

## **Dampak Limbah Radioaktif Terhadap Lingkungan dan Upaya Mitigasi Risikonya**

**Eko Yudho Pramono<sup>1, 2, a)</sup> dan Waringin Margi Yusmaman<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>Magister Manajemen Bencana, UPN “Veteran” Yogyakarta

<sup>2)</sup>Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia

<sup>3)</sup>Badan Riset dan Inovasi Nasional

<sup>a)</sup>Corresponding author: 214232018@student.upnyk.ac.id

### **ABSTRAK**

Pemanfaatan teknologi nuklir diberbagai bidang kehidupan menghasilkan limbah radioaktif yang berpotensi mengkontaminasi dan mencemari tanah, air, serta udara. Sehingga keberadaan limbah radioaktif merupakan salah satu topik perdebatan serta kekhawatiran yang serius, karena dapat menimbulkan bencana lingkungan serta dampak buruk terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana dampak limbah radioaktif terhadap lingkungan dan upaya mitigasi risikonya. Metode penyusunan artikel ini menggunakan *narrative literature review* dan pembahasan dengan analisa kualitatif diskriptif. Mitigasi risiko dari potensi bahaya limbah radioaktif harus menjadi bagian dari tahapan dalam manajemen bencana yang sejalan dengan kebijakan pembangunan terkait pemanfaatan zat radioaktif, penerapan regulasi, pemantauan dan pengawasan, penggunaan dan inovasi teknologi pengolahan limbah radioaktif, serta melalui sosialisasi, edukasi dan peningkatan kesadaran publik. Hasil kajian ini dapat digunakan oleh para pihak terkait dan berkepentingan sebagai acuan dalam membuat kebijakan dan perencanaan pembangunan kebencanaan terkait risiko bahaya dari limbah radioaktif yang dihasilkan dari pemanfaatan tenaga nuklir

**Kata Kunci:** Limbah, Radioaktif, Mitigasi, Risiko, Lingkungan

### **ABSTRACT**

*The utilization of nuclear technology in various fields of life generates radioactive waste, which has the potential to contaminate and pollute soil, water, and air. Consequently, the presence of radioactive waste is a significant topic of debate and serious concern, as it can lead to environmental disasters and adverse effects on human health and ecosystems. This article aims to examine the environmental impacts of radioactive waste and efforts to mitigate its risks. The methodology used in this article involves a narrative literature review and descriptive qualitative analysis. Risk mitigation from the potential hazards of radioactive waste must be an integral part of the disaster management process, aligned with development policies related to the use of radioactive materials, the enforcement of regulations, monitoring and supervision, the utilization and innovation of radioactive waste treatment technologies, as well as through public awareness campaigns, education, and increasing public awareness. The findings of this study can serve as a reference for relevant stakeholders and interested parties in formulating policies and disaster management planning related to the risks posed by radioactive waste generated from nuclear energy utilization.*

**Keywords:** Waste, Radioactive, Mitigation, Risk, Environment

### **PENDAHULUAN**

Kebijakan pembangunan di dalam Rencana Induk Riset Nasional Tahun 2017-2045 menyatakan bahwa Indonesia turut memanfaatkan teknologi nuklir untuk tujuan damai, kesejahteraan dan kemakmuran rakyat sesuai amanat Undang Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945. Pemanfaatan teknologi nuklir sebagai langkah mendasar yang dibutuhkan dalam meningkatkan produktivitas industri nasional di berbagai bidang kehidupan.(Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2018 Tentang Rencana Induk Riset Nasional Tahun 2017-2045, 2018) Indonesia telah berkomitmen dalam mensukseskan *Sustainable Development Goals* (SDGs) menuju tahun 2030 dengan memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) sebagai bagian dari sumber energi terbarukan.(BAPPENAS,

