



KAJIAN SPESIFIKASI MATERIAL IKUTAN RADIOAKTIF PADA INDUSTRI PERTAMBANGAN DI INDONESIA BERDASARKAN PP NO. 52 TAHUN 2022

Nasywa Hasna Aisyi^{1,*}, Rieka Arkaninto Adeska¹, Desalsa Anggoro Diani¹, Ferdy Muhammad Fadhillah¹, Maria Christina Prihatiningsih¹

¹ Nuclear Chemical Engineering Department, Polytechnic Institute of Nuclear Technology
Indonesia, Special Region of Yogyakarta, Indonesia

Email: nasywahasna773@gmail.com

Abstrak

Spesifikasi dan karakterisasi mineral ikutan radioaktif (MIR) yang dihasilkan dari pertambangan di Indonesia dibahas dalam penelitian ini. Kajian ini berkonsentrasi pada peraturan yang berlaku di Indonesia, khususnya Peraturan Pemerintah Nomor 52 Tahun 2022, dan membandingkannya dengan peraturan internasional yang ditetapkan oleh Agensi Nuklir Internasional (IAEA). Kajian ini mengidentifikasi berbagai jenis MIR yang ditemukan dalam industri pertambangan, termasuk industri minyak dan gas bumi. Selain itu, kajian ini menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas yang melebihi ambang batas yang diizinkan, yang dalam beberapa kasus dapat mencapai 16,590 Bq/g. Kajian ini menemukan bahwa meskipun peraturan terbaru telah memperkenalkan kerangka pengelolaan dan pengawasan, regulasi MIR Indonesia masih terbatas. Kajian ini memberikan rekomendasi untuk perbaikan regulasi berbasis best practices internasional, termasuk pentingnya sistem proteksi radiasi, prosedur keselamatan kerja, dan metode pengukuran yang lebih akurat untuk radionuklida dalam MIR. Hasilnya diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat dan pelaku industri akan pentingnya pengelolaan yang tepat terhadap MIR untuk mencegah risiko kesehatan dan lingkungan yang signifikan. Kajian ini juga akan menjadi dasar bagi peraturan yang akan datang.

Kata kunci : Mineral ikutan radioaktif, Uranium, Thorium, regulasi Indonesia, IAEA, standar internasional.

Article History

Received: Januari 2025

Reviewed: Januari 2025

Published: Januari 2025

Plagiarism Checker No 34282

Prefix DOI : Prefix DOI :

10.8734/Kohesi.v1i2.365

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

PENDAHULUAN

Mineral ikutan radioaktif adalah mineral yang mengandung elemen-elemen radioaktif alami yang dapat menghasilkan radiasi ionisasi, seperti uranium, thorium, dan radium. Mineral Ikutan Radioaktif dapat dihasilkan dari berbagai macam aktivitas atau kegiatan non nuklir seperti eksploitasi minyak dan gas bumi, penambangan, pengolahan, peleburan, pemurnian logam, dan pengolahan air minum [1]. Mineral Ikutan Radioaktif adalah mineral ikutan dengan konsentrasi aktivitas paling sedikit 1 Bq/S (satu becquerel per gram) pada salah satu unsur radioaktif anggota deret uranium dan thorium atau 10 Bq/g (sepuluh becquerel per gram) pada unsur kalium yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan mineral dan batubara, minyak dan gas bumi, dan industri lainnya sebagai bagian dari hasil samping [2][3][4]. Meskipun sebagai hasil samping, mineral ikutan radioaktif ini dapat menimbulkan paparan radiasi bagi pekerja



