

Studi Radon (Rn-222) dalam Lingkungan: Pembentukan, Paparan, dan Dampaknya Bagi Manusia

Afifah^{1*} dan Murniati²

^{1,2*}Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sriwijaya, Palembang 30862

*E-mail Penulis Korespondensi: fifah425@mail.com

Abstrak

Radon adalah salah satu jenis unsur radioaktif yang terdapat di alam dan menjadi penyumbang terbesar sumber radiasi alam dibandingkan radiasi alami yang lainnya. Masalah yang mendasari penelitian ini adalah potensi risiko kesehatan yang timbul dari paparan radon, terutama dalam ruang tertutup. Tujuan penelitian adalah untuk memahami pembentukan gas radon, paparannya terhadap manusia, serta mengevaluasi dampak kesehatan yang mungkin timbul dari inhalasi radon secara terus menerus. Metode yang dipakai dalam penelitian ini adalah penelitian kepustakaan (*library research*) yang langkah-langkahnya menggunakan langkah-langkah penelitian kepustakaan menurut Kuhlthau yang terdiri dari enam tahap. Hasil penelitian menunjukkan radon terbentuk sebagai produk peluruhan alami dari uranium (U-238) dengan waktu paro uranium adalah 4,5 miliar tahun, melalui serangkaian peluruhan alfa dan beta yang berurutan. Radon ini kemudian dapat dilepaskan dari tanah dan batuan ke dalam atmosfer, serta dapat merembes ke dalam bangunan dan menjadi sumber paparan radiasi bagi manusia jika terakumulasi dalam jumlah yang signifikan. Paparan radon yang terjadi akibat inhalasi radon secara terus menerus akan mengakibatkan potensi kanker paru-paru bagi manusia yang terpapar.

Kata kunci: Kanker Paru-Paru, Radon, Unsur Radioaktif.

Abstract

Radon is a type of radioactive substance found in nature, and it is the most significant contributor to natural radiation sources compared to other natural radiation. The issue underlying this research is the potential health risks arising from exposure to radon, especially in enclosed spaces. The research aims to understand the formation of radon gas and its exposure to humans, and evaluate the health impacts that may arise from continuous radon inhalation. The method used in this research is library research, which uses library research steps according to Kuhlthau, which consists of six stages. The research results show that radon is formed as a natural decay product of uranium (U-238) with a uranium half-life of 4.5 billion years through a series of successive alpha and beta decays. This radon can then be released from soil and rocks into the atmosphere, seep into buildings, and become a source of radiation exposure for humans if it accumulates in significant amounts. Exposure to radon that occurs due to continuous radon inhalation will result in the potential for lung cancer in exposed humans.

Keywords: Lung Cancer, Radioactive Element, Radon

Article History: Received: 29 November 2023

Accepted: 8 January 2024

Revised: 6 January 2024

Published: 16 February 2024

How to cite: Afifah dan Murniati. (2024). *Studi Radon (Rn-222) dalam Lingkungan: Pembentukan, Paparan, dan Dampaknya Bagi Manusia*, Jurnal Literasi Pendidikan Fisika, 4 (2). pp. 131-142. Retrieved from <http://jurnal.fkip.unmul.ac.id/index.php/JLPF>

Copyright © November 2023, Jurnal Literasi Pendidikan Fisika

PENDAHULUAN

Teknologi nuklir telah memainkan peran yang cukup besar dalam kemajuan ilmu pengetahuan maupun teknologi di seluruh dunia (y Leòn & Lindberg, 2022). Penggunaan teknologi nuklir mencakup berbagai aplikasi, mulai dari pembangkit listrik tenaga nuklir hingga pengobatan radioterapi dan penelitian ilmiah yang mendalam. Salah satu aspek yang tidak terhindarkan dari teknologi nuklir adalah emisi radiasi. Berdasarkan proses terbentuknya, radiasi terbagi menjadi dua, yaitu radiasi alam dan radiasi buatan (Supriyono et al., 2017). Radiasi alam bisa berasal dari, sinar kosmos, sinar gamma dari kulit bumi, hasil peluruhan radon dan thorium di udara dan berbagai radionuklida alamiah yang lainnya. Sedangkan radiasi buatan dihasilkan oleh aktivitas manusia dalam aplikasi nuklir, misalnya radiasi dari pembangkit listrik tenaga nuklir, instalasi penelitian nuklir, penggunaan bahan radioaktif dalam bidang kedokteran, industri, dan penelitian ilmiah.

Pada radiasi alam, radon adalah penyumbang terbesar sumber radiasi alam, yaitu sekitar 55% dari dosis radiasi alami yang lainnya (Belete & Anteneh, 2021). Gas Radon (^{222}Rn) merupakan radionuklida berumur pendek yang melepaskan partikel alfa di udara yang mengakibatkan mudahnya gas ini terhirup ke saluran pernapasan (Pahrudin et al., 2022). Radon yang terbentuk dari peluruhan uranium di dalam tanah maupun di batuan, bisa terakumulasi di dalam rumah atau bangunan dan menjadi sumber paparan radiasi yang berpotensi berdampak negatif terhadap kesehatan manusia. Ketika orang menghirup udara yang mengandung gas radon, mereka juga menghirup partikel-partikel radioaktif yang dapat berpotensi merusak jaringan paru-paru dan bisa memiliki risiko terkena kanker paru-paru. Berdasarkan NRC (National Research Council), dewan riset nasional AS, kasus kanker paru-paru yang diakibatkan gas radon terjadi sebanyak 10.000-14.000 orang/tahun, kemudian NRPB (National Radiological Protection Board) memperkirakan orang meninggal yang disebabkan oleh kanker paru-paru akibat inhalasi radon adalah 2.500 orang/tahun, dan di Indonesia sendiri diperkirakan sekitar 7.600 kanker/tahun yang disebabkan oleh inhalasi radon (Syarbaini & Bunawas, 2010). Tidak hanya itu, menurut EPA (Environmental Protection Agency), radon juga merupakan penyebab utama kanker paru yang dialami oleh non-perokok dan juga menjadi penyebab kedua dari kanker paru karena radon bertanggung jawab sekitar 21.000 kematian akibat kanker paru tiap tahunnya dan sekitar 2.900 dari kematian ini terjadi diantara orang-orang yang tidak pernah merokok (US EPA 2022 di dalam Buana & Harahap, 2022).