2017) Pemerintah tidak lagi menempatkan nuklir sebagai opsi terakhir sebagai sumber energi, namun menjadi penyeimbang untuk bauran energi menuju target Net Zero Emission (NZE) 2060. (KEMENTERIAN ESDM, 2024) Peta Jalan Menuju Emisi Nol Bersih pada Sektor Energi di Indonesia diantaranya meliputi nuklir, karena termasuk bahan bakar rendah karbon. Energi nuklir muncul sebagai salah satu solusi energi bersih yang berpotensi untuk menjawab kebutuhan energi yang dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan dampak negatif terhadap lingkungan. PLTN dapat menghasilkan jumlah energi yang besar tanpa menghasilkan emisi karbon yang merugikan atmosfer. (IEA, 2022)

Kebutuhan pemanfaatan tenaga nuklir di Indonesia di bidang industri, kesehatan dan penelitian mengalami peningkatan sejalan dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, pertambahan jumlah penduduk, budaya, dan lain-lain. Selain memberikan manfaat bagi kehidupan manusia, Tenaga nuklir juga memiliki karakteristik sistem risiko yang tinggi yang melibatkan zat radioaktif. Pemanfaatan teknologi nuklir dan beberapa aktivitas manusia akan menghasilkan limbah radioaktif, seperti untuk kedokteran nuklir dibidang kesehatan, dibidang industri untuk radiografi dan iradiasi, dibidang pertanian dan pangan, dibidang penelitian dan pendidikan, dan bidang pertambangan. Termasuk pengoperasian PLTN nantinya juga akan menghasilkan limbah radioaktif yang lebih banyak. Limbah radioaktif ini memiliki potensi bahaya, karena bersifat toksik dan dapat bertahan dalam lingkungan selama ribuan tahun karena memiliki waktu paruh yang sangat panjang. Limbah radioaktif memiliki karakteristik memancarkan radiasi yang berbahaya yang dapat mengionisasi atau merusak target material lain menjadi tidak stabil, sedangkan limbah B3 memiliki karakteristik bahaya: beracun, reaktif, mudah meledak, mudah terbakar, bersifat korosif dan dapat menyebabkan infeksi. Sehingga limbah radioaktif apabila tidak ditangani dengan tepat, maka akan menjadi ancaman bagi lingkungan dan manusia serta dapat menyebabkan kerusakan yang permanen pada ekosistem. (Lee & Cheong, 2020)

Risiko bahaya dari limbah radioaktif jika bertemu dengan kerentanan dan kapasitas yang tidak memadai, maka akan dapat menyebabkan terjadinya kedaruratan nuklir yang berkembang menjadi bencana radiologik. Untuk itu diperlukan upaya mitigasi risiko dari bahaya limbah radioaktif untuk melindungi pekerja, masyarakat dan lingkungan. Tujuan dari kajian dalam artikel ini adalah untuk menganalisis dampak lingkungan yang diakibatkan oleh limbah radioaktif dan mengidentifikasi upaya mitigasi yang dapat diterapkan untuk mengurangi dampak negatif tersebut. Diharapkan hasil kajian ini dapat menjadi acuan bagi para pihak terkait dan berkepentingan dalam menyusun kebijakan dan perencanaan pembangunan dan penanggulangan bencana.

## METODE

Dalam kajian ini menggunakan metode narative literatur review dan pembahasan dengan analisa bersifat kualitatif diskriptif. Sumber literatur berasal dari buku, karya tulis ilmiah, dokumen resmi, serta regulasi. Ruang lingkup literatur berkaitan dengan pengelolaan, pengolahan, dampak yang ditimbulkan limbah radioaktif terhadap lingkungan, serta strategi untuk pengurangan risikonya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah radioaktif adalah limbah yang mengandung atau terkontaminasi radionuklida pada konsentrasi atau aktivitas yang melebihi batas yang diijinkan (*Clearance level*) yang ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Pengertian limbah radioaktif yang lain adalah zat radioaktif yang sudah tidak dapat digunakan lagi, dan atau bahan serta peralatan yang terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif dan sudah tidak dapat difungsikan atau dimanfaatkan.(Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2023 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, 2013) Bahan atau peralatan tersebut terkena atau menjadi radioaktif kemungkinan karena pengoperasian instalasi nuklir atau instalasi yang memanfaatkan radiasi pengion. Limbah radioaktif pada umumnya berasal dari setiap pemanfaatan tenaga nuklir, baik pemanfaatan untuk pembangkit listrik tenaga nuklir, maupun pemanfaatan nuklir untuk keperluan medis dan industri, pertambangan, penelitian dan pendidikan.

