

Penerapan Precautionary Principle dalam Pengembangan Green Nuclear Energy melalui Konsep REMIX sebagai Upaya Mewujudkan Energi Berkelanjutan

Abigail Georginna Stephanies Sitorus¹, Ibek Arya Winata², Muhammad Abidin³, Chelsie Tetratama Ramadhani⁴, Ubaidillah Kamal⁵

^{1,2,3,4,5} Faculty Of Law, Universitas Negeri Semarang

e-mail: abigailgeorginna26@students.unnes.ac.id¹,

ibekaryawinata@students.unnes.ac.id²,

muhammadabidin629@students.unnes.ac.id³, chelsietetra20@students.unnes.ac.id⁴,

ubaidillahkamal@mail.unnes.ac.id⁵

Abstrak

Perubahan iklim global dan meningkatnya kebutuhan energi mendorong percepatan pengembangan sumber energi rendah karbon yang berkelanjutan. Salah satu alternatif yang semakin mendapat perhatian adalah Green Nuclear Energy melalui konsep Regenerated Mixture (REMIX), yaitu teknologi daur ulang bahan bakar nuklir yang memanfaatkan kembali uranium dan plutonium dari bahan bakar bekas untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya serta mengurangi volume limbah radioaktif. Meskipun demikian, penerapan teknologi ini tetap mengandung risiko lingkungan, keselamatan, dan keamanan yang bersifat kompleks serta berdampak jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan precautionary principle dalam pengembangan Green Nuclear Energy berbasis REMIX sebagai upaya mendukung transisi energi berkelanjutan di Indonesia. Metode yang digunakan adalah penelitian hukum normatif dengan pendekatan perundang-undangan, konseptual, dan komparatif melalui studi kepustakaan terhadap peraturan, doktrin, serta literatur ilmiah yang relevan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa precautionary principle memiliki peran fundamental dalam tata kelola energi nuklir karena ketidakpastian ilmiah tidak dapat dijadikan alasan untuk menunda tindakan pencegahan terhadap potensi risiko serius. Implementasinya mencakup penguatan regulasi, sistem perizinan berbasis keselamatan, pengawasan independen, pengelolaan limbah radioaktif sesuai standar internasional, serta penguatan mekanisme tanggung jawab hukum. Selain itu, konsep REMIX memiliki potensi meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi limbah, namun tetap memerlukan pengawasan ketat karena risiko teknis dan lingkungan yang melekat. Dengan penerapan prinsip kehati-hatian secara konsisten, pengembangan Green Nuclear Energy berbasis REMIX diharapkan dapat mendukung pencapaian Net Zero Emission Indonesia sekaligus menjamin perlindungan lingkungan dan keadilan antargenerasi. Penelitian ini menegaskan pentingnya sinergi kebijakan energi dan lingkungan dalam pengembangan teknologi nuklir berkelanjutan di masa depan di Indonesia secara konsisten.

Kata kunci: *Precautionary Principle, Green Nuclear Energy, REMIX, Energi Berkelanjutan, Limbah Radioaktif.*

Abstract

Climate change and the increasing global demand for energy have accelerated the development of low-carbon and sustainable energy sources. One promising alternative is *Green Nuclear Energy* through the *Regenerated Mixture* (REMIX) concept, a nuclear fuel recycling technology that reuses uranium and plutonium from spent nuclear fuel to enhance resource efficiency and reduce radioactive waste generation. However, despite its potential benefits, the implementation of this technology still involves complex environmental, safety, and security risks with long-term and potentially irreversible impacts. This study aims to analyze the application of the *precautionary principle* in the development of REMIX-based *Green Nuclear Energy* as an effort to support Indonesia's sustainable energy transition. The research employs a normative legal method (*normative legal research*) using a statutory approach (*statute approach*), conceptual approach (*conceptual approach*), and comparative approach (*comparative approach*) through library research of relevant regulations, legal doctrines, and scientific literature. The findings indicate that the *precautionary principle* plays a fundamental role in nuclear energy governance, as scientific uncertainty should not be used as justification for delaying preventive actions against serious environmental risks. Its implementation includes strengthening regulatory frameworks, safety-based licensing systems, independent regulatory oversight, radioactive waste management in accordance with international standards, and robust liability mechanisms. Although REMIX has significant potential to improve fuel efficiency and reduce waste, it still requires strict oversight due to inherent technical and environmental risks. Therefore, consistent application of the precautionary principle is essential to ensure that the development of *Green Nuclear Energy* supports Indonesia's *Net Zero Emission* target while maintaining environmental protection and intergenerational equity.

Keywords : *Precautionary Principle, Green Nuclear Energy, REMIX, Sustainable Energy, Radioactive Waste.*

LATAR BELAKANG

Sejak Revolusi Industri, perekonomian dunia sangat bergantung pada bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas. Hingga saat ini, sebagian besar kebutuhan energi global masih dipenuhi oleh sumber energi tersebut, sehingga rentan terhadap fluktuasi harga dan gangguan pasokan akibat faktor geopolitik (International Energy Agency, 2024). Di Indonesia, ketergantungan terhadap energi fosil juga masih tinggi dan menimbulkan berbagai dampak lingkungan, seperti emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, serta perubahan iklim. Kondisi ini mendorong perlunya transisi menuju ekonomi hijau melalui pengembangan energi rendah karbon yang lebih berkelanjutan.

Dalam upaya mencapai target Net Zero Emission 2060 dan memperkuat ketahanan energi nasional, pemerintah mulai mempertimbangkan energi nuklir sebagai salah satu alternatif energi bersih yang mampu menghasilkan listrik dalam jumlah besar dan stabil. Pemanfaatan energi nuklir sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan dan prinsip kehati-hatian yang telah diakui dalam Deklarasi Rio 1992 serta Pasal 2 huruf f Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (United Nations, 1992; Republik Indonesia, 2009). Namun, pengembangannya tetap memerlukan perhatian terhadap aspek keselamatan, penerimaan masyarakat, serta perlindungan lingkungan.

Meskipun memiliki potensi besar sebagai sumber energi rendah karbon, energi nuklir masih menghadapi tantangan berupa risiko kecelakaan dan pengelolaan limbah radioaktif yang dapat berdampak jangka panjang terhadap manusia dan lingkungan. Untuk mengurangi risiko tersebut, berkembang konsep Green Nuclear Energy melalui pendekatan Regenerated Mixture (REMIX), yaitu pemanfaatan kembali dan daur ulang material nuklir yang masih bernilai guna guna meningkatkan efisiensi bahan bakar sekaligus mengurangi volume limbah radioaktif yang harus dikelola dalam jangka panjang.

Namun demikian, penerapan teknologi nuklir dan konsep REMIX tetap mengandung ketidakpastian terhadap dampak lingkungan di masa depan. Oleh karena itu, penerapan precautionary principle menjadi penting sebagai dasar pengambilan kebijakan agar potensi ancaman serius terhadap lingkungan dapat dicegah meskipun belum terdapat kepastian ilmiah yang mutlak. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini berfokus pada penerapan precautionary principle dalam pengembangan Green Nuclear Energy melalui konsep REMIX di Indonesia, potensi dan tantangan implementasinya, serta relevansinya dalam mendukung pencapaian target Net Zero Emission 2060 dan ketahanan energi nasional yang berkelanjutan.

Tujuan Penulisan

Penulisan artikel ini secara umum bertujuan untuk memberikan kontribusi akademis dan kebijakan dalam wacana pengembangan energi nuklir yang bertanggung jawab di Indonesia. Secara khusus, artikel ini bertujuan untuk menganalisis penerapan precautionary principle sebagai landasan hukum dan kebijakan dalam pengembangan green nuclear energy melalui konsep REMIX, sekaligus mengidentifikasi potensi dan tantangan implementasinya dalam sistem pengelolaan bahan bakar nuklir dan limbah radioaktif demi mewujudkan energi yang lebih bersih dan efisien. Di samping itu, artikel ini juga bertujuan mengevaluasi relevansi integrasi precautionary principle dan konsep REMIX dalam mendukung target ketahanan energi nasional serta komitmen Indonesia terhadap Net Zero Emission 2060, sehingga dapat dirumuskan rekomendasi kebijakan yang konstruktif bagi pemangku kepentingan di bidang energi dan lingkungan hidup.

Tinjauan Pustaka

A. Konsep Green Nuclear Energy

Energi Nuklir Hijau adalah konsep yang menjadikan nuklir sebagai bagian dari solusi energi berkelanjutan melalui kemajuan teknologi reaktor, emisi gas rumah kaca yang sangat

minim, serta pengelolaan limbah radioaktif yang lebih etis. Pembangkit listrik nuklir tidak secara langsung menghasilkan emisi gas rumah kaca saat beroperasi, oleh karena itu sering dipandang sebagai sumber energi rendah karbon yang mendukung transisi menuju Emisi Nol Bersih. Berdasarkan informasi dari Badan Energi Atom Internasional (IAEA), energi nuklir menyuplai sekitar 9% dari total listrik di dunia dan hampir 25% dari total produksi listrik rendah karbon secara global (IAEA, 2024).

Meski demikian, status nuklir sebagai sumber energi “hijau” masih menjadi topik perdebatan. Para pendukung berpendapat bahwa emisi lintas siklus hidup pembangkit nuklir cukup rendah, sementara mereka yang menentang menekankan isu keselamatan dan limbah radioaktif yang dapat bertahan lama. Secara keseluruhan, Energi Nuklir Hijau didirikan di atas tiga komponen inti, yaitu: (1) pengakuan bahwa energi nuklir berkontribusi pada pengurangan karbon untuk mencapai sasaran iklim dunia, (2) peningkatan aspek keselamatan dan efisiensi melalui kemajuan teknologi dalam desain reaktor dan pengelolaan bahan bakar, serta (3) pengelolaan limbah radioaktif yang bertanggung jawab dan penerimaan masyarakat sebagai penerapan prinsip kehati-hatian dalam pengembangan energi nuklir.

