

Tinjauan Skoping Paparan Radon di Lingkungan Indoor dan Implikasinya terhadap Risiko Kesehatan Masyarakat

Wisnu Wardana Widyatmoko^{*1}, Farahiyah Nur Ramadhanty², Kusuma Ayu Galih Dwi Rahardjo³, Arya Indra Rabbani⁴, Naufal Aulia Bagus Putra⁵, Tata Auliya Intan⁶, Dhanny Achmad Ardiansyah Putra Hermawan⁷, M. Ryan Ferdiansyah⁸, Ratna Dwi Puji⁹, Ratnaningtyas Wahyu Kusuma Wardani¹⁰, Sudarmaji¹¹, M. Farid Dimjati Lusno¹², Kusuma Scorpio Lestari¹³

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13}Departemen Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Airlangga, Indonesia

Email: ¹wisnu.wardana.widyatmoko-2022@fkm.unair.ac.id

Abstrak

Radon merupakan gas radioaktif yang terjadi secara alami dan merupakan kontributor terbesar terhadap paparan radiasi ionisasi pada manusia. Paparan radon di dalam ruangan secara kronis dapat menyebabkan masalah kesehatan, terutama kanker paru-paru. Kondisi ventilasi, karakteristik geologis, dan variasi iklim mempengaruhi konsentrasi radon di dalam ruangan. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan bukti ilmiah terkait paparan radon di dalam ruangan, termasuk metode pemantauan, penilaian risiko, dan dampak kesehatan. Pendekatan tinjauan skoping digunakan melalui pencarian literatur di PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar. Artikel yang ditinjau adalah publikasi berbahasa Inggris dari tahun 2015–2025 yang membahas paparan radon di rumah, sekolah, fasilitas kesehatan, atau tempat kerja. Data dianalisis secara deskriptif dan komparatif berdasarkan konsentrasi radon (Bq/m^3), metode pengukuran, dan hasil kesehatan yang dilaporkan. Sepuluh studi memenuhi kriteria inklusi. Konsentrasi radon di dalam ruangan berkisar antara 10 hingga 2166 Bq/m^3 . Sebagian besar nilai yang dilaporkan berada di bawah pedoman WHO (100 Bq/m^3) dan tingkat referensi ICRP (300 Bq/m^3), meskipun beberapa lokasi dengan ventilasi buruk dan kondisi geologis tertentu melebihi batas-batas tersebut. Paparan radon meningkatkan risiko kanker paru-paru global sebesar 3–14% dan juga terkait dengan gangguan pernapasan serta efek neurologis potensial pada anak-anak. Faktor utama meliputi ventilasi bangunan, usia konstruksi, kelembapan, dan karakteristik tanah. Secara ilmiah, kajian ini mengukuhkan radon sebagai indikator krusial kualitas udara indoor, sekaligus memberikan landasan empiris bagi perumusan kebijakan kesehatan lingkungan dan standar konstruksi nasional.

Kata kunci: Radon, Kesehatan Masyarakat, Kualitas Udara Indoor, Ventilasi, Paparan Radiasi, Risiko Kesehatan

Abstract

Radon is a naturally occurring radioactive gas and the largest contributor to ionizing radiation exposure in humans. Chronic indoor exposure to radon can cause health problems, especially lung cancer. Ventilation conditions, geological characteristics, and climate variations affect indoor radon concentration. This study aims to map scientific evidence related to indoor radon exposure, including monitoring methods, risk assessment, and health impacts. A scoping review approach was used through literature searches in PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar. The reviewed articles were English-language publications from 2020–2025 discussing radon exposure in homes, schools, healthcare facilities, or workplaces. Data were analyzed descriptively and comparatively based on radon concentration (Bq/m^3), measurement methods, and reported health outcomes. Ten studies met the inclusion criteria. Indoor radon concentrations ranged from 10 to 2166 Bq/m^3 . Most reported values were below the WHO guideline (100 Bq/m^3) and the ICRP reference level (300 Bq/m^3), although some locations with poor ventilation and certain geological conditions exceeded these limits. Radon exposure increases global lung cancer risk by 3–14% and is also associated with respiratory disorders and potential neurological effects in children. The main factors include building ventilation, age of construction, humidity, and soil characteristics. Scientifically, this study confirms radon as a crucial indicator of indoor air quality, while also providing an empirical basis for the formulation of environmental health policies and national building codes.

Keywords: Radon, Public Health, Indoor Air Quality, Ventilation, Radiation Exposure, Health Risks

1. PENDAHULUAN

Radon adalah salah satu kontributor utama dari paparan radiasi ionisasi di udara dan merupakan ancaman berbahaya bagi kesehatan manusia. Menurut United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR, 2016), radiasi ionisasi radon merupakan sumber alami terbesar dengan menyumbang lebih dari 50% dari total dosis radiasi yang diterima tubuh manusia dalam setahun. Radon secara alami dilepaskan dari pori-pori batuan dan tanah. Gas radon yang terbentuk di bawah permukaan bumi dapat bermigrasi ke permukaan dan dapat masuk ke dalam bangunan melalui retakan pada pondasi, celah di lantai, sambungan pipa, serta pori-pori tanah di sekitar bangunan. Setelah masuk ke ruang tertutup, konsentrasinya dapat meningkat akibat keterbatasan sirkulasi udara. Ventilasi menjadi faktor pengendali utama, di mana peningkatan pertukaran udara terbukti secara signifikan menurunkan kadar radon dalam ruangan (Lucchetti et al., 2022). Selain itu, bahan bangunan yang mengandung radionuklida alami, kondisi geologi lokal mencakup jenis batuan, porositas tanah, dan tingkat kelembapan, serta faktor cuaca pada daerah tropis, juga memengaruhi kadar radon di dalam ruangan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kadar radon di dalam ruangan dapat mencapai 5–10 kali lebih tinggi dibanding udara luar, terutama pada bangunan dengan ventilasi yang buruk atau kedap energi (Felicioni et al., 2023). Kondisi ini berdampak signifikan terhadap kesehatan masyarakat karena manusia menghabiskan 80 hingga 90 persen waktunya di dalam ruangan (WHO, 2023).