Pemanfaatan tenaga nuklir mencakup berbagai bidang, termasuk kedokteran (diagnostik dan terapi), farmasi (sebagai pernafas), yang menghasilkan limbah rumah sakit. Sementara itu, limbah yang

dihasilkan dari industri disebut limbah industri, dan limbah dari laboratorium (seperti pusat riset, universitas, atau sektor swasta) terkait penggunaan sumber radiasi, bahan bakar reaktor, atau fasilitas pengolahan bahan bakar disebut limbah laboratorium. Limbah radioaktif diklasifikasikan berdasarkan aktivitasnya menjadi limbah beraktivitas tinggi, sedang, dan rendah, serta berdasarkan umur paruhnya menjadi limbah berumur paruh panjang dan pendek. Dari bentuk fisiknya, limbah dibagi menjadi limbah padat, cair, dan gas.

### **1.1 Dampak Limbah Radioaktif Terhadap Lingkungan**

Limbah radioaktif yang terlepas ke dalam tanah dapat merusak struktur tanah dan menyebabkan kontaminasi yang sulit untuk dilakukan pemulihannya. Zat radioaktif seperti cesium-137 dan strontium-90 dapat terakumulasi dalam tanah dan diserap oleh tanaman, yang kemudian masuk ke dalam rantai makanan, hal ini dapat membahayakan bagi manusia dan makhluk hidup lainnya. Pencemaran ini juga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem, mengurangi produktivitas tanah, dan berdampak langsung pada keamanan pangan.(Aditya et al., 2023) Limbah radioaktif yang tidak dikelola dengan baik dapat meresap ke sumber air tanah atau permukaan, menyebabkan kontaminasi air yang berbahaya bagi manusia dan satwa liar. Radionuklida seperti tritium dan plutonium dapat mencemari sungai, danau, serta laut, menyebabkan kerusakan pada organisme air dan mengancam kesehatan manusia yang mengonsumsi air atau makanan laut yang terkontaminasi.(Sari et al., 2023) Selain tanah dan air, limbah radioaktif juga dapat mencemari udara jika terjadi kebocoran atau pelepasan zat radioaktif melalui pembakaran atau ledakan. Partikel radioaktif yang terdispersi di atmosfer dapat terhirup oleh manusia dan hewan, menyebabkan risiko kanker dan penyakit lain yang berhubungan dengan radiasi.(Kautsky et al., 2016) Radiasi atmosferik juga dapat mempengaruhi cuaca dan perubahan iklim dalam jangka panjang.(Cao et al., 2022)

Bahaya dari limbah radioaktif umumnya berupa radiasi terhadap tubuh manusia disekitar sumber radioaktif. Radiasi dapat melakukan ionisasi dan merusak sel organ tubuh manusia. Kerusakan sel tersebut mampu menyebabkan terganggunya fungsi organ tubuh. Disamping itu, sel-sel yang masih tetap hidup namun mengalami perubahan, dalam jangka panjang kemungkinan menginduksi adanya tumor atau kanker. Ada kemungkinan pula bahwa kerusakan sel akibat radiasi mengganggu fungsi genetika manusia, sehingga keturunannya mengalami cacat. Bahaya dari limbah radioaktif umumnya berupa radiasi terhadap tubuh manusia disekitar sumber radioaktif. (Cao et al., 2022)

Limbah radioaktif juga dapat mengganggu ekosistem secara keseluruhan, terutama di area sekitar tempat penyimpanan atau pembuangan limbah. Radiasi dapat mempengaruhi keanekaragaman hayati, menyebabkan mutasi genetik pada flora dan fauna, serta mengurangi daya dukung ekosistem. Mutasi ini dapat mengakibatkan ketidakmampuan spesies untuk bertahan hidup, yang pada akhirnya menurunkan populasi spesies tertentu.(Aditya et al., 2023)

