

ANALISIS DAMPAK RADIASI OLEH PLTN TERHADAP POPULASI ORGANISME DI LAUT

Novita Risna Sari ^{*1)}, Helmi Alfiaturrohmah ²⁾, Sudarti ³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember

**Corresponding author*

e-mail: novitarisnasari2002@gmail.com ^{*1)}, helmyalfy40@gmail.com ²⁾,
sudarti.fkip@unej.ac.id ³⁾

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak radiasi yang disebabkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) terhadap populasi organisme di laut. PLTN merupakan sumber energi kontroversial yang menggunakan bahan bakar nuklir, yang berpotensi menghasilkan radiasi yang merusak ekosistem laut. Penelitian ini menggunakan metode studi literatur untuk mengumpulkan data tentang dampak radiasi PLTN terhadap populasi organisme di laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biota air tawar di Fukushima sangat tercemar, dan semakin besar ukuran ikan, semakin tinggi tingkat pencemarannya. Air limbah nuklir yang dilepaskan ke Samudera Pasifik juga menjadi ancaman jangka panjang. Aktivitas radionuklida dalam biota laut meningkat setelah kecelakaan, yang dapat mempengaruhi jaringan makanan laut. Penelitian ini menyimpulkan bahwa air yang dipanaskan dari PLTN dapat mempercepat metabolisme hewan air seperti ikan, menyebabkan malnutrisi karena kurangnya sumber makanan yang cukup. Hal ini menunjukkan adanya dampak negatif radiasi PLTN terhadap populasi organisme di laut.

Kata Kunci : PLTN; radiasi; radionuklida; fukushima; organisme laut.

PENDAHULUAN

Kehadiran radiasi pengion di lingkungan berasal dari sumber alami dan antropogenik. Sumber alam termasuk radiasi kosmik yang berasal dari luar tata surya dan radionuklida primordial yang timbul dari proses bintang. Sebagian besar radionuklida antropogenik di lingkungan berasal dari tiga sumber utama: pengujian senjata nuklir, bencana nuklir, dan pembuangan yang diizinkan dari pabrik pemrosesan ulang nuklir (Fuller et al., 2015).

Energi nuklir merupakan salah satu sumber energi baru yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan listrik. Pembuangan air panas dari PLTN saja dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan laut, khususnya

terhadap populasi organisme yang hidup di perairan sekitar PLTN. Organisme laut, seperti plankton, ikan, dan kerang, dapat terpapar oleh radiasi nuklir yang berasal dari efluen radioaktif yang terlepas dari PLTN. Radiasi nuklir dapat menyebabkan mutasi, kanker, atau kematian pada organisme laut. Selain itu, radiasi nuklir juga dapat terakumulasi dalam rantai makanan laut dan berpotensi mencemari manusia yang mengkonsumsi hasil laut.

Dampak radiasi oleh PLTN terhadap populasi organisme di laut adalah topik yang berkaitan dengan penelitian tentang perilaku radionuklida antropogenik di laut dan pengaruh kenaikan suhu air laut terhadap populasi plankton dan beberapa organisme yang hidup di laut. Radionuklida antropogenik adalah radionuklida yang berasal dari aktivitas manusia, seperti

pengoperasian PLTN. Plankton adalah organisme yang hidup di perairan dan merupakan bagian penting dari rantai makanan laut.

Plankton merupakan organisme mikroskopis yang hidup di perairan dan berperan penting dalam ekosistem laut. Plankton merupakan produsen primer yang menghasilkan oksigen dan bahan organik melalui fotosintesis. Plankton juga merupakan makanan bagi organisme laut lainnya, seperti ikan dan kerang. Plankton sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan kualitas air laut. Kenaikan suhu air laut akibat pembuangan air panas dari PLTN dapat mengurangi jumlah dan keanekaragaman plankton. Hal ini dapat mengganggu keseimbangan ekosistem laut dan produktivitas perikanan.