Konsentrasi radon dalam lingkungan dapat berbeda-beda pada setiap daerah, dan bahkan dalam rumah yang berdekatan. Maka dari itu, penting untuk mengetahui dan memahami faktor-faktor yang memengaruhi tingkat paparan radon di berbagai lokasi dan kondisi. Namun, masih banyak masyarakat yang masih kurang menyadari risiko paparan radon. Masyarakat sekarang harus mengetahui apa itu gas radon yang mencakup sumber dari gas radon itu sendiri yang dilihat dari proses pembentukan radon, paparannya kepada manusia, serta dampaknya bagi manusia. Sudah ada beberapa penelitian yang ada di Indonesia mengenai studi pengukuran tingkat radon di beberapa wilayah Indonesia (Wahyudi et al., 2017, 2019; Widisaputra et al., 2023; Wulandarisman et al., 2022). Tidak hanya itu ada juga yang telah membahas dampak gas radon bagi kesehatan manusia (Buana & Harahap, 2022; Malaka, 2019). Akan tetapi, belum ada studi yang didalamnya membahas secara detail pembentukan dari radon itu sendiri, paparan, dan dampaknya bagi manusia secara detail dalam satu artikel secara runtut. Maka dari itu, pada artikel ini akan mengkaji studi mengenai pembentukan, paparan, dampak radon bagi manusia.

METODE

Dalam penulisan artikel ini, digunakan penelitian kepustakaan (*library research*). Studi kepustakaan merupakan salah satu metode penelitian dengan pengumpulan data-data yang bersumber dari berbagai literatur, seperti jurnal, buku, artikel ataupun tulisan-tulisan tertentu yang kemudian akan

Studi Radon (Rn-222) dalam...

dipahami dan dipelajari teori-teori dari berbagai literatur tersebut yang berhubungan dengan topik penelitian (Adlini et al., 2022). Menurut Zed (2003:3) dalam Supriyadi (2016), terdapat empat ciri yang harus diperhatikan dalam penelitian kepustakaan ini, yaitu (1) peneliti berhadapan langsung dengan teks atau data angka, bukan dari pengetahuan yang didapat langsung dari lapangan, (2) Data pustaka bersifat siap pakai, yang berarti bahwa peneliti atau penulis tidak terjun langsung ke lapangan untuk mendapatkan data, melainkan peneliti berhadapan langsung dengan sumber data dari berbagai literatur, (3) Data pustaka yang dipakai adalah data sekunder yang disebabkan oleh peneliti mendapatkan bahan ataupun data dari tangan kedua dan bukan data orisinal yang didapatkan dari data pertama penelitian di lapangan, dan (4) kondisi data Pustaka tidaklah dibatasi ruang maupun waktu.

Penelitian kepustakaan ini menggunakan Langkah-langkah penelitian kepustakaan menurut Kuhlthau (2002) yang terdiri dari enam tahap (Sari & Asmendri, 2020), yaitu

1. Pemilihan topik. Tahap ini melibatkan pemilihan topik penelitian yang akan diteliti dan menjadi tahap awal dalam proses penelitian. Topik awal yang dipilih adalah mengenai unsur radioaktif.
2. Eksplorasi informasi. Setelah dilakukan pemilihan topik, maka peneliti mulai menjelajahi literatur yang relevan dengan topik penelitian, yaitu mengenai unsur radioaktif
3. Menentukan fokus penelitian. Setelah eksplorasi informasi awal, peneliti mengkaji dan merenungkan tentang fokus penelitian secara spesifik yang didalamnya melibatkan proses perumusan pertanyaan penelitian atau tujuan yang akan dicapai dalam penelitian. Peneliti memfokuskan penelitian pada radon, yang mana radon merupakan unsur radioaktif yang banyak ditemukan di alam dan menjadi salah satu penyebab dari kanker paru-paru akibat inhalasi radon secara terus menerus dan dalam jumlah yang signifikan.
4. Pengumpulan sumber data. Pada tahap ini, peneliti secara aktif mengumpulkan dan mencatat informasi dari sumber-sumber yang relevan melalui kegiatan membaca, mencatat dan membuat anotasi tentang temuan yang berkaitan dengan fokus penelitian, yaitu mengenai pembentukan radon, paparan radon, dan dampak radon bagi manusia.
5. Persiapan penyajian data. Tahap ini peneliti mulai mempersiapkan data yang dikumpulkan untuk penyajian data yang lebih sistematis dan mudah dipahami.
6. Penyusunan laporan. Tahap ini melibatkan penyusunan laporan atau makalah yang berisi hasil penelitian kepustakaan yang memuat ringkasan temuan, analisis, dan interpretasi penelitian yang relevan dengan focus penelitian, yaitu mengenai pembentukan radon, paparan radon, dan dampak radon bagi manusia.

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mencari sumber dan mengkonstruksi dari berbagai sumber yang didapat, seperti dari jurnal, buku, ataupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik penelitian ini. Bahan pustaka yang didapat dari berbagai sumber akan dianalisis secara kritis dan mendalam yang selanjutnya akan disusun dalam sebuah bentuk laporan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

PEMBENTUKAN RADON

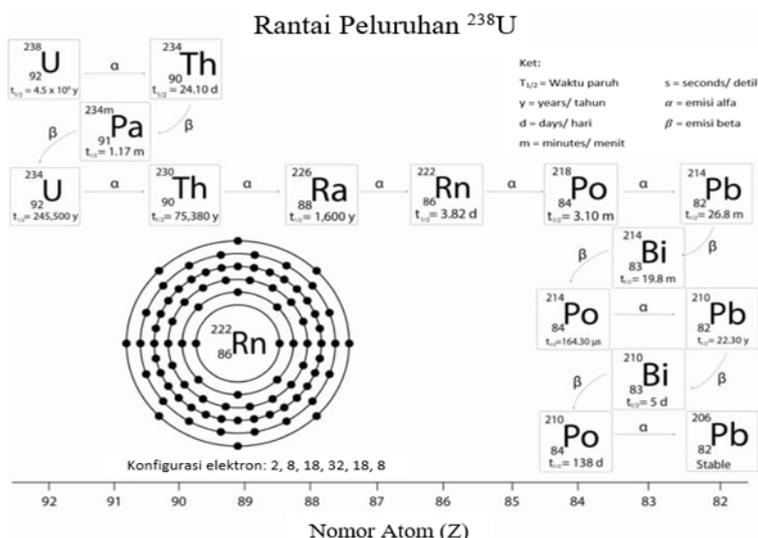
Radon adalah unsur kimia yang ditemukan dalam bentuk gas yang bersifat radioaktif, tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa sehingga gas ini tidak bisa dideteksi secara langsung melalui indera manusia, tetapi dibutuhkan peralatan khusus untuk mendeteksi gas ini. Walaupun (^{222}Rn) adalah gas, ia lebih berat daripada udara. Ini menyebabkan gas ini cenderung mengendap di ruangan tertutup, terutama jika ventilasi di ruangan itu tidak memadai.