### **1.2 Mitigasi Risiko**

Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, khususnya Pasal 44, mengatur langkah-langkah yang diperlukan untuk mengurangi atau menghilangkan korban jiwa dan kerugian material yang dapat memengaruhi kehidupan dan aktivitas manusia. Aturan pelaksanaan dari undang-undang ini adalah Peraturan BNPB Nomor 4 Tahun 2008 tentang Pedoman Penyusunan Rencana Penanggulangan Bencana, yang menyatakan bahwa mitigasi dapat dilakukan secara struktural, melalui pembangunan dan infrastruktur, serta nonstruktural, melalui peraturan, penyuluhan, dan pendidikan. Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif menyatakan bahwa “Limbah Radioaktif yang berasal dari pemanfaatan tenaga nuklir berpotensi membahayakan keselamatan, keamanan, dan kesehatan pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup jika tidak dikelola secara tepat guna dan berhasil guna dengan cara dan metode yang akurat serta sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi”. Upaya mitigasi risiko dari bahaya limbah radioaktif adalah :

### **1) Kebijakan dan Perencanaan Pembangunan**

Kebijakan pembangunan nasional yang diimplementasikan melalui perencanaan pembangunan secara bertingkat dan bertahap harus diikuti dengan adanya kebijakan dan perencanaan penanggulangan bencana. Ancaman bahaya limbah radioaktif yang berpotensi risiko bagi masyarakat dan lingkungan meningkat seiring dengan perkembangan pembangunan pemanfaatan tenaga nuklir diberbagai bidang kehidupan.(Ahdi, 2015) Pembangunan instalasi/fasilitas pemanfaatan zat radioaktif juga harus menyertakan dokumen *Feasibility Study* (FS), *Detail Engineering Design* (DED), *Analisis Mengenai Dampak Lingkungan Hidup* (AMDAL), termasuk didalamnya juga rancangan pengelolaan dan instalasi pengolahan limbah radioaktif. Untuk izin operasional instalasi/fasilitas nuklir juga harus memenuhi persyaratan dari BAPETEN berupa Laporan Analisis Keselamatan (LAK) termasuk Petugas Proteksi Radiasi (PPR) yang bersertifikat.(Mudjiono et al., 2017)

### **2) Penerapan Regulasi**

Pengelolaan limbah radioaktif yang meliputi penyimpanan, transportasi, dan pengolahannya diatur oleh regulasi yang ketat dan harus diterapkan secara konsisten, baik di tingkat instalasi/fasilitas, nasional, maupun internasional. Limbah radioaktif tidak pernah dibuang sembarangan ke lingkungan karena sudah diatur oleh peraturan nasional yang sejalan dengan ketentuan internasional. Regulasi internasional tentang pengelolaan limbah radioaktif dan paparan radiasi ditetapkan oleh IAEA dan International Commission on Radiological Protection (ICRP). Sedangkan di Indonesia, pengawasan dilakukan oleh BAPETEN..

Pengawasan yang dilakukan BAPETEN sebagaimana dimaksud dalam Undang-Undang No.10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran pada Pasal 16 ayat 1 dinyatakan bahwa “Setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketentraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup”. Dan dalam Pasal 16 ayat 2 dinyatakan bahwa “Ketentuan sebagaimana dimaksud pada ayat 1 diatur lebih lanjut dengan Peraturan Pemerintah”. Sesuai dengan amanat UU No.10/1997 tentang Ketenaganukliran Pasal 14 ayat 2 BAPETEN melakukan pengawasan terhadap pemanfaatan tenaga nuklir melalui peraturan, perizinan, dan inspeksi. Peraturan dan perizinan yang diberikan oleh BAPETEN juga memperhatikan Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Undang Undang No. 23 Tahun 1992 tentang Kesehatan dan Undang-Undang lainnya yang terkait beserta produk hukum dibawahnya.(Yuliyani et al., 2023)

