

ASPEK LINGKUNGAN DALAM PENERAPAN TINGKAT KLIERENS LIMBAH RADIOAKTIF

Moh. Cecep Cepi Hikmat¹, Moh. Hasroel Thayib², Dadong Iskandar³

1 Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional, Gd. 50 Kawasan Puspiptek Serpong

2 Sekolah Ilmu Lingkungan-Universitas Indonesia, Jl. Salemba No 4 Jakarta Pusat

3 Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jl. Lebak Bulus Raya No.49, Jakarta Selatan

ceceptea@batan.go.id

ABSTRAK

ASPEK LINGKUNGAN DALAM PENERAPAN TINGKAT KLIERENS LIMBAH RADIOAKTIF. Pemanfaatan teknologi nuklir untuk kesejahteraan manusia telah merambah ke berbagai bidang kehidupan. Dalam pemanfaatan dan pengembangan iptek nuklir selalu akan dihasilkan limbah radioaktif sebagai sisa proses. Limbah radioaktif yang dihasilkan harus dikelola dengan baik untuk mencegah timbulnya efek radiasi pada pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup. Lingkungan hidup harus dikelola dengan baik, karena kita sebagai manusia adalah bagian yang tak terpisahkan dari lingkungan hidup itu sendiri. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui aspek lingkungan yang diakibatkan dari penerapan tingkat klierens limbah radioaktif, sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah dapat memperkuat pemangku kepentingan dalam memutuskan program klierens limbah radioaktif ke depannya. Metodologi penyusunan makalah ini adalah dengan melakukan analisis limbah radioaktif menggunakan spektrometer gamma digiBASE, inventarisasi data sekunder untuk perangkat lunak RESRAD-OFFSITE, simulasi data dengan perangkat lunak RESRAD-OFFSITE dan analisis keluaran RESRAD-OFFSITE. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dosis efektif paling tinggi yang diterima oleh individu adalah sekitar $1,40 \times 10^{-44}$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, selain itu tidak ada risiko kanker dari awal pengoperasian fasilitas *landfill* sampai ratusan tahun. Dapat disimpulkan bahwa paparan radiasi dari limbah klierens tidak memberikan penambahan dosis di lingkungan, sehingga tidak memberikan dampak yang signifikan pada aspek lingkungan.

Kata Kunci: lingkungan, tingkat klierens, limbah radioaktif.

ABSTRACT

ENVIRONMENT ASPECT ON THE IMPLEMENTATION OF RADIOACTIVE WASTE CLIERENS. Utilization of nuclear technology for human welfare has penetrated into various areas of life. In the utilization and development of nuclear science and technology will always be generated radioactive waste as the rest of the process. Radioactive waste generated must be well managed to prevent the effects of radiation on workers, community members, and the environment. The environment must be well managed, because we as human beings are an integral part of the environment itself. The purpose of this research is to know the environmental aspect caused by applying the radioactive waste clearance level, while the benefit of this research is to strengthen the stakeholders in deciding the radioactive waste clearance programme in the future. The methodology of this paper is to conduct a radioactive waste analysis using the digiBASE gamma spectrometer, secondary data inventory for RESRAD-OFFSITE software, data simulation with RESRAD-OFFSITE software and RESRAD-OFFSITE output analysis. The simulation results show that the highest effective dose received by individuals is about 1.40×10^{-44} $\mu\text{Sv}/\text{year}$, otherwise there is no cancer risk from the start of the operation of landfill facilities for hundreds of years. It can be concluded that radiation exposure from waste clearance does not provide additional doses in the environment, so it does not have a significant impact on environmental aspects.

Keywords: environment, clearance level, radioactive waste

PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi nuklir untuk kesejahteraan manusia telah merambah ke berbagai bidang kehidupan seperti kesehatan, industri, penelitian kebumihuan, energi, pangan dan pertanian. Seiring perkembangan teknologi nuklir tersebut, maka sangat dibutuhkan metode, teknik dan atau uji yang handal untuk menentukan besarnya dosis yang diterima oleh seseorang sehingga keselamatannya terjamin [1]. Dalam pemanfaatan dan pengembangan iptek nuklir selalu akan dihasilkan limbah radioaktif sebagai sisa proses. Limbah radioaktif yang dihasilkan harus dikelola dengan baik dan sesuai dengan peraturan yang berlaku, hal ini untuk

mencegah timbulnya efek radiasi pada pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup, serta untuk mencegah timbulnya potensi yang dapat mengganggu kesehatan masyarakat dan lingkungan [2].