dan masyarakat sekitar jika tidak dikelola dengan benar. Paparan semacam itu umumnya tidak menjadi perhatian untuk proteksi radiasi. Akan tetapi, tentu dapat menimbulkan paparan yang meningkat secara signifikan yang mungkin perlu dikontrol oleh peraturan. Bahan yang menimbulkan paparan yang ditingkatkan ini dikenal sebagai material ikutan radioaktif. Dalam beberapa proses, peningkatan konsentrasi aktivitas akan teramati pada limbah dan/atau residu yang dihasilkan [5]. Teknologi yang Ditingkatkan Material Ikutan Radioaktif Alami (TENORM) dapat meningkatkan konsentrasi NORM karena aktivitas manusia seperti pertambangan, pengolahan bijih, dan ekstraksi bahan bakar fosil. NORM dapat ditemukan di mana-mana di formasi minyak bumi di seluruh dunia [6][7][8]. Industri-industri tersebut dapat melepaskan banyak zat radioaktif ke lingkungan, sehingga berpotensi menyebabkan paparan radiasi yang luas [6]. MIR dapat ditemukan dalam berbagai bentuk dalam industri pertambangan, seperti limbah, mineral, dan skala. Akibatnya, sangat penting untuk menggunakan metode yang cepat dan akurat untuk mengukur konsentrasi aktivitas radionuklida alami yang ada dalam sampel ini. Pengukuran ini diperlukan untuk menghitung indeks radioaktif (RI), yang merupakan rasio antara konsentrasi aktivitas dan konsentrasi aktivitas ambang batas yang ditetapkan oleh peraturan [9].

Di Indonesia, pengelolaan mineral ikutan radioaktif diatur melalui Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran [10] dan PP RI Nomor 52 Tahun 2022 [4]. UU ini menetapkan dasar-dasar pengelolaan bahan radioaktif, termasuk mineral ikutan, yang harus mengikuti standar keselamatan dan prosedur pengawasan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), yang mengacu pada standar internasional yang ditetapkan oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), mengatur regulasi terkait NORM di Indonesia. BAPETEN mengatur kerangka regulasi yang mencakup otorisasi, tinjauan dan penilaian, inspeksi, dan penegakan, serta pembuatan regulasi untuk memastikan kontrol regulasi terhadap situasi paparan yang direncanakan [11]. Namun belum ada peraturan yang secara khusus mengatur tentang pengelolaan, penyimpanan, dan pemantauan mineral ikutan radioaktif ini. Pentingnya untuk melakukan identifikasi, spesifikasi dan karakterisasi mineral ikutan radioaktif yang dihasilkan saat ini. Spesifikasi mengenai mineral ikutan radioaktif tertuang pada salah satu dokumen International Atomic Energy Agency (IAEA), yaitu Technical Document (TecDoc) 1712. Spesifikasi dan karakterisasi mineral ikutan radioaktif perlu dilakukan agar kita dapat menentukan perlakuan seperti apa yang perlu dilakukan baik untuk penyimpanan maupun pengolahan limbah materi ikutan radioaktif.

Kajian ini akan berfokus pada pengembangan spesifikasi material ikutan radioaktif yang secara khusus relevan untuk industri pertambangan dan regulasi mengenai MIR di Indonesia yang masih sangat terbatas [12]. Penelitian ini akan mengeksplorasi karakteristik spesifik radionuklida alami yang muncul di industri lokal beserta dengan regulasi yang ada. Ini mungkin saja dapat membantu mengidentifikasi celah dalam regulasi di Indonesia dan memberikan rekomendasi berdasarkan best practices internasional. Melalui kajian ini juga besar harapan agar masyarakat dapat mengetahui dan lebih peduli terhadap material ikutan radioaktif yang dapat menimbulkan paparan radiasi bagi pekerja dan masyarakat sekitar jika tidak dikelola dengan benar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Material Ikutan Radioaktif

Penting untuk melakukan identifikasi terhadap karakterisasi MIR yang dihasilkan saat ini. Jika kita merujuk pada salah satu dokumen IAEA, yaitu Technical Document (TecDoc) 1712, memang telah disampaikan tipikal konsentrasi aktivitas dari setiap radionuklida. Batasan