Meskipun risiko kesehatan akibat radon dalam ruangan telah teridentifikasi dengan baik, upaya untuk menilai dan mengelola risiko secara efektif menghadapi berbagai tantangan dalam penelitian yang ada. Dari berbagai hasil studi yang tersedia masih menunjukkan variasi metodologi dan hasil antarnegara. Beberapa penelitian menekankan aspek pemantauan dan pemetaan, tetapi masih secara umum tanpa mengaitkannya dengan metode penilaian risiko maupun dampak kesehatannya. Studi-studi yang ada seringkali terbatas pada kondisi geografis atau jenis bangunan tertentu, seperti fasilitas kesehatan, sekolah, atau area perumahan di berbagai wilayah, sehingga menyusahkan proses generalisasi. Terdapat juga keragaman dalam pendekatan pemantauan, meliputi pemilihan jenis detektor (pasif maupun aktif) hingga durasi pengukuran yang bervariasi. Selain itu, meskipun bahaya kanker paru-paru akibat radon telah banyak diteliti, penelitian tentang dampak kesehatan non-kanker lainnya, seperti penyakit pernapasan, pengaruh terhadap perkembangan anak, dan penyakit lainnya, masih terbatas dan belum dikaji secara menyeluruh. Metode penelitian risiko yang digunakan juga masih bervariasi antar studi.

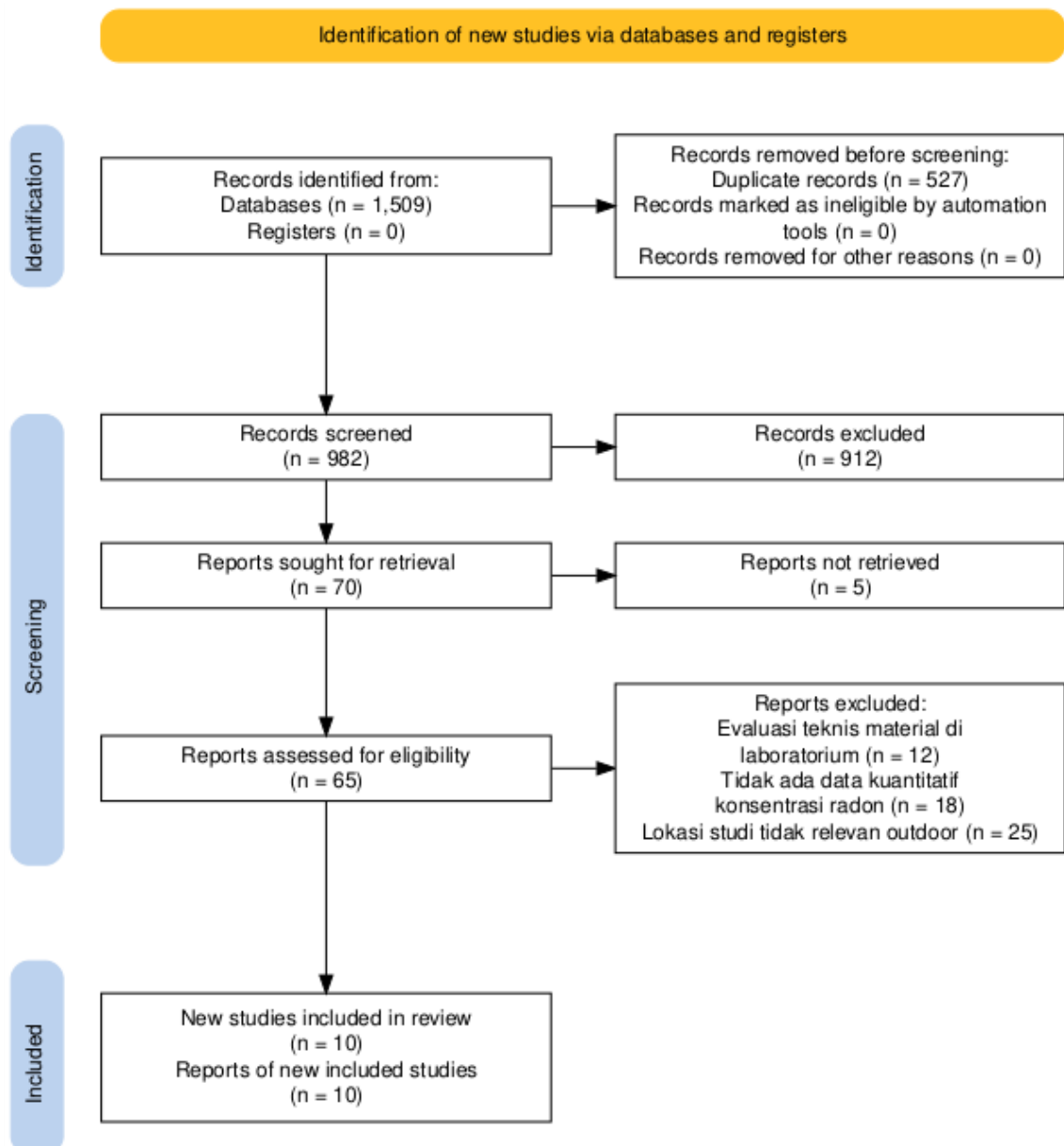
Pendekatan scoping review dipilih untuk menjembatani kesenjangan pengetahuan ini dengan memetakan tren konsentrasi radon indoor, metode pemantauan, dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat secara global. Oleh karena itu, Tujuan studi ini adalah untuk memetakan literatur ilmiah mengenai paparan radon di lingkungan dalam ruangan, metode pemantauan, penilaian risiko, dan dampaknya di berbagai situasi lingkungan. Tinjauan ini akan menguraikan cakupan penelitian saat ini, menyoroti variasi metodologis, dan merekomendasikan bidang-bidang untuk penelitian di masa depan. Temuan-temuan ini diharapkan dapat membantu peneliti, praktisi kesehatan masyarakat, dan pembuat kebijakan memahami kompleksitas masalah ini serta merancang strategi pemantauan dan mitigasi risiko yang lebih efektif.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode literature review dengan pendekatan scoping review yang bertujuan untuk memetakan bukti penelitian yang ada secara komprehensif terkait paparan gas radon pada lingkungan dalam ruangan, serta mengidentifikasi dampak paparan gas radon terhadap kesehatan masyarakat. Pendekatan scoping review dipilih karena memungkinkan peneliti untuk melakukan identifikasi, evaluasi, dan mensintesis dari berbagai hasil penelitian yang telah dilakukan terkait paparan radon.