Lingkungan hidup adalah ruang dimana aktivitas manusia berlangsung, manusia memanfaatkan sumber daya alam untuk memenuhi kebutuhan dan kelangsungan hidupnya [3]. Lingkungan hidup harus dikelola dengan baik, karena kita sebagai manusia adalah bagian yang tak terpisahkan dari lingkungan hidup itu sendiri. Pengelolaan lingkungan hidup dewasa ini masih bersifat antroposentris artinya masih melihat permasalahan dari sudut

kepentingan manusia. Unsur-unsur lingkungan hidup seperti unsur biotik dan abiotik masih diperhatikan, namun perhatian itu secara eksplisit maupun implisit masih dihubungkan dengan kepentingan manusia [4].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui aspek lingkungan yang diakibatkan dari penerapan tingkat klierens limbah radioaktif, sedangkan manfaat yang akan diperoleh dari penelitian ini adalah dengan diketahuinya aspek pada lingkungan maka dapat memperkuat pemangku kepentingan dalam memutuskan program klierens limbah radioaktif ke depannya. Pengelolaan limbah radioaktif menjadi tanggung jawab penghasil limbah dan Badan Pelaksana dalam hal ini adalah Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sesuai amanat Undang-Undang Nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran dan Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. Berdasarkan basis data yang ada di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR), bahwa limbah radioaktif yang dihasilkan dari pemanfaatan tenaga nuklir dari tahun ke tahun mengalami penambahan, sehingga apabila hal ini dibiarkan terus berlanjut tanpa adanya solusi yang berkelanjutan, maka suatu saat akan menjadi permasalahan baru bagi bangsa ini. Oleh karena itu diperlukan suatu terobosan untuk mengurangi volume limbah radioaktif tersebut, sehingga tidak menjadi beban bagi generasi yang akan datang.

Sumber limbah radioaktif yang dihasilkan dari pemanfaatan iptek nuklir, diantaranya berasal dari [5]:

- a. Pusat penelitian tenaga nuklir,
- b. Rumah sakit,
- c. Industri,
- d. Universitas dan lembaga penelitian,
- e. Dekontaminasi dan dekomisioning instalasi nuklir/fasilitas radiasi.

Badan tenaga atom internasional atau *International Atomic Energy Agency* (IAEA) telah memberikan suatu terobosan yang cukup baik terkait penanganan limbah radioaktif ini yaitu dengan adanya penerapan tingkat klierens limbah radioaktif. Tingkat klierens ini sudah dikenalkan oleh IAEA kepada negara anggotanya termasuk Indonesia sejak tahun 1996 [6].

Sumber radioaktif dan bahan/peralatan yang bersifat radioaktif dapat dihapus dari sistem pengawasan badan pengawas, dimana dampak radiologik yang diberikan setelah penghapusan dari sistem ini cukup rendah, karena tidak ada jaminan pengawasan lebih lanjut. Kriteria sumber radioaktif dan bahan/peralatan yang bersifat radioaktif dapat dibebaskan dari pengawasan badan pengawas adalah dosis efektif yang ditimbulkan dari sumber radioaktif tersebut tidak melebihi 1 mSv dalam satu tahun [7].

Limbah yang sudah masuk kategori klierens berarti limbah tersebut sudah aman bagi lingkungan, limbah tersebut dapat dilepas ke lingkungan apabila sudah mendapatkan rekomendasi/persetujuan dari badan pengawas. Surat rekomendasi ini sangat penting karena limbah ini sudah tidak akan dilakukan lagi pengawasan karena sudah dianggap aman untuk lingkungan. Klierens adalah pembebasan sumber radiasi pengion dari skema pengawasan badan pengawas untuk dibuang (*dispose*) atau digunakan kembali (*reuse*), sedangkan tingkat klierens adalah batas nilai konsentrasi aktivitas generik tiap radionuklida yang terkandung dalam limbah yang berlaku umum untuk eksklusif, eksemis dan klierens [8].