konsentrasi aktivitas sebesar 1 Bq/g yang menjadi pemicu (trigger) masuk atau tidaknya dalam rezim pengawasan [25]. Besaran konsentasi aktivitas yang spesifik dari setiap komoditi yang ada di masing masing negara akan berbeda-beda sesuai dengan kondisi geologi dari negara tersebut. Merujuk pada ARPANSA – Australia yang juga menekankan pentingnya identifikasi terhadap kegiatan yang memungkinkan menghasilkan NORM. Kemudian dilakukan pengukuran tingkat konsentrasi aktivitas untuk menunjukkan jenis operasi lebih lanjut di mana tindakan proteksi radiasi mungkin diperlukan [26]. Di Indonesia Mineral Ikutan Radioaktif suatu bahan radioaktif yang terdapat di alam yang terkonsentrasi atau naik kandungannya yang merupakan by product dari kegiatan industri non nuklir yang menggunakan bahan baku dari (dalam) kulit bumi [Aspek Safeguards pada Perizinan Penyimpanan Mineral Ikutan Radioaktif (MIR), 8]. Kegiatan beberapa industri non-nuklir seperti minyak dan gas bumi, dan batubara dapat memobilisasi radionuklida alam yang terkandung di dalam batu-batuan yang terdapat di dalam bumi. MIR awal mula terdeteksi ada pada industri minyak dan gas bumi pada tahun 1904 di Kanada yang kemudian dilakukan kajian radiologi terhadap MIR pada lapangan minyak di laut pada tahun 1980. Radionuklida dalam MIR berasal dari radionuklida purba/primordial dari peluruhan U-238, Th-232 dan K-40. [13] [14]. Namun, keputusan tentang makna 'jumlah yang signifikan' bervariasi, dibuat secara berbeda di tingkat nasional, dan bahkan di tingkat otoritas lokal. Oleh karena itu, klasifikasi bahan sebagai MIR dapat bervariasi dari satu negara ke negara lain, dan bahkan di tingkat regional global yang lebih luas. Secara umum radionuklida alam yang dominan ditemukan di dalam MIR adalah U-238, Th-232, Th 228, Ra-226, Ra-228, Rn-222, Rn-220, Pb-210 dan Po-210. MIR dapat dihasilkan dari berbagai macam aktivitas dan/atau kegiatan, maka akan memiliki karakteristik fisika, kimia, dan/atau radionuklida dominan yang berbeda-beda.

Material/Waste Stream	Production Rate (metric tons per year)	Average ²²⁶ Ra Concentration, Bq/g (pCi/g)
Uranium overburden	3.80E+07	0.92 (25)
Phosphate waste		
• Phosphogypsum	4.80E+07	1.2 (33)
• Slag	1.60E+06	1.29 (35)
Phosphate fertilizers	4.80E+06	0.31 (8.3)
Coal ash	6.10E+07	0.14 (3.7)
• Fly ash	4.40E+07	0.14 (3.9)
• Bottom ash and slag	1.70E+07	0.11 (3.1)
Oil and gas scale and sludge	2.60E+06	3.33 (90)
Water treatment	3.00E+06	0.59 (16)
• Sludges	2.60E+06	0.59 (16)
• Radium selective resins	4.00E+04	1295 (35,000)
Metal mining and processing	1.00E+09	0.18 (5)
• Rare earths	2.10E+03	33.3 (900)
• Zirconium, hafnium, titanium, and tin	4.70E+05	1.59 (43)
• Large volume industries (e.g., copper, iron)	1.00E+09	0.18 (5)
Geothermal energy production wastes	5.40E+04	4.9 (132)

Gambar 1. MIR yang terdapat di Industri

Radiasi yang dipancarkan MIR merupakan campuran partikel alpha, beta dan gamma. Berdasarkan sifat dan wujud dari masing radionuklida ini maka metode penentuan setiap radionuklida tersebut berbeda. Di Indonesia Radionuklida yang ada dalam MIR adalah radionuklida deret U-238, deret Th-232, dan K-40 [15]. MIR. Kandungan radionuklida thorium (Th-232) dan Uranium (U-238) dari berbagai jenis MIR sangat berbeda-beda. Studi menunjukkan bahwa mineral ikutan dari penambangan dan pengolahan timah mengandung monasit dan xenotim yang mengandung sedikit unsur radioaktif seperti Thorium dan Uranium [16]. Mineral ikutan radioaktif ini juga masih memiliki potensi ekonomi karena kandungan unsur tanah jarang Y 29,5 %, Dy 7,7 %, dan Gd 2,6 % yang terdapat pada xenotim, dan Ce 28,2 %, La 12,9 %, Nd 9,7 %, Pr 5,2 %, dan Gd 3,9 % yang terdapat pada monasit, monasit yang merupakan hasil samping penambangan timah umumnya mengandung U₃O₈ sebesar 0,3-0,5% dan ThO₂ 3,0-4,0% [16]. Karakteristik fisik MIR yang mendominasi pada kegiatan eksploitasi dan eksplorasi minyak dan