B. Konsep REMIX: Definisi dan Mekanisme Teknis Daur Ulang

Komponen kedua dari Energi Nuklir Hijau, yaitu peningkatan efisiensi melalui kemajuan pengelolaan bahan bakar, menemukan bentuk teknisnya pada konsep REMIX, sebuah kerangka pengelolaan bahan bakar nuklir bekas yang menyatukan logika *reduce*, *reuse*, dan *mix* ke dalam satu siklus bahan bakar tertutup (*closed fuel cycle*). Berbeda dari siklus terbuka yang langsung memperlakukan bahan bakar bekas sebagai limbah akhir, siklus tertutup memandangnya sebagai material yang masih mengandung uranium dan plutonium tersisa untuk dipungut kembali (Wati et al., 2024). REMIX dengan demikian melengkapi inovasi reaktor generasi IV dan SMR yang telah dibahas sebelumnya, karena yang disasar bukan desain reaktornya melainkan apa yang terjadi pada bahan bakar setelah keluar dari teras reaktor, sejalan dengan posisi energi nuklir dalam pencapaian *Net Zero Emission* di Indonesia (Fautngiljanan, 2023). Secara mekanis, prosesnya dimulai dari pemisahan kimiawi antara uranium sisa, plutonium, dan aktinida lain dari hasil belah yang tertinggal dalam bahan bakar bekas, untuk mengambil kembali uranium yang belum terbakar serta plutonium yang terbentuk selama proses di reaktor (Wati et al., 2024).

Reaktor pembiak cepat berpendingin Pb-Bi menunjukkan breeding ratio lebih besar dari satu, artinya menghasilkan lebih banyak bahan fisil daripada yang dikonsumsi, sehingga uranium hasil pemulihan dapat diperkaya kembali dan menekan kebutuhan penambangan uranium alam yang baru (Nurkholilah & Fitriyani, 2019). Plutonium hasil pemisahan kemudian dicampur dengan uranium yang sudah diperkaya untuk menjadi bahan bakar oksida campuran (MOX), dengan proporsi plutonium dalam campuran tersebut menentukan tingkat pembakaran bahan bakar sejak awal operasi (Luthfi & Pinem, 2021). Tiga gerakan ini saling mengunci, satu langkah menyiapkan bahan untuk langkah berikutnya, dan secara empiris daur tertutup melalui olah ulang memang memberikan efisiensi penggunaan bahan bakar yang lebih baik dibandingkan daur terbuka serta menghindarkan plutonium dari penyalahgunaan, meskipun tetap menyisakan limbah toksik dari aktinida minor dan produk

fisi yang belum sepenuhnya terselesaikan (Silakhudin, 2008). Artinya, REMIX bukan solusi yang membebaskan diri dari beban limbah, melainkan mekanisme yang mendistribusikan ulang beban tersebut, mengurangi sebagian volume dan toksisitas namun menyisakan risiko baru yang lebih terkonsentrasi pada keamanan plutonium, sehingga sekuat apa pun argumen efisiensinya, REMIX tidak bisa dilepaskan dari kebutuhan penerapan *precautionary principle* yang akan dibahas berikutnya.

C. Konsep REMIX: Manfaat (Efisiensi Sumber Daya, Reduksi Limbah)

Rosatom mengembangkan REMIX melalui anak perusahaannya, TVEL, sebagai salah satu solusi untuk menyelesaikan siklus bahan bakar nuklir secara utuh, seperti yang dijelaskan dalam penelitian Voronova et al.(2016) dan Shchepetina et al.(2020). Perbedaan antara MOX dengan REMIX adalah dalam cara mengolah plutonium: MOX terlebih dahulu memisahkan plutonium melalui proses PUREX, sedangkan REMIX langsung mencampur plutonium dan uranium bekas tanpa proses pemisahan, kemudian menggabungkannya dengan uranium alam yang sudah diperkaya. Hasilnya menunjukkan performa yang sama dengan bahan bakar konvensional seperti yang diteliti oleh Voronova dan tim pada tahun 2016.

Soal efisiensi, bahan bakar REMIX bisa diproses ulang hingga lima kali dengan kadar inti 100% di dalam reaktor VVER-1000. Satu reaktor bisa beroperasi selama 60 tahun dengan hanya mengisi bahan bakar kurang dari tiga kali, dan penggunaan uranium alam berkurang sekitar 20% di setiap siklus dibandingkan dengan siklus terbuka (World Nuclear Association, 2026). Studi simulasi pada reaktor VVER-1000/1200 menunjukkan tiga jenis REMIX, yaitu A, B, dan C dengan tingkat pemisahan unsur yang berbeda (Shchepetina et al., 2020). Terdapat temuan bahwa proses daur ulang membantu mengurangi risiko penyebaran senjata nuklir, hal ini berkaitan dengan kekhawatiran masyarakat terhadap penggunaan energi nuklir dan menjadi salah satu alasan mengapa prinsip kehati-hati harus diterapkan (Dudnikov et al., 2016). Logikanya sesuai dengan prinsip umum pengurangan nuklir: bahan fisil yang dihasilkan dari reaksi fisi dipisahkan agar dapat diubah kembali menjadi bahan bakar bar. Dengan begitu, REMIX menjadi bukti nyata bahwa energi nuklir hijau bisa mengurangi dampak limbah tanpa mengurangi kemampuan menghasilkan energi..

Precautionary Principle: Definisi, Sejarah, Dasar Hukum Internasional

Precautionary principle merupakan salah satu prinsip Hukum Internasional yang relatif baru. Atau lebih sering dikenal dengan prinsip kehati-hatian. Prinsip ini berkembang dengan perkembangan teknologi yang semakin pesat. Dalam perkembangan teknologi, tidak dapat dihindari adanya dampak negatif yang sering muncul, baik terhadap kesehatan masyarakat maupun lingkungan. Secara umum, precautionary principle dapat diartikan sebagai suatu prinsip tindakan kehati-hatian yang dilakukan sebelum timbulnya dampak yang nyata.

Selanjutnya prinsip ini dikonsolidasikan secara internasional melalui Rio Declaration 1992, lalu diadopsi dalam berbagai instrumen hukum internasional seperti UNFCCC 1992, Convention on Biological Diversity, Cartagena Protocol on Biosafety 2000, serta diperkuat dalam hukum Uni Eropa melalui Pasal 191 TFEU.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode yuridis normatif (normative legal research), yaitu penelitian yang berfokus pada kajian terhadap norma hukum, peraturan perundang-undangan, doktrin, dan prinsip-prinsip hukum yang relevan. Metode ini dipilih karena penelitian membahas penerapan precautionary principle dalam pengembangan Green Nuclear Energy melalui konsep REMIX di Indonesia. Pendekatan yang digunakan meliputi pendekatan perundang-undangan (statute approach) dengan menelaah berbagai regulasi terkait lingkungan hidup, ketenaganukliran, dan energi; pendekatan konseptual (conceptual approach) melalui kajian teori serta doktrin precautionary principle dan konsep REMIX; serta pendekatan komparatif (comparative approach) dengan membandingkan regulasi dan praktik pemanfaatan energi nuklir di beberapa negara sebagai bahan pembelajaran bagi Indonesia.

Bahan hukum yang digunakan terdiri atas bahan hukum primer, sekunder, dan tersier. Bahan hukum primer meliputi peraturan perundang-undangan, perjanjian internasional, dan dokumen kebijakan resmi, sedangkan bahan hukum sekunder berupa buku, jurnal ilmiah, laporan lembaga internasional, serta penelitian terdahulu yang relevan. Adapun bahan hukum tersier mencakup kamus hukum dan sumber referensi pendukung lainnya. Pengumpulan bahan hukum dilakukan melalui studi kepustakaan (library research), kemudian dianalisis secara kualitatif-preskriptif untuk menafsirkan norma hukum yang berlaku serta merumuskan rekomendasi kebijakan terkait penerapan precautionary principle dalam pengembangan Green Nuclear Energy melalui konsep REMIX di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Precautionary Principle sebagai Landasan Hukum dan Kebijakan dalam Pengembangan Green Nuclear Energy melalui REMIX

1. Ketidakpastian Ilmiah sebagai Basis Penerapan Precautionary Principle

Precautionary principle menegaskan bahwa ketidakpastian ilmiah tidak boleh dijadikan alasan untuk menunda tindakan pencegahan apabila terdapat potensi ancaman serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Prinsip ini diakui dalam Prinsip 15 Deklarasi Rio 1992 dan telah menjadi bagian dari hukum Indonesia melalui Pasal 2 huruf f Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (United Nations, 1992; Wibisana, 2019; UU No. 32 Tahun 2009). Dengan demikian, pengambilan keputusan lingkungan harus tetap dilakukan meskipun bukti ilmiah belum sepenuhnya pasti, terutama untuk mencegah kerusakan yang sulit atau tidak dapat dipulihkan.

Prinsip kehati-hatian tersebut sangat relevan dalam pengembangan energi nuklir melalui konsep REMIX karena pengelolaan limbah radioaktif mengandung risiko jangka panjang yang tidak sepenuhnya dapat diprediksi. Meskipun REMIX menawarkan manfaat berupa pengurangan volume limbah dan peningkatan efisiensi bahan bakar, ketidakpastian mengenai dampaknya terhadap lingkungan dan generasi mendatang tetap harus diperhitungkan (IAEA, 2012; de Sadeleer, 2002). Oleh karena itu, penerapan precautionary principle menjadi landasan penting dalam perizinan, analisis keselamatan, dan pengelolaan

limbah radioaktif guna memastikan pengembangan green nuclear energy berlangsung secara aman dan berkelanjutan.