Klasifikasi limbah radioaktif menurut IAEA terdiri atas: limbah aktivitas tinggi (*high level waste*), limbah aktivitas rendah dan sedang (*low and intermediate level waste*) dan limbah yang dikecualikan (*exempt waste*) [9]. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif bahwa limbah radioaktif diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu:

1. Limbah tingkat rendah yaitu limbah yang berada di atas tingkat aman (tingkat klierens) tetapi di bawah tingkat sedang yang tidak memerlukan penahanan radiasi selama penanganan dalam keadaan normal dan pengangkutan,
2. Limbah tingkat sedang yaitu limbah radioaktif dengan aktivitas di atas tingkat rendah tetapi di bawah tingkat tinggi yang tidak memerlukan pendingin, dan memerlukan penahanan radiasi selama penanganan dalam keadaan normal dan pengangkutan,
3. Limbah tingkat tinggi yaitu limbah radioaktif dengan aktivitas di atas tingkat sedang, yang memerlukan pendingin dan penahanan radiasi dalam penanganan pada keadaan normal dan pengangkutan, termasuk bahan bakar nuklir bekas.

Tipe atau jenis limbah radioaktif yang dihasilkan dari pemanfaatan zat radioaktif dapat dibedakan berdasarkan sifat fisika, kimia dan biologinya, yaitu [10]:

- a. Limbah cair, adalah cairan yang telah terkontaminasi yang berasal dari sisa-sisa larutan untuk analisis, air cucian peralatan yang terkontaminasi, air dekontaminasi pekerja dan juga air pendingin reaktor,
- b. Limbah cair organik, adalah limbah radioaktif cair organik berasal dari kedokteran, industri, dan pusat penelitian,
- c. Limbah padat, terbagi menjadi 3 bagian yaitu limbah padat terkompaksi (*compactible*), limbah padat terbakar (*combustible/burnable*), dan limbah tidak

- terkompaksi (*noncompactible*) dan tidak terbakar (*noncombustible/nonburnable*).
- d. Limbah padat basah/semi cair, adalah limbah yang berupa resin penukar ion, lumpur hasil presipitasi, dan konsentrat hasil evaporasi,
 - e. Limbah biologi, adalah limbah yang berasal dari kegiatan penelitian yang menggunakan jaringan atau organ tubuh binatang percobaan yang terkontaminasi zat radioaktif.

Prinsip dasar dalam pengolahan limbah radioaktif adalah reduksi volume dan imobilisasi. Teknik reduksi volume untuk limbah radioaktif cair dilakukan dengan cara: evaporasi (penguapan), koagulasi (penggumpalan), flokulasi (pembentukan flok/penggumpalan) dan penukar ion, sedangkan reduksi volume untuk limbah radioaktif padat dilakukan dengan cara: kompaksi (penekanan), dan insenerasi (pembakaran). Setelah limbah radioaktif tersebut mencapai reduksi volume maksimal, kemudian dilakukan proses imobilisasi dengan matriks yang sesuai atau proses kondisioning yang tepat agar bentuk akhir hasil pengolahan dapat dipindahkan, dan disimpan secara mudah dan aman [11].

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah radioaktif padat pra-olah dalam drum 100 liter, palet kayu, sumber standar ^{60}Co dan ^{137}Cs , sedangkan alat yang digunakan adalah forklip, surveimeter, digiBASE, alat bantu naik turun drum 100 liter.