1.) Strategi Pencarian dan Seleksi Artikel

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis melalui beberapa sumber data ilmiah internasional, antara lain PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar. Beberapa kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian dengan istilah “indoor radon exposure”, “radon concentration”, dan “health impact”. Pembatasan publikasi artikel bahasa inggris yang digunakan dalam rentang waktu 2015-2025 dan mencakup hasil penelitian terkini terkait paparan radon dari berbagai wilayah dunia.



Gambar 1. Strategi Pencarian dan Seleksi Artikel

Untuk menjaga transparansi dan fokus penelitian, ditetapkan kriteria inklusi dan eksklusi yang dirangkum pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Rentang Waktu Terbit	Diterbitkan pada tahun 2015 hingga 2025.	Diterbitkan sebelum tahun 2015.
Lokasi atau Fokus Paparan	Lingkungan dalam ruangan (indoor) seperti sekolah, rumah, fasilitas kesehatan, dan tempat kerja.	Lingkungan luar ruangan (outdoor)
Tipe Data dan Parameter	Menyajikan data kuantitatif konsentrasi radon (dalam Bq/m ³) atau dampak kesehatan masyarakat.	Hanya mengevaluasi rekayasa teknis material bangunan di lab, atau tidak ada hasil pengukuran radon kuantitatif

Kriteria inklusi yang digunakan merupakan artikel diterbitkan dalam rentang waktu 2015–2025, berfokus pada paparan radon di lingkungan dalam ruangan (indoor) seperti sekolah, rumah, fasilitas kesehatan, dan tempat kerja, serta menyajikan data kuantitatif konsentrasi radon dalam satuan Bq/m³ atau dampak kesehatan yang ditimbulkannya. Kriteria eksklusi yang digunakan merupakan artikel diterbitkan sebelum tahun 2015, berfokus pada paparan radon di lingkungan luar ruangan (outdoor), studi yang murni mengevaluasi teknis material bangunan di laboratorium, serta publikasi (seperti opini pakar atau survei awam) yang tidak menyertakan hasil pengukuran konsentrasi radon secara kuantitatif.

2.) Prosedur Analisis Data

Seluruh data yang terpilih diekstraksi dan disajikan dalam bentuk kuantitatif (konsentrasi Bq/m³) maupun kualitatif. Data dianalisis menggunakan pendekatan tematik naratif, dengan pengelompokan hasil berdasarkan kategori lokasi (rumah, sekolah, fasilitas kesehatan, tempat kerja) dan rentang konsentrasi paparan radon. Hasil analisis ini disajikan secara komparatif melalui tabel ekstraksi dan narasi tematik untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai variasi metode pengukuran, tingkat pajanan, dan implikasi kesehatan yang ditimbulkan.

3.) Validitas dan Keandalan Analisis

Validasi hasil penyaringan dan ekstraksi literatur dilakukan melalui *peer checking* (pengecekan sejawat) secara independen guna meminimalisir bias seleksi dan memastikan reliabilitas data. Selain itu, dilakukan perbandingan data hasil penelitian dengan ambang batas paparan referensi internasional, yaitu pedoman *World Health Organization* (WHO) sebesar 100 Bq/m³ dan *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) sebesar 300 Bq/m³. Pendekatan ini memberikan dasar metodologis yang kuat untuk sintesis bukti pada bidang kesehatan lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Tinjauan Global Paparan Radon Indoor

Hasil Scoping review ini mencakup sepuluh penelitian yang mengevaluasi konsentrasi gas radon di lingkungan dalam ruangan serta dampak kesehatannya terhadap masyarakat. Penelitian-penelitian tersebut meliputi pengukuran lapangan pada berbagai tipe bangunan, yaitu: 1. sekolah; 2. rumah; 3. fasilitas kesehatan; 4. tempat kerja. Analisis ini memfokuskan pada metode pengukuran, kisaran konsentrasi radon dalam satuan Bq/m³, serta potensi risiko kesehatan yang diidentifikasi. Secara umum, hasil pengukuran konsentrasi radon dalam ruangan berada pada kisaran 10 hingga 600 Bq/m³, dengan rata-rata sebagian besar studi masih berada di bawah ambang batas yang direkomendasikan oleh WHO (100 Bq/m³) dan ICRP (300 Bq/m³). Namun, beberapa lokasi spesifik, seperti area tambang, ruang bawah tanah, serta bangunan dengan sirkulasi udara buruk, tercatat melebihi nilai ambang tersebut.