gas, yaitu lumpur (sludge) dan kerak (scale) dan radionuklida yang mendominasi adalah radium dan ^{210}Pb [15] [14].



Gambar 2. Pengukuran sludge

Berikut Tabel konsentrasi rata-rata radionuklida dalam *sludge*

Radionuklida	Konsentrasi Bq/g (pCi/g)
Ra-226	2,07 (56)
Pb-210	2,07 (56)
Po-210	2,07 (56)
Ra-228	0,7 (19)
Th-228	0,7 (19)

Karakteristik konsentrasi aktivitas radionuklida dalam 2 bentuk itupun juga berbeda misalnya konsentrasi aktivitas radium dalam sludge lebih rendah dibandingkan dalam scale. Sebaliknya, konsentrasi aktivitas ^{210}Pb umumnya relatif rendah dalam scale. Sedangkan pada pengolahan dan peleburan timah dihasilkan MIR berupa tailing [8] [9] [10] dan terak timah [11] [12] [13]. Konsentrasi aktivitas yang terukur juga bervariasi dan berada di atas nilai 1 Bq/g [12]. Bahkan berdasarkan hasil pengukuran sampel MIR dari salah satu industri peleburan dan pemurnian mineral dengan spektrometri gamma, menunjukkan konsentrasi aktivitas radionuklida anak luruh deret uranium dan thorium serta potasium berada jauh di atas kriteria konsentrasi aktivitas yang diizinkan. Mengacu pada beberapa peraturan yang ada batasan tersebut adalah 1 Bq/gram untuk tiap radionuklida anggota deret uranium dan thorium, atau 10 Bq/gram untuk potasium. Sedangkan hasil data primer menunjukkan nilai hingga 16,590 Bq/gram. Peraturan Pemerintah No. 52 Tahun 2022 tentang Keselamatan dan Keamanan Pertambangan Bahan Galian Nuklir mineral ikutan radioaktif adalah “mineral ikutan dengan konsentrasi aktivitas paling sedikit 1 Bq/gr pada salah satu unsur radioaktif anggota deret uranium dan thorium atau 10 Bq/g pada unsur kalium yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan mineral dan batubara, minyak dan gas bumi, dan industri lainnya” [4]. Peraturan Pemerintah ini mencakup keselamatan pengelolaan MIR sebagai bagian dari persyaratan keselamatan pertambangan bahan galian nuklir. Batas ini diselaraskan dengan standar dari IAEA (International Atomic Energy Agency) dan ICRP (International Commission on Radiological Protection), yang memberikan pedoman tentang pengelolaan NORM dan limbah radioaktif dalam industri. IAEA menetapkan bahwa material dengan aktivitas spesifik kurang dari 1 Bq/g untuk radionuklida uranium/thorium biasanya tidak dianggap memerlukan pengawasan radiologis karena dampaknya dianggap rendah.