Pada tabel periodik, unsur ini memiliki simbol kimia "Rn" dengan nomor atom 86 dan nomor massa 222. Pada tabel periodik unsur, radon termasuk dalam golongan VIIIA. Golongan VIIIA disebut dengan golongan gas mulia. Radon menjadi satu satunya unsur yang bersifat radioaktif dalam golongan VIIIA. Hal ini dikarenakan Radon mengalami peluruhan radioaktif dan melepaskan partikel alfa selama peluruhannya. Radon (Rn) merupakan gas radioaktif yang terbentuk sebagai produk peluruhan alami

Studi Radon (Rn-222) dalam...

uranium (U). Pembentukan radon terjadi melalui serangkaian peluruhan radioaktif yang melibatkan beberapa tahap, yang dapat dilihat pada Gambar 1 (Robertson et al., 2013). Tahapan yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. Peluruhan Alfa pertama: U-238 mengalami peluruhan alfa, yang menghasilkan thorium-234 (Th-234) sebagai produk antara. Reaksinya adalah $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$.
2. Peluruhan Beta: Kemudian, Th-234 mengalami peluruhan beta, mengubahnya menjadi protaktinium-234 (Pa-234m). Reaksi ini melibatkan konversi neutron menjadi proton dan menghasilkan elektron (beta minus). Prosesnya dapat dituliskan sebagai $^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{234m}_{91}\text{Pa} + e^-$ (beta minus).
3. Peluruhan Beta Lainnya: Pa-234m dapat mengalami peluruhan beta lainnya, menghasilkan uranium-234 (U-234). Reaksi ini melibatkan konversi neutron menjadi proton dan menghasilkan elektron (beta minus). Reaksinya adalah $^{234m}_{91}\text{Pa} \rightarrow ^{234}_{92}\text{U} + e^-$ (beta minus).
4. Peluruhan Alfa kedua: U-234 mengalami peluruhan alfa yang menghasilkan Thorium-230 (Th-230). Reaksinya dapat dituliskan menjadi $^{234}_{92}\text{U} \rightarrow ^{230}_{90}\text{Th} + \alpha$.
5. Peluruhan Alfa ketiga: Th-230 mengalami peluruhan alfa yang menghasilkan Radium-226 (Ra-226). Reaksinya adalah $^{230}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{226}_{88}\text{Ra} + \alpha$.
6. Pembentukan Radon: Selanjutnya, Radium-226 (Ra-226) yang telah terbentuk dari peluruhan sebelumnya, akan mengalami peluruhan alfa lagi untuk menghasilkan radon-222 (Rn-222) dan peluruhan produk yang lebih stabil. Proses ini adalah bagian terakhir dari pembentukan radon, yang dapat dituliskan sebagai $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha$.



Gambar 1. Rantai Peluruhan ^{238}U

Dengan demikian, radon (Rn-222) terbentuk sebagai produk peluruhan alami dari uranium (U-238) dengan waktu paro uranium adalah 4,5 miliar tahun, melalui serangkaian peluruhan alfa dan beta yang berurutan. Radon ini kemudian dapat dilepaskan dari tanah dan batuan ke dalam atmosfer, serta dapat merembes ke dalam bangunan dan menjadi sumber paparan radiasi bagi manusia jika terakumulasi dalam jumlah yang signifikan. Radon-222 sendiri memiliki waktu paro sekitar 3,8 hari untuk meluruh menjadi Polonium-218.

PAPARAN RADON TERHADAP MANUSIA

Radon adalah gas radioaktif yang terbentuk secara alami dari peluruhan uranium dalam tanah, batuan, dan air tanah. Gas radon dapat masuk ke dalam rumah atau bangunan dan menyebabkan

paparan manusia melalui beberapa cara, yaitu:

1. **Infiltrasi Tanah.** Granit, migmatit, beberapa tanah liat sangat kaya akan uranium (Padhi et al., 2023), yang selanjutnya dapat meluruh menjadi radon. Perlu diketahui bahwa konsentrasi radon akan berbeda-beda menurut kedalaman permukaan tanah. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Alharbi & Abbady (2013) yang melakukan pengukuran konsentrasi gas radon di wilayah Arab Saudi berdasarkan empat kedalaman diperoleh hasil bahwa rata-rata konsentrasi radon pada kedalaman 60 cm adalah 220 ± 19 Bq/m³, pada kedalaman 40 cm adalah 163 ± 16 Bq/m³ dan pada kedalaman 0 cm atau pada permukaan tanah adalah 75 ± 9 Bq/m³. Sehingga dari penelitian ini diketahui bahwa semakin besar kedalamannya maka konsentrasi radon juga akan semakin besar. Hal ini disebabkan oleh sumber gas radon dan isotopnya itu sendiri berada di dalam perut bumi. Maka dari itu, gas radon yang dihasilkan dalam tanah akan bergerak dari daerah dengan konsentrasi lebih tinggi menuju ke permukaan tanah. Ini karena adanya perbedaan tekanan dan perbedaan suhu di dalam tanah dan di permukaan. Ketika gas radon bergerak melalui tanah, ia dapat memasuki rumah atau bangunan melalui retakan, celah, atau kerusakan pada dasar bangunan, dinding, lantai, atau fondasi. Bangunan yang tidak hermetis tersegel (bangunan atau ruangan tersebut sangat tertutup dan tidak memiliki celah atau lubang yang signifikan yang memungkinkan gas radon dari tanah untuk masuk ke dalam ruangan) dengan baik cenderung memiliki lebih banyak celah dan retakan yang memungkinkan masuknya radon. Tekanan di dalam ruangan biasanya lebih rendah daripada tekanan di dalam tanah. Karena perbedaan tekanan ini, gas radon yang ada di bawah bangunan cenderung masuk ke dalam ruangan melalui celah dan retakan, bahkan jika celah tersebut sangat kecil. Ketika gas radon masuk ke dalam ruangan, ia dapat terakumulasi di dalam ruangan karena tidak ada ventilasi yang cukup untuk menggantikan udara dalam ruangan dengan udara luar yang memiliki konsentrasi radon yang lebih rendah. Kondisi ini terjadi karena radon tidak larut di udara dalam ruangan secepat di luar ruangan dan cenderung terakumulasi di ruang tertutup gedung, sehingga menjadi sumber paparan radiasi yang signifikan bagi masyarakat.
2. **Air Tanah.** Radon juga dapat masuk ke dalam bangunan melalui air tanah yang digunakan untuk pasokan air. Air tanah bisa diambil dari sumur-sumur dangkal atau sumur dalam dan digunakan untuk pasokan air rumah tangga atau komersial. Air tanah dapat mengandung uranium, yang merupakan unsur kimia yang melimpah di kerak bumi. Uranium ini dapat terlarut dalam air tanah, dan kemudian uranium ini mengalami peluruhan alami. Seiring peluruhan uranium, radon diproduksi sebagai salah satu produk peluruhan. Radon ini kemudian dapat dilepaskan ke dalam air tanah, mengubah air tanah menjadi sumber radon potensial. Ketika air tanah dimanfaatkan dalam keperluan sehari-hari seperti mandi, minum, mencuci, atau digunakan dalam sistem perpipaan rumah tangga, radon yang terlarut dalam air dapat terlepas ke udara dalam ruangan selama penggunaan air. Ini terjadi karena radon yang terkandung dalam air dapat keluar dari air dan masuk ke udara saat air mengalir melalui keran air, pancuran, atau aliran air lainnya. Perlu diketahui bahwa aktivitas radon di air tanah berkisar antara 1 hingga 100 Bq/L dan bergantung pada litologi area (tipe, sifat fisik, dan distribusi batuan dan lapisan tanah di suatu daerah geografis atau lokal) tersebut (Yousef dkk., 2009; Kluge dkk., 2007 dalam Thabayneh & Gharaybeh, 2023). Hal ini terlihat dari adanya perbedaan konsentrasi radon saat dilakukannya pengukuran radon pada air minum yang berasal dari tanah di beberapa negara. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Suresh et al (2020), hampir 55% air minum yang berasal dari air tanah di distrik Uttara kannada (negara India) memiliki Tingkat aktivitas radon melebihi MCL (Tingkat kontaminasi maksimum) sebesar 11,1 Bq/l. Sedangkan Menurut Penelitian Thabayneh & Gharaybeh (2023), konsentrasi radon pada sampel air tanah di provinsi Betlehem-Palestina adalah 1,21 Bq/l. Sedangkan Menurut penelitian Manawi et al (2023), tingkat konsentrasi radon pada sampel air tanah di Qatar berkisar 0,2 Bq/l sampai 13,4 Bq/l, dengan sekitar 65% sampel yang diteliti melebihi MCL yang diusulkan USEPA.