Studi oleh Azzam et al. (2023) berjudul *Indoor Radon Concentration Levels in Healthcare Settings: The Results of Environmental Monitoring in a Large Italian University Hospital* dilakukan di Italia dengan fokus pada pemantauan kadar radon di lingkungan rumah sakit universitas besar. Pengukuran menggunakan detektor radon kontinu pada berbagai ruangan, termasuk ruang bawah tanah dan area radiologi. Hasil menunjukkan kadar radon berkisar antara 57 hingga 220 Bq/m³, dengan nilai tertinggi ditemukan di ruang bawah tanah yang memiliki ventilasi minim. Sebagian hasil pengukuran melampaui batas aman WHO, menegaskan pentingnya sistem ventilasi aktif dan inspeksi berkala di fasilitas kesehatan untuk melindungi pekerja dan pasien dari paparan radon kronis.

Kajian yang dilakukan oleh Petrescu et al. (2024) dalam *Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies* memberikan tinjauan global terhadap berbagai penelitian empiris terkait radon dan dampaknya terhadap kesehatan manusia. Artikel ini mengkompilasi lebih dari 50 studi lintas benua dan menemukan bahwa konsentrasi radon di dalam ruangan umumnya berkisar antara 10 hingga 600 Bq/m³, tergantung pada struktur tanah dan ventilasi bangunan. Hasil meta-analisis menunjukkan bahwa paparan radon berkontribusi terhadap 3–14% kasus kanker paru di dunia, termasuk pada populasi non-perokok. Selain efek karsinogenik, ditemukan pula indikasi gangguan neurologis dan peningkatan risiko penyakit pernapasan kronis akibat paparan jangka panjang. Artikel ini menegaskan perlunya kebijakan mitigasi radon dalam program kesehatan masyarakat, terutama di negara dengan potensi paparan tinggi.

Penelitian oleh Rahimi et al. (2023) yang berjudul *Impact of Climate Change on Indoor Radon Concentrations as a Current Public Health Challenge* menyoroti keterkaitan antara perubahan iklim dan peningkatan kadar radon dalam ruangan. Melalui pendekatan pemodelan atmosfer dan pemantauan lapangan di Iran, penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu global dan perubahan kelembapan udara berpotensi meningkatkan konsentrasi radon dalam ruangan sebesar 25–30% dalam tiga dekade mendatang. Kondisi ini disebabkan oleh meningkatnya tekanan tanah dan perubahan sirkulasi udara alami akibat iklim yang lebih hangat. Studi ini menekankan bahwa radon harus dipertimbangkan sebagai bagian dari isu kesehatan lingkungan adaptif, bukan hanya sebagai risiko lokal, karena perubahan iklim memperburuk akumulasi gas di bangunan berinsulasi tinggi.

Selanjutnya, penelitian oleh Davis et al. (2020) dalam *Estimated Radon Exposure in Eastern Pennsylvania Schools* meneliti paparan radon di lingkungan sekolah dasar dan menengah di Pennsylvania, Amerika Serikat. Pengukuran dilakukan menggunakan monitor radon kontinu di lebih dari tiga puluh sekolah. Hasil menunjukkan kadar radon berkisar antara 42 hingga 158 Bq/m³, dengan konsentrasi tertinggi ditemukan di sekolah yang berlokasi di daerah pegunungan. Ventilasi alami terbukti menjadi faktor penting yang memengaruhi akumulasi radon. Studi ini merekomendasikan pemeriksaan tahunan dan penerapan sistem ventilasi mekanik di sekolah untuk meminimalkan risiko paparan jangka panjang bagi siswa dan staf pengajar.

Sementara itu, penelitian oleh Yuan et al. (2022) berjudul *Effect of Radon Exposure on Asthma Morbidity in the School Inner-City Asthma Study* berfokus pada hubungan antara paparan radon dan kejadian asma pada anak sekolah di wilayah perkotaan Tiongkok. Penelitian ini menemukan kadar radon antara 35 hingga 125 Bq/m³ menggunakan detektor pasif CR-39. Analisis epidemiologis menunjukkan bahwa anak-anak yang terpapar pada kadar ≥ 100 Bq/m³ memiliki risiko 1,7 kali lebih tinggi mengalami eksaserbasi asma dibanding mereka yang berada di wilayah dengan kadar rendah. Hasil ini memperluas pemahaman bahwa dampak radon tidak hanya terkait kanker paru, tetapi juga berpotensi memperburuk gangguan pernapasan non-kanker pada populasi anak.

Penelitian oleh Kim Y. H. et al. (2025) membahas terkait dengan pengembangan pendekatan teoritis-analitis untuk memprediksi perubahan konsentrasi dan distribusi radon serta turunannya dalam udara dalam ruangan, aerosol, dan permukaan padat. Hasil verifikasi dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menghasilkan prediksi yang konsisten dengan solusi analitik, model keadaan tunak, serta analisis numerik dan data pengukuran lapangan. Model tersebut berhasil menggambarkan dinamika perubahan kadar radon dan radionuklida turunannya di berbagai kondisi ventilasi.

Selanjutnya, Quarto M. et al. (2015) dalam penelitiannya yang berjudul *“Radon Exposure Assessment and Relative Effective Dose Estimation to Inhabitants of Puglia Region, South Italy”*

menyebutkan, bahwa konsentrasi radon dalam ruang diukur di hunian-hunian Puglia, Italia Selatan menggunakan detektor pasif LR-115. Hasilnya menunjukkan bahwa konsentrasi radon bervariasi dari 15 ± 2 hingga 2166 ± 133 Bq/m³. Dengan rata-rata geometrik 114 Bq/m³ dan simpangan baku geometrik 2,3. Analisis faktor-faktor yang memengaruhi konsentrasi radon seperti usia hunian dan lantai telah dilakukan. Rata-rata dosis efektif bagi penghuni telah dihitung dan ditemukan sebesar 8,2 mSv/tahun. Setelah itu, estimasi risiko kanker, risiko seumur hidup dan kasus kanker paru-paru per tahun per juta telah dihitung.