Tahapan kerja yang dilakukan pada penelitian ini adalah:

1. Identifikasi limbah radioaktif yang meliputi:
 - a. Pensortiran data limbah,
 - b. Pencarian sampel limbah radioaktif,
 - c. Pemilahan sampel limbah radioaktif,
 - d. Pemisahan sampel limbah radioaktif,
2. Pengukuran paparan radiasi sampel limbah radioaktif, sampel yang telah memenuhi kategori, diukur ulang paparan radiasinya pada permukaan dan jarak 1 meter dari drumnya, pengukuran menggunakan surveimeter FAG FH 40F2 yang sudah terkalibrasi. Paparan radiasi yang terukur dari limbahnya dikurangi dengan paparan radiasi latar (*background*), sehingga diperoleh paparan radiasi murni yang dimiliki oleh limbah tersebut,
3. Pencacahan sampel limbah radioaktif, yang bertujuan untuk mengidentifikasi konsentrasi aktivitas radionuklida yang terkandung di dalam limbah, dianalisis

menggunakan spektrometer gamma digiBASE. Detektor yang digunakan pada alat spektrometer gamma digiBASE adalah detektor NaI(Tl) (Natrium Iodida (Thalium)).

Pengumpulan data sekunder yang dibutuhkan sebagai parameter input RESRAD-OFFSITE code, kemudian dilanjutkan dengan simulasi data sekunder menggunakan RESRAD-OFFSITE code dan tahap terakhir adalah analisis terhadap keluaran hasil simulasi RESRAD-OFFSITE code untuk mengetahui dampak radiologis dari suatu fasilitas *landfill* limbah klierens sebagai dasar penilaian kelayakan fasilitas *landfill* tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah radioaktif yang akan dinyatakan klierens harus dilakukan tahapan identifikasi, hal ini untuk memastikan bahwa limbah yang dipilih telah benar-benar masuk dalam kategori limbah klierens. Limbah radioaktif yang dijadikan sampel pada penelitian ini mempunyai paparan radiasi lebih kecil atau sama dengan $0,114 \mu\text{Sv/jam}$, besaran ini diperoleh dari Nilai Batas Dosis (NBD) untuk anggota masyarakat yang telah ditetapkan oleh BAPETEN yaitu 1 mSv/tahun yang tertuang dalam Peraturan Kepala BAPETEN No 4 tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Nilai ini merupakan dosis tambahan yang diizinkan dari pemanfaatan tenaga nuklir ke lingkungan.

Sampel limbah radioaktif yang masuk kategori klierens kemudian dibawa ke tempat yang jauh dari sumber paparan radiasi lainnya, kemudian dilakukan pengukuran paparan radiasi ulang untuk masing-masing limbah tersebut. Hal ini untuk mengetahui kondisi paparan radiasi terkini dari limbah tersebut. Terdapat sebelas sampel limbah yang memenuhi kriteria yang telah ditetapkan, kesebelas limbah tersebut berasal dari internal BATAN yaitu Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR), Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka (PTRR), dan Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN). Data hasil pengukuran paparan radiasi sampel limbah tersebut dapat dilihat pada Sampel limbah yang sudah memenuhi kriteria, selanjutnya dicacah menggunakan spektrometer gamma digiBASE untuk mengetahui kandungan dari radionuklida yang ada di dalam limbah tersebut. Hasil pencacahan sampel limbah radioaktif tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1 Paparan Radiasi Sampel Limbah Radioaktif

No.	Asal Limbah	Paparan Radiasi (µSv/jam)		No. Drum
		Kontak	1 Meter	
1.	PTRR	0,04	0,02	15.1
2.	PTRR	0,06	0,03	15.2
3.	PTRR	0,08	0,04	15.6
4.	PTRR	0,06	0,02	15.7
5.	PTRR	0,05	0,01	16.8
6.	PTRR	0,04	0,01	25.5
7.	PTBBN	0,08	0,04	2146
8.	PTBBN	0,04	0,02	2160
9.	PTLR	0,04	0,01	25.4
10.	PTLR-IS1	0,04	0,02	2192
11.	PTLR	0,04	0,01	2193

