulyarahman257@gmail.com.



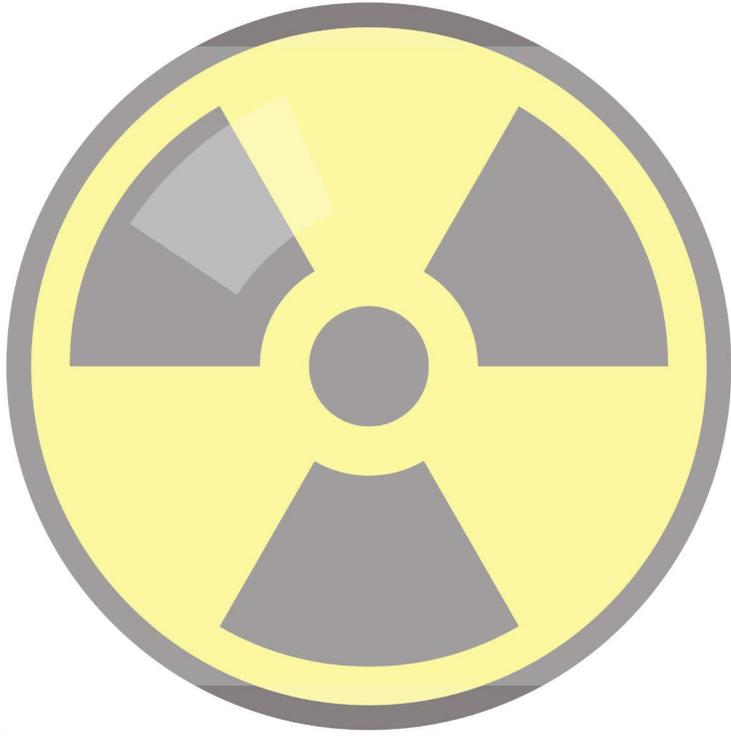
### **Ryan Yulma Susanto**

Lahir di Kambang pada tanggal 1 Oktober 2001, penulis merupakan mahasiswa S-1 pada jurusan Fisika di Universitas Andalas. Pada tahun 2023, penulis mengikuti program MBKM di Kelompok Dosimetri pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir BRIN yang berlokasi di Kawasan Sains dan Teknologi Siwabessy, Pasar Jumat, Jakarta Selatan. Selama perkuliahan, penulis aktif di beberapa kegiatan kepanitiaan di kampus, seperti menjadi staf Humas pada event Physics Festival ke 24 tahun 2023, staf Perlengkapan pada event Physics Festival ke 23 tahun 2022 dan di tahun yang sama juga menjadi staff konsumsi pada *event* BAKTI FMIPA. *E-mail*: rianyulmai01@gmail.com.



### **Wildatun Zahra**

Lahir di Kampung Paya pada tanggal 19 Mei 2002, penulis merupakan seorang mahasiswa S-1 pada Jurusan Fisika FMIPA Universitas Syiah Kuala. Pada tahun 2023, penulis mengikuti program MBKM BRIN di Kelompok Dosimetri pada Pusat Riset Teknologi Keselamatan Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTK-MMN), Kawasan Sains dan Teknologi (KST) Siwabessy, Pasar Jumat, Jakarta Selatan. Selama perkuliahan, penulis aktif di beberapa kegiatan himpunan mahasiswa di kampus, seperti menjadi ketua panitia PAKARMARU periode 2022/2023, ketua panitia acara Pelatihan CV BEM FMIPA 2022/2023, ketua panitia acara Bakti Sosial Himafis 2020/2021, panitia acara POH Himafis 2020/2021, panitia acara PCOH VIII Himafis. *E-mail*: wildatunzahra@gmail.com.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

# Indeks

Aceh, 71, 75, 101, 103, 107  
air panas Ciater, 78

Bali, 71, 98  
Bangka, 78, 100  
Belitung, 78, 100  
beton ringan, 13, 74, 91, 99

CDC, 20, 85  
Cipanas, 78  
Cisalada, 79  
Ciwidey, 78  
CR-39, 32, 41, 43, 70, 71, 72, 73, 76,  
78, 85, 91, 96, 98, 99, 103

depresurisasi tanah aktif, 63  
depresurisasi tanah pasif, 63  
deret aktinium, 5, 6, 7

deret torium, 5, 6, 7  
deret uranium, 5, 6, 7  
detektor arang aktif, 30, 31  
detektor ion elektret, 30  
detektor jejak alfa, 31, 32  
detektor sawar muka, 38  
DNA, 19, 23, 85

EPA, 20, 25, 27, 40, 41, 42, 43, 44,  
47, 86, 91, 93, 101

faktor kesetimbangan, 14, 49, 50, 67

Gua Batu, 76  
Gua Mimpi, 76  
Gunung Masigit, 79, 90  
Gunung Papandayan, 79, 96  
Gunung Sinabung, 70, 99  
Gunung Tampomas, 80