Studi Radon (Rn-222) dalam...

3. Udara Luar. Gas radon yang dihasilkan dalam tanah dapat bergerak melalui tanah dan merembes ke permukaan tanah. Ini terjadi karena gas radon memiliki kemampuan untuk bergerak melalui retakan, celah, dan pori-pori di tanah. Setelah gas radon mencapai permukaan tanah, ia dapat masuk ke dalam udara luar. Udara luar di sekitar rumah atau bangunan dapat mengandung konsentrasi radon yang bervariasi tergantung pada faktor-faktor geologis dan lingkungan di area tersebut. Udara luar yang mengandung radon dapat masuk ke dalam rumah atau bangunan melalui ventilasi alami. Ini terjadi ketika jendela, pintu, atau celah lainnya dalam bangunan tidak tertutup rapat, sehingga memungkinkan udara luar masuk ke dalam ruangan.
4. Radon dalam Bahan Bangunan. Sebagian besar bahan bangunan menghasilkan radon secara alami dalam jumlah kecil. Pada saat yang sama, beberapa bahan tertentu dapat berperan sebagai sumber paparan radon yang signifikan. Bahan-bahan tersebut cenderung memiliki kombinasi tingkat Radium-226 yang tinggi (yang terurai menjadi radon) dan porositas yang tinggi, yang memungkinkan gas radon keluar. Ini termasuk beton ringan dengan serpih tawas, fosfogypsum, dan tufa Italia. Menurut Syarbaini & Bunawas (2010), banyak sekali material yang bisa digunakan sebagai campuran dalam pembuatan beton ringan termasuk salah satunya penggunaan limbah industri. Adapun jenis limbah industri yang dimaksud adalah yang mengandung 226-Radium seperti fosfogypsum, fly ash, dan yang lainnya. Penggunaan material dari tailing uranium tua (produk sampingan penambangan uranium) sebagai pengisi kolong bangunan juga dapat berkontribusi terhadap konsentrasi radon yang signifikan di dalam ruangan.

Ketika radon masuk ke dalam rumah atau bangunan, radon dapat terakumulasi di dalam ruangan dan menciptakan konsentrasi yang lebih tinggi. Paparan terhadap radon terutama terjadi saat manusia menghirup gas ini. Setelah dihirup, partikel radon dan produk peluruhan radioaktifnya dapat terperangkap dalam paru-paru manusia. Maka dari itu, batas tindakan radon menjadi salah satu aspek yang perlu diketahui. Batas tindakan radon adalah tingkat konsentrasi radon dalam udara di dalam rumah atau bangunan di mana langkah-langkah mitigasi atau perbaikan harus segera diambil untuk mengurangi paparan radon dan melindungi kesehatan penghuni. Batas tindakan ini bervariasi tergantung pada regulasi dan panduan yang berlaku di berbagai negara dan wilayah. Badan Perlindungan Lingkungan atau *United States Environmental Protection Agency (USEPA)* merekomendasikan 148 Bq/m^3 sebagai tingkat tindakan radon, sedangkan Komisi Internasional Untuk Perlindungan Radiasi atau *International Commission on Radiation Protection (ICRP)* menetapkan 200 Bq/m^3 sebagai tingkat tindakan (Belete & Anteneh, 2021). Nilai 300 Bq/m^3 menjadi nilai batas tindakan yang telah menjadi kesepakatan internasional (Alfiyan, 2017). Konsensus Internasional telah menyetujui batas dosis radiasi maksimum (MPD) untuk pekerja yang bekerja di dekat reaktor nuklir. Batas MPD ini adalah 5 rem atau 50 mSv per tahun untuk organ-organ seperti lensa mata dan indung telur, 30 rem atau 300 mSv per tahun untuk kelenjar gondok, tulang, kulit, dan 75 rem atau 750 mSv per tahun untuk kaki, tengah, dan tangan, sedangkan dosis radiasi maksimum (MPD) bagi masyarakat umum tidak boleh lebih dari 1/10 dosis yang diperbolehkan untuk pekerja radiasi (Malaka, 2019). Sedangkan untuk Tingkat kontaminan maksimum (MCL / *Maximum Contaminant Level*) radon di dalam air diusulkan oleh USEPA (*Environmental Protection Agency*) sebesar 11 Bq/l (Nugraha et al., 2021).

Untuk mengukur konsentrasi radon dan turunannya di udara, dapat digunakan teknik yang berbeda. Radiasi alfa, radiasi beta, dan radiasi gamma dipancarkan melalui rantai peluruhan radioaktif radon. Oleh karena itu, terdapat beberapa Teknik yang telah dikembangkan untuk mengukur radionuklida ini berdasarkan deteksi partikel alfa, partikel beta, atau sinar gamma. Teknik pengukuran radon umumnya diklasifikasikan menjadi metode pasif dan aktif. Dalam metode pengukuran radon pasif, pengukuran biasanya dilakukan dalam jangka waktu yang lama dan hasilnya dilaporkan sebagai rata-rata selama interval waktu yang diukur. Dalam metode pengukuran aktif, konsentrasi radon diukur pada titik waktu pengukuran tertentu.