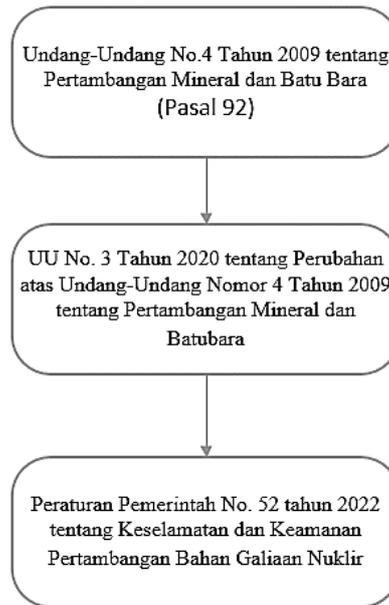
2. Paparan Radiasi dan Dampak Kesehatan

Bahan sumber yang terkandung dalam mineral ikutan adalah zat radioaktif yang berpotensi menimbulkan bahaya radiasi dan kontaminasi. Meskipun konsentrasinya dalam hasil tambang tidak cukup besar untuk memiliki nilai komersial, keberadaannya tetap perlu diperhatikan sesuai dengan prinsip-prinsip dasar keselamatan radiasi untuk menjelaskan paparan radiasi terhadap pekerja, masyarakat, dan lingkungan. MIR (^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K) akan didistribusikan dari sistem tersebut di setiap tahap produksi tambang, seperti peleburan pasir zirkon dan kalsinasi zirkonium hidroksida menjadi ZrO_2 . Oleh karena itu, sebagai bagian dari keselamatan pekerja yang terpapar radiasi, sistem proteksi radiasi TENORM diperlukan.

Menurut ICRP (International Commission on Radiological Protection) No. 60 tahun 1990, batas dosis (NBD) untuk pekerja radiasi adalah 20 mSv/tahun, dan untuk masyarakat adalah 1 mSv/tahun. Dua jenis efek negatif radiasi pengion adalah efek stokastik dan efek deterministik. Efek stokastik adalah efek yang kemungkinan terjadi bergantung pada waktu dari dosis radiasi yang diterima seseorang, sedangkan efek deterministik adalah efek yang tingkat keparahannya bergantung pada dosis radiasi yang diterima, sehingga memerlukan nilai ambang batas [19] [18]. Pasir zirkon, scale, dan maupuan sludge yang mengandung radioaktif seperti uranium dan thorium adalah contoh potensi dampak kandungan mineral ikutan pada industri pertambangan untuk kesehatan. Misalnya dalam produk Iluka mempunyai kandungan mineral tersebut dengan keaktifan sebagai berikut: ^{238}U 1,5–4,5 Bq/gr; ^{232}Th 0,6–1,2 Bq/gr. Hal ini mempunyai potensi bahaya yang cukup signifikan, terutama karena partikel alfa yang ditemukan dalam debu yang dihisap melalui pernafasan. Pekerja yang menghisap debu dengan kadar di atas 1,5 mg/m³ dapat terkena paparan lebih dari 1 mSv. Ketika bekerja di instalasi dan peralatan yang terbuka atau dibongkar, menangani limbah, dan menangani permukaan benda dan peralatan yang terkontaminasi, atau ketika mengonsumsi atau menghirup radionuklida, paparan internal dari MIR dapat terjadi. Untuk mengurangi risiko inhalasi kontaminan bahan radioaktif yang terdapat dalam daerah kerja dapat dilakukan dengan menggunakan pakaian pelindung yang tepat dan hindari merokok, minum, makan, menggunakan kosmetik, dan kegiatan lainnya yang dapat meningkatkan perpindahan bahan radioaktif ke dalam tubuh. Anda juga harus menggunakan peralatan masker yang tepat.

Keberadaan MIR dapat menyebabkan paparan eksternal yang dapat mendekati atau melampaui batasan dosis tahunan pekerja, jadi sangat tidak diharapkan ada di dalam instalasi. Dalam situasi di mana paparan radiasi eksternal yang signifikan terjadi di lokasi tertentu, dasar-dasar proteksi radiasi dapat digunakan untuk meminimalkan paparan radiasi, seperti mengurangi jumlah waktu yang dihabiskan untuk terkena paparan dan menjaga jarak yang paling mungkin antara individu. Dosis tahunan yang diperbolehkan untuk pekerja atau personel yang terpapar radiasi rata-rata 20 mSv selama 5 (lima) tahun dan 50 mSv selama 1 (satu) tahun.