2. Peran negara: Preventif vs Represif dalam Tata Kelola Risiko

Hukum lingkungan mengenal dua paradigma tata kelola risiko, yaitu preventif, yang menuntut perizinan dan kelayakan teknis dipenuhi sebelum kegiatan berisiko berjalan, dan represif, yang bekerja melalui sanksi dan pemulihan setelah kerugian terjadi. Asas pencegahan dan asas kehati-hatian berbeda dari segi syarat kepastian ilmiahnya, namun keduanya sama-sama berorientasi preventif (di hulu) dan berhadapan dengan paradigma represif yang bekerja di hilir (Widagdo, Siswajanthi, dan Kusnadi, 2021). Karakter ketidakpastian pada *precautionary principle* menjadikan peran preventif negara tidak tergantikan oleh instrumen represif, karena sanksi pidana, gugatan, dan tanggung jawab mutlak baru bekerja jika kerugian sudah terjadi dan terukur asumsi yang runtuh begitu kontaminasi limbah REMIX bersifat lintas generasi dan tidak terpulihkan oleh kompensasi finansial. Logika ini sebenarnya sudah tertanam dalam kerangka hukum ketenaganukliran nasional pada Pasal 17 UU No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran mensyaratkan izin pada setiap tahap instalasi nuklir dengan pengawasan melalui pengaturan, perizinan, dan inspeksi, diperkuat PP No. 2 Tahun 2014 dan PP No. 54 Tahun 2012 yang menjadikan kajian keselamatan sebagai syarat di muka, bukan dokumen pertanggungjawaban di belakang sejalan dengan konsep *defence in depth* IAEA, yaitu lapisan perlindungan berlapis yang dirancang mencegah kegagalan, bukan sekadar meredam akibatnya (IAEA, 2006).

Sebaliknya, instrumen represif menunjukkan keterbatasan yang semakin nyata. Pasal 88 UU No. 32 Tahun 2009 awalnya menganut tanggung jawab mutlak, namun frasa "tanpa perlu pembuktian unsur kesalahan" dihapus oleh UU Cipta Kerja sehingga karakternya bergeser mendekati tanggung jawab berbasis kesalahan (Marpaung, 2021) sebuah pelemahan yang terjadi justru ketika risiko semakin kompleks. Pola serupa tampak pada *Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage* 1963 dan Protokol 1997, yang menetapkan tanggung jawab mutlak operator namun membatasi besaran kompensasi dan jangka waktu klaim (IAEA, t.t.), sementara Indonesia melalui UU No. 10 Tahun 1997 dan PP No. 46 Tahun 2009 menetapkan plafon tanggung jawab yang relatif kecil dibandingkan skala kerugian nuklir yang mungkin timbul (American Academy of Arts and Sciences, t.t.) membuktikan bahwa instrumen represif-kompensatoris tidak pernah dirancang untuk memulihkan kerugian katastrofik lintas generasi, melainkan hanya mendistribusikan sebagian kecil bebannya. Karena itu, tata kelola REMIX harus menempatkan peran negara berat sebelah ke arah preventif kajian keselamatan sebagai prasyarat *ex ante* sejak perizinan dengan instrumen represif sebatas jaring pengaman residual, bukan andalan utama, menggantungkan harapan pada represif untuk risiko nuklir yang ireversibel dan lintas generasi sama dengan meninggalkan logika dasar *precautionary principle* itu sendiri.

3. Penguatan Regulasi dalam Pengembangan Green Nuclear Energy

Pengembangan green nuclear energy melalui konsep REMIX memerlukan penguatan regulasi yang menyeluruh agar implementasinya berjalan sesuai dengan prinsip kehati-

hatian. Penguatan regulasi tersebut dapat diwujudkan melalui pembentukan atau revisi peraturan perundang-undangan yang secara khusus mengatur pemanfaatan bahan bakar nuklir daur ulang, pengelolaan limbah radioaktif, standar keselamatan reaktor, serta mekanisme pengawasan dan tanggung jawab lingkungan. Saat ini, pengaturan ketenaganukliran di Indonesia masih berpedoman pada Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran yang belum secara eksplisit mengakomodasi perkembangan teknologi daur ulang bahan bakar nuklir seperti konsep REMIX. Oleh karena itu, diperlukan pembaruan regulasi guna memberikan kepastian hukum terhadap penggunaan teknologi nuklir generasi baru yang lebih ramah lingkungan (Anwar, 2021: 183).

Selain itu, penguatan regulasi juga harus didasarkan pada integrasi antara hukum lingkungan dan hukum ketenaganukliran. Integrasi tersebut diperlukan agar pengembangan energi nuklir tidak hanya berorientasi pada pemenuhan kebutuhan energi nasional, tetapi juga menjamin perlindungan lingkungan hidup serta keselamatan masyarakat. Prinsip kehati-hatian sebagaimana diatur dalam Pasal 2 huruf e Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup harus menjadi dasar dalam setiap tahapan pengembangan energi nuklir, mulai dari perencanaan, perizinan, operasional, hingga pengelolaan limbah radioaktif (UU No. 32 Tahun 2009, Pasal 2 huruf e). Tidak hanya itu, penguatan regulasi juga harus mencakup pengaturan mengenai analisis risiko, penilaian dampak lingkungan, sistem pemantauan berkelanjutan, serta mekanisme tanggap darurat apabila terjadi insiden nuklir. Seluruh tahapan tersebut harus dilaksanakan secara transparan dan melibatkan partisipasi publik sebagai bentuk akuntabilitas pemerintah dalam proses pengambilan keputusan. Keterlibatan masyarakat menjadi penting karena penerimaan publik merupakan salah satu faktor utama keberhasilan pengembangan energi nuklir di Indonesia. Melalui keterbukaan informasi dan partisipasi masyarakat, kepercayaan publik terhadap pemanfaatan energi nuklir dapat ditingkatkan sehingga potensi konflik sosial dapat diminimalkan. Dengan demikian, penguatan regulasi tidak hanya memberikan kepastian hukum, tetapi juga memperkuat legitimasi kebijakan, meningkatkan kepercayaan publik, serta mendukung pengembangan energi nuklir sebagai sumber energi berkelanjutan di Indonesia.

4. Pengawasan Keselamatan Nuklir (Lembaga dan Mekanisme Pengawasan)

Implementasi *precautionary principle* dalam pengembangan *green nuclear energy* melalui konsep REMIX memerlukan sistem pengawasan keselamatan yang kuat sebagai instrumen utama untuk menjamin bahwa seluruh tahapan pemanfaatan teknologi nuklir berlangsung secara aman dan terkendali. Di Indonesia, fungsi tersebut dilaksanakan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) yang memiliki kewenangan dalam penyusunan regulasi, pemberian izin, pelaksanaan inspeksi, serta penegakan ketentuan hukum pada seluruh kegiatan ketenaganukliran (Fautngiljanan, 2023). Mekanisme pengawasan tersebut mencakup seluruh siklus hidup pembangkit listrik tenaga nuklir, mulai dari kajian awal, penetapan lokasi, persetujuan desain, konstruksi, komisioning, operasional, hingga dekomisioning (Birman, 2015). Selain itu, BAPETEN menjadikan standar keselamatan yang ditetapkan *International Atomic Energy Agency* (IAEA) sebagai rujukan utama agar sistem keselamatan nasional selaras dengan praktik internasional. Pada tingkat global, IAEA juga

mengembangkan berbagai *Safety Standards* dan menyediakan program *Integrated Regulatory Review Service* (IRRS) sebagai sarana evaluasi dan penguatan kapasitas lembaga pengawas negara anggota dalam membangun infrastruktur keselamatan nuklir yang efektif dan independen.

Pelaksanaan misi IRRS di Indonesia menunjukkan adanya peningkatan kapasitas pengawasan melalui pembaruan regulasi, penguatan sistem manajemen kelembagaan, peningkatan kompetensi sumber daya manusia, pengembangan komunikasi publik, serta penyempurnaan sistem kesiapsiagaan dan respons kedaruratan (International Atomic Energy Agency, 2019). Meskipun demikian, IAEA tetap merekomendasikan pembaruan regulasi secara berkala agar sejalan dengan perkembangan standar internasional, disertai dukungan sumber daya manusia dan pendanaan yang memadai bagi BAPETEN (Alamsyah et al., 2017). Dalam pengelolaan bahan bakar bekas dan limbah radioaktif yang berkaitan dengan penerapan REMIX, Indonesia telah memiliki kerangka hukum yang relatif komprehensif dan diselaraskan dengan standar keselamatan internasional. Namun, perkembangan teknologi reaktor generasi baru yang menggunakan bahan bakar dan sistem pendingin nonkonvensional menuntut adanya penyesuaian kebijakan pengawasan yang lebih adaptif. Oleh karena itu, penguatan kapasitas kelembagaan, penyempurnaan regulasi, dan modernisasi mekanisme pengawasan menjadi prasyarat penting agar penerapan *precautionary principle* dalam pengembangan energi nuklir hijau berbasis REMIX dapat dilaksanakan secara akuntabel, aman, dan berkelanjutan.