Tabel 2 Hasil Pencacahan Limbah Radioaktif

No.	Asal Limbah	No. Palet	Massa (kg)	Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/g)	Kategori
1	PTRR	15.1	15	⁶⁰ Co	<MDC	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
2	PTRR	15.2	14	⁶⁰ Co	<MDC	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
3	PTRR	15.6	15	⁶⁰ Co	0,0657±0,0083	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
4	PTRR	15.7	14,9	⁶⁰ Co	0,2973±0,0079	Tidak Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
5	PTRR	16.8	15	⁶⁰ Co	<MDC	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
6	PTRR	25.5	13,9	⁶⁰ Co	<MDC	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
7	PTBBN	2146	26	⁶⁰ Co	<MDC	Tidak Klierens
				¹³⁷ Cs	0,5515±0,0040	
8	PTBBN	2160	28	⁶⁰ Co	<MDC	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
9	PTLR	25.4	11	⁶⁰ Co	<MDC	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	
10	PTLR	2192	12	⁶⁰ Co	0,0916±0,0104	Tidak Klierens
				¹³⁷ Cs	0,3319±0,0054	
11	PTLR	2193	14	⁶⁰ Co	<MDC	Klierens
				¹³⁷ Cs	<MDC	

Batasan: ¹³⁷Cs = 0,1 Bq/g; ⁶⁰Co = 0,1 Bq/g [12]

(Keterangan: MDC= Minimum Detectable Concentration)

Berdasarkan data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada sampel limbah radioaktif tersebut telah teridentifikasi kandungan radionuklida ¹³⁷Cs dan ⁶⁰Co. Sebelas drum limbah yang dianalisis terdapat delapan drum limbah yang mengandung radionuklida dengan konsentrasi aktivitasnya di bawah batasan klierens, limbah yang sudah masuk kategori klierens ini dapat

dikeluarkan dari kelompok limbah radioaktif/interim storage, sehingga hal ini dapat mengurangi jumlah populasi limbah yang ada di interim storage, dan apabila hal ini terus dilakukan secara berkelanjutan, maka jumlah limbah yang ada di interim storage berangsur akan berkurang.

Analisis konsentrasi aktivitas radionuklida yang terkandung di dalam limbah,

juga dapat dilakukan oleh semua penghasil limbah, dan dapat menerapkan tingkat klierens pada limbahnya. Setelah diperoleh hasil analisis dari limbah tersebut, kemudian mengajukan izin penetapan klierens ke BAPETEN. Berdasarkan data yang diajukan, BAPETEN akan melakukan verifikasi lapangan, setelah data tersebut sesuai dengan yang dipersyaratkan, maka Kepala BAPETEN akan mengeluarkan surat penetapan klierens.

Aspek lingkungan perlu diperhatikan dalam penerapan tingkat klierens limbah radioaktif, karena apabila limbah klierens ini dibuang ke lingkungan (*dispose*), maka lingkungan sebagai tujuan akhir yang akan terbebani oleh limbah tersebut, yang ujung-ujungnya akan sampai juga kepada mahluk hidup termasuk manusia.

Sebaran radionuklida di alam/lingkungan dapat diketahui dengan pendekatan menggunakan perangkat lunak *Residual Radioactivity (RESRAD)*. Perangkat lunak ini dapat memperkirakan sebaran radionuklida tersebut baik di tanah, badan air, maupun tanaman. Sebagai umpan/inputan bagi perangkat lunak ini adalah konsentrasi aktivitas radionuklida yang diperoleh dari hasil analisis sampel klierens limbah radioaktif menggunakan spektrometer gamma.

Mengacu pada Tabel 2, dimana limbah yang mempunyai aktivitas radionuklida tertinggi yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan dalam RESRAD. Konsentrasi aktivitas ^{60}Co tertinggi adalah sebesar $0,0657 \pm 0,0083 = 0,0740$ Bq/g, sedangkan konsentrasi aktivitas ^{137}Cs tertinggi adalah sebesar $0,5515 \pm 0,0040 = 0,5555$ Bq/g (dari data tidak klierens).