Kebocoran nuklir atau penggunaan senjata nuklir taktis dalam perang terbatas dapat menyebabkan konsekuensi ekologis yang sangat besar dan bertahan lama di luar lokasi paparan langsung (Bonacic et al., 2023). Pernah terjadi kecelakaan atau kebocoran nuklir akibat dari PLTN di Fukushima pada tahun 2011. Ketika itu terjadi pelepasan radiasi akibat gempa bumi dan tsunami yang menyebabkan pemadaman total dan kerusakan sistem pendingin di empat reaktor di PLTN di Jepang. Akibatnya, panas sisa yang tidak terkendali menyebabkan melelehnya bahan bakar nuklir dan pelepasan gas hidrogen yang meledak. Bencana ini menyebabkan evakuasi lebih dari 100 ribu orang dari daerah sekitar dan pencemaran air laut dan tanah oleh zat radioaktif. Menurut skala *INES* bencana kebocoran nuklir ini diklasifikasikan sebagai kecelakaan nuklir level 7.

Sebelum kebocoran nuklir di Fukushima juga pernah terjadi kebocoran PLTN pada tahun 1986 yaitu PLTN

Chernobyl, berbagai isotop *plutonium*, *strontium-90*, *americium-241*, dan *cesium-137* masih terdeteksi pada tingkat tinggi yang menyebabkan efek biologis yang merugikan di seluruh area terdekat tidak terkecuali dampaknya terhadap lautan. Sedangkan pada kebocoran pembangkit listrik Fukushima area tanah dan air yang relatif lebih kecil terkontaminasi *cesium-134* dan *cesium-137* dengan gas mulia radioaktif yang dilepaskan ke udara. Isotop *cesium* diharapkan bertanggung jawab atas 98% dari dosis radiasi kumulatif 30 tahun ke depan di daerah sekitar Fukushima (Cannon & Kiang, 2022).

Distribusi radionuklida di kompartemen lingkungan harus ditentukan untuk menyediakan pemetaan garis dasar radiologi. Informasi tersebut diperlukan untuk menilai paparan manusia dan risiko dari sumber radiasi alami dan buatan manusia dan diperlukan untuk menyiapkan dan mengembangkan peraturan yang diperlukan untuk proteksi radiasi (Diab et al., 2019). Penting untuk menentukan kandungan radionuklida pada ikan sebagai produk makanan dari sudut pandang persyaratan sanitasi dan higienis; di sisi lain, penting untuk menilai risiko radioekologi untuk ikan itu sendiri karena paparan internal dan eksternal dari radionuklida di lingkungan (air dan sedimen dasar) (Gorodetsky et al., 2022). Radiasi nuklir dapat terakumulasi dalam rantai makanan laut dan mencemari tubuh manusia. Radiasi nuklir dapat menyebabkan berbagai efek negatif bagi kesehatan manusia, seperti mutasi, kanker, kerusakan organ, gangguan sistem kekebalan tubuh, dan bahkan kematian. Kasus pencemaran radioaktif di laut akibat ledakan reaktor nuklir di Fukushima, menyebabkan sejumlah besar bahan radioaktif bocor ke laut dan menyebar ke berbagai wilayah. Beberapa ikan yang

tertangkap di dekat lokasi kecelakaan nuklir ditemukan mengandung tingkat radiasi yang melebihi batas aman.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak radiasi yang disebabkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) terhadap populasi organisme di laut. PLTN merupakan salah satu sumber energi yang kontroversial, karena penggunaan bahan bakar nuklir untuk menghasilkan energi dapat menghasilkan radiasi yang berpotensi merusak ekosistem laut. Dalam konteks ini, pemahaman mengenai dampak radiasi terhadap organisme laut sangat penting untuk mengevaluasi keberlanjutan penggunaan energi nuklir.

METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam artikel ini yaitu penelitian deskriptif dengan memanfaatkan data base *google scholar* dan *PUBMED*. Dengan kata kunci PLTN, Radiasi, Radionuklida, Fukushima, Organisme Laut yang dipublikasi dalam rentang tahun 2015-2023. Dalam penelitian ini, pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, yaitu dengan mencari, mengumpulkan, dan menganalisis sumber-sumber literatur yang relevan. Studi literatur digunakan untuk mengidentifikasi temuan dari penelitian sebelumnya, metodologi yang digunakan, serta hasil penelitian terkait dampak radiasi PLTN terhadap organisme di laut. Melalui studi literatur, akan dianalisis data yang ada untuk memahami dampak radiasi PLTN terhadap populasi organisme laut, membandingkan temuan dari penelitian sebelumnya, dan melihat perkembangan terkini. Artikel yang dijadikan sumber review berjumlah 18. Dengan 16 artikel internasional dan 2 artikel nasional. Analisis data dilakukan dengan *mapping* artikel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Radionuklida adalah isotop yang tidak stabil dari berbagai unsur kimia. Di jenis ini, partikel alfa memiliki efek biologi terkuat, yang dapat menyebabkan kerusakan biologis dua puluh kali lebih besar daripada dosis radiasi *gamma* atau *beta* yang setara. *Californium-252* (^{252}Cf), salah satu radionuklida buatan manusia yang lebih aneh, memiliki kemampuan untuk mengeluarkan neutron secara spontan. Terlepas dari fakta bahwa *hormesis* radiasi telah diteliti secara mendalam baru – baru ini, hal ini masih belum diperhitungkan dalam perhitungan proteksi radiasi. Ini karena setiap dosis radiasi minimum dianggap membawa risiko yang kecil tetapi tidak dapat diabaikan (Ostoich et al., 2016).

Pembangkit listrik tenaga nuklir menghasilkan panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap melalui proses fisik yang dikenal sebagai fisik. Neutron bergabung dengan atom *uranium* untuk menghasilkan listrik tenaga nuklir. Dalam proses pembelahan ini, neutron dari *uranium* dihasilkan, yang kemudian bertabrakan dengan atom – atom lain yang menyebabkan reaksi berantai. Batang kendali yang menyerap neutron bertanggung jawab atas reaksi berantai ini. Energi dilepaskan melalui pembuatan atom uranium di inti reaktor nuklir, yang memanaskan air hingga 520 derajat *Fahrenheit*. Selanjutnya, air panas ini digunakan untuk menggerakkan turbin yang terhubung ke generator, yang menghasilkan listrik (Aladesote et al., 2018).

Saat air yang dipanaskan dibuang ke ekosistem air, beberapa masalah sering muncul bersamaan. Menurunnya kadar oksigen terlarut dan peningkatan pH adalah perubahan yang paling cepat diamati. Air hangat tidak dapat menampung oksigen

terlarut seperti air dingin, dan pada suhu yang lebih tinggi, bahan organik akan terurai lebih cepat. Eutrofikasi terjadi ketika kadar air nutrisi yang terurai meningkat, yang biasanya terjadi pada tumbuhan ganggang karena menghambat sinar matahari untuk mencapai tanaman air di bawahnya. Melumpuhkan ganggang menyebabkan populasi mikroba aerobik meningkat, dan semakin menguras oksigen terlarut. Sebagian organisme air tidak dapat hidup di zona mati hipoksia karena kadar oksigen yang rendah (Jebakumar et al., 2018).

Air yang dipanaskan juga dapat mempercepat metabolisme hewan air berdarah dingin seperti ikan. Akibatnya, kurangnya sumber makanan menyebabkan malnutrisi. Karena lingkungan fauna air di daerah tersebut biasanya tidak nyaman bagi mereka, banyak spesies meninggalkan habitatnya sementara spesies yang lebih rentan bisa mati. Hal ini dapat memengaruhi keanekaragaman local. Terumbu karang, rumah bagi lebih dari 2 juta spesies akuatik dan sekitar 25% dari semua kehidupan laut, sangat terpengaruh oleh dampak ini (Sonone et al., 2021).

Studi lain oleh (Masuda, 2020) di tiga tempat di pesisir Teluk Wasaka, Laut Jepang, yaitu Otonomi, Sezaki, dan Nagham, menemukan bahwa pelepasan panas dapat merusak lingkungan, terutama jika banyak PLTN beroperasi di wilayah yang terbatas seperti di Laut Jepang. Tingkat pemanasan laut di wilayah ini jauh lebih cepat (1,70 per abad) daripada rata – rata global. tetapi itu mungkin karena Arus Tsushima yang panas. Tren pemanasan di beberapa wilayah Laut Jepang dapat dipicu oleh pelepasan panas di beberapa PLTN.