5. Standar Pengelolaan Limbah Radioaktif

Menurut Pasal 1 angka 2 Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, limbah radioaktif adalah zat radioaktif dan bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena pengoperasian instalasi nuklir yang tidak dapat digunakan lagi. Pengelolaan limbah radioaktif merupakan salah satu aspek yang sangat penting dalam pengembangan *green nuclear energy* karena limbah tersebut memiliki karakteristik yang berbahaya dan sebagian dapat tetap bersifat radioaktif dalam jangka waktu yang sangat panjang. Oleh karena itu, pengelolaannya harus dilakukan berdasarkan standar keselamatan yang ketat untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan. Berdasarkan tingkat radioaktivitasnya, limbah radioaktif diklasifikasikan menjadi very low level waste (VLLW), low level waste (LLW), intermediate level waste (ILW), dan high level waste (HLW). Setiap kategori memerlukan metode pengelolaan yang berbeda, mulai dari penyimpanan dekat permukaan hingga sistem penyimpanan khusus dengan penghalang berlapis untuk limbah tingkat tinggi. Standar tersebut diterapkan untuk memastikan bahwa zat radioaktif tidak mencemari lingkungan serta tidak membahayakan manusia selama proses penyimpanan maupun setelah fasilitas pengelolaan ditutup.

Dalam penerapan konsep REMIX, standar pengelolaan limbah radioaktif tetap menjadi prioritas meskipun teknologi tersebut mampu mengurangi volume limbah melalui proses daur ulang bahan bakar nuklir. Residu radioaktif yang masih dihasilkan tetap harus dikelola melalui sistem pengolahan, penyimpanan, dan pembuangan yang aman sesuai standar internasional. Di Indonesia, pengelolaan limbah radioaktif telah diatur dalam

Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran serta berbagai regulasi BAPETEN.a Namun, perkembangan teknologi daur ulang bahan bakar nuklir menuntut adanya penyempurnaan regulasi dan pengawasan agar penerapan REMIX dapat berjalan sesuai dengan precautionary principle serta mendukung pengembangan energi nuklir yang aman dan berkelanjutan.

6. Mekanisme Pertanggungjawaban (*liability*) Atas Risiko Lingkungan

Pengembangan green nuclear energy melalui konsep REMIX memiliki risiko lingkungan yang tinggi sehingga Indonesia menerapkan sistem tanggung jawab mutlak (*absolute liability*) dalam hukum ketenaganukliran. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, pengusaha instalasi nuklir wajib bertanggung jawab atas kerugian nuklir tanpa perlu pembuktian kesalahan (UU No. 10 Tahun 1997, Pasal 28–40). Selain itu, pengusaha instalasi nuklir diwajibkan memiliki asuransi atau jaminan keuangan untuk menjamin tersedianya dana kompensasi apabila terjadi kecelakaan nuklir.

Dalam konteks REMIX, mekanisme pertanggungjawaban ini perlu diharmonisasikan dengan hukum lingkungan hidup, khususnya prinsip tanggung jawab mutlak dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU No. 32 Tahun 2009, Pasal 88). Harmonisasi tersebut penting karena pengelolaan limbah radioaktif berpotensi menimbulkan dampak lingkungan jangka panjang. Oleh sebab itu, penguatan sistem pertanggungjawaban perlu diarahkan pada penyesuaian batas ganti rugi, peningkatan jaminan keuangan, dan perlindungan yang lebih efektif terhadap lingkungan serta masyarakat terdampak.

Potensi dan Tantangan Implementasi Konsep REMIX sebagai Pendekatan Pengelolaan Limbah Radioaktif yang Berkelanjutan

1. Potensi REMIX sebagai Solusi Energi Bersih

Dilihat dari aspek teknis, REMIX dapat dikategorikan sebagai salah satu varian dari siklus bahan bakar nuklir tertutup (*closed nuclear fuel cycle*). Konsep ini dikembangkan oleh para peneliti Rusia untuk menjadi alternatif atas metode reprosesing PUREX konvensional, yang selama ini menghasilkan bahan bakar MOX atau *mixed oxide*. Letak perbedaan utama antara kedua metode tersebut ada pada penanganan plutonium. Pada metode MOX, plutonium harus dipisahkan secara penuh dari uranium hasil reprosesing. Sebaliknya, pada REMIX, pemisahan plutonium secara murni justru sengaja dihindari; plutonium hanya dicampurkan dalam konsentrasi rendah (kurang lebih 1-2% berat sebagai PuO_2) bersama uranium alam yang diperkaya dan uranium hasil daur ulang. Melalui proses tersebut, dihasilkan bahan bakar yang karakteristiknya setara dengan bahan bakar uranium-235 standar untuk reaktor jenis VVER (Kagramanyan et al., 2019). Klaim bahwa REMIX berpotensi menjadi solusi energi yang lebih efisien dan bersih dibandingkan siklus bahan bakar terbuka (*once-through cycle*) didukung oleh sejumlah data dan studi berikut:

- 1) Dari segi efisiensi sumber daya, hasil pemodelan ekonomi-matematis yang dilakukan oleh Matveenko dkk. memperlihatkan bahwa kebutuhan uranium alam dapat dihemat sebesar 24–36% apabila REMIX diterapkan. Selain itu, kebutuhan kerja pemisahan isotop (*separation work*) juga dapat ditekan, dengan rentang penghematan 8–18% untuk

varian REMIX-A hingga 40% untuk varian REMIX-C, bergantung pada varian fabrikasi yang dipilih.

- 2) Terkait reduksi volume limbah akhir, studi yang sama menunjukkan bahwa massa limbah radioaktif yang harus dikirim ke fasilitas pembuangan akhir dapat diturunkan hingga 20 kali lipat melalui penggunaan REMIX dibandingkan siklus terbuka. Bagi negara dengan keterbatasan lahan serta infrastruktur penyimpanan limbah jangka panjang seperti Indonesia, angka tersebut tentu menjadi temuan yang signifikan (Matveenکو et al., 2021).
- 3) Adapun dalam kaitannya dengan strategi penutupan siklus bahan bakar dua komponen, Adamov, Mochalov, dan Rachkov menempatkan REMIX sebagai salah satu pilar dalam strategi *two-component nuclear energy*. Strategi ini menggabungkan reaktor termal dan reaktor cepat ke dalam satu siklus bahan bakar tertutup, dengan tujuan meminimalkan akumulasi SNF secara struktural, bukan semata-mata mengurangi volumenya secara insidental (Kagramanyan et al., 2019).
- 4) Terakhir, terkait profil proliferasi, REMIX dinilai memiliki risiko yang relatif lebih rendah dibandingkan rute reprosesing PUREX-MOX konvensional. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa plutonium tidak pernah hadir dalam bentuk terpisah murni sepanjang prosesnya, sehingga daya tariknya untuk disalahgunakan sebagai bahan baku senjata pun berkurang secara desain yang berbeda dengan rute PUREX-MOX yang justru menghasilkan plutonium dalam bentuk terpisah (Kagramanyan et al., 2025).
- 5) Selain memberikan efisiensi bahan bakar dan pengurangan limbah, REMIX juga berpotensi memperkuat ketahanan energi nasional. Indonesia hingga saat ini masih bergantung pada impor energi primer tertentu dan menghadapi tantangan peningkatan kebutuhan listrik akibat industrialisasi serta pertumbuhan penduduk. Dengan kemampuan mendaur ulang uranium dan plutonium yang masih memiliki nilai energi, REMIX memungkinkan optimalisasi sumber daya nuklir sehingga ketergantungan terhadap pasokan uranium alam dapat dikurangi. Dalam jangka panjang, pendekatan ini dapat meningkatkan keamanan pasokan energi (*energy security*) sekaligus mendukung diversifikasi bauran energi nasional menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan (Kovalev et al., 2020).

Jika dilihat dari sisi kebijakan nasional seperti Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017, dua potensi target capaian, yakni Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang telah memasukkan energi nuklir sebagai salah satu opsi dalam bauran energi rendah karbon dan target *Net Zero Emission* 2060, yang mendorong pemanfaatan sumber energi rendah karbon secara stabil dan berskala besar (Direktorat Jenderal EBTKE, 2026). Lebih jauh, jika dikaitkan dengan kerangka hukum nasional, efisiensi pemanfaatan bahan bakar serta reduksi volume limbah yang ditawarkan oleh REMIX juga selaras dengan semangat pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Semangat tersebut tercermin dalam UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, sekaligus dalam kerangka perizinan pemanfaatan tenaga nuklir menurut UU No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. Perlu digarisbawahi, bagaimanapun, bahwa keseluruhan data kuantitatif yang dipaparkan di atas bersumber dari studi pemodelan dan simulasi dalam konteks reaktor VVER di Rusia dan Belarus. Kondisi geologis, kapasitas kelembagaan

pengawasan, maupun skala industri nuklir di kedua negara tersebut tentu berbeda secara signifikan dengan Indonesia. Oleh karena itu, potensi REMIX lebih tepat dipahami sebagai sesuatu yang *promising but context-dependent* merupakan sebuah catatan kritis yang akan menjadi pijakan penting bagi pembahasan tantangan pada bagian selanjutnya.