Sepotong kecil plastik atau film adalah komponen dasar detektor jejak nuklir padat (SSNTD). Ketika

Studi Radon (Rn-222) dalam...

detektor plastik ini terkena radon, partikel yang dipancarkan selama rantai peluruhan radioaktif radon terus menerus mengenai detektor yang menyebabkan sejumlah jejak submikroskopis dihasilkan pada plastik atau film (Belete & Anteneh, 2021). Setelah detektor dipaparkan selama jangka waktu yang diperlukan, detektor dikembalikan ke laboratorium untuk dihitung jumlah trek pada film. Untuk menghitung jejak submikroskopis tersebut dengan mudah, detektor plastik kemudian direndam dalam larutan kaustik. Besarnya konsentrasi radon lingkungan penelitian mempunyai hubungan langsung dengan jumlah saluran yang terekam pada detektor.

Bahan pendeteksi dan ruang pendeteksi adalah komponen detektor jalur nuklir solid-state. Kebanyakan detektor lintasan nuklir solid-state menggunakan CR-39. CR-39 dipilih karena sensitivitasnya yang baik, stabilitas terhadap berbagai faktor lingkungan, dan tingkat kejernihan optik yang tinggi.

Efisiensi detektor lintasan nuklir solid-state bergantung pada kualitas berbagai parameter etsa. Sampel CR-39 diiradiasi menggunakan sumber alfa. Sampel CR-39 yang diiradiasi dapat digores dalam larutan. Larutan NaOH banyak digunakan sebagai etsa dan telah dipelajari secara luas. Konsentrasi larutan NaOH yang bervariasi dapat digunakan pada suhu dan periode yang berbeda. Mikroskop optik dengan perbesaran yang sesuai dapat digunakan untuk mengamati jejak yang tergores. Eksperimen kalibrasi dapat dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antara kepadatan lintasan yang direkam dan konsentrasi radon.

Untuk mengetahui tingkat konsentrasi radon dengan menggunakan detector Cr-39, biasanya digunakan Pers. (1) untuk penghitungan konsentrasi radon (Wahyudi et al., 2019).

$$C_{Rn} = \frac{N_T - N_B}{E_{RN} \times T} \quad (1)$$

Dengan C_{Rn} adalah konsentrasi gas radon (Bq/m^3), N_T adalah jumlah jejak total (jejak/ mm^3), N_B adalah jumlah jejak latar (jejak/ mm^3), E_{RN} adalah efisiensi detektor untuk gas radon atau faktor kalibrasi radon sebesar 0.00241, dan T adalah waktu paparan (hari). Jejak latar merujuk pada jejak-jejak kecil yang muncul pada permukaan detektor tanpa adanya paparan radon atau radiasi lainnya. Jejak-jejak ini adalah hasil dari berbagai faktor yang dapat mempengaruhi permukaan detektor CR-39 dan menciptakan pola atau jejak yang terlihat.

Setelah diketahui konsentrasi gas radon (Bq/m^3), dapat diukur dosis efektif yang diterima manusia di dalam bangunan/rumah tersebut dengan menggunakan Pers. (2) (Wahyudi et al., 2019).

$$D_{Rn} = F_{kRn} \cdot F_{Rn} \cdot T \cdot C_{Rn} \quad (2)$$

Dengan D_{Rn} adalah dosis efektif yang diterima ($mSv/tahun$), F_{kRn} adalah faktor konversi dosis radon ($9 nSv/Bq.jam/m^3$), F_{Rn} adalah faktor kesetimbangan radon dengan anak luruhnya ($0,4$), T adalah lama tinggal di dalam rumah ($jam/tahun$) dan C_{Rn} adalah konsentrasi gas radon (Bq/m^3). Hasil pengukuran dosis efektif gas radon dianalisis kemudian dibandingkan dengan nilai yang telah ditentukan oleh PERKA BAPETEN No.4 tahun 2013, yaitu sebesar $1 mSv/tahun$ (Pahrudin et al., 2022).

Tingkat konsentrasi radon dalam ruangan dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Beberapa faktor yang mempengaruhi tingkat konsentrasi radon dalam ruangan meliputi:

1. Faktor Geologi. Faktor geologi ini dapat dilihat dari berapa macam aspek, yaitu diantaranya (1) Konsentrasi radon dalam tanah dan batuan di suatu daerah sangat tergantung pada geologi. Konsentrasi radon dalam tanah dan batuan sangat dipengaruhi oleh jumlah uranium dan thorium yang terkandung dalam material tersebut. Uranium dan thorium adalah unsur yang radioaktif, dan mereka mengalami peluruhan menjadi radon dan produk peluruhan lainnya. Daerah dengan kandungan uranium dan thorium yang tinggi akan cenderung memiliki konsentrasi radon yang lebih tinggi. (2) Jenis batuan yang ada di suatu daerah juga memainkan peran penting. Batuan granit, shale, dan batuan yang memiliki kandungan uranium yang relatif tinggi (Padhi et al., 2023), sehingga dapat menghasilkan konsentrasi radon yang lebih tinggi jika ada di dekat permukaan tanah. (3) Tingkat porositas tanah dan batuan juga berperan. Di dalam tanah, radon dapat keluar

Studi Radon (Rn-222) dalam...

dari butiran tanah dengan cara berdifusi atau masuk ke dalam pro-pori tanah, proses ini disebut dengan emanasi (Thabayneh, 2018). Sehingga, radon yang terbentuk di dalam batuan dan tanah pada tingkat kedalaman yang besar memiliki kecenderungan untuk berdifusi melalui pori-pori dan rekahan di batuan ataupun celah-celah mikroskopis di antara butir-butir tanah atau di dalam struktur molekuler batuan. Difusi adalah perpindahan zat dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah. Jika batuan dan tanah memiliki retakan atau pori-pori yang memungkinkan pergerakan gas, radon dapat bergerak ke atas menuju permukaan tanah. (4) Aktivitas geologi seperti gempa bumi, pemindahan tanah, atau aktivitas vulkanik dapat mempengaruhi pergerakan radon di dalam tanah dan batuan. Aktivitas geologi ini dapat mengganggu pergerakan radon dan mengakibatkan pelepasan radon yang lebih besar ke permukaan. (5) Ketinggian lokasi juga dapat memengaruhi konsentrasi radon. Daerah yang berada di ketinggian tertentu dapat memiliki konsentrasi radon yang lebih tinggi karena perbedaan tekanan udara di daerah tersebut dapat mempengaruhi pergerakan radon. (6) Drainase tanah juga berperan. Daerah dengan drainase tanah yang buruk atau cekungan air tanah yang dangkal dapat menyebabkan akumulasi radon di dekat permukaan tanah.