### **3) Pemantauan dan Sistem Peringatan Dini**

Sistem peringatan dini (Early Warning System = EWS) merupakan bentuk upaya mitigasi bencana struktural adalah bagian dari siklus bencana pada tahap pencegahan. EWS merupakan gabungan antara kemampuan teknologi dan kemampuan pengambil kebijakan yang terkoneksi dengan sistem kedaruratan nuklir nasional, serta kemampuan masyarakat untuk menindaklanjutinya sebagai upaya pengurangan risiko lepasan zat radioaktif ke lingkungan.(Peraturan BNPB Nomor 2 Tahun 2024 Tentang Sistem Peringatan Dini Bencana, 2024) Sistem peringatan dini dimulai dengan melakukan pengamatan gejala bencana yang ada, menganalisis hasil pengamatan gejala bencana, pengambilan keputusan oleh pihak berwenang, penyebarluasan informasi peringatan bencana, dan pengambilan tindakan oleh masyarakat.

Pemasangan sistem peringatan dini dengan sistem proteksi fisik dan pemantauan radiasi secara real-time di sekitar fasilitas penyimpanan limbah merupakan langkah penting dalam mitigasi. Sistem ini memungkinkan deteksi dini terhadap kebocoran atau pelepasan radioaktif sehingga tindakan cepat dapat diambil untuk mencegah pencemaran lebih lanjut. Pemantauan jangka panjang juga penting untuk memastikan bahwa limbah yang disimpan tidak merusak lingkungan selama berabad-abad.

Upaya peningkatkan kemampuan deteksi dini dan respons terhadap kedaruratan nuklir yang timbul akibat lepasan limbah radioaktif yang disebabkan dari limbah industry, kecelakaan dan percobaan senjata nuklir/radiasi baik dari dalam maupun dari luar wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia telah dilakukan dengan pengembangan infrastruktur yang memanfaatkan teknologi informasi. Adapun infrastruktur tersebut berupa pemasangan *Indonesian-Radiation Data Monitoring System* (I-RDMS). Sistem I-RDMS mampu berperan sebagai realtime monitoring radioaktivitas lingkungan / *Nuclear Early Warning System* dan sebagai data dukung dalam pengambilan keputusan dalam respon kedaruratan nuklir/radiologi di tingkat nasional.

#### 4) Evaluasi

Evaluasi secara berkala setiap 6 bulan sekali sesuai dengan amanat regulasi penting untuk dilakukan sebagai upaya mitigasi. Evaluasi bertujuan untuk memastikan bahwa proses pengelolaan limbah radioaktif sesuai dengan dokumen AMDAL dan persyaratan regulasi maupun standar. Evaluasi AMDAL limbah radioaktif meliputi aspek fisika dan kimia melalui pengukuran kualitas udara, kualitas tanah, hidrologi, kualitas air dan air Tanah. Demikian pula evaluasi mencakup aspek biologi meliputi biota darat dan biota aquatik, termasuk dampak terhadap sosial ekonomi dan budaya dampak kesehatan masyarakat dampak terhadap komponen kependudukan, perekonomian dan sosial budaya yang diperkirakan dapat dinetralisasikan.

Upaya pengelolaan lingkungan untuk pencegahan, penanggulangan dampak negatif serta pengembangan manfaat dengan penggunaan bahan radioaktif dan atau Bahan Beracun & Berbahaya (B3) lainnya untuk keperluan riset dan pendidikan dibatasi seminimal mungkin. Fasilitas/instalasi/laboratorium yang menggunakan bahan Radioaktif dan B3 harus dilengkapi dengan sarana Proteksi Fisik dan instalasi pengolahan limbah. melakukan peningkatan penghijauan disekitar fasilitas/ instalasi/laboratorium yang menghasilkan limbah radioaktif.