2. Risiko Teknis: Radioaktivitas Plutonium dan Keamanan Fasilitas

Meskipun REMIX berhasil menurunkan risiko proliferasi, hal tersebut tidak serta-merta menghapuskan risiko teknis yang melekat pada penanganan plutonium maupun proses reprosesing itu sendiri. Terdapat setidaknya tiga lapis risiko teknis yang relevan untuk dianalisis lebih lanjut:

- 1) Pertama, persoalan sifat radiotoksistas plutonium yang persisten. Plutonium termasuk isotop Pu-239 yang menjadi komponen utama dalam REMIX yang dikenal sebagai pemancar alfa dengan waktu paruh yang sangat panjang. Apabila terinhalasi atau tertelan, radiotoksistasnya pun tergolong tinggi. Konsekuensinya, sistem pengungkungan (*confinement*) serta proteksi radiasi yang ketat tetap diperlukan dalam penanganannya, walaupun konsentrasi plutonium dalam REMIX relatif lebih rendah dibandingkan MOX (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2017, p. 3). Signifikansi material nuklir khusus (*special nuclear material*) semacam ini pun menjadikannya tetap sebagai objek pengawasan internasional yang serius, terlepas dari skema reprosesing yang digunakan (Union of Concerned Scientists, 2026).
- 2) Kedua, risiko yang muncul pada tahap reprosesing dan fabrikasi. Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) telah mengidentifikasi bahwa risiko utama pada fasilitas reprosesing bahan bakar nuklir meliputi kekritisian (*criticality*), kebocoran pengungkungan, paparan radiasi, serta bahaya kimia. Risiko-risiko tersebut harus dikendalikan melalui langkah teknis dan administratif, mulai dari tahap pemilihan lokasi hingga dekomisioning fasilitas (IAEA, 2017, p. 4). Risiko ini bukan sekadar potensi yang bersifat teoretis semata. Sebagai gambaran empiris, kajian terhadap 18 insiden ledakan historis di berbagai fasilitas reprosesing bahan bakar nuklir mencatat bahwa enam di antaranya merupakan ledakan "*red oil*" yang diakibatkan oleh reaksi eksotermik antara pelarut organik (tributil fosfat) dan asam nitrat pada suhu tinggi. Salah satu insiden tersebut bahkan diklasifikasikan sebagai insiden nuklir tingkat 6 pada Skala Kejadian Nuklir Internasional (INES) (Liu et al., 2024, pp. 108–116). Karena REMIX tetap mensyaratkan tahapan reprosesing kimiawi sebelum bahan bakar regenerasi dapat difabrikasi, risiko yang sejenis pada dasarnya tetap relevan untuk dipertimbangkan meskipun tingkat konsentrasi plutonium yang lebih rendah memungkinkan terjadinya reduksi pada sebagian severitas potensialnya.
- 3) Ketiga, kebutuhan akan keamanan fisik dan pengawasan (*safeguards*) fasilitas. Walaupun plutonium dalam REMIX tidak pernah berada dalam bentuk terpisah murni, jumlah plutonium yang relevan secara senjata (*weapons-usable quantity*) tetap tergolong kecil. Diperkirakan, kurang dari sembilan kilogram plutonium sudah cukup untuk merakit senjata nuklir sederhana. Oleh sebab itu, rezim keamanan fisik yang setara dengan fasilitas penanganan bahan nuklir khusus lainnya tetap dibutuhkan pada fasilitas penyimpanan, transportasi, maupun fabrikasi bahan bakar regenerasi (Union of

Concerned Scientists, n.d.). Senada dengan hal tersebut, laporan Congressional Research Service turut mencatat bahwa plutonium yang tidak dipisahkan dari produk fisi memang relatif kurang menarik untuk disalahgunakan. Akan tetapi, risikonya tetap digambarkan sebagai "relatif rendah", bukan nihil sama sekali, dan tingkat risiko tersebut tetap bergantung pada ketersediaan keahlian teknis serta fasilitas khusus dari pihak yang berniat melakukan penyalahgunaan (Congressional Research Service, n.d., hlm. 6).

Dapat disimpulkan, REMIX memang menggeser profil risiko teknis bila dibandingkan dengan reprocessing konvensional, namun pergeseran tersebut tidak serta-merta menghapuskan risiko itu sendiri. Justru pergeseran inilah yang secara epistemologis relevan dengan logika *precautionary principle*: ketidakpastian mengenai skala risiko residual pada konteks penerapan baru yang termasuk pada negara yang belum memiliki pengalaman reprocessing skala industri seperti Indonesia tidak dapat begitu saja disamakan dengan ketiadaan risiko.

3. Risiko Terhadap Lingkungan & Manusia

Meskipun REMIX (Regenerated Mixture of Uranium and Plutonium Oxides) menawarkan manfaat dalam mendukung energi nuklir berkelanjutan, penerapannya tetap memiliki risiko yang perlu diantisipasi melalui prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*). Prinsip ini menekankan pentingnya tindakan pencegahan meskipun tingkat risiko belum dapat dipastikan secara ilmiah. Salah satu risiko utama adalah kerusakan elemen bahan bakar yang dapat menyebabkan pecahnya lapisan pelindung (*cladding*) sehingga radionuklida dan produk fisi berpotensi terlepas ke sistem reaktor maupun lingkungan. Selain itu, proses *reprocessing* pada REMIX tetap menghasilkan limbah radioaktif tingkat tinggi yang memerlukan pengelolaan dan penyimpanan jangka panjang. Apabila terjadi kebocoran atau kegagalan sistem pengamanan, radionuklida dapat mencemari tanah, air tanah, dan ekosistem di sekitarnya.

Dari sisi kesehatan manusia, paparan radiasi akibat kecelakaan nuklir dapat menyebabkan kerusakan jaringan tubuh, meningkatkan risiko kanker, serta menimbulkan gangguan genetik pada generasi berikutnya. Di samping itu, limbah yang mengandung plutonium dan aktinida minor masih memiliki tingkat radiotoksitas tinggi dalam jangka waktu yang sangat panjang sehingga memerlukan pengelolaan yang ketat. Oleh karena itu, pengembangan dan penerapan REMIX harus disertai sistem keselamatan yang kuat serta pengawasan yang berkelanjutan agar tujuan keberlanjutan energi dapat tercapai tanpa mengabaikan keselamatan manusia dan perlindungan lingkungan.

Relevansi Precautionary Principle dan REMIX terhadap Pencapaian Net Zero Emission 2060 dan Ketahanan Energi Nasional

1. Posisi Indonesia dalam Transisi Energi dan Ketahanan Energi Nasional

Posisi Indonesia dalam transisi energi global semakin strategis seiring kebutuhan menyeimbangkan target dekarbonisasi dengan ketahanan energi nasional. Namun, capaian bauran energi terbarukan yang masih berada di bawah target menunjukkan bahwa proses transisi energi belum berjalan optimal. Kondisi ini mendorong pemerintah memperbarui arah

kebijakan melalui Peraturan Pemerintah Nomor 40 Tahun 2025 tentang Kebijakan Energi Nasional, yang menargetkan peningkatan bauran energi terbarukan secara bertahap hingga 70–72% pada tahun 2060 sejalan dengan agenda Net Zero Emission. Dalam kerangka tersebut, energi nuklir mulai diposisikan sebagai salah satu sumber energi strategis yang mendukung sistem ketenagalistrikan nasional, dengan proyeksi kontribusi yang terus meningkat karena kemampuannya menyediakan listrik dalam jumlah besar secara stabil dan rendah karbon.

Pengakuan terhadap peran strategis nuklir tercermin dalam dimasukkannya PLTN ke dalam RUKN 2025–2060 dan RUPTL PLN 2025–2034. Meskipun demikian, pengembangannya masih menghadapi berbagai tantangan, mulai dari kebutuhan investasi yang besar, aspek keselamatan, hingga penerimaan masyarakat terhadap pembangunan fasilitas nuklir. Oleh karena itu, tata kelola energi nuklir harus dirancang secara hati-hati dengan memperhatikan perlindungan lingkungan dan partisipasi publik. Dalam konteks ini, konsep REMIX menjadi relevan karena menawarkan pemanfaatan kembali material nuklir yang masih bernilai guna untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar sekaligus mengurangi volume limbah radioaktif. Bagi Indonesia yang sedang mempersiapkan pembangunan PLTN pertama, penerapan konsep tersebut dapat menjadi bagian dari strategi ketahanan energi yang tidak hanya berorientasi pada pemenuhan kebutuhan listrik nasional, tetapi juga selaras dengan prinsip kehati-hatian dan pembangunan berkelanjutan.

2. Kesiapan Regulasi Nuklir Indonesia Saat Ini

Kesiapan regulasi terkait tenaga nuklir di Indonesia saat ini sangat tergantung pada UU No. 10 Tahun 1997 tentang ketenaganukliran yang menjadi dasar hukum utama. Namun, banyak penelitian terbaru menunjukkan bahwa undang-undang ini sudah tidak relevan dan kedaluwarsa untuk mendukung kebutuhan industri nuklir saat ini, terutama yang berkaitan dengan aspek keselamatan, pengelolaan limbah radioaktif, dan transparansi informasi publik (Kementerian PPN/Bappenas, 2025). Menanggapi situasi ini, BAPETEN tengah mendorong diadakannya revisi melalui RUU Ketenaganukliran, yang sejak Juli 2024 telah memasuki tahap audiensi dengan Badan Pembinaan Hukum Nasional dan berjuang untuk dimasukkan ke dalam prolegnas Prioritas 2025 (Badan Pembinaan Hukum Nasional, 2024). Dalam tahap regulasi yang lebih lanjut, sejumlah peraturan baru telah dikeluarkan untuk memperkuat kerangka hukum yang telah ada. Peraturan Pemerintah No. 45 Tahun 2023 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Zat Radioaktif telah dibahas oleh BAPETEN dalam kegiatan pembinaan yang diadakan pada April 2025. Selain itu, Peraturan BAPETEN No. 4 dan No. 5 Tahun 2024 diumumkan pada akhir Desember 2024 dan mulai disosialisasikan pada Januari 2025 di seluruh Lembaga Pelatihan Ketenaganukliran, di mana Perba No. 5/2024 secara khusus mengatur kategori dan tingkat keamanan zat radioaktif dari kategori 1 hingga 5, kewajiban program keamanan yang berdasarkan analisis risiko, serta pengelolaan insiden keamanan (Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2025).

Dari perspektif kelembagaan, keadaan ini masih memunculkan tantangan. Dokumen Kerja Bappenas (2025) menyoroti sejumlah isu institusional, antara lain ketidakhadiran Badan Pelaksana Khusus setelah integrasi BATAN ke dalam BRIN, kebingungan mengenai operator PLTN, dan peran Kementerian ESDM yang masih belum terdefinisi dengan baik.