Pada 11 Maret 2011, gempa bumi berkekuatan 9,0 skala *Richter* melanda lepas pantai timur laut Jepang. Gempa itu menyebabkan tsunami setinggi 15 meter.

Meskipun system cadangan yang digunakan untuk mencegah reaktor nuklir meledak di PLTN Fukushima selamat dari gempa awal, tsunami menyebabkan kerusakan lebih lanjut. Berton-ton bahan radioaktif dilepaskan setiap kali sistem pendinginan gagal pada hari berikutnya. Kerusakan nuklir ini merupakan yang terburuk sejak kecelakaan Chernobyl pada tahun 1986. Gempa dan tsunami menewaskan sekitar 18.500 orang atau menghilang, dan lebih dari 160.000 orang harus mengungsi dari rumah mereka.

Setelah peristiwa itu, Jepang setuju untuk melepaskan lebih banyak air yang tercemar dari PLTN Fukushima yang hancur ke laut. Air akan diproses dan diencerkan sehingga tingkat radiasi akan dikurangi dari batas air minum. Namun, industri perikanan lokal, serta Cina dan Korea Selatan menentang keras tindakan tersebut.

Pemerintah Jepang telah memutuskan untuk membuang lebih dari satu juta ton air yang terkontaminasi radioaktif dari bencana pembangkit tenaga nuklir di Fukushima ke laut bagian timurnya. Namun, beberapa peneliti dari negara lain seperti Korea Selatan, Cina, Taiwan, dan negara kepulauan Pasifik telah menentang keputusan tersebut karena dapat berdampak pada industri perikanan dan merusak kepercayaan masyarakat terhadap konsumsi makanan laut. Selain itu, pemerintah Jepang dianggap melanggar hukum lingkungan internasional karena mengabaikan metode lain untuk mengalihkan limbah radioaktif dan tidak bekerja sama dengan negara lain dan organisasi internasional (Nuraini, 2022).

Sebuah model penelitian menunjukkan bahwa biota air tawar di Fukushima sangat tercemar, dan semakin besar ukuran ikan, semakin tinggi trofiknya, maka semakin besar pula pencemarannya.

Air limbah nuklir yang dilepaskan ke Samudera Pasifik menimbulkan ancaman dalam ratusan tahun bahkan ribuan tahun mendatang. Jaringan makanan laut menghubungkan kehidupan laut secara erat melalui tindakan predator, dan setelah kecelakaan, aktivitas radionuklida dalam biota laut sudah terbukti meningkat.

Kecelakaan Fukushima memiliki dampak yang signifikan terhadap keamanan ekonomi lingkungan Jepang. Ancaman lingkungan termasuk masalah produksi, pemindahan lokasi, peraturan biaya tambahan, dan hilangnya nilai (*intangible capital*) seperti nama, reputasi, dll. Sementara itu, ancaman terhadap keamanan ekonomi termasuk kehilangan nilai modal dan tanah pertanian yang tidak terjamin, yang akan mengakibatkan penurunan pendapatan utama masyarakat, kehilangan pekerjaan, dan kewajiban untuk membayar ganti rugi. Selain itu, negara lain juga melarang masuknya produk lokal, terutama perikanan yang berasal dari Fukushima, Miyagi, dan daerah sekitarnya. Jumlah negara yang melarang ini dapat menyebabkan petani mulai kehilangan sumber daya mereka (Singgih, 2015).

Dari kasus kecelakaan PLTN Fukushima, dapat diketahui bahwa radiasinya berdampak pada beberapa spesies ikan, *moluska*, *krustasea*, dan *zooplankton* di perairan Jepang. Dari dokumen artikel yang dirilis oleh (IAEA, 2020) tentang “*Marine Systems*” menunjukkan sebuah nilai rata – rata geometric faktor konsentrasi radionuklida (*CR GF*) pada beberapa spesies ikan sebelum kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi hingga tahun 2010. Nilai *CR GF* tersebut diperoleh dengan membandingkan konsentrasi radionuklida pada air laut dengan konsentrasi radionuklida pada jaringan lunak atau seluruh tubuh ikan.