Didukung dengan penelitian oleh Pulliam H. R. et al. (2024) yang mengkaji terkait dengan dampak paparan radon di rumah terhadap aktivitas osilasi saraf yang berfungsi untuk reorientasi perhatian pada remaja dengan 56 peserta (usia 6-14 tahun) yang menyelesaikan tugas isyarat Posner Klasik selama magnetoensefalografi (MEG), dan kadar radon di rumah diukur untuk setiap peserta. Spektrogram waktu-frekuensi menunjukkan respons Theta (3-7 Hz, 300-800 ms), Alfa (9-13 Hz, 400-900 ms), dan Beta (14-24 Hz, 400-900 ms) yang lebih kuat selama tugas tersebut dibandingkan dengan kondisi awal.

Sementara itu, Celen Y. Y. et al. (2023) dengan penelitiannya yang berfokus pada pengukuran konsentrasi gas radon di dalam gedung Rumah Sakit Pendidikan dan Penelitian Kesehatan Universitas Balikesir serta gedung Fakultas Kedokteran yang terletak di Kota Balikesir. Lebih lanjut, penelitian ini berupaya untuk memastikan potensi risiko kanker paru yang terkait dengan konsentrasi radon yang terukur. Penelitian ini menggunakan kampanye pemantauan radon yang ekstensif dan jangka panjang (2-3 bulan) dan dilaksanakan dengan menempatkan detektor jalur nuklir solid-state Columbia Resin-39 (CR-39) secara strategis di 28 lokasi berbeda. Ditemukan nilai terukur terendah dari konsentrasi gas radon yang terukur adalah 6 Bq/m³, nilai tertinggi adalah 60 ± 8 Bq/m³, nilai rata-rata adalah $21,96 \pm 3,16$ Bq/m³. Hasil pengukuran tersebut menunjukkan lebih rendah dari nilai konsentrasi aktivitas radon yang diizinkan dalam "Radiation Safety Directive".

Penelitian yang dilaksanakan oleh Adesina K. E. et al. (2025) mengevaluasi konsentrasi radon dan risiko kesehatan terkait di gedung-gedung di Nigeria termasuk rumah, sekolah, dan tempat kerja melalui berbagai teknik pemantauan seperti detektor CR-39 dan monitor RAD7. Dengan total 47 siswa yang memenuhi syarat berdasarkan pedoman PRISMA yang mencakup variasi spasial paparan radon di seluruh Nigeria menunjukkan konsentrasi radon dalam ruangan rata-rata sebesar 104 Bq/m³ sehingga melebihi tingkat referensi WHO sebesar 100 bq/m³ tetapi masih di bawah tingkat tindakan USEPA sebesar 148 bq/m³. Lokasi-lokasi tertentu seperti Odo-Ona, Ibadan, mencatat 531, 85 Bq/m³ yang setara dengan dosis efektif tahunan sebesar 13,42 mSv/tahun, risiko kanker seumur hidup berlebih sebesar $51,66 \times 10^{-3}$ dan perkiraan beban kanker paru-paru sebesar 242 kasus/tahun per juta orang.

Tabel 2. Ringkasan Perbandingan 10 Studi tentang Paparan Radon di Lingkungan Dalam Ruangan

Judul Penelitian	Lokasi/Populasi	Metode Pengukuran	Kisaran Konsentrasi Radon (Bq/m ³)	Fokus Utama	Dampak Kesehatan	Kesimpulan
Indoor Radon Concentration Levels in Healthcare Settings: The Results of an Environmental Monitoring	Italia (RS Universitas)	Continuous Radon Detector	57-220 Bq/m ³	Paparan di fasilitas kesehatan	Kanker paru	Beberapa ruang bawah tanah melebihi ambang batas WHO

Judul Penelitian	Lokasi/Populasi	Metode Pengukuran	Kisaran Konsentrasi Radon (Bq/m ³)	Fokus Utama	Dampak Kesehatan	Kesimpulan
in a Large Italian University Hospital						
Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies	Multinational (review)	Literatur Sekunder	10-600 Bq/m ³	Kajian global radon dan kesehatan	Kanker paru, neurologis	Perlu integrasi kebijakan kesehatan dan iklim
Impact of Climate Change on Indoor Radon Concentrations as a Current Public Health Challenge	Iran	Modeling dan Monitoring	17-168 Bq/m ³	Dampak perubahan iklim terhadap radon	Risiko kumulatif kanker paru meningkat	Perubahan iklim memperburuk akumulasi radon
Estimated Radon Exposure in Eastern Pennsylvania Schools	Amerika Serikat	Active Continuous Monitor	42-158 Bq/m ³	Paparan Radon di sekolah	Risiko Kanker paru	Sekolah di pegunungan memiliki kadar radon lebih tinggi
Effect of Radon Exposure on Asthma Morbidity in the School Inner-City Asthma Study	Tiongkok	Passive CR-39	35-125 Bq/m ³	Radon dan morbiditas asma anak	Asma meningkat pada kadar tinggi	Kadar ≥ 100 Bq/m ³ berisiko tinggi