2. Kualitas ventilasi dalam ruangan memainkan peran besar dalam tingkat konsentrasi radon. Ruangan yang sangat tertutup dan memiliki ventilasi yang buruk cenderung memiliki konsentrasi radon yang lebih tinggi karena radon terperangkap di dalamnya. Dalam sistem ventilasi, DVR (*Damper Ventilation Rate* atau *Ventilation Rate Damper*) dapat digunakan untuk mengontrol banyaknya udara yang masuk atau keluar dari ruangan atau sistem ventilasi. Hal ini dapat membantu dalam mencapai tingkat ventilasi yang sesuai dengan kebutuhan, terutama dalam lingkungan tertentu seperti gedung perkantoran, rumah sakit, atau fasilitas industri. Adapun daftar skenario untuk DVR yang diperlukan atau direkomendasikan pada suatu bangunan dapat dilihat pada Tabel 1 (Dovjak et al., 2022).

Tabel 1. Daftar Skenario dengan DVR yang Diperlukan atau Direkomendasikan

Skenario	Tingkat Kewajiban	DVR yang diperlukan atau direkomendasikan	
		Kriteria Deskriptif	Kriteria umum Kuantitatif
1	Persyaratan	Pergantian Udara Per Jam (ACH) minimal saat tidak ada penghuni untuk menghilangkan emisi bangunan dan mencegah bahaya (dapat dipertimbangkan dalam siklus 24 jam)	0,20/jam
2	Persyaratan	Asupan udara luar ruangan yang minimal	15 m ³ /jam.orang
3	Persyaratan	Minimal ACH	0,50/jam
4	Persyaratan	Volume udara minimal per luas permukaan lantai (tanpa mempertimbangkan sumber lain)	1,50 m ³ /jam
5a: Kat. I-III	Rekomendasi	Tingkat ventilasi perorang dan per m ² luas lantai	Kategori I: 12,6 m ³ /jam.orang + 0,9 m ³ /jam.m ² Kategori II: 9 m ³ /jam.orang + 0,54 m ³ /jam.m ² Kategori III: 5,4 m ³ /jam.orang + 0,36 m ³ /jam.m ²
5b: Kat. I-III	Rekomendasi	Tingkat ventilasi per orang	Kategori I: 36,0 m ³ /jam.orang Kategori II: 25,2 m ³ /jam.orang Kategori III: 14,4 m ³ /jam.orang
5c: Kat. I-IV	Rekomendasi	Tingkat ventilasi per m ² luas lantai dengan infiltrasi	Kategori I: 1,76 m ³ /jam.m ² Kategori II: 1,51 m ³ /jam.m ² Kategori III: 1.26 m ³ /jam.m ² Kategori IV: 0,83 m ³ /jam.m ²
Keterangan:			

Kategori I: direkomendasikan untuk ruangan yang ditempati oleh orang-orang yang sangat sensitif dan rentan dengan kebutuhan khusus seperti penyandang cacat, orang sakit, anak-anak yang masih sangat kecil, dan orang lanjut usia;
Kategori II: digunakan untuk bangunan baru dan renovasi;
Kategori III: dapat digunakan untuk bangunan yang sudah ada;
Kategori IV: nilai di luar kriteria kategori di atas. Kategori terakhir hanya boleh diterima untuk waktu terbatas dalam satu tahun

3. Cuaca juga dapat mempengaruhi tingkat konsentrasi radon dalam ruangan. Pada cuaca dingin, ketika jendela dan pintu sering tertutup rapat, radon dapat terjebak dalam ruangan. Sebaliknya, pada cuaca hangat atau saat jendela terbuka, ventilasi alami dapat membantu mengurangi konsentrasi radon.
4. Konstruksi bangunan, termasuk kedap udara dan segel retakan serta celah, dapat memengaruhi infiltrasi radon dari tanah ke dalam bangunan. Bangunan yang kurang kedap udara dapat memungkinkan lebih banyak radon masuk.
5. Jika bangunan telah dipasang sistem mitigasi radon yang efektif, tingkat konsentrasi radon dalam ruangan dapat dijaga pada tingkat yang lebih rendah. Sistem mitigasi ini dapat mencakup penggunaan pipa penguras dan pengalihan gas radon ke luar bangunan.
6. Aktivitas manusia, seperti berpergian dan beraktivitas di dalam rumah, juga dapat mempengaruhi tingkat konsentrasi radon dalam udara. Semakin sering udara dalam ruangan diganti, semakin rendah konsentrasi radonnya.

DAMPAK RADON TERHADAP MANUSIA

Paparan radon dapat memiliki dampak serius terhadap kesehatan manusia. Radon merupakan unsur radioaktif berbentuk gas yang terbentuk dari peluruhan uranium dan thorium dalam tanah dan batuan (Nunes et al., 2023). Ketika radon terurai, ia melepaskan partikel radioaktif yang bisa merusak sel-sel tubuh dan meningkatkan risiko penyakit tertentu (Salman & Murad, 2021). Telah banyak studi studi penelitian yang menyebutkan bahwa inhalasi radon secara terus menerus dapat mengakibatkan kanker paru-paru. Proses terjadinya kanker paru-paru akibat inhalasi radon melibatkan serangkaian peristiwa biologis yang terjadi ketika gas radon dan produk peluruhan radioaktifnya masuk ke dalam paru-paru manusia. Berikut adalah detail langkah-langkah dalam proses terjadinya kanker paru-paru yang disebabkan radon:

1. Pelepasan Radon: Radon adalah gas radioaktif yang berasal dari peluruhan uranium dan thorium dalam tanah dan batuan. Radon dihasilkan ketika uranium dan thorium tersebut memancarkan partikel alfa dan berubah menjadi elemen radium, yang kemudian terurai menjadi radon. Radon dilepaskan dari tanah dan batuan ke atmosfer.
2. Inhalasi Radon: Radon yang dilepaskan ke atmosfer dapat masuk ke dalam rumah melalui retakan, celah, atau melalui air tanah yang digunakan dalam rumah tangga. Orang yang tinggal di dalam bangunan yang terkontaminasi oleh radon dapat menghirup udara yang mengandung radon.
3. Penetrasi Paru-paru: Setelah radon masuk ke dalam paru-paru manusia melalui inhalasi, gas ini mengalami peluruhan radioaktif dalam paru-paru. Selama peluruhan ini, radon mengeluarkan partikel alfa dan berubah menjadi produk peluruhan radioaktif, seperti polonium-210 (^{210}Po).
4. Radiasi Alfa: Produk peluruhan seperti ^{210}Po melepaskan partikel alfa selama peluruhan radioaktif. Partikel alfa adalah partikel berenergi tinggi yang memiliki muatan positif. Ketika partikel alfa ini bersentuhan dengan jaringan sel paru-paru, mereka dapat merusak struktur kimia dan DNA dalam sel-sel tersebut.
5. Kerusakan DNA: Radiasi alfa yang dihasilkan oleh partikel alfa dapat menyebabkan kerusakan DNA dalam sel-sel paru-paru. Kerusakan genetik ini dapat mengubah fungsi normal sel dan mengarah pada pertumbuhan sel kanker yang tidak terkendali.

Studi Radon (Rn-222) dalam...