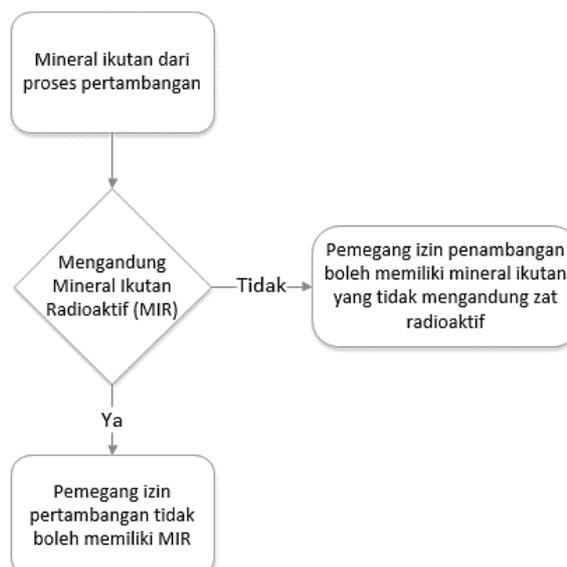
3. Kerangka Regulasi



Gambar 3. perkembangan regulasi MIR di Indonesia

Sebelum terbitnya PP No. 52 Tahun 2022, pengaturan MIR diatur dalam Peraturan Kepala BAPETEN No. 9 Tahun 2009 tentang Paparan yang Berasal dari Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material dan Peraturan Kepala BAPETEN No. 16 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material. Pengaturan tentang mineral ikutan radioaktif ini juga sudah diatur di Undang-Undang No.4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batu Bara dalam Pasal 92 yang menyatakan bahwa “Pemegang IUP (Izin Usaha Pertambangan) dan IUPK (Izin Usaha Pertambangan Khusus) berhak memiliki Mineral, termasuk mineral ikutannya, atau Batubara yang telah diproduksi setelah memenuhi iuran produksi, kecuali mineral ikutan radioaktif”. Tidak ada penjelasan lanjutan apa yang harus dilakukan oleh pemegang IUP dan IUPK terhadap mineral ikutan radioaktif tersebut.

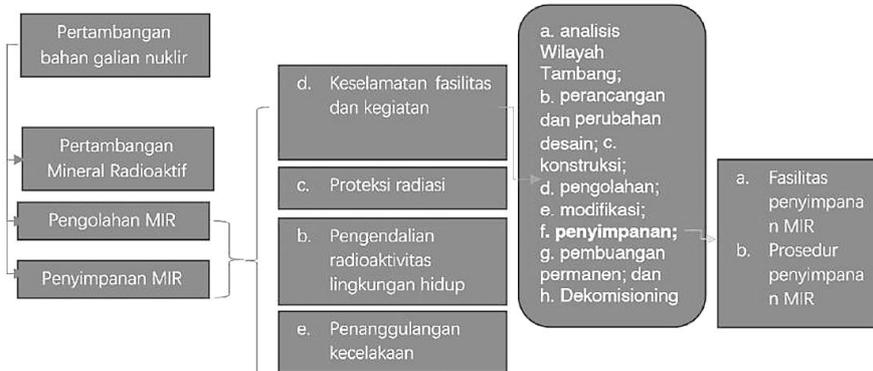
Proses Pengaturan MIR di UU No.4 Tahun 2009



Gambar 4. pengaturan MIR di UU No.4 Tahun 2009

Walaupun sebagian ketentuan dalam Undang-Undang No 4 tahun 2009 sudah diubah dalam UU No. 3 Tahun 2020 tentang Perubahan atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara, ketentuan Pasal 92 ini tidak mengalami perubahan [5]. Ketentuan yang menyatakan bahwa mineral ikutan radioaktif tidak boleh dimiliki pemegang izin usaha pertambangan ini tentu akan meningkatkan deposit mineral ikutan radioaktif di perusahaan tambang.