Judul Penelitian	Lokasi/Populasi	Metode Pengukuran	Kisaran Konsentrasi Radon (Bq/m ³)	Fokus Utama	Dampak Kesehatan	Kesimpulan
Residential and occupational exposure to indoor radon and associated human health risk in Nigeria buildings assessed by multiple monitoring techniques	Nigeria	CR-39 detectors and RAD7 monitors	104 Bq/m ³	Radon di gedung-gedung (rumah, sekolah, tempat kerja)	Risiko kanker paru	Melebihi ambang batas WHO tetapi masih di bawah USEPA
Radon Exposure Assessment and Relative Effective Dose Estimation to Inhabitants of Puglia Region, South Italy	Puglia, Italia Selatan	LR-115 passive detectors	15 ± 2 to 2166 ± 133 Bq/m ³	Radon di hunian-hunian	Kanker paru-paru	Estimasi risiko kanker, risiko seumur hidup dan kasus kanker paru-paru per tahun per juta telah dihitung
Neurotoxic effects of home radon exposure on oscillatory dynamics serving attentional orienting in children and adolescents	56 anak lokal umur 6-14 tahun	Classic Posner cuing task during magnetoencephalography (MEG)	11-1242 Bq/m ³	Konsentrasi radon rumah	Perkembangan saraf	Paparan radon berpengaruh pada perkembangan saraf
Measuring radon	Balikesir	CR-39	21.96 ± 3.16 Bq/m ³	Bangunan Perkuliahan	Kanker paru-paru	Hasil menunjukk

Judul Penelitian	Lokasi/Populasi	Metode Pengukuran	Kisaran Konsentrasi Radon (Bq/m ³)	Fokus Utama	Dampak Kesehatan	Kesimpulan
concentration and investigation of its effects on lung cancer						an lebih rendah dari yang diizinkan
Kinetics and Radioactive Equilibrium of Radon and Radon Progenies in Indoor Air	Amerika Serikat	Theoretical/analytical	220 Bq/m ³	Beberapa bangunan	Gangguan pernapasan	Radionuklida dapat menyebabkan berbagai dampak kesehatan

3.2 Faktor Determinan Konsentrasi Radon Indoor

Menurut studi yang telah ditelaah, fluktuasi konsentrasi radon di dalam ruangan disebabkan oleh interaksi kompleks antara unsur-unsur geologis, arsitektural, dan mikro-lingkungan. Studi di Italia Selatan oleh Quarto et al. (2015) menunjukkan bahwa usia bangunan, tipe konstruksi, dan ketinggian lantai merupakan determinan utama. Secara umum, kadar radon cenderung lebih tinggi pada bangunan tua, terutama di lantai dasar dan basement, dikarenakan kontak langsung dengan tanah dan minimnya lapisan kedap udara. Hal ini diperkuat oleh temuan di Bari, Italia, yang memperlihatkan variasi vertikal dengan kadar paparan tertinggi terakumulasi di basement yang mencapai 118,9 Bq/m³. Jenis bangunan dan tingkat ventilasi juga menjadi pertimbangan penting, bangunan dengan sirkulasi udara yang buruk lebih rentan terhadap penumpukan radon. Nilai konsentrasi radon yang dilaporkan dalam berbagai studi berkisar antara 25 hingga lebih dari 2100 Bq/m³. Konsentrasi radon di Puglia rata-rata 114 Bq/m³, dengan nilai ekstrem mencapai 2.166 Bq/m³, yang menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari variabel geologis terhadap penumpukan radon. Sebagai perbandingan, tingkat radon di Nigeria jauh lebih tinggi, terutama di wilayah Odo-Ona dengan rata-rata 531,85 Bq/m³ akibat ventilasi yang buruk dan kelembapan cukup tinggi. Di Balikpapan, bahan bangunan modern dan ventilasi yang memadai menghasilkan rata-rata hanya 21,96 Bq/m³.

Faktor lingkungan seperti ventilasi, bahan bangunan, kelembapan, musim, dan struktur tanah terbukti memengaruhi hasil penelitian. Seluruh penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa konsentrasi radon meningkat pada musim dingin atau dalam kondisi lembap, ketika ventilasi alami berkurang dan tekanan udara di dalam ruangan menahan gas radon yang berasal dari tanah. Jenis batuan dasar, kepadatan penduduk, dan metode penghematan energi semuanya dapat memengaruhi pembentukan gas radon, terutama di kawasan perkotaan padat penduduk dengan iklim tropis. Penelitian oleh Rahimi et al. (2023) menyoroti keterkaitan perubahan iklim; peningkatan suhu global dan kelembapan berpotensi meningkatkan konsentrasi radon dalam ruangan sebesar 25 hingga 30%. Studi terbaru oleh Silva et al. (2021) dan Nunes et al. (2022) juga menyoroti bahwa perubahan iklim global dapat memperburuk permasalahan ini melalui peningkatan suhu, kelembapan, serta desain bangunan hemat energi yang mengurangi ventilasi alami.

3.3 Dampak Kesehatan dan Implikasi Ilmiah

Radon dalam ruangan telah menyebabkan masalah kesehatan yang serius, terutama pada saluran pernapasan. Menurut studi epidemiologi, radon merupakan penyebab utama kanker paru-paru pada individu non-perokok. Celen et al. (2023) menemukan korelasi positif antara tingkat radon dan perkembangan kanker paru-paru di Turki. Radon yang telah meluruh menghasilkan partikel alfa yang merusak sel epitel dan menyebabkan mutasi DNA. Menurut meta-analisis Petrescu et al. (2024), radon berkontribusi terhadap 3-14% dari seluruh kasus kanker paru-paru di seluruh dunia. Penelitian di Nigeria (2022) juga mengungkapkan prevalensi kanker prostat yang lebih tinggi di daerah dengan tingkat radon yang tinggi.