#### 5) Inovasi Teknologi Pengelolaan Limbah

Salah satu langkah mitigasi utama adalah pengelolaan limbah radioaktif melalui pengembangan dan inovasi teknologi pengolahan dan penyimpanan limbah radioaktif agar lebih aman, efektif dan efisien serta dapat menangani berbagai limbah radioaktif sesuai perkembangan pemanfaatan tenaga nuklir. Teknologi seperti penyimpanan geologis dalam lapisan bumi yang stabil digunakan untuk menyimpan limbah tingkat tinggi, sementara limbah tingkat rendah dan menengah dapat disimpan dalam fasilitas permukaan dengan perlindungan yang berlapis.(Chapman & Hooper, 2012) Selain itu, pengembangan teknologi pengurangan limbah melalui proses daur ulang isotop radioaktif dapat digunakan untuk mengurangi volume limbah yang harus disimpan.(Chipiga et al., 2022)

Teknologi pengelolaan limbah radioaktif berdasarkan tiga kriteria pokok, yaitu tergantung dari volume limbah dan nilai aktivitas radiasi yang terkandung didalam limbah serta sifat-sifat fisika dan kimia limbah tersebut. Tiga kriteria pokok dalam pengolahan limbah radioaktif meliputi:

- a) Limbah radioaktif dipekatkan dan dipadatkan dalam wadah yang khusus, setelah itu disimpan dalam jangka waktu yang lama. Limbah radioaktif cair yang mengandung zat radioaktivitas sedang dan atau tinggi lebih efektif menggunakan cara ini.
- b) Limbah radioaktif disimpan dalam fasilitas khusus dan dibiarkan mengalami proses peluruhan hingga aktivitasnya setara dengan lingkungan sekitarnya. Metode ini dinilai efektif untuk menangani limbah radioaktif cair atau padat yang memiliki aktivitas rendah dan waktu paruh pendek..

- c) Limbah radioaktif juga dapat diencerkan dan disebarluaskan ke lingkungan. Pendekatan ini cocok digunakan dalam pengelolaan limbah radioaktif cair dan gas yang beraktivitas rendah.

## 6) Program Sosialisasi dan Edukasi

Sosialisasi dan edukasi kepada penghasil limbah radioaktif dan para pihak terkait tentang bahaya limbah radioaktif dan cara-cara pengelolaannya perlu ditingkatkan menjadi program pemerintah melalui Kementerian dan Lembaga terkait. Sosialisasi dan edukasi juga penting berikan kepada masyarakat, khususnya di sekitar instalasi/ fasilitas nuklir melalui program latihan dan simulasi yang terencana. Kesadaran publik yang tinggi dapat membantu masyarakat memahami risiko dan turut serta melakukan pengawasan terhadap aktivitas pengelolaan limbah. Selain itu, keterlibatan komunitas dalam pengambilan keputusan terkait lokasi pembuangan atau penyimpanan limbah akan mengurangi risiko dan resistensi sosial.