Beberapa spesies ikan seperti *greenling*, *stone flounder*, *white croaker*, *bartail flathead*, *black rockfish*, *blue drum*, *brown hakeling*, *conger ell*, *Japanese flounder*, *marbled rockfish*, dan *marbled sole*. Dari data yang ada, di ketahui bahwa nilai *CR GF* masing – masing spesies ikan bervariasi, dengan *Greenling* memiliki nilai tertinggi sebesar 6,7 dan *Conger ell* memiliki nilai terendah sebesar 0,5. IAEA sendiri tidak dapat memastikan berapa nilai *CR GF* yang ada pada spesies ikan setelah terjadinya kecelakaan. Namun, dijelaskan bahwa berbagai variabel seperti sumber makanan, panjang rantai makanan, preferensi makanan, dan seberapa sering spesies ikan bergerak di dalam atau keluar dan wilayah yang terkontaminasi dapat mempengaruhi efek radiasi pada spesies ikan.

Kami memperoleh sumber data dari (Kryshev et al., 2012) yang dapat dilihat dalam tabel dibawah ini.

Tabel 1. Parameter Perkiraan Dosis Radiasi Biota Laut

Parameter	Dimensions	¹³¹ I	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs
Activity concentration of radionuclide in sea water (coastal area)	kBq/L	6.8 ± 3.4	2.9 ± 1.4	2.6 ± 1.2
Activity concentration of radionuclide in sea water (open sea)	Bq/L	17 ± 10	10 ± 6	9 ± 5
Concentration factor in fish	L/kg	9 · 10 ⁰	4 · 10 ¹	4 · 10 ¹
Concentration factor in molluscs	L/kg	1 · 10 ¹	6 · 10 ¹	6 · 10 ¹
Concentration factor in algae	L/kg	1 · 10 ³	5 · 10 ¹	5 · 10 ¹
Concentration factor in bottom sediments	L/kg	5 · 10 ¹	7.0 · 10 ²	7.0 · 10 ²
Dose conversion factor for internal irradiation in fish	(μGy/h)/(Bq/kg)	1.3 · 10 ⁻⁴	1.8 · 10 ⁻⁴	1.9 · 10 ⁻⁴
Dose conversion factor for internal irradiation in molluscs	(μGy/h)/(Bq/kg)	1.2 · 10 ⁻⁴	1.5 · 10 ⁻⁴	1.2 · 10 ⁻⁴
Dose conversion factor for internal irradiation in plants	(μGy/h)/(Bq/kg)	1.0 · 10 ⁻⁴	1.3 · 10 ⁻⁴	9.5 · 10 ⁻⁵
Dose conversion factor for external irradiation in fish	(μGy/h)/(Bq/kg)	2.0 · 10 ⁻⁴	2.9 · 10 ⁻⁴	8.1 · 10 ⁻⁴
Dose conversion factor for external irradiation in molluscs	(μGy/h)/(Bq/kg)	2.1 · 10 ⁻⁴	3.2 · 10 ⁻⁴	8.7 · 10 ⁻⁴
Dose conversion factor for external irradiation in algae	(μGy/h)/(Bq/kg)	2.3 · 10 ⁻⁴	3.4 · 10 ⁻⁴	9.0 · 10 ⁻⁴

Tabel 1 memberikan informasi mengenai tiga jenis radionuklida, yaitu ¹³¹I, ¹³⁷Cs, dan ¹³⁴Cs, ditunjukkan dalam nilai aktivitas radionuklida dalam kBq/L dan Bq/L. untuk ¹³⁷Cs, dan ¹³⁴Cs, aktivitas

radionuklida di air laut berkisar antara 2,9 hingga 10 Bq/L, sedangkan untuk ¹³¹I berkisar antara 6,8 hingga 17 Bq/L. Selain itu, tabel diatas juga memberikan nilai faktor konsentrasi untuk ikan, moluska, alga dan sedimen laut dasar. Nilai – nilai ini digunakan untuk menghitung aktivitas radionuklida di biota laut dan sedimen dasar laut berdasarkan konsentrasi aktivitas radionuklida di air laut. Nilai faktor konsentrasi ini ditunjukkan dalam L/kg.