Peraturan Pemerintah No. 52 tahun 2022 tentang Keselamatan dan Keamanan Pertambangan Bahan Galian Nuklir mengatur keselamatan dan keamanan mineral ikutan radioaktif sebagai bagian dari persyaratan keselamatan dan keamanan pertambangan bahan galian nuklir. Dengan demikian, para pelaku usaha MIR diharapkan memenuhi persyaratan keselamatan dan keamanan kegiatan MIR, termasuk kegiatan penyimpanan dan pengolahan bahan galian nuklir [17][18][19][20][21]. Untuk kegiatan pengolahan MIR pada peraturan pemerintah ini hanya berlaku untuk pengolahan untuk mengambil senyawa uranium terkonsentrasi (yellowcake), oksida thorium terkonsentrasi, atau mineral terkonsentrasi yang bersifat radioaktif lainnya. Hal ini dijelaskan dalam bagian penjelasan Pasal 6 ayat (2) huruf f [3].



Gambar 5. Pengaturan MIR di PP No.52 Tahun 2022

Dari penjelasan ini, dapat disimpulkan bahwa kegiatan pengolahan yang diatur dalam PP No. 52 Tahun 2022 hanya ditujukan untuk pengolahan MIR untuk mengekstraksi uranium dan thorium. Namun, bagaimana dengan pengolahan MIR yang tidak dimaksudkan untuk mengekstraksi keduanya? Ini adalah tanggung jawab kementerian yang menangani energi dan sumber daya mineral. Keselamatan dan perlindungan masyarakat dan pekerja harus tetap dipertimbangkan saat mengolah MIR.

KESIMPULAN

Berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) No. 52 Tahun 2022, kajian ini menunjukkan betapa pentingnya pengelolaan mineral ikutan radioaktif (MIR) untuk industri pertambangan Indonesia. MIR, termasuk elemen radioaktif seperti radium, uranium, dan thorium, dapat ditemukan dalam berbagai bentuk, seperti kerak, lumpur, dan limbah yang berasal dari aktivitas industri seperti penambangan dan pengolahan logam. MIR memiliki konsentrasi radionuklida yang tinggi, sering melampaui ambang batas internasional. Ini berpotensi menimbulkan paparan radiasi bagi masyarakat dan karyawan. Pengaruh pada kesehatan mencakup risiko efek stokastik dan deterministik, yang memerlukan pengendalian ketat untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan. Selain itu, penelitian ini menemukan kelemahan dalam peraturan pengelolaan MIR. Misalnya, PP No. 52 Tahun 2022 berfokus pada pengolahan MIR untuk ekstraksi uranium dan thorium, sementara bagian lain dari pengelolaan limbah belum sepenuhnya diatur. Kajian ini, berdasarkan standar internasional seperti dari IAEA dan ICRP, merekomendasikan perbaikan regulasi melalui penerapan praktik terbaik, pengembangan sistem perlindungan