Beberapa rekomendasi yang diajukan mencakup pembentukan Badan Pelaksana Tenaga Nuklir, percepatan perubahan UU Ketenaganukliran agar sejalan dengan standar IAEA, penguatan posisi BAPETEN sebagai pengawas independen, pembentukan Tim Persiapan PLTN, serta penetapan PLN sebagai operator utama untuk PLTN (Kementerian PPN/Bappenas, 2025). Peta jalan resmi pemerintah yang terdapat dalam RPJPN 2025-2045 (UU No. 59/2024) mengatur periode 2025-2029 sebagai fase persiapan untuk regulasi dan lembaga, sebelum berpindah ke tahap konstruksi yang akan berlangsung antara tahun 2030-2034. Berdasarkan misi Integrated Regulatory Review Service (IRRS), tim IAEA mengidentifikasi bahwa Indonesia telah mengambil langkah-langkah sesuai dengan saran sebelumnya dan terus melaksanakan kerangka perlindungan Kesehatan Masyarakat dan Keselamatan, termasuk pengembangan kebijakan serta strategi nasional yang berhubungan dengan keselamatan nuklir (International Atomic Energy Agency, n.d.). Pada Juni 2025, pemerintah menargetkan agar PLTN perdana dapat beroperasi pada tahun 2034 di wilayah Sumatra dan Kalimantan, dengan Rusia dan Kanada menunjukkan ketertarikan untuk berpartisipasi dalam proyek ini.

3. Gap Regulasi dan Rekomendasi Kebijakan untuk Adopsi RREM

Indonesia sebenarnya telah meletakkan dasar hukum di bidang ketenaganukliran lewat Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, tapi masih ada beberapa hal yang belum sepenuhnya siap, terutama kalau kita bicara soal penerapan teknologi REMIX. Salah satu kendalanya adalah ketiadaan fasilitas untuk proses ulang bahan bakar nuklir bekas, yang mana ini adalah unsur penting dalam siklus bahan bakar REMIX. Pengelolaan limbah radioaktif di Indonesia sampai sekarang lebih banyak terfokus pada penyimpanan atau pembuangan, bukan untuk pemanfaatan ulang bahan bakar bekas (Ratiko et al., 2020). Ditambah lagi, regulasi khusus yang mengatur pemanfaatan plutonium hasil daur ulang belum ada, padahal materi ini butuh pengawasan ekstra agar terhindar dari risiko proliferasi nuklir (Republik Indonesia, 1997; Republik Indonesia, 2013). Selain itu, sumber daya manusia dan penguasaan teknologi di aspek siklus bahan bakar nuklir juga masih terbatas. Belum lagi, aturan yang mengatur tanggung jawab lingkungan dan manajemen risiko secara menyeluruh juga belum ada, dan ini jadi tantangan tersendiri dalam mengadopsi teknologi REMIX (IAEA, 2019; Republik Indonesia, 2013).

Kalau kita mau dukung penggunaan REMIX, tentu saja kerangka regulasi ketenaganukliran Indonesia harus diperbarui, terutama untuk mengatur hal-hal seperti keselamatan, keamanan, perizinan, dan pengawasan terkait siklus bahan bakar tertutup yang jadi basis teknologi itu (IAEA, n.d.). Penguatan kapasitas regulator, terutama BAPETEN, juga sangat penting supaya pengawasan terhadap seluruh tahap pengelolaan bahan bakar nuklir bisa sesuai dengan standar internasional (IAEA, 2024). Pemerintah pun perlu lebih menerapkan prinsip kehati-hatian, misalnya lewat studi risiko lingkungan, pengawasan jangka panjang, serta pengelolaan limbah radioaktif yang memang menitikberatkan pada upaya pemanfaatan kembali sumber daya (IAEA, 2015; IAEA, 2025). Kerja sama internasional juga seharusnya diperkuat, terutama dengan IAEA dan negara-negara yang sudah lebih berpengalaman dalam teknologi daur ulang bahan bakar nuklir, supaya transfer teknologi, pengembangan sumber daya manusia, dan penguatan sistem

pengamanan nuklir bisa berjalan lancar (Reuters, 2025). Dan tentu saja, mekanisme pertanggungjawaban hukum yang komprehensif harus dibangun agar perlindungan lingkungan, keselamatan masyarakat, dan keberlanjutan pengembangan energi nuklir di Indonesia bisa benar-benar terjamin (IAEA, 2009). Tidak ada jalan pintas di sini, namun langkah-langkah tersebut penting untuk maju ke depan.

SIMPULAN

Pengembangan Green Nuclear Energy melalui konsep REMIX merupakan alternatif strategis dalam mendukung transisi energi Indonesia menuju sistem energi rendah karbon dan berkelanjutan. Teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar nuklir melalui daur ulang uranium dan plutonium serta mengurangi volume limbah radioaktif, sehingga berpotensi mendukung pencapaian target Net Zero Emission Indonesia tahun 2060 dan memperkuat ketahanan energi nasional. Namun, penerapannya tetap mengandung ketidakpastian ilmiah dan risiko lingkungan yang bersifat jangka panjang, sehingga penerapan *precautionary principle* menjadi landasan penting dalam setiap tahap pengembangannya.

Penerapan *precautionary principle* perlu diwujudkan melalui regulasi yang adaptif, sistem perizinan berbasis keselamatan, pengawasan yang independen, pengelolaan limbah radioaktif sesuai standar internasional, serta mekanisme pertanggungjawaban yang efektif. Dengan demikian, pengembangan Green Nuclear Energy berbasis REMIX tidak hanya menjadi solusi energi masa depan, tetapi juga tetap menjamin perlindungan lingkungan dan keadilan antargenerasi.

Berdasarkan hasil penelitian, pemerintah perlu melakukan pembaruan regulasi di bidang ketenaganukliran agar mampu mengakomodasi perkembangan teknologi Green Nuclear Energy, khususnya penerapan konsep REMIX sebagai teknologi daur ulang bahan bakar nuklir. Pembaruan tersebut hendaknya tidak hanya berfokus pada aspek pemanfaatan energi, tetapi juga mengintegrasikan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) secara menyeluruh dalam setiap tahapan pengembangan, mulai dari perencanaan, perizinan, operasional, hingga pengelolaan limbah radioaktif. Selain itu, penguatan kapasitas lembaga pengawas, peningkatan standar keselamatan yang selaras dengan ketentuan internasional, serta penyempurnaan mekanisme pertanggungjawaban atas risiko lingkungan perlu menjadi prioritas guna menjamin perlindungan masyarakat dan lingkungan hidup secara optimal. Di samping itu, pengembangan energi nuklir berbasis REMIX perlu dilakukan secara transparan dengan melibatkan partisipasi masyarakat, akademisi, dan berbagai pemangku kepentingan agar tercipta kepercayaan publik serta dukungan yang kuat terhadap kebijakan energi yang aman, berkelanjutan, dan berorientasi pada kepentingan generasi sekarang maupun generasi yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

“Jalan Panjang Realisasi Energi Nuklir Di Indonesia.” *Laporiklim*. June 26, 2025. <https://Laporiklim.Wargaberdaya.Org/Berita/Pltn-Di-Indonesia-Solusi-Energi-Dan-Risiko/>.

- “Menuju Nol Emisi 2060, Pemerintah Masukkan PLTN Ke Rencana Strategis Energi Nasional.” *Suara.Com*. October 28, 2025. <https://www.suara.com/bisnis/2025/10/28/132122/Menuju-Nol-Emisi-2060-Pemerintah-Masukkan-Pltn-Ke-Rencana-Strategis-Energi-Nasional>.
- “Nuklir Opsi Strategis Transisi Energi, Bapeten Kaji PLTN Bengkayang.” *Emitennews*. October 27, 2025. <https://emitennews.com/news/nuklir-opsi-strategis-transisi-energi-bapeten-kaji-pltn-bengkayang>.
- “Outlook 2025: Bagaimana Pemerintahan Prabowo Penuhi Target Bauran Energi Terbaru.” *Tempo.Co*. January 16, 2025. <https://www.tempo.co/ekonomi/outlook-2025-bagaimana-pemerintahan-prabowo-penuhi-target-bauran-energi-terbaru-1196060>.
- “Pemerintah Siapkan PLTN, Pilar Baru Perkuat Ketahanan Energi Nasional.” *CNN Indonesia*. October 28, 2025. <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20251028134931-90-1289271/pemerintah-siapkan-pltn-pilar-baru-perkuat-ketahanan-energi-nasional>.
- “Russia Advances REMIX Fuel Trials In Boost For Closed Nuclear Fuel Cycle.” *POWER Magazine*. December 5, 2024. <https://www.powermag.com/russia-advances-remix-fuel-trials-in-boost-for-closed-nuclear-fuel-cycle/>.
- “What Is Nuclear Recycling?” *Whatisnuclear.Com*. Accessed June 21, 2026. <https://whatisnuclear.com/recycling.html>.
- Adamov, E. O., Yu. S. Mochalov, And V. I. Rachkov. “Spent Nuclear Fuel Reprocessing And Nuclear Materials Recycling In Two-Component Nuclear Energy.” *Atomic Energy* 130, No. 1 (2021): 29–35. <https://doi.org/10.1007/S10512-021-00769-W>.
- Alamsyah, Reno, Bintoro Aji, And Djoko Hari Nugroho. “Improvement Of Nuclear Safety Infrastructure In Indonesia Through Participation As A Country Of Nuclear Safety Convention.” In *Proceedings Of The Seminar On Nuclear Safety 2017: Development Of Nuclear Power Oversight Based On Public Information And Communication Technology*, No. INIS-ID--89 (2017): 138. <https://inis.laea.org/records/qdgvq-79c37>.
- American Academy Of Arts And Sciences. “Nuclear Liability: A Key Component Of The Public Policy Decision To Deploy Nuclear Energy In Southeast Asia.” Accessed June 21, 2026. <https://www.amacad.org/publication/nuclear-liability-key-component-public-policy-decision-deploy-nuclear-energy-southeast-asia/section/5>.
- Anwar, Muhamad. “Efektivitas Penyidikan Terhadap Pelanggaran Ketenaganukliran Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran.” *Jurnal Hukum Media Justitia Nusantara* 11, No. 2 (2021): 183–194.
- Badan Pembinaan Hukum Nasional. “Kesiapan RUU Ketenaganukliran Menuju Prolegnas Prioritas 2025.” 2024. <https://bphn.go.id/Berita-Kegiatan/Kesiapan-Ruu-Ketenaganukliran-Menuju-Prolegnas-Prioritas-2025>.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). “Konsultasi Publik Penyusunan KLHS KRP PLTN.” Accessed June 21, 2026. <https://www.bapeten.go.id/Berita/Konsultasi-Publik-Penyusunan-Klhs-Krp-Pltn-114254>.

- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. "Diseminasi Kebijakan Penerapan Peraturan BAPETEN No. 4 Tahun 2024 Dan No. 5 Tahun 2024." January 16, 2025. <https://www.bapeten.go.id/Berita/Diseminasi-Kebijakan-Penerapan-Peraturan-Bapeten-No4-Tahun-2024-Dan-Peraturan-Bapeten-No5-Tahun-2024-140426>.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. *Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 5 Tahun 2025 Tentang Standar Kegiatan Usaha Dan/Atau Standar Produk/Jasa Pada Penyelenggaraan Perizinan Berusaha Berbasis Risiko Sektor Ketenaganukliran*. Badan Pengawas Tenaga Nuklir. *Surat Edaran Kepala BAPETEN Nomor 0375 Tahun 2026 Tentang Pelayanan Perizinan Ketenaganukliran Untuk Nonpelaku Usaha*. Accessed June 21, 2026. <https://bapeten.go.id/Berita/Surat-Edaran-Kepala-Bapeten-Nomor-0375-Tahun-2026-Tentang-Pelayanan-Perizinan-Ketenaganukliran-Untuk-Nonpelaku-Usaha-110728>.
- Badan Riset Dan Inovasi Nasional (BRIN). "Pengelolaan Limbah Nuklir Dan Kesiapan SDM: Faktor Kunci Dalam Pengoperasian PLTN Yang Aman Dan Berkelanjutan." Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN). Accessed June 21, 2026. <https://brin.go.id/Ortn/Posts/Kabar/Pengelolaan-Limbah-Nuklir-Dan-Kesiapan-Sdm-Faktor-Kunci-Dalam-Pengoperasian-Pltn-Yang-Aman-Dan-Berkelanjutan>.
- Birman, Moch Djoko. "The Strategy Of Experimental Power Reactor Licensing In Indonesia." In *Proceeding On The Scientific Meeting And Presentation On Basic Research Of Nuclear Science And Technology (Book I): Physics, Reactors*, No. INIS-ID--69 (2015): 76. <https://inis.laea.org/Records/0ed8v-N5684>.
- Bodansky, Daniel. "Scientific Uncertainty And The Precautionary Principle." *Environment: Science And Policy For Sustainable Development* 33, No. 7 (1991): 4–5, 43–44.
- Cameron, James, And Juli Abouchar. "The Precautionary Principle: A Fundamental Principle Of Law And Policy For The Protection Of The Global Environment." *Boston College International And Comparative Law Review* 14, No. 1 (1991): 1–27.
- International Atomic Energy Agency. *Spent Fuel Reprocessing Options*. IAEA-TECDOC-1587. Vienna: IAEA, 2008.
- Congressional Research Service. *Considerations For Reprocessing Of Spent Nuclear Fuel*. Report No. R48364. Washington, DC: Library Of Congress, January 23, 2025. https://www.congress.gov/Crs/External_Products/R/PDF/R48364/R48364.2.Pdf.
- Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, Dan Konservasi Energi (EBTKE), Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. "Menuju NZE 2060, Pemerintah Perkuat Fondasi Energi Rendah Karbon Berkelanjutan." Published February 12, 2026. Accessed June 20, 2026. <https://ebtke.esdm.go.id/Artikel/Berita/Menuju-Nze-2060-Pemerintah-Perkuat-Fondasi-Energi-Rendah-Karbon-Berkelanjutan>.
- Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, Dan Konservasi Energi (EBTKE), Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. "Menuju NZE 2060, Pemerintah Perkuat Fondasi Energi Rendah Karbon Berkelanjutan." Published February 12, 2026. Accessed June 20, 2026. <https://ebtke.esdm.go.id/Artikel/Berita/Menuju-Nze-2060-Pemerintah-Perkuat-Fondasi-Energi-Rendah-Karbon-Berkelanjutan>.

- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. "Pemerintah Siapkan Regulasi Pengembangan PLTN Di Indonesia." May 16, 2025. <https://Gatrik.Esdm.Go.Id/Berita/?Category=Ketenagalistrikan&Slug=Pemerintah-Siapkan-Regulasi-Pengembangan-Pltn-Di-Indonesia>.
- Dudnikov, A. A., Et Al. "Radiation Characteristics Of REMIX Fuel During Multiple Recycling In VVER-1000 Reactors." *Nuclear Energy And Technology* 2, No. 2 (2016): 91. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452303816300450>.
- European Commission. *Commission Delegated Regulation (EU) 2022/1214 Of 9 March 2022 Amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139*. Brussels: Official Journal Of The European Union, 2022.
- European Commission. *Communication From The Commission: Small Modular Reactors Strategy* (COM/2026/117). Brussels: European Commission, 2026.
- European Parliament Research Service. *The Precautionary Principle*. Brussels: European Union, 2015.
- Fautngiljanan, Johrdan. "Energi Nuklir Dalam Net Zero Emission Indonesia: Tinjauan Terhadap Peraturan Perundang-Undangan Ketenaganukliran Di Indonesia." *LITRA: Jurnal Hukum Lingkungan, Tata Ruang, Dan Agraria* 2, No. 2 (2023): 155. <https://doi.org/10.23920/Litra.V2i2.1088>.
- Kovalev, N. V., Zilberman, B. Y., Goletsky, N. D., & Sinyukhin, A. B. (2020). *A New Approach To The Recycling Of Spent Nuclear Fuel In Thermal Reactors Within The REMIX Concept*. *Nuclear Energy And Technology*, 6(2), 93–98. <https://doi.org/10.3897/Nucet.6.54624>.
- Fautngiljanan, Johrdan. "Energi Nuklir Dalam Net Zero Emission Indonesia: Tinjauan Terhadap Peraturan Perundang-Undangan Ketenaganukliran Di Indonesia." *Litra Jurnal Hukum Lingkungan Tata Ruang Dan Agraria* 2, No. 2 (2023): 164. <https://doi.org/10.23920/Litra.V2i2.1088>.
- Institute For Essential Services Reform (IESR). "IETD 2025: Tiga Rekomendasi Utama Untuk Mewujudkan Transisi Energi Yang Berdampak." October 8, 2025. <https://iesr.or.id/ietd-2025-tiga-rekomendasi-utama-untuk-mewujudkan-transisi-energi-yang-berdampak/>.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). *Predisposal Management Of High Level Radioactive Waste*. <https://inis.laea.org/records/paf9g-33g95>.
- International Atomic Energy Agency. "IAEA Mission Says Indonesia Strengthened Nuclear And Radiation Safety, Sees Areas For Enhancement." Accessed June 21, 2026. <https://www.laea.org/newscenter>.
- International Atomic Energy Agency. "Regulatory Framework For Nuclear Installations." Accessed June 21, 2026. <https://www.laea.org/topics/nuclear-installations>.
- International Atomic Energy Agency. "Regulatory Framework." Accessed June 21, 2026. <https://gnssn.laea.org/regnet/pages/regulatory-framework.aspx>.
- International Atomic Energy Agency. "Spent Fuel Management For Research Reactors: Using Decision Tools To Help Choose The Best Option." 2019. Accessed June 21, 2026. <https://www.laea.org/newscenter/news/spent-fuel-management-for-research-reactors-using-decision-tools-to-help-choose-the-best-option>.

- International Atomic Energy Agency. "Vienna Convention On Civil Liability For Nuclear Damage." Accessed June 21, 2026. <https://www.iaea.org/topics/nuclear-liability-conventions/vienna-convention-on-civil-liability-for-nuclear-damage>.
- International Atomic Energy Agency. *Accident Analysis For Nuclear Power Plants With Pressurized Water Reactors*. Vienna: IAEA, 2003.
- International Atomic Energy Agency. *Climate Change And Nuclear Power 2024*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2024.
- International Atomic Energy Agency. *Fundamental Safety Principles*. IAEA Safety Standards Series No. SF-1. Vienna: IAEA, 2006. <https://www.iaea.org/publications/7592/fundamental-safety-principles>.
- International Atomic Energy Agency. *Geological Disposal Facilities For Radioactive Waste*. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. Vienna: IAEA, 2011.
- Grambow, B., And R. C. Ewing. "Safety And Science: The Fragile Connection." *Bulletin Of The Atomic Scientists* (2025).
- International Atomic Energy Agency. *Geological Disposal Facilities For Radioactive Waste*. Vienna: IAEA, 2011.
- International Atomic Energy Agency. *Managing Radioactive Waste*. Accessed June 21, 2026. <https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/tc/waste.pdf>.
- International Atomic Energy Agency. *Predisposal Management Of Radioactive Waste From Nuclear Fuel Cycle Facilities*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1720web-34641098.pdf>.
- International Atomic Energy Agency. *Safety Of Nuclear Fuel Reprocessing Facilities*. IAEA Nuclear Energy Series. Vienna: IAEA, 2017. <https://www.iaea.org/publications/10994/safety-of-nuclear-fuel-reprocessing-facilities>.
- International Atomic Energy Agency. *The Safety Case And Safety Assessment For The Disposal Of Radioactive Waste*. IAEA Safety Standards Series No. SSG-23. Vienna: IAEA, 2012.
- Kagramanyan, V. M., A. V. Pavlovichev, A. S. Gerasimov, And A. V. Vasiliev. "A New Approach To The Recycling Of Spent Nuclear Fuel In Thermal Reactors Within The REMIX Concept." *Atomic Energy* 126, No. 2 (2019). https://www.researchgate.net/publication/342320221_A_New_Approach_To_The_Recycling_Of_Spent_Nuclear_Fuel_In_Thermal_Reactors_Within_The_REMIX_Concept.
- Kementerian PPN/Bappenas. "Analisis Kesiapan Regulasi Dan Kelembagaan Pembangunan PLTN Di Indonesia Dalam Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025–2045." *Bappenas Working Papers* VIII, No. 1 (2025). <https://workingpapers.bappenas.go.id/index.php/bwp/article/view/398>.
- Kurniawan, Muhammad Aldi, Menik Ariani, Fiber Monado, Akmal Johan, And Hadir Kaban. "Efek Penambahan Plutonium Pada Sel Bahan Bakar MOX Terhadap Performa Reaktor GFR 250mwth." *Jurnal Fisika Unand* 14, No. 2 (2025): 152–159. <https://doi.org/10.25077/jfu.14.2.152-159.2025>.