Dari sumber yang sama (Kryshev et al., 2012), kami memperoleh data mengenai perkiraan laju dosis radiasi terhadap biota laut di area PLTN Fukushima.

Tabel 2. Perkiraan Laju Dosis Radiasi Terhadap Biota Laut di Area PLTN Fukushima

Dose component	Fish	Molluscs	Algae
<i>Coastal exclusion zone</i>			
Internal irradiation, including	48	53	710
¹³¹ I	8	8	680
¹³⁴ Cs	19	19	12
¹³⁷ Cs	21	26	18
External irradiation from water, Including	4.3	4.6	4.9
¹³¹ I	1.4	1.4	1.6
¹³⁴ Cs	2.1	2.3	2.3
¹³⁷ Cs	0.8	0.9	1.0
<i>Open sea</i>			
Internal irradiation, Including	0.16	0.18	1.8
¹³¹ I	0.02	0.02	1.7
¹³⁴ Cs	0.07	0.07	0.04
¹³⁷ Cs	0.07	0.09	0.06
External irradiation from water, Including	0.014	0.015	0.015
¹³¹ I	0.004	0.004	0.004
¹³⁴ Cs	0.007	0.008	0.008
¹³⁷ Cs	0.003	0.003	0.003
External irradiation from bottom sediments, Including	11.0	12.0	12.4
¹³¹ I	0.2	0.3	0.3
¹³⁴ Cs	7.7	8.3	8.5
¹³⁷ Cs	3.1	3.4	3.6

Tabel 2 menunjukkan estimasi tingkat dosis radiasi pada biota laut di area PLTN Fukushima dari Maret hingga Mei 2011. Tabel ini menunjukkan terdiri dari tiga komponen dosis: 1) dosis radiasi internal pada ikan, moluska, dan alga. 2) dosis radiasi eksternal pada air laut, dan 3) dosis total radiasi pada biota laut baik internal maupun eksternal.

Dosis radiasi internal pada ikan di zona eksklusi pantai berkisar antara 48 - 21 mGy/h, tergantung pada jenis radionuklida. Dosis radiasi internal pada moluska berkisar antara 53 - 26 mGy/h, dan dosis radiasi internal pada alga berkisar antara 710 - 18 mGy/h. Dosis radiasi eksternal air laut di

zona eksklusi pantai adalah 4,3 - 4,9 mGy/H. Zona eksklusif pantai memiliki dosis radiasi eksternal 4,3 – 4,9 mGy/h. Zona laut terbuka, 30 km dari PLTN Fukushima, memiliki dosis radiasi internal ikan 0,16 – 0,07 mGy/h, dosis moluska 0,18 – 0,09 mGy/h, dan dosis alga 1,8 – 0,06 mGy/h. Tabel ini menunjukkan bahwa zona eksklusi pantai menerima dosis radiasi yang jauh lebih tinggi daripada zona laut terbuka.

Data yang diberikan oleh (Kryshev et al., 2012) melalui tabel 1 dan tabel 2 didukung oleh hasil penelitian (Buessler et al., 2011) dan (Laplace et al., 2011) yang menyatakan bahwa setelah kecelakaan PLTN Fukushima terjadi, radioaktivitas laut di sekitar lokasi meningkat secara signifikan. Kedua penelitian ini menunjukkan bahwa kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan laut, kesehatan manusia, ekosistem, dan satwa liar. Sehingga perlu dilakukan upaya untuk memantau dan mengurangi dampak kecelakaan tersebut terhadap lingkungan laut, kesehatan manusia, ekosistem, dan satwa liar.

Kecelakaan nuklir Fukushima adalah sesuatu yang berbeda dari operasi biasa pembangkit listrik tenaga nuklir. Air limbah nuklir FDNPP berasal dari air tanah dan air hujan yang merembes ke dalam reaktor serta air pendingin yang diinjeksikan dengan cairan inti yang rusak setelah kecelakaan. Kecelakaan Fukushima dianggap sebagai pelepasan radioaktif terbesar ke laut yang pernah dilakukan oleh manusia, meskipun sumber aliran ini belum sepenuhnya diketahui (Lu et al., 2021).