6. Pembentukan Sel Kanker: Sel-sel yang mengalami kerusakan genetik dan pertumbuhan yang tidak terkendali akibat radiasi alfa dapat berkembang menjadi sel kanker. Sehingga dapat dikatakan bahwa kanker paru-paru adalah salah satu jenis kanker yang paling umum terjadi akibat paparan radon.
7. Risiko Kanker: Risiko perkembangan kanker paru-paru akibat paparan radon tergantung pada sejumlah faktor, termasuk tingkat paparan, lama paparan, genetika individu, dan kebiasaan merokok. Orang yang merokok dan terpapar radon memiliki risiko kanker paru-paru yang lebih tinggi dibandingkan dengan mereka yang tidak merokok atau terpapar radon.

Walaupun radon memiliki waktu paro yang lumayan singkat, yaitu sekitar 3,8 hari. Radon sangat berisiko terhadap kesehatan manusia. Hal ini dikarenakan radon merupakan gas radioaktif yang menghasilkan partikel berbahaya saat mengalami peluruhan. Salah satu produk peluruhan utama radon adalah radon progeni atau "anak radon," yang meliputi partikel-partikel padat seperti polonium-218 (^{218}Po) dan polonium-214 (^{214}Po). Partikel-partikel ini dapat mengendap di saluran pernapasan manusia ketika gas radon yang terhirup mulai mengalami peluruhan di dalam paru-paru. Meskipun waktu paro (waktu yang dibutuhkan setengah dari suatu zat untuk meluruh) radon dan produk peluruhan radon sangat singkat, efek berbahaya dapat terjadi.

Namun perlu diingat bahwa selain paparan radon, kanker paru-paru bisa disebabkan oleh beberapa hal yang lain. Orang yang terkena kanker paru-paru bisa mengalami kondisi ini sebagai akibat dari berbagai faktor, termasuk pola merokok dan lingkungan tempat mereka tinggal. Orang yang merokok ataupun orang yang terpapar secara berkepanjangan terhadap asap rokok mengandung zat-zat berbahaya yang dapat merusak sel-sel paru-paru dan memicu perkembangan kanker. Di sisi lain, kondisi lingkungan juga dapat berperan dalam risiko kanker paru-paru. Di daerah-daerah dengan tingkat kelembapan tinggi dan pertumbuhan jamur tertentu, udara lembap dapat menyebabkan paparan terhadap spora jamur yang dapat berkontribusi pada pengembangan kanker paru-paru.

Membedakan kanker paru-paru yang disebabkan oleh paparan radon, perokok, dan udara lembap dapat menjadi tugas yang rumit, karena kanker paru-paru memiliki gejala yang serupa. Namun, ada beberapa perbedaan penting yang dapat membantu membedakan penyebab kanker paru-paru. Berikut adalah beberapa aspek yang dapat membantu dalam membedakan penyebab kanker paru-paru:

1. Riwayat Perokok. Seseorang yang adalah perokok aktif atau mantan perokok yang merokok secara signifikan dalam sejarahnya memiliki risiko kanker paru-paru yang lebih tinggi akibat merokok. Kanker paru-paru yang disebabkan oleh merokok sering kali terkait dengan paparan zat-zat berbahaya dalam rokok, seperti nikotin dan tar. Sementara, orang yang secara teratur terpapar asap rokok dari orang lain (perokok pasif) juga memiliki risiko lebih tinggi untuk terkena kanker paru-paru dibandingkan dengan non-perokok yang tidak terpapar asap rokok.
2. Paparan Radon. Paparan radon biasanya terkait dengan lokasi geografis di mana tingkat radon dalam tanah dan batuan tinggi. Ini dapat terjadi di daerah-daerah tertentu dan terutama dalam rumah-rumah yang tidak memiliki sistem mitigasi radon yang baik. Seseorang yang terkena paparan radon dan tidak merokok memiliki risiko kanker paru-paru yang tinggi, terutama jika paparan radon berlangsung dalam jangka waktu yang lama.
3. Lokasi Geografis. Kanker paru-paru yang terkait dengan udara lembap sering kali terjadi di daerah yang memiliki kelembapan tinggi dan pertumbuhan jamur tertentu. Ini terutama terjadi pada orang-orang yang memiliki eksposur kronis terhadap spora jamur di udara. Kanker paru-paru yang terkait dengan udara lembap bisa saja disertai dengan gejala seperti batuk berdahak, demam, dan sesak napas yang lebih mirip dengan infeksi saluran pernapasan daripada gejala kanker paru-paru akibat faktor lainnya.
4. Pemeriksaan Medis. Untuk membedakan jenis kanker paru-paru, pemeriksaan medis seperti CT scan, biopsi, dan tes histopatologi dapat diperlukan untuk menentukan jenis kanker dan faktor penyebabnya.

Namun perlu diketahui juga bahwa beberapa kasus kanker paru-paru dapat disebabkan oleh

Studi Radon (Rn-222) dalam...

kombinasi faktor, seperti perokok yang juga terpapar radon atau udara lembap. Dalam banyak kasus, kanker paru-paru yang terdiagnosis tidak selalu disebabkan oleh satu faktor tunggal. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh EPA dan CDC paparan radon dengan konsentrasi 20 pCi/L atau sekitar 740 Bq/m³ (dengan 1 pCi/L = 37 Bq/m³) bisa mengakibatkan terjadinya kanker paru pada 36 orang wanita yang tidak merokok dan 260 orang perokok serta paparan radon dengan konsentrasi 10 pCi/L atau sekitar 370 Bq/m³ (dengan 1 pCi/L = 37 Bq/m³) dapat mengakibatkan kanker paru pada 18 orang Wanita yang tidak merokok dan 150 orang perokok (Buana & Harahap, 2022).

PENUTUP

Radon adalah gas radioaktif yang berasal dari peluruhan uranium yang melalui serangkaian peluruhan alfa dan beta yang berurutan. Radon ini kemudian dapat dilepaskan dari tanah dan batuan ke dalam atmosfer, serta dapat masuk ke dalam bangunan dan menjadi sumber paparan radiasi bagi manusia jika terakumulasi dalam jumlah yang signifikan. Gas radon dapat masuk ke dalam rumah atau bangunan dengan melalui beberapa cara, yaitu infiltrasi tanah, air tanah, udara luar, dan berasal dari bahan bangunan itu sendiri. Tingkat paparan ini dapat sangat bervariasi berdasarkan geografi dan sumbernya. Tidak hanya itu kualitas ventilasi dalam suatu bangunan, cuaca, konstruksi bangunan, ada tidaknya sistem mitigasi radon dalam suatu bangunan dan aktivitas manusia dalam bangunan itu sendiri menjadi faktor lain yang mempengaruhi tingkat konsentrasi radon dalam suatu bangunan. Dampak kesehatan yang paling serius adalah risiko kanker paru-paru. kanker paru-paru akibat inhalasi radon terjadi melalui serangkaian peristiwa biologis yang terjadi ketika gas radon dan produk peluruhan radioaktifnya masuk ke dalam paru-paru manusia. Saat mengalami peluruhan di dalam paru-paru, radon akan memancarkan partikel alfa dan berubah menjadi produk peluruhan radioaktif, seperti polonium-210 (²¹⁰Po). Ketika partikel alfa ini bersentuhan dengan jaringan sel paru-paru, mereka dapat merusak struktur kimia dan DNA dalam sel-sel tersebut. Kerusakan ini dapat mengubah fungsi normal sel dan mengarah pada pertumbuhan sel kanker yang tidak terkendali.