- Latifah, Emmy. "Precautionary Principle Sebagai Landasan Dalam Merumuskan Kebijakan Publik." *Yustisia* 5, No. 2 (May–August 2016): 278.
- Liu, Jiaxin, Yang Tian, Shuo Yang, Yongquan Qin, Xuefeng Hou, Yantao Hu, Liudong Hou, And Jing Ma. "Analysis Of Explosion Incidents In Nuclear Fuel Reprocessing Facilities And Recommendations For Their Prevention." *International Journal Of Advanced Nuclear Reactor Design And Technology* 6, No. 2 (2024): 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.jandt.2024.12.001>
- Marpaung, Diory. "Perubahan Pasal 88 UU Lingkungan Hidup Terkait Prinsip Strict Liability." *DHP Law Firm*. March 30, 2021. <https://www.dhp-lawfirm.com/perubahan-pasal-88-uu-lingkungan-hidup-terkait-prinsip-strict-liability/>.
- Marzuki, Peter Mahmud. *Penelitian Hukum*. Revised Edition. Jakarta: Kencana Prenada Media Group, 2017.
- Matveenko, A. V., V. V. Kharitonov, Yu. G. Pavlov, And Yu. A. Ul'yanin. "Competitiveness Assessment Of Regenerated Uranium-Plutonium Remix Fuel In Thermal Reactors." *Atomic Energy* 130, No. 1 (2021): 57–62. <https://doi.org/10.1007/S10512-021-00774-Z>.
- Nurkholillah And Dian Fitriyani. "Analisis Burn Up Pada Reaktor Pembiak Cepat Bependingin Pb-Bi Dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar Dan Bahan Pendingin." *Jurnal Fisika Unand* 8, No. 2 (2019): 184–190. <https://doi.org/10.25077/jfu.8.2.184-190.2019>.
- OECD Nuclear Energy Agency. *SMR Dashboard: Third Edition*. Paris: OECD Publishing, July 2025.
- OECD/NEA. *Management And Disposal Of High-Level Radioactive Waste*. Paris: OECD Publishing, 2020.
- Pebrianto, Dony Yusra, Akbar Kurnia Putra, And Budi Ardianto. "Tinjauan *Precautionary Principle* Dalam Hukum Internasional Terkait Pertanggungjawaban Negara Dalam Penanganan Dan Pencegahan Wabah Covid-19." *Jurnal Sains Sosio Humaniora* 6, No. 1 (June 2022).
- Pemerintah Republik Indonesia. *Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)*. Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017.
- Ratiko, R., D. S. Wisnubroto, N. Nasruddin, And T. M. I. Mahlia. "Current And Future Strategies For Spent Nuclear Fuel Management In Indonesia." *Energy Strategy Reviews* 32 (2020): 100575. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20301280>.
- REMIX—Fuel For A Nuclear Fuel Cycle. PCT International Application No. PCT/RU2019/000740. 2019. <https://image-pubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadpdf/12327645>.
- Republik Indonesia. *Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 Tentang Perizinan Instalasi Nuklir Dan Pemanfaatan Bahan Nuklir*.
- Republik Indonesia. *Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 Tentang Keselamatan Dan Keamanan Instalasi Nuklir*.
- Republik Indonesia. *Peraturan Pemerintah Nomor 46 Tahun 2009 Tentang Batas Pertanggungjawaban Kerugian Nuklir*.

- Republik Indonesia. *Peraturan Presiden Nomor 74 Tahun 2012 Tentang Pertanggungjawaban Kerugian Nuklir*.
- Republik Indonesia. *Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif*. Accessed June 21, 2026. <https://Peraturan.Bpk.Go.Id/Details/5395/Pp-No-61-Tahun-2013>.
- Republik Indonesia. *Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran*. Accessed June 21, 2026. <https://jdih.bapeten.go.id/En/Dokumen/Peraturan/The-Act-Number-10-Year-1997-On-Nuclear-Energy-Unofficial-Translation>.
- Republik Indonesia. *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 140.
- Republik Indonesia. *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Republik Indonesia. *Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran*.
- Republik Indonesia. *Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)*. Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017.
- Republik Indonesia. *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. 2026. [https://jdih.esdm.go.id/Common/Dokumen-External/UU%2032%20Tahun%202009%20\(PPLH\).Pdf](https://jdih.esdm.go.id/Common/Dokumen-External/UU%2032%20Tahun%202009%20(PPLH).Pdf).
- Reuters. "World Bank, IAEA To Cooperate On Nuclear Power Development And Safety." *Reuters*. June 26, 2025. <https://www.reuters.com/business/energy/world-bank-iaea-cooperate-nuclear-power-development-safety-2025-06-26/>.
- Sadeleer, Nicolas De. *Environmental Principles: From Political Slogans To Legal Rules*. Oxford: Oxford University Press, 2002
- Sands, Philippe, Jacqueline Peel, Et Al. *Principles Of International Environmental Law*. 3rd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- Shchepetina, T. D., Et Al. "A New Approach To The Recycling Of Spent Nuclear Fuel In Thermal Reactors Within The REMIX Concept." *Nuclear Energy And Technology* 6, No. 2 (2020): 89. <https://nucet.pensoft.net/article/54624/>.
- Silakhuddin. "Analisis Dan Konsep Penanganan Aktinida Minor Dalam Limbah PLTN Menggunakan Teknologi ADS." *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir* 11, No. 2 (2008). <https://doi.org/10.17146/Gnd.2008.11.2.141>.
- Soekanto, Soerjono, And Sri Mamudji. *Penelitian Hukum Normatif: Suatu Tinjauan Singkat*. Jakarta: Rajagrafindo Persada, 2015.
- International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023
- Soemitro, Ronny Hanitijo. *Metodologi Penelitian Hukum Dan Jurimetri*. Jakarta: Ghalia Indonesia, 1994.
- UK Government. *UK Green Taxonomy Consultation: Government Response*. London: HM Government, 2024.
- UNESCO. *The Precautionary Principle*. Paris: UNESCO, 2005.
- Union Of Concerned Scientists. "Nuclear Reprocessing: Dangerous, Dirty, And Expensive." Accessed June 20, 2026. <https://www.ucs.org/resources/nuclear-reprocessing-dangerous-dirty-and-expensive>.

- United Nations. *Report Of The United Nations Conference On Environment And Development*. Annex I: *Rio Declaration On Environment And Development*. A/CONF.151/26 (Vol. I). 1992.
- Voronova, Marina V., Et Al. "Physical And Economical Aspects Of Pu Multiple Recycling On The Basis Of REMIX Reprocessing Technology In Thermal Reactors." *EPJ Nuclear Sciences & Technologies* 2 (2016): 47. https://www.epj-n.org/articles/epjn/full_html/2016/01/epjn150063/epjn150063.html.
- Wati, Jaka Rachmadetin, Yuli Purwanto, Dwi Luhur Ibnu Saputra, Ratiko, Aisyah, And Pungky Ayu Artiani. "Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Aktivitas Tinggi Melalui Vitrifikasi Gelas Borosilikat." *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir* 30, No. 2 (2024): 123–138. <https://doi.org/10.55981/uranian.2024.9144>.
- Wibisana, Andri G. "The Development Of The Precautionary Principle In International Environmental Law And Indonesian Environmental Law." *Asia Pacific Journal Of Environmental Law* 14, No. 1–2 (2011).
- Wibisana, Andri Gunawan. *Penegakan Hukum Lingkungan Melalui Pertanggungjawaban Perdata*. Depok: Badan Penerbit Fakultas Hukum Universitas Indonesia, 2017
- Widagdo, Faris Rafi Almay, Farahdinny Siswajanthy, And Nandang Kusnadi. "Analisis Penerapan Asas Kehati-Hatian Didalam Penyelesaian Perkara Perdata Lingkungan Hidup Dan Kehutanan (Studi Kasus Putusan Mahkamah Agung Nomor 666PK/Pdt/2017)." Undergraduate Thesis, Universitas Pakuan, 2021. <https://eprints.unpak.ac.id/5524/>.
- World Health Organization. *Ionizing Radiation, Health Effects And Protective Measures*. Geneva: WHO, 2016.
- World Nuclear Association. *Mixed Oxide (MOX) Fuel*. Updated 2026. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox>.
- World Nuclear Association. *Radioactive Waste Management*. 2024. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/radioactive-waste-management>