radiasi yang lebih baik, dan penggunaan teknik pengukuran radionuklida yang lebih akurat. Kajian ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat dan pelaku industri tentang pentingnya pengelolaan MIR yang berkelanjutan untuk mencegah kerusakan lingkungan dan dampak kesehatan yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Puji Yuwana, "Tinjauan Inventori Daur Hidup dalam Pengelolaan Mineral Ikutan Radioaktif," *Jurnal Pengawasan Tenaga Nuklir*, vol. 3, no. 2, pp. 26–36, 2023, doi: 10.53862/jupeten.v3i2.005.
- [2] Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir, "PERATURAN BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR REPUBLIK INDONESIA NOMOR 1 TAHUN 2022 TENTANG PENATALAKSANAAN PERIZINAN BERUSAHA BERBASIS RISIKO SEKTOR KETENAGANUKLIRAN," *BAPETEN*, 2022.
- [3] Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir, "PERATURAN BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR REPUBLIK INDONESIA NOMOR 3 TAHUN 2021 TENTANG STANDAR KEGIATAN USAHA DAN STANDAR PRODUK PADA PENYELENGGARAAN PERIZINAN BERUSAHA BERBASIS RISIKO SEKTOR KETENAGANUKLIRAN," *BAPETEN*, pp. 1–49, 2014.
- [4] Presiden Negara Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 52 Tahun 2022 tentang Keselamatan dan Keamanan Pertambangan Bahan Galian Nuklir," in *Negara Republik Indonesia*, 2022.
- [5] I. A. E. Agency, *Management of NORM Residues - IAEA-TECDOC-1712*. 2013.
- [6] M. I. G. David Vearrier, John A. Curtis, "Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials," *Taylor & Francis*, vol. 47, no. 5, pp. 393–406, 2009, doi: 10.1080/15563650902997849.
- [7] Steven H. Brown; Douglas B. Chambers, "Uranium Mining and Norm in North America—Some Perspectives on Occupational Radiation Exposure," *Health Phys*, pp. 13–22, 2017, doi: 10.1097/HP.0000000000000673.
- [8] F. Bou-Rabee, A. Z. Al-Zamel, R. A. Al-Fares, and H. Bem, "Technologically enhanced naturally occurring radioactive materials in the oil industry (TENORM). A review," *Nukleonika*, vol. 54, no. 1, pp. 3–9, 2009.
- [9] A. Barba-Lobo, M. J. Gázquez, and J. P. Bolívar, "A Practical Procedure to Determine Natural Radionuclides in Solid Materials from Mining," *Minerals*, vol. 12, no. 5, pp. 1–13, 2022, doi: 10.3390/min12050611.
- [10] Indonesia, "Undang-undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran," no. 1, pp. 1–54, 1997.
- [11] J. Loy, "What should a radiation regulator do about naturally occurring radioactive material?," *Ann ICRP*, vol. 44, pp. 197–201, 2015, doi: 10.1177/0146645315572298.
- [12] S. Nightingale, H. Spiby, K. Sheen, and P. Slade, *LJMU Research Online m*. 2018.
- [13] "Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir 2023," *BAPETEN*, 2023.
- [14] "IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition." [Online]. Available: <https://www.iaea.org/resources/safety-standards>
- [15] D. A. S. Chrisantus Aristo Wirawan Dwipayana, "Analisis Ketentuan Pemantauan Dosis Pekerja di Industri yang Melibatkan Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)," *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*, 2023.



- [16] S. Virdhian and E. Afrilinda, "Karakterisasi Mineral Tanah Jarang Ikutan Timah Dan Potensi Pengembangan Industri Berbasis Unsur Tanah Jarang," *Metal Indonesia*, vol. 36, no. 2, p. 61, 2018, doi: 10.32423/jmi.2014.v36.61-69.
- [17] "Peraturan Pemerintah RI NO 61 Tahun 2013 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif," 2013.
- [18] "Peraturan Kepala BAPETEN NO 16 Tahun 2013 Tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penyimpanan Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material," 2013. [Online]. Available: www.djpp.kemendiknas.go.id
- [19] "Peraturan Pemerintah RI NO 33 Tahun 2007 Tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif," 2007.
- [20] "Peraturan Kepala BAPETEN NO 9 Tahun 2009 Tentang Intervensi Terhadap Paparan Yang Berasal Dari Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material," 2009.
- [21] "Peraturan Pemerintah RI NO 29 Tahun 2008 Tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan BahanNuklir," 2008.
- [22] "Undang-Undang RI NO 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran," 1997. [Online]. Available: www.bphn.go.id
- [23] H. K. L. V. M. N.-N. R. and N. S. A. (DSA), N. Jelena Mrdakovic Popic, D. G. U.-D. H. A. R. P. (SIS), D. Rikke Harlou, N. L. M. P. P. K.-R. and N. S. A. (STUK), F. Antti Kallio, I. Gísli Jónsson - The Icelandic Radiation Safety Authority (GR), and S. Pernilla Sopher - Swedish Radiation Safety Authority (SSM), "Regulatory control of naturally occurring radioactive material (NORM) in the Nordic countries," 2023.
- [24] "Peraturan BAPETEN RI NO 1 Tahun 2022 Tentang Penatalaksanaan Perizinan Berusaha Berbasis Risiko Sektor Ketenaganukliran," 2022.
- [25] "Undang-Undang RI NO 4 Tahun 2009 Tentang Pertambangan Mineral dan Batubara," 2009.