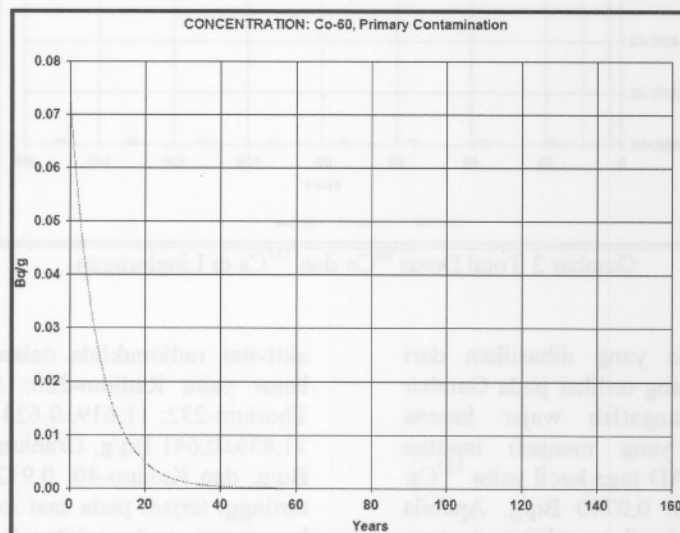
Untuk menghitung dosis menggunakan RESRAD maka tahapannya adalah menyiapkan data pendukung secara nyata, jika tidak tersedia dapat membuat asumsi-asumsi atau mengikuti data yang telah disediakan oleh RESRAD (*default*). Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data nyata, data asumsi dan data *default*.

Individu diasumsikan berdomisili secara permanen pada jarak 1.000 m dari lokasi pembuangan (*dispose*) limbah klierens. Pemenuhan kebutuhan air individu dirancang hanya berasal dari air tanah/sumur. Individu juga diasumsikan mengkonsumsi sayur, buah, daging, dan lain-lain yang hanya berasal dari lokasi setempat. Fasilitas *landfill* dirancang untuk menjadi tempat pembuangan (*dispose*) limbah klierens dengan dimensi lebar: 10 m, panjang: 10 m dan kedalaman: 10 m.

Hasil dari simulasi perangkat lunak RESRAD pada disain fasilitas pembuangan (*dispose*) limbah klierens tersebut ditampilkan pada Gambar 1 sampai Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa konsentrasi aktivitas ^{60}Co mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu. Pada tahun ke 40 atau delapan kali dari umur paronya (umur paro $^{60}\text{Co} = 5,2$ tahun) aktivitasnya sudah hampir mendekati nol. Konsentrasi ^{137}Cs pun mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu, konsentrasi aktivitas ^{137}Cs dapat dilihat pada Gambar 2.

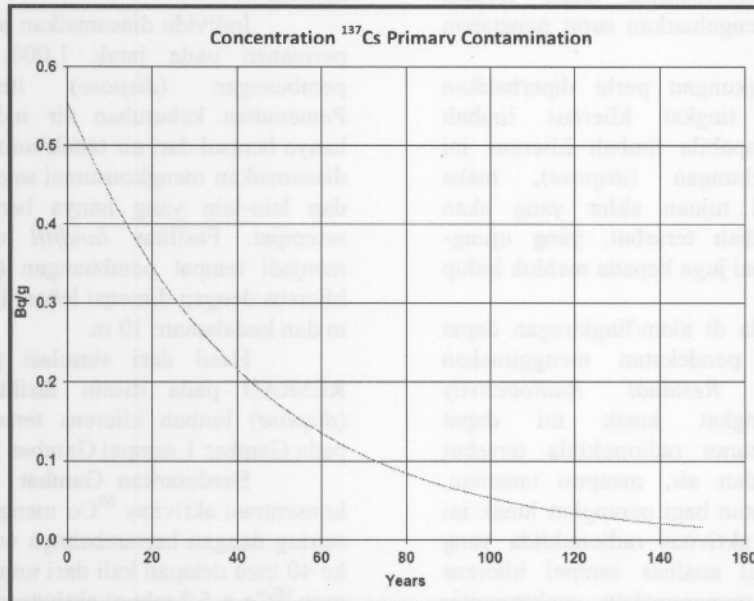
Berdasarkan pada Gambar 2 terlihat bahwa konsentrasi aktivitas ^{137}Cs mengalami penurunan juga seiring dengan bertambahnya waktu. Pada tahun ke 30, konsentrasinya menjadi separo dari aktivitas awal yaitu 0,27 Bq/g, hal ini sesuai dengan umur paro yang dimiliki oleh ^{137}Cs yaitu 30 tahun.