- IAEA, 14, 47, 56, 59, 62, 63, 64, 65,  
71, 72, 83, 86, 92, 93, 106,  
107
- IARC, 18, 19, 86, 93
- ICRP, 7, 8, 9, 14, 15, 23, 36, 50, 51,  
55, 56, 57, 58, 59, 61, 65, 66,  
67, 71, 72, 75, 83, 86, 93
- justifikasi, 57
- Kalan, 76
- Kalimantan Barat, 71, 76, 95, 102
- Kalimantan Selatan, 71
- kanker ginjal, 25
- kanker kulit, 24
- kanker lambung, 24
- kanker paru-paru, 2, 4, 17, 19, 20,  
21, 22, 23, 25, 26, 27, 36, 46,  
47, 48, 59, 83, 98
- kanker payudara, 25
- kanker tiroid, 25
- kardiovaskular, 24
- kategori pajanan, 56
- Ke'te'Kesu, 76
- konsentrasi energi alfa potensial,  
48, 49, 67
- konsentrasi radon, 2, 10, 11, 13, 14,  
15, 19, 20, 23, 26, 29, 30, 31,  
32, 33, 35, 36, 38, 40, 42, 43,  
44, 45, 46, 47, 48, 57, 58, 60,  
61, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 74,  
75, 76, 77, 78, 79, 80, 83, 84
- Korea Selatan, 22, 107
- limfoma, 23
- limfosit darah, 22
- limitasi dosis, 57, 59
- Lubuk Basung, 72, 103
- Madura, 71, 102
- Maluku, 71, 102
- Maluku Utara, 71, 102
- Mamuju, 78, 96
- membran, 38, 62, 63
- mitigasi, 45, 46, 54, 58, 60, 64, 65,  
66, 73, 76, 83
- model generasi saluran napas, 50,  
51
- model ICRP, 51
- monitor radon kontinu, 31, 35
- myeloma, 98
- Nagari Alam Pauh Duo, 72
- Nagari Solok Bio-Bio, 72, 73, 103
- non-perokok, 2, 17, 20, 22
- optimisasi proteksi, 57, 58, 59
- pajanan, 2, 3, 9, 10, 11, 13, 14, 17,  
18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25,  
26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34,  
36, 38, 41, 42, 45, 46, 47, 48,  
49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60,  
61, 62, 65, 66, 67, 68, 69, 83,  
84, 95
- Pangalengan, 78
- partikel alfa, 19, 24, 32, 35, 48
- Pasar Jumat, 71, 74, 94, 108, 109
- peluruhan, 3, 5, 6, 7, 18, 35, 38, 48
- Perancis, 23
- perokok, 2, 17, 18, 20, 22, 59
- Piyungan, 80

- polikarbonat, 32  
 produk peluruhan, 3, 5, 6, 7  
 Pundong, 80
- radioaktif, 2, 3, 5, 6, 18, 24, 49, 54,  
 75, 78, 79, 83, 97
- radon, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12,  
 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,  
 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29,  
 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,  
 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,  
 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53,  
 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61,  
 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69,  
 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77,  
 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85,  
 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96,  
 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103
- Rajabasa, 78, 79, 92  
 Republik Ceko, 23  
 risiko kanker paru-paru, 2, 17, 19,  
 20, 21, 25, 26, 36, 59
- saluran pencernaan, 23  
 serebrovaskular, 24, 25
- situasi pajanan, 14, 56, 58, 59, 60  
 Spanyol, 22, 24  
 Subang, 78  
 Sulawesi Selatan, 71, 76, 89
- tabel periodik, 6  
 Taman Nasional Bantimurung, 76,  
 89  
 tambang uranium, 23, 56  
 Terowongan Remaja, 76  
 tingkat acuan, 14, 15, 40, 42, 45, 46,  
 47, 58, 59, 60, 61, 67, 68, 71,  
 72, 73, 74, 76, 83, 84  
 tingkat acuan turunan, 58, 59, 61,  
 67
- UNSCEAR, 10, 17, 26, 27, 29, 49,  
 50, 55, 69, 70, 78, 87, 100,  
 101  
 uranium, 2, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 23,  
 56, 76, 94, 95, 98, 100
- WHO, 12, 15, 17, 19, 20, 21, 29, 30,  
 31, 32, 36, 37, 38, 39, 40, 42,  
 45, 53, 59, 60, 65, 83, 87, 102

**R**adon adalah gas radioaktif yang tidak berbau, berwarna, dan berasa. Radon dipancarkan sebagai hasil peluruhan radioaktif alami uranium yang dapat dijumpai di semua jenis batuan dan tanah, dan juga ditemukan di air. Radon dapat memasuki bangunan melalui retakan di lantai atau sambungan lantai-dinding, celah di sekitar pipa atau kabel, pori-pori kecil di dinding blok berongga, dinding berlubang, atau bak penampungan air atau saluran air. Tingkat radon biasanya lebih tinggi di ruang bawah tanah, dan ruang terbuka yang bersentuhan dengan tanah.

Berdasarkan WHO, radon diperkirakan menjadi penyebab antara 3% hingga 14% dari seluruh kanker paru-paru. Sedangkan Badan Internasional untuk Riset Kanker (IARC) menyatakan bahwa radon terbukti sebagai bahan karsinogen bagi manusia bersama dengan asap tembakau, asbes, dan benzena.

Buku ini menguraikan karakteristik radon dan beberapa aspeknya, yaitu sumber, efek, dan proteksinya. Beberapa riset tentang radon yang telah dilakukan di Indonesia juga diuraikan untuk memberikan gambaran tentang tingkat konsentrasi radon yang ada di negara ini.

Selamat membaca!

**BRIN Publishing**  
*The Legacy of Knowledge*

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

DOI: 10.55981/brin.931



ISBN 978-623-8372-81-2



Buku ini tidak diperjualbelikan.