Radon tidak hanya menyebabkan kanker, tetapi juga memperparah penyakit pernapasan non-kanker. Yuan dkk. (2022) menemukan bahwa anak-anak yang terpapar pada tingkat ≥ 100 Bq/m³ memiliki risiko 1,7 kali lipat lebih tinggi untuk mengalami eksaserbasi asma. Temuan serupa di Boston, Massachusetts, mengungkapkan bahwa paparan radon berkaitan dengan peradangan saluran pernapasan yang lebih parah. Hal ini menunjukkan bahwa paparan radon dosis rendah dalam jangka panjang dapat memperparah peradangan saluran pernapasan. Dampak paparan pada kelompok rentan ini juga terlihat di sekolah-sekolah Pennsylvania, di mana sekitar 19,5% siswa terpapar dosis tahunan 3 hingga 6 mSv/tahun, atau dua kali lipat dari dosis radiasi latar alami. Selain itu, Pulliam H. R. dkk. (2024) menemukan bahwa paparan radon di rumah dalam jangka panjang berkaitan dengan kehilangan ingatan dan perubahan aktivitas gelombang otak pada remaja. Hal ini memperkuat pemahaman kita bahwa radon bukan hanya karsinogen paru-paru, tetapi juga kemungkinan neurotoksik. Secara biologis, mekanisme peluruhan radon melalui radiasi alfa dan stres oksidatif memberi dasar kausal yang kuat untuk efek karsinogenik dan neurotoksik tersebut.

Dari segi implikasi ilmiah, teknologi pengukuran telah berkembang dari detektor pasif (CR-39 dan LR-115) menjadi sensor aktif (RAD7, AlphaGUARD) serta integrasi GIS untuk pemetaan spasial. Lama waktu pemantauan juga makin komprehensif, mulai dari pengukuran jangka pendek selama 90 hari di rumah sakit universitas oleh Celen et al. (2023) hingga pemantauan selama 402 hari oleh De Maria et al. (2023) untuk mengamati fluktuasi musim secara akurat. Yang et al. (2024) melakukan penelitian di Pennsylvania yang menunjukkan pergeseran ke arah strategi epidemiologi berbasis big data geografis. Namun, semua penelitian yang ditinjau memiliki kelemahan yang sama, seperti desain cross-sectional dan periode pengumpulan data yang terbatas. Kesenjangan informasi terlihat akibat kegagalan mengintegrasikan data lingkungan dengan data klinis individu, serta kurangnya penelitian mengenai dampak non-karsinogenik jangka panjang.

3.4 Implikasi Kebijakan untuk Kesehatan Masyarakat Indonesia

Upaya untuk membatasi paparan radon di dalam ruangan difokuskan pada peningkatan sistem ventilasi, modifikasi struktur bangunan, dan penguatan kebijakan regulasi. Secara teknis, intervensi seperti penggunaan ventilasi alami atau mekanis, pemasangan sistem pengurangan tekanan di bawah lantai, serta perbaikan retakan di lantai dan dinding dapat mencegah infiltrasi gas dari tanah. Peningkatan pada fasilitas tata udara tersebut dapat menurunkan kadar radon sebesar 50% hingga 70%. Selain itu, perilaku penghuni juga memegang peranan penting dalam mengendalikan tingkat paparan, seperti kebiasaan membuka jendela dan manajemen penggunaan pendingin ruangan atau AC. Beberapa negara maju telah menetapkan batas konsentrasi berdasarkan pedoman WHO (100 Bq/m³) dan mewajibkan pemantauan di area publik. Namun, kebijakan khusus terkait radon di negara-negara berkembang, termasuk di wilayah tropis seperti Indonesia, masih sangat kurang memadai.

Secara geografis, penelitian di wilayah tropis masih sangat terbatas, meskipun karakteristik bangunan dan suhu di sana menimbulkan risiko paparan yang berbeda dibandingkan dengan di daerah beriklim sedang. Kepadatan pemukiman di kota-kota tropis, ditambah dengan sirkulasi udara yang kurang memadai, memperparah penumpukan gas. Radon harus diakui sebagai indikator penting kualitas udara dalam ruangan (IAQ), dan pengelolannya memerlukan kerja sama antara sektor kesehatan, lingkungan, dan bangunan.

Diperlukan pembentukan sistem pemantauan nasional, pengintegrasian pedoman teknis ke dalam peraturan bangunan, serta pelaksanaan kampanye pendidikan masyarakat. Khususnya di Indonesia, formulasi kebijakan ini perlu disesuaikan dengan geografi negara yang berada di kawasan vulkanik aktif dengan tingkat kelembapan udara yang sangat tinggi. Mengingat bahwa perubahan iklim dan tren bangunan hemat energi berpotensi memperparah penumpukan gas di ruang tertutup, pengendalian paparan radon di dalam ruangan harus dimasukkan ke dalam program kesehatan lingkungan nasional guna melindungi masyarakat secara adaptif dan berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan telaah terhadap sepuluh literatur global, scoping review ini menemukan bahwa paparan radon indoor bervariasi secara ekstrem (mulai dari 10 Bq/m³ hingga mencapai nilai 2.166 Bq/m³), dengan sejumlah lokasi studi secara konsisten melampaui batas aman referensi WHO (100 Bq/m³) dan ICRP (300 Bq/m³). Akumulasi gas radioaktif ini tidak hanya dikendalikan oleh faktor geologis tradisional seperti kandungan uranium tanah, tetapi terbukti sangat dipengaruhi oleh modifikasi arsitektur dan efektivitas sistem sirkulasi udara di dalam bangunan.

Kontribusi dan kebaruan ilmiah dari tinjauan ini terletak pada identifikasi tiga pergeseran paradigma utama dalam kajian radon indoor. Pertama, tinjauan ini memetakan perluasan bukti epidemiologis bahwa ancaman radon tidak lagi terbatas pada karsinogenisitas paru-paru pada orang dewasa, melainkan telah merambah pada temuan efek neurotoksik yang mengganggu aktivitas gelombang otak serta memicu eksaserbasi asma pada populasi rentan seperti anak-anak. Kedua, terdapat evolusi signifikan dalam metodologi pengukuran, yang bergerak dari detektor pasif menuju pemantauan real-time berbasis multi-sensor cerdas dan integrasi data geospasial (GIS) berskala besar. Ketiga, kajian ini menyoroti sebuah paradoks lingkungan baru, di mana perubahan iklim dan tren desain bangunan modern yang hemat energi (kedap udara) justru berpotensi meningkatkan retensi gas radon di masa depan.