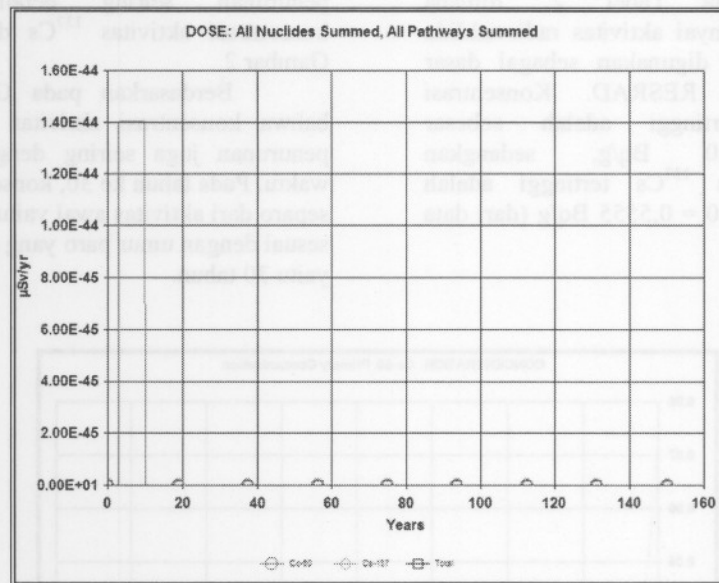
Gambar 1 Konsentrasi ^{60}Co di dalam *Landfill*

Total dosis efektif berdasarkan simulasi RESRAD yang diterima oleh individu dari seluruh jalur paparan akan semakin menurun dengan bertambahnya usia radionuklida di fasilitas pembuangan, total dosis tertinggi adalah $1,40 \times 10^{-44}$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Grafik total dosis ^{137}Cs

dan ^{60}Co yang diberikan pada lingkungan dapat dilihat pada Gambar 3. Besarnya dosis tersebut masih sangat jauh di bawah nilai pembatas dosis untuk masyarakat yang diperkenankan pada satu kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir, yaitu sebesar 0,3 mSv/tahun.



Gambar 2 Konsentrasi ^{137}Cs di Dalam Landfill



Gambar 3 Total Dosis ^{60}Co dan ^{137}Cs di Lingkungan

Kecilnya dosis yang dihasilkan dari hasil simulasi seperti yang terlihat pada Gambar 3 tersebut masih sangatlah wajar karena konsentrasi aktivitas yang menjadi inputan perangkat lunak RESRAD juga kecil yaitu ^{137}Cs : 0,5555 Bq/g dan ^{60}Co : 0,0740 Bq/g. Apabila dibandingkan dengan hasil penelitian tentang fasilitas landfill slag timah, dimana konsentrasi

aktivitas radionuklida dalam slag timah sangat besar yaitu Radium-226: $5,924 \pm 0,321$ (Bq/g), Thorium-232: $11,619 \pm 0,624$ Bq/g, Thorium-228: $11,839 \pm 0,641$ Bq/g, Uranium-238: $10,005 \pm 0,913$ Bq/g, dan Kalium-40: $0,912 \pm 0,061$ Bq/g. Dosis tertinggi terjadi pada saat landfill tersebut mulai beroperasi, yaitu sekitar 9,13 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, nilai dosis tersebut masih di bawah nilai pembatas

dosis yang diperkenankan pada satu kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir, yaitu sebesar 0,3 mSv/tahun [13]. Sehingga pantaslah apabila dosis limbah klierens yang dihasilkan sangat kecil.

Berdasarkan hasil simulasi perangkat lunak RESRAD menunjukkan bahwa limbah klierens yang dibuang ke lingkungan (*dispose*), tidak memberikan penambahan dosis pada air permukaan, air sumur, susu, daging, ikan maupun hasil pertanian penduduk yang berlokasi pada jarak 1 km dari daerah pembuangan, hal ini disebabkan karena konsentrasi aktivitas radionuklidanya sangat kecil.