DAFTAR PUSTAKA

- Adlini, M. N., Dinda, A. H., Yulinda, S., Chotimah, O., & Merliyana, S. J. (2022). Metode Penelitian Kualitatif Studi Pustaka. *Edumaspul-Jurnal Pendidikan*, 6(1), 974–980.
- Alharbi, W. R., & Abbady, A. G. E. (2013). Measurement of radon concentrations in soil and the extent of their impact on the environment from Al-Qassim, Saudi Arabia. *Natural Science*, 05(01), 93–98. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.51015>
- Buana, I., & Harahap, D. A. (2022). Asbestos, Radon Dan Polusi Udara Sebagai Faktor Resiko Kanker Paru Pada Perempuan Bukan Perokok. *AVERROUS: Jurnal Kedokteran Dan Kesehatan Malikussaleh*, 8(1), 1–16.
- Degu Belete, G., & Alemu Anteneh, Y. (2021). General Overview of Radon Studies in Health Hazard Perspectives. *Journal of Oncology*, 2021, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2021/6659795>
- Dovjak, M., Vene, O., & Vaupotič, J. (2022). Analysis of Ventilation Efficiency as Simultaneous Control of Radon and Carbon Dioxide Levels in Indoor Air Applying Transient Modelling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2125. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042125>
- Malaka, M. (2019). Dampak Radiasi Radioaktif Terhadap Kesehatan. *Foramadiahi: Jurnal Kajian Pendidikan Keislaman* Volume, 11(2), 199–211.
- Manawi, Y., Ahmad, A., Subeh, M., Hushari, M., Bukhari, S., & Al-Sulaiti, H. (2023). Evaluation of the Radon Levels in the Groundwater Wells of Qatar: Radiological Risk Assessment. *Water*, 15(22), 4026. <https://doi.org/10.3390/w15224026>
- 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), 920. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030920>
- Nunes, L. J. R., Curado, A., & Lopes, S. I. (2023). The Relationship between Radon and Geology: Sources, Transport and Indoor Accumulation. *Applied Sciences*, 13(13), 7460.

- <https://doi.org/10.3390/app13137460>
- Padhi, A. K., Mukherjee, M. K., Tripathi, B. K., Pande, D., Bisht, B. S., & Sarkar, B. C. (2023). Polymetallic Uranium Mineralisation in Rohil, Rajasthan, Western India: Insights from Mode of Occurrences, Structural Controls, Alteration Geochemistry and Exploration. *Minerals*, 13(4), 555. <https://doi.org/10.3390/min13040555>
- Pahrudin, P., Milvita, D., & Wahyudi, W. (2022). Pengukuran Konsentrasi Gas Radon (^{222}Rn) dan Thoron (^{220}Rn) Menggunakan Detektor CR-39 Pada Rumah Penduduk Di Nagari Alam Pauh Duo, Solok Selatan. *Jurnal Fisika Unand*, 11(3), 354–359. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.3.354-359.2022>
- Robertson, A., Allen, J., Laney, R., & Curnow, A. (2013). The Cellular and Molecular Carcinogenic Effects of Radon Exposure: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(7), 14024–14063. <https://doi.org/10.3390/ijms140714024>
- Salman, E. F., & Murad, A. K. (2021). Radioactivity: Radon Gas, its Properties and the Risks of Increasing its Concentration. *J Phys Chem Biophys*, 11(3), 1–6.
- Sari, M., & Asmendri. (2020). Penelitian Kepustakaan (Library Research) dalam Penelitian Pendidikan IPA. *NATURAL SCIENCE: Jurnal Penelitian Bidang IPA Dan Pendidikan IPA*, 6(1), 41.
- Supriyono, P., Candrawila, W. S., Rahim, A. H., & Murni, T. W. (2017). Keamanan Peralatan Radiasi Penganalisis Dikaitkan Dengan Perlindungan Hukum Bagi Tenaga Kesehatan Di Bidang Radiologi Diagnostik. *Jurnal Hukum Kesehatan*, 3(1), 102–116.
- Suresh, S., Rangaswamy, D. R., Srinivasa, E., & Sannappa, J. (2020). Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 12–26. <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1693175>
- Syarbaini, & Bunawas. (2010). Studi Penurunan Konsentrasi Gas Radon dalam Rungan. *Jurnal Pemukiman*, 5(1), 1–6.
- Thabayneh, K. M. (2018). Determination of radon exhalation rates in soil samples using sealed can technique and CR-39 detectors. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 16(2), 121–128. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-0298-2>
- Thabayneh, K. M., & Gharaybeh, A. E. (2023). Determination of the radiation dose from radon ingestion and inhalation in different types of drinking water samples collected from Bethlehem province – Palestine. *Applied Radiation and Isotopes*, 200, 110972.
- Wahyudi, Iskandar, D., Safitri, R., & Kusdiana. (2017). Determination Of Radon Concentrations In Dwelling In Aceh. *Jurnal Natural*, 17(2), 1411–8513.
- Wahyudi, Kusdiana, Wiyono, M., & Iskandar, D. (2019). Analisis Dosis Radiasi Alam Radon Dan Sinar Gamma Di Rumah Penduduk Kalimantan Barat Analysis Of Natural Radiation Dose Of Radon And Gamma Rays In Resident Houses Of West Kalimantan. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*, 22(2), 63–72. <http://ganendra.batan.go.id>
- Widisaputra, M. R., Milvita, D., & Kusdiana. (2023). Penentuan Laju Dosis Efektif Gas Radon (^{222}Rn) dan Gas Thoron (^{220}Rn) Menggunakan CR-39 di Nagari Solok Bio-Bio, Kabupaten 50 Kota, Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.3.1-7.2023>
- Wulandarisman, M., Milvita, D., & Wahyudi, W. (2022). Pengukuran Konsentrasi Gas Radon (^{222}Rn) dan Gas Thoron (^{220}Rn) 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>
- Leòn, S. B., & Lindberg, J. C. H. (2022). The Humanitarian Atom: The Role of Nuclear Power in Addressing the United Nations Sustainable Development Goals. In *Nuclear Law* (pp. 271–298). T.M.C. Asser Press. https://doi.org/10.1007/978-94-6265-495-2_13