Upaya mitigasi harus disatukan ke dalam kebijakan pembangunan berkelanjutan dan kesehatan lingkungan. Upaya pengendalian paparan radon perlu dimasukkan ke dalam kebijakan kesehatan lingkungan nasional, termasuk melalui pemantauan rutin radon dalam bangunan publik dan permukiman, penerapan standar teknis bangunan tahan radon, serta pemberian edukasi kepada masyarakat mengenai sistem ventilasi dan metode mitigasi sederhana. Penelitian lanjutan di wilayah tropis dan negara berkembang seperti Indonesia masih sangat dibutuhkan untuk mengisi kesenjangan data paparan, memperbaiki model penilaian risiko kesehatan atau ARKL, dan memperkuat dasar ilmiah bagi strategi pencegahan serta mitigasi paparan radon secara berkelanjutan. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada pemetaan komprehensif bukti global yang dapat dijadikan dasar kuat bagi perumusan kebijakan pengelolaan risiko radon di Indonesia di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adesina, K. E., Specht, A. J., Olaniyan, S. D., Ignatius, C., Idowu, O. P., Jubril, R. D., Hamzat, T. T., Ndoma, E. G., & Olatunji, O. (2025). Residential and occupational exposure to indoor radon and associated human health risk in Nigeria buildings assessed by multiple monitoring techniques. *Science of the Total Environment*, 981, 179478. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179478>
- Kashkinbayev, Y., Bakhtin, M., Kazymbet, P., Lesbek, A., Kazhiyakhmetova, B., Hoshi, M., Altaeva, N., Omori, Y., Tokonami, S., Sato, H., & Ibrayeva, D. (2024). Influence of Meteorological Parameters on Indoor Radon Concentration Levels in the Aksu School. *Atmosphere*, 15(9), 1067. <https://doi.org/10.3390/atmos15091067>
- Banzon, T. M., Greco, K. F., Li, L., Mukharesh, L., Vieira, C. L. Z., Steiner, M. K., Hauptman, M., Ratchataswan, T., Koutrakis, P., Phipatanakul, W., & Gaffin, J. M. (2023). Effect of radon exposure on asthma morbidity in the School Inner-City Asthma study. *Pediatric Pulmonology*, 58(7), 2042–2049. <https://doi.org/10.1002/ppul.26429>

- Belete, G. D. (2021). General overview of radon studies in health hazard perspectives. *Journal of Oncology*, 2021, 6659795. <https://doi.org/10.1155/2021/6659795>
- Celen, Y. Y., Oncul, S., Narin, B., & Gunay, O. (2023). Measuring radon concentration and investigation of it's effects on lung cancer. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4), 100716. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100716>
- Felicioni, L., Jiránek, M., Vlasatá, B., & Lupíšek, A. (2023). An environmental evaluation of ventilation systems aimed at reducing indoor radon concentration. *Buildings*, 13(11), 2706. <https://doi.org/10.3390/buildings13112706>
- Keith, S., Doyle, J. R., Harper, C., et al. (2012). *Toxicological profile for radon*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158784/>
- Kim, Y.-H., Bender, M., Laws, E., & Wang, W.-H. (2025). Kinetics and radioactive equilibrium of radon and radon progenies in indoor air. *ACS ES&T Air*, 2(8), 1684–1693. <https://doi.org/10.1021/acsestair.5c00115>
- Lucchetti, C., Galli, G., & Tuccimei, P. (2022). Indoor/outdoor air exchange affects indoor radon: The use of a scale model room to develop a mitigation strategy. *Advances in Geosciences*, 57, 81–88. <https://doi.org/10.5194/adgeo-57-81-2022>
- Nunes, L. J. R., Curado, A., da Graça, L. C. C., Soares, S., & Lopes, S. I. (2022). Impacts of indoor radon on health: A comprehensive review on causes, assessment and remediation strategies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3929. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073929>
- Overcenco, A. V., & Coretchi, L. Ş. (2025). Impact of climate change on indoor radon concentrations as a current public health challenge. *Environment and Health*, 3(7), 705–713. <https://doi.org/10.1021/envhealth.4c00269>
- Pulliam, H. R., Springer, S. D., Rice, D. L., Ende, G. C., Johnson, H. J., Willett, M. P., Wilson, T. W., & Taylor, B. K. (2024). Neurotoxic effects of home radon exposure on oscillatory dynamics serving attentional orienting in children and adolescents. *NeuroImage*, 292, 120606. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2024.120606>
- Quarto, M., Pugliese, M., La Verde, G., Loffredo, F., & Roca, V. (2015). Radon exposure assessment and relative effective dose estimation to inhabitants of Puglia region, South Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(11), 14948–14957. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114948>
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2016). *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. United Nations.
- Voltattorni, N., Gasparini, A., & Galli, G. (2023). The analysis of ²²²Rn and ²²⁰Rn natural radioactivity for local hazard estimation: The case study of Cerveteri (Central Italy). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(14), 6420. <https://doi.org/10.3390/ijerph20146420>
- World Health Organization. (2023). *Handbook on indoor radon: A public health perspective*. WHO Press. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789241547673>
- Yang, B., Cronin, C., & Tarini, B. A. (2024). Estimated radon exposure in eastern Pennsylvania schools. *JAMA Network Open*, 7(12). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.48676>