## KESIMPULAN

Limbah radioaktif memiliki dampak berbahaya, bahkan dapat menimbulkan bencana lingkungan. Ancaman risiko dari bahaya limbah radioaktif dapat dikurangi bahkan dapat dicegah melalui upaya mitigasi yang melibatkan perencanaan pembangunan kebencanaan, penerapan regulasi, adanya pemantauan dan evaluasi, inovasi teknologi pengelolaan limbah yang tepat, dan edukasi publik yang memadai untuk penyadaran publik. Negara yang memiliki kekuasaan dan kewenangan, merupakan pihak utama yang memiliki kewajiban dan tanggung jawab untuk menegakkan regulasi serta melibatkan para pihak terkait termasuk masyarakat dalam rangka pengurangan risiko ancaman bahaya limbah radioaktif tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, F., Pratama, R. S., Silaban, F., Hasibuan, M., Siregar, R., & Manurung, M. F. (2023). Krisis Lingkungan Dan Implikasinya Terhadap Keamanan Manusia (Studi Kasus Pembuangan Limbah Nuklir Oleh Jepang). *Student Research Journal*, 1(6), 210–219.
- Ahdi, D. (2015). Perencanaan Penanggulangan Bencana Melalui Pendekatan Manajemen Risiko. *Reformasi*, 5(1), 13–30.
- BAPPENAS. (2017). Peta Jalan Sustainable Development Goals (SDGs) di Indonesia. In *Kementerian PPN/Bappenas*. [https://sdgs.bappenas.go.id/website/wp-content/uploads/2021/02/Roadmap\\_Bahasa-Indonesia\\_File-Upload.pdf](https://sdgs.bappenas.go.id/website/wp-content/uploads/2021/02/Roadmap_Bahasa-Indonesia_File-Upload.pdf)
- Cao, Y., Lin, J., Zhai, K., Jiang, W., Zou, H., Ren, H., Wang, P., Gao, X., Zhang, M., Yu, S., Zhao, Y., Xuan, Z., Zhang, D., Liu, Y., & Lou, X. (2022). Long-term investigation of environmental radioactivity levels and public health around the Qinshan Nuclear Power Plant, China. *Scientific Reports*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09091-2>
- Chapman, N., & Hooper, A. (2012). The disposal of radioactive wastes underground. *Proceedings of the Geologists' Association*, 123(1), 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2011.10.001>
- Chipiga, L. A., Vodovatov, A. V., Zvonova, I. A., Stanzhevsky, A. A., Petryakova, A. V., Anokina, E. E., Velichkina, K. S., & Ryzhov, S. A. (2022). Management of biological waste of patients after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiene*, 15(2), 19–30. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30>
- IEA. (2022). *Peta Jalan Menuju Emisi Nol Bersih pada Sektor Energi di Indonesia*. [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
- Kautsky, U., Saetre, P., Berglund, S., Jaeschke, B., Nordén, S., Brandefelt, J., Keesmann, S., Näslund, J. O., & Andersson, E. (2016). The impact of low and intermediate-level radioactive waste on

- humans and the environment over the next one hundred thousand years. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.06.025>
- KEMENTERIAN ESDM. (2024). *Sekjen DEN: Pembangunan Pembangkit Nuklir Jadi Penyeimbang Bauran Energi*. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/sekjen-den-pembangunan-pembangkit-nuklir-jadi-penyeimbang-bauran-energi>
- Lee, S. G., & Cheong, J. H. (2020). Neutron activation of structural materials of a dry storage system for spent nuclear fuel and implications for radioactive waste management. *Energies*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/en13205325>
- Mudjiono, Dewita, E., & Priambodo, D. (2017). Manajemen Konstruksi Reaktor Daya Eksperimental. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*, 1(1), 199–207. [https://www.researchgate.net/profile/Mudjiono-Mudjiono/publication/330753072\\_Manajemen\\_Konstruksi\\_Reaktor\\_Daya\\_Eksperimental/links/5c52aff2299bf12be3eff3b1/Manajemen-Konstruksi-Reaktor-Daya-Eksperimental.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mudjiono-Mudjiono/publication/330753072_Manajemen_Konstruksi_Reaktor_Daya_Eksperimental/links/5c52aff2299bf12be3eff3b1/Manajemen-Konstruksi-Reaktor-Daya-Eksperimental.pdf)
- Peraturan BNPB Nomor 2 Tahun 2024 Tentang Sistem Peringatan Dini Bencana, 2 (2024). [peraturan.go.id](http://peraturan.go.id)
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2023 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif (2013). [jdih.bapeten.go.id](http://jdih.bapeten.go.id)
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2018 Tentang Rencana Induk Riset Nasional Tahun 2017-2045 (2018). <https://peraturan.go.id/files/ps38-2018.pdf>
- Sari, N. R., Alfiaturrohmah, H., & Sudarti, S. (2023). Analisis Dampak Radiasi Oleh Pltn Terhadap Populasi Organisme Di Laut. *EDUPROXIMA : Jurnal Ilmiah Pendidikan IPA*, 5(2), 73–81. <https://doi.org/10.29100/.v5i2.4154>
- Yuliyani, A. P., Ariyanti, B. F., & Elaies, R. S. (2023). Pembuangan Limbah Nuklir Jepang Terhadap Regulasi Hukum. *Jurnal Hukum Dan HAM Wara Sains*, 2(12), 1089–1094. <https://doi.org/10.58812/jhhws.v2i12.774>