Jepang secara hukum bertanggung jawab atas dampak radiasi nuklir. Ini karena hukum internasional mengatur bahwa negara dapat diminta pertanggung jawaban jika melakukan sesuatu yang

mengakibatkan pelanggaran kewajiban internasional, baik yang timbul dari perjanjian internasional maupun dari sumber hukum internasional lainnya. Jepang bertanggung jawab secara internasional atas kerugian yang ditimbulkan oleh radiasi nuklir karena semua syarat yang diperlukan untuk negara tersebut dimintai pertanggung jawaban, yaitu tindakan atau kelalaian yang melanggar hukum internasional dan keterlibatan resmi pemerintah negara dalam pembuangan air radioaktif ke laut Pasifik (Siregar, 2012).

Konvensi Keselamatan Nuklir, Perjanjian Kerja Sama tentang Keselamatan Manajemen Uap dan Keselamatan Manajemen Uap Radioaktif, *Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage*, dan *Responsibility of States for Internationally Wrongful Acts*, adalah beberapa hukum internasional yang mengatur radiasi nuklir Jepang. Konvensi keselamatan nuklir melindungi masyarakat pekerja dan lingkungan hidup. Konvensi gabungan tentang keselamatan pengelolaan bahan bakar bekas dan keselamatan pengelolaan limbah radioaktif menetapkan bahwa setiap pihak harus mengambil tindakan yang tepat untuk memastikan bahwa proses atau tahapan pengelolaan bahan radioaktif memberikan perlindungan yang memadai terhadap masyarakat dan lingkungan terhadap bahaya radiologi dan lainnya (Siregar, 2012).

KESIMPULAN

Radionuklida merupakan isotop yang tidak stabil yang berasal dari berbagai unsur kimia. Pembangkit listrik tenaga nuklir menghasilkan panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap melalui proses fisika yang dikenal sebagai fisi. Saat air yang dipanaskan dibuang ke ekosistem air, masalah yang dapat terjadi adalah

menurunnya kadar oksigen terlarut dan peningkatan pH karena air hangat tidak dapat menampung oksigen terlarut. Air yang dipanaskan juga dapat mempercepat metabolisme hewan air seperti ikan sehingga menyebabkan malnutrisi akibat kurangnya sumber makanan karena lingkungan tersebut tidak banyak bagi mereka.

Setelah terjadinya kecelakaan Fukushima yang disebabkan oleh gempa dan tsunami setinggi 15 meter pada 11 Maret 2011, pemerintah Jepang memutuskan untuk melepaskan lebih dari satu juta ton air yang tercemar radioaktif dari bencana PLTN di Fukushima ke laut bagian timurnya. Namun, hal ini ditentang oleh beberapa peneliti dari Korea Selatan, Cina, Taiwan, dan negara kepulauan Pasifik karena akan berdampak pada industri perikanan dan ekonomi masyarakat. Pencemaran ini didukung oleh beberapa hasil penelitian yang menyatakan bahwa kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan laut, kesehatan manusia, ekosistem, dan satwa liar. Sehingga perlu adanya upaya untuk memantau dan mengurangi dampak kecelakaan tersebut.

REFERENSI

- Aladesote, O., Nosiri, C., & Oguntimein, G. (2018). The Environmental Impact Of Nuclear Power Plants With A Focus On Calvert Cliffs Nuclear Plant And How CO₂ And CO_{2e} Contribute To Climate Change. *International Journal of Engineering Sciece Invention (IJESI)*, 7(10), 8–16.
- Bonacic, C., Medellin, R. A., Ripple, W., Sukumar, R., Ganswindt, A., Padua, S. M., Padua, C., Pearl, M. C., Aguirre, L. F., Valdés, L. M., Buchori, D., Innes, J. L., Ibarra, J. T., Rozzi, R., & Aguirre, A. A. (2023). Scientists warning on the ecological effects of radioactive leaks

- on ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10(January), 1–3. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1099162>
- Buesseler, K., Aoyama, M., & Fukasawa, M. (2011). Impacts of the Fukushima Nuclear Power Plants on Marine Radioactivity. *Environmental Science & Technology*, 45, 9931–9935. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1021/es202816c>
- Cannon, G., & Kiang, J. G. (2022). A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation: wildlife population. *International Journal of Radiation Biology*, 98(6), 1054–1062. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793021>
- Diab, H. M., Ramadan, A. B., Monged, M. H. E., & Shahin, M. (2019). Environmental assessment of radionuclides levels and some heavy metals pollution along Gulf of Suez, Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 12346–12358. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04610-7>
- Fuller, N., Lerebours, A., Smith, J. T., & Ford, A. T. (2015). The biological effects of ionising radiation on Crustaceans: A review. *Aquatic Toxicology*, 167, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.07.013>
- Gorodetsky, V. G., Trapeznikov, A. V., Trapeznikova, V. N., & Korzhavin, A. V. (2022). Dose Power Estimation for Fish in the Lower Reaches of the Ob River. *Inland Water Biology*, 15(3), 324–330. <https://doi.org/10.1134/S1995082922030051>
- IAEA. (2020). Environmental transfer of radionuclides in Japan following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In *Iaea-Tecd-1927* (pp. 229–261).
- Jebakumar, J. P. P., Nandhagopal, G., Babu, B. R., Ragumaran, S., & Ravichandran, V. (2018). Impact of coastal power plant cooling system on planktonic diversity of apolluted creek system. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 278–391. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.053>
- Kryshev, I. I., Kryshev, A. I., & Sazykina, T. G. (2012). Dynamics of radiation exposure to marine biota in the area of the Fukushima NPP in March-May 2011. *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.04.015>
- Laplace, J. G., Seiller, K. B., & Hinton, T. G. (2011). Fukuhsima Wildlife Dose Reconstruction Signals Ecological Consequences. *Environmental Science & Technology*, 45, 133–155. <https://doi.org/10.1525/california/9780520274181.003.0006>
- Lu, Y., Yuan, J., Du, D., Sun, B., & Yi, X. (2021). Monitoring long-term ecological impacts from release of Fukushima radiation water into ocean. *Geography and Sustainability*, 2(2), 95–98. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.04.002>
- Masuda, R. (2020). Tropical fishes vanished after the operation of a nuclear power plant was suspended in the Sea of Japan. *PLoS ONE*, 15(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232065>
- Nuraini, H. (2022). Analisis Mengenai Keputusan Pemerintah Jepang Dalam Pembuangan Air Radioaktif Fukushima Terhadap Hukum Lingkungan Internasional. *LITRA : Jurnal Hukum Lingkungan Tata Ruang Dan Agraria*, 1(2), 265–276. <https://doi.org/10.23920/litra.v1i2.775>
- Ostoich, P., Beltcheva, M., Rojas, J. A. H., & Metcheva, R. (2016). Radionuclide Contamination as a Risk Factor in Terrestrial Ecosystems: Occurrence, Biological Risk, and Strategies for Remediation and Detoxification. *IntechOpen*, 11, 1–16.

- [.https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics](https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics)
- Singgih, D. (2015). Dampak Kecelakaan Pembangkit Tenaga Nuklir Fukushima Daiichi Terhadap Keamanan Lingkungan dan Ekonomi di Jepang. *E-Journal Ilmu Hubungan Internasional*, 1–13.
- Siregar, N. (2012). ANALISIS YURIDIS TANGGUNG JAWAB NEGARA TERHADAP DAMPAK RADIASI NUKLIR MENURUT HUKUM INTERNASIONAL (Studi Kasus Radiasi Nuklir Jepang Pasca Gempa Dan Tsunami). *FIAT JUSTISIA: Jurnal Ilmu Hukum*, 5(2), 1–11. <https://doi.org/10.25041/fiatjustisia.v5no2.65>
- Sonone, S. S., Jadhav, S. V, Sankhla, M. S., & Kumar, R. (2021). Water Contamination by Heavy Metals and their Toxic Effect on Aquaculture and Human Health through Food Chain. *Letters in Applied NanoBioScience*, 10(2), 2148–2166. <https://doi.org/10.33263/LIANBS102.21482166>