Begitu juga dengan risiko kanker pada individu yang diakibatkan oleh paparan radiasi yang berasal dari fasilitas pembuangan (*dispose*) limbah klierens, hasil simulasi perangkat lunak RESRAD menunjukkan bahwa limbah klierens yang dibuang ke lingkungan tidak menyebabkan timbulnya risiko kanker. Hal ini disebabkan karena tidak ada dosis tambahan yang diterima oleh makanan maupun minuman yang dikonsumsi oleh penduduk sekitar dari limbah klierens tersebut.

Tidak adanya resiko kanker dari awal pengoperasian fasilitas *landfill* sampai ratusan tahun, disebabkan karena konsentrasi aktivitas yang dibuang ke lingkungan (*dispose*) sangat kecil yaitu $\leq 0,1$ Bq/g. Apabila dibandingkan dengan simulasi RESRAD pada fasilitas *landfill* slag timah yang konsentrasi aktivitas radionuklidanya besar saja risiko kankernya bernilai $6,8 \times 10^{-6}$, yang dapat diartikan bahwa kemungkinan paparan radiasi yang diterima individu dapat mengakibatkan kanker adalah $6,8 \times 10^{-6}$ kali dari keseluruhan kemungkinan penyebab kanker pada individu [13].

Berdasarkan hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa limbah radioaktif yang sudah klierens apabila dibuang ke lingkungan (*dispose*) tidak memberikan dampak negatif bagi makhluk hidup termasuk manusia. Dengan demikian penerapan tingkat klierens limbah radioaktif dapat menjadi solusi untuk mengurangi jumlah limbah radioaktif yang aktivitas/paparannya masuk kategori klierens.

KESIMPULAN

Berdasarkan penjabaran yang telah dijelaskan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa paparan radiasi dari limbah klierens tidak memberikan penambahan dosis di lingkungan baik pada tanah, air maupun tanaman. Dengan demikian, maka penerapan tingkat klierens limbah radioaktif tidak memberikan dampak yang signifikan pada aspek lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lusiyan, Y. & Syaifudin, M. (2004). Nuklir Mengabdikan Kemanusiaan, Buletin ALARA. Jakarta.
2. Wiyono dan Bunawas. (2007). Penentuan Aktivitas Limbah Radioaktif Padat Menggunakan Spektrometer Gamma *In-Situ*. Prosiding Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah V. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN. Serpong
3. Soemarwoto, O. (2001). Ekologi, Lingkungan Hidup dan Pembangunan. Jakarta: Djambatan
4. Rusdina, A. (2015). Membumikan Etika Lingkungan Bagi Upaya Membudayakan Pengelolaan Lingkungan Yang Bertanggung Jawab. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati. Bandung
5. Utara. (2005). Pengelolaan Limbah dan Aspek Keselamatan Radiasi. Pelatihan Petugas Proteksi Radiasi. Pusdiklat. BATAN. Jakarta.
6. European Commission. (2000). *Practical Use of the Concepts of Klierens and Exemption-Part 1. Guidance on General Klierens Levels for Practices*. Radiation Protection 122.
7. IAEA. (2004). *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*. RS-G-1.7. Vienna
8. Syahrir. (2006). Aplikasi Tingkat Klierens dalam Pengelolaan Limbah Radioaktif di BATAN. Seminar Keselamatan Nuklir. Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Jakarta.
9. IAEA. (1994). *Classification of Radioactive Waste*. Safety Series No. 111-G-1.1. Vienna
10. BATAN. (2010). Pengelolaan Limbah. Pelatihan Penyegaran Proteksi Radiasi Instalasi Nuklir, Pusdiklat. BATAN. Jakarta
11. Wati. (2013). Pengelolaan Berbagai Jenis Limbah Radioaktif dari Instalasi Produksi Radioisotop. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif. BATAN. Serpong
12. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 tahun 2012 tentang Tingkat Klierens
13. Alfian, M. (2011). Penggunaan Perangkat Lunak RESRAD-OFFSITE untuk Memperkirakan Risiko Radiologik Suatu Fasilitas *Landfill* Slag Timah. Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi Terapan 2011. Universitas Dian Nuswantoro. Semarang.