

PENGGUNAN PERANGKAT LUNAK RESRAD-OFFSITE UNTUK MEMPERKIRAKAN RESIKO RADIOLOGIK SUATU FASILITAS LANDFILL SLAG TIMAH

Moekhamad Alfian

Staf Pengkajian Bidang Industri dan Penelitian-BAPETEN, Jakarta
E-mail : m.alfian@bapeten .go.id

ABSTRAK

Kandungan radionuklida alam dalam limbah yang dihasilkan oleh industri strategis seperti peleburan timah, atau yang dikenal dengan TENORM telah menjadi isu global dan mendapat perhatian serius di tingkat nasional dan internasional dalam menemukan solusi yang tepat untuk pengelolaannya. Kuantitas yang besar dari TENORM telah menempatkan landfill sebagai salah satu opsi pengelolaannya. Makalah ini bertujuan mengetahui resiko radiologik dari suatu landfill slag timah menggunakan perangkat lunak RESRAD-OFFSITE. Metodologi penyusunan makalah dengan inventarisasi data sekunder, kajian literature, 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 9,13 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ yang sebagian besar dikontribusi melalui jalur paparan radiasi langsung dari airborne. Resiko individu akan menderita kanker akibat radiasi yang ditimbulkan oleh fasilitas landfill adalah 6,8. 10^{-6} . Dapat disimpulkan bahwa fasilitas landfill slag timah yang disimulasikan tidak memberikan dampak radiologik signifikan terhadap individu karena memenuhi kriteria pembatas dosis, yaitu kurang dari atau sama dengan 0,3 mSv/tahun.

Kata kunci : TENORM. Slag timah, RESRAD-OFFSITE

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan tenaga nuklir secara nyata telah dilindungi oleh undang-undang, yang didalamnya mengatur garis-garis besar nasional pemanfaatan tenaga nuklir di Indonesia dengan memprioritaskan keselamatan pekerja dan masyarakat serta perlindungan terhadap lingkungan hidup sebagai prioritas tertinggi. Itu berarti, bahwa pemanfaatan tenaga nuklir diharapkan mampu meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan mampu meningkatkan perekonomian nasional serta meningkatkan martabat bangsa. Kontroversi yang kental terhadap tenaga nuklir masih belum luntur sepanjang perjalanan sejarah pemanfaatannya di Indonesia maupun di dunia. Tragedi-tragedi nuklir yang pernah terjadi di dunia merupakan alasan pokok dalam menyikapi eksistensi pemanfaatan tenaga nuklir tersebut, termasuk kebijakan nasional terkait segmentasi pemanfaatan tenaga nuklir. Hal ini merupakan suatu kewajaran sebagai indikator instabilitas struktur masyarakat Indonesia yang berakibat mudah berkembangnya informasi yang tidak konstruktif dan tidak berbasis scientific. Perlu ada solusi ilmiah yang mampu menggeser pemahaman pragmatis tersebut. Berbagai upaya telah ditempuh untuk memperkenalkan tenaga nuklir sebagai salah satu teknologi masa kini yang tidak seharusnya didramatisir sebagai teknologi yang beresiko tinggi.

Pada dasarnya tenaga nuklir ada disekitar kita dan bagian dari kehidupan manusia dalam bentuk radionuklida alam, yang dibagi menjadi dua, yaitu primordial dan kosmogenik. Radionuklida primordial adalah radionuklida purba yang ada di bumi dan terjadinya berkaitan erat dengan terbentuknya bumi itu sendiri. Dari sudut radioekologi, radionuklida primordial yang penting adalah unsur-unsur berat dan mempunyai deret peluruhan yang panjang seperti deret uranium (U-238), aktinium (U-235) dan thorium (Th-232). Radionuklida kosmogenik adalah radionuklida yang dihasilkan dari reaksi antara sinar kosmik dengan inti-inti atom yang terdapat di atmosfer, tanah dan air. Umumnya, radionuklida ini memiliki konsentrasi yang sangat rendah di alam sehingga memerlukan prosedur yang rumit untuk sampling dan analisisnya. Secara rata-rata, manusia di muka bumi menerima paparan radiasi alam dari sinar kosmis dan permukaan bumi (terrestrial) sekitar 2400 μSv per tahun. Perbandingannya 35 persen dari paparan eksternal dan sisanya berasal dari paparan internal. Dari hasil kajian *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR), dosis eksternal dari sinar kosmik dan sumber radiasi yang ada di

permukaan tanah yang diterima oleh penduduk bumi adalah sekitar 840 μSv . Aktivitas manusia yang memanfaatkan sumber daya alam yang terkandung dalam perut bumi memungkinkan terangkatnya radionuklida alam tersebut. Situasi ini lebih lazim disebut dengan TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material*) adalah zat radioaktif alam yang dikarenakan kegiatan manusia atau proses teknologi terjadi peningkatan paparan potensial jika dibandingkan dengan keadaan awal. Berdasarkan fakta yang berkembang, bahwa sangat banyak dan beragam industri yang memanfaatkan sumber daya alam sebagai sumber daya usahanya dan memberikan kontribusi signifikan terhadap pendapatan nasional sehingga pemanfaatannya tidak akan pernah surut atau bahkan semakin meningkat. Diantara industri yang memanfaatkan sumber daya alam sebagai bahan baku *core* usahanya, antara lain: minyak dan gas bumi, tambang batu bara, industri fosfat, industri timah, dll.

Fenomena di atas dapat memberikan ilustrasi betapa banyaknya zat radioaktif di sekitar kita yang dapat memberikan paparan eksternal dan internal terhadap manusia sekitar yang diakibatkan oleh kegiatan diluar pemanfaatan tenaga nuklir sebagaimana yang diatur oleh undang-undang. Sementara itu pihak industri penghasil limbah belum banyak mengenal adanya kandungan radioaktif dari material limbahnya sehingga kepeduliannya terhadap aspek proteksi radiasi terhadap limbah yang dihasilkannya masih terbatas. Pada umumnya limbah industri pertambangan dan sejenisnya yang mengandung radioaktif mempunyai volume yang besar, praktek yang sudah berlangsung selama ini adalah menempatkan limbah tersebut disekitar lokasi, baik melalui pengkondisian atau tanpa pengkondisian. Salah satu bentuk pengkondisian limbah tersebut adalah dengan mengubur di dalam lapisan tanah (landfill).

Makalah ini akan menyajikan perkiraan resiko radiologik dari landfill TENORM hasil kegiatan peleburan timah menggunakan perangkat lunak RESRAD-OFFSITE. Dari hasil simulasi diharapkan dapat memberikan informasi tentang perkiraan dosis yang diterima oleh masyarakat di sekitar fasilitas tersebut dan mengetahui kemampuan perangkat lunak RESRAD-OFFSITE sebagai alat bantu dalam memperkirakan resiko radiologik fasilitas landfill suatu TENORM.

2. TEORI

2.1. Konsentrasi Aktivitas Radionuklida Alam

Keberadaan radionuklida alam (NORM) dengan konsentrasi tinggi dapat terjadi pada beberapa tahap operasi, yaitu batuan mentah, tumpukan mineral, produk antara, produk akhir dan limbah.

Data terbaru konsentrasi aktivitas menunjukkan bahwa sebagian besar kegiatan produksi berbahan baku dari alam mengandung konsentrasi radionuklida dibawah 1 Bq/gram. Menurut standar internasional dan peraturan perundang-undangan nasional nilai konsentrasi radionuklida alam kurang dari atau sama dengan 1 Bq/gram tidak memerlukan pengawasan. Nilai konsentrasi aktivitas melebihi 1 Bq/gram biasanya terjadi pada bahan baku bervolume moderate, material yang termasuk dalam kategori ini antara lain tumpukan pasir zircon dan batuan posfat, lumpur hasil pengolahan air, lumpur merah hasil pemrosesan bauksit, padatan dalam lumpur hasil produksi titanium oksida, ampas produksi pospor termal, dan dari peleburan timah serta produk akhir dari pospat, fertilizer, refractory zircon, pembuatan briket dan residu NORM. Disamping itu, beberapa material dilaporkan mempunyai tingkat konsentrasi aktivitas tinggi dan potensial menimbulkan dosis paparan yang signifikan, yaitu:

1. Tumpukan bahan baku: material yang termasuk kategori ini adalah mineral pyrochlore (produksi dari ferro-niobium) dengan konsentrasi aktivitas ^{232}Th berkisar 7-80 Bq/gram.
2. Limbah: konsentrasi aktivitas tertinggi ditemukan dalam limbah, khususnya dalam scale (kerak) dari proses kimia basah dan dalam presipitator debu hasil pemrosesan pada temperatur tinggi. Konsentrasi ^{226}Ra dalam kerak dari pemrosesan batuan pospat biasanya pada nilai konsentrasi aktivitas 10 Bq/gram namun bisa mencapai 1500 Bq/gram sedangkan konsentrasi aktivitas ^{226}Ra dalam kerak pada pipa industri minyak dan gas nilainya dari rendah hingga mencapai 15000 Bq/gram. Konsentrasi ^{226}Ra pada industri tambang batu bara yaitu pada bagian kerak dan kolam sedimen dapat mencapai 200 Bq/gram sebagai akibat aliran air yang mengandung radium masuk ke pertambangan. Konsentrasi ^{210}Pb dalam debu presipitator dari produksi fospor thermal dapat mencapai 1000 Bq/gram sedangkan konsentrasi ^{210}Pb atau ^{210}Po dalam debu dari proses temperatur tinggi (peleburan besi dan produksi refractori zircon).
3. Produk: Produk dalam bentuk filamen tungsten and batangan las mengandung ^{232}Th tinggi.
4. Kandungan ^{232}Th dalam bahan serpihan untuk pembakaran mencapai 65 Bq/g⁽¹⁾.

2.2. TENORM pada Industri Timah

Produksi timah dimulai dari tahap penambangan timah yang terdiri dari penambangan lepas pantai (*off shore*) dan penambangan darat. Hasil eksplorasi selanjutnya diproses dengan cara pencucian untuk meningkatkan kadar bijih timah. Melalui proses tersebut bijih timah dapat ditingkatkan kadar (*grade*) Sn-nya dari 20 - 30% Sn menjadi 72% Sn untuk memenuhi persyaratan peleburan. Proses selanjutnya adalah pemisahan biji timah dari mineral ikutan lainnya dan ditingkatkan kadarnya hingga mencapai persyaratan peleburan yaitu minimal 70-72% Sn. Proses peleburan merupakan proses melebur bijih timah menjadi logam timah. Untuk mendapatkan logam timah dengan kualitas yang lebih tinggi maka harus dilakukan proses pemurnian terlebih dahulu dengan menggunakan suatu alat pemurnian yang disebut *crystallizer*. Produk akhir yang dihasilkan berupa logam timah dalam bentuk balok atau batangan.

Pada kegiatan pencucian timah akan dihasilkan limbah dalam bentuk monazite dan ilmenite sedangkan pada kegiatan peleburan timah akan dihasilkan limbah slag. Radionuklida alam yang terkandung pada ketiga material tersebut berasal dari deret Uranium dan Thorium. Kadar terbesar pada slag timah dengan kadar uranium mencapai 41,07 ppm dan kadar thorium 18,130% sedangkan kadar Uranium pada ilmenit dan Monazite adalah 19,55 ppm dan 17, 21 ppm. Kadar thorium dalam ilmenite sebesar 0,023% dan dalam monazite sekitar 0,026%. Terdapat empat radionuklida utama yang terkandung dalam slag timah, yaitu: Ra-226, Th-228, Th-232 dan K-40 dengan nilai konsentrasi aktivitas bervariasi sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1: Jenis dan Konsentrasi Aktivitas Radionuklida dalam Slag Timah

No.	Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/Kg)
1.	Radium-226	5924±321
2.	Thorium-232	11619±624
3.	Thorium-228	11839±641
4.	Uranium-238	10005±913
5.	Kalium-40	912±61

2.3. Penempatan Akhir TENORM

Beragamnya jumlah dan jenis TENORM yang dihasilkan industri akan memerlukan pilihan penempatan akhir yang memberikan keselamatan dan keamanan jangka panjang sesuai dengan karakteristik TENORM, yaitu mengandung radionuklida berumur paro panjang. Kriteria penempatan akhir TENORM didasarkan pada beberapa pertimbangan, antara lain: sifat kimia dan fisika TENORM, konsentrasi radionuklida dan sifat geologi lokasi penempatan akhir. Terdapat empat jenis penempatan akhir TENORM, yaitu:

Kanisterisasi dan abandon well disposal

Metode penempatan akhir dengan kanisterisasi dan abandon well disposal sesuai untuk limbah TENORM yang bersifat diffuse dan peralatan terkontaminasi dengan tingkat konsentrasi aktivitas tinggi, misalnya: kerak, tanah, lumpur kering, filter, dll. Pada disposal ini, TENORM yang akan didisposal dienkapsulasi dengan sebuah tabung (kanister) kemudian dimasukkan kedalam lubang sumuran sampai pada posisi dibawah formasi air tanah dan ditutup dengan semen.

Sumur injeksi

Pada disposal jenis ini, limbah padat, kerak atau lumpur diencerkan dan diinjeksikan menggunakan tekanan kedalam sumur disposal pada kedalaman dibawah formasi airtanah. Formasi permeable dilapisi oleh lapisan geologis. Pada tekanan peninjeksian yang tinggi, patahan sepanjang lapisan permeable menyebabkan limbah yang diinjeksikan masuk kedalam formasi patahan tersebut. Setelah limbah dimasukkan, sumur ditutup dengan semen untuk mencegah aliran balik dari lumpur limbah dan mencegah pengambilan limbah oleh kegiatan manusia (intrusi).

Salt cavern disposal

Salt cavern adalah ruangan besar di bawah tanah yang dibentuk dalam lapisan formasi garam dengan permeabilitas rendah. Disposal ini memberikan isolasi yang sempurna terhadap limbah dengan kuantitas besar untuk jangka waktu yang lama atau lebih lama dari umur geologi tempat tersebut. Disposal ini sesuai untuk penempatan akhir abadi limbah(>100 000 tahun) dengan sifat kimia dan fisika yang sesuai.

Landfill

Landfill merupakan penempatan limbah TENORM seperti tanah atau peralatan terkontaminasi yang wadahnya sesuai ditempatkan dalam fasilitas landfill. Jenis disposal ini digunakan pada apabila tidak ada pemanfaatan lain di lokasi landfill, terjaminnya fasilitas dari intrusi oleh manusia dan ketersediaan dari fasilitas.

Dalam fasilitas landfill terdapat sistem penghalang linier dan penutup. Sistem linier, pada umumnya merupakan tanah liat yang kompak atau kombinasi dari liat dan material sintetik. Sistem penutup merupakan liat kompak dan sub soil. Landfill dapat pula dilengkapi dengan sistem pengelolaan gas dan lindi. Kualitas sistem penutup sangat menentukan dalam memitigasi paparan radiasi dari bawah tanah dan paparan gas radon. Pemantauan terhadap air permukaan dan air tanah diperlukan pada tahap operasional dan pasca operasional untuk mengetahui keterpaduan antara TENORM dengan fasilitas landfill. Fasilitas landfill harus dirancang sedemikian rupa sehingga paparan radiasi terhadap pekerja dan penduduk sekitar dapat diminimalisasi. Paparan radiasi yang ditimbulkan dapat berasal dari iradiasi dari lapisan tanah, inhalasi partikulat, inhalasi gas radon dan air tanah⁽²⁾.

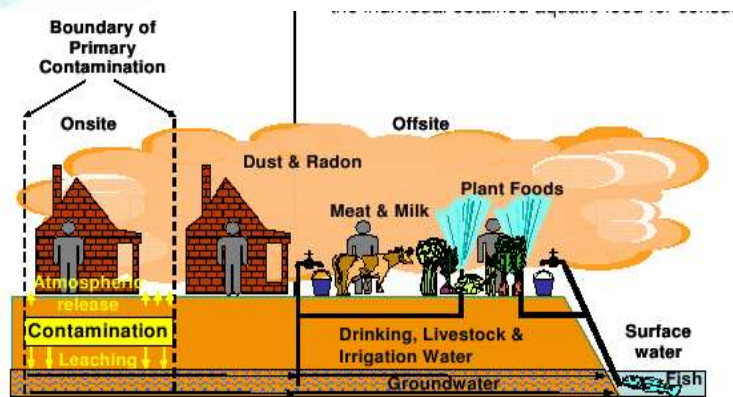
2.4. RESRAD-OFFSITE

RESRAD-OFFSITE code merupakan pengembangan dari RESRAD code sebelumnya yang dirancang untuk mengevaluasi dosis radiologik yang diterima oleh individu setempat (*onsite*) akibat paparan yang ditimbulkan oleh RESidual RADioactive yang terkandung dalam tanah. Untuk membedakan dengan code dikeluarkan sebelumnya, maka RESRAD hasil pengembangan disebut RESRAD-OFFSITE dan RESRAD yang sebelumnya disebut RESRAD (*onsite*).

RESRAD-OFFSITE code pertama kali dibuat dengan menambahkan submodel akumulasi radionuklida dalam tanah diluar kawasan (*offsite*) (BIOMOVS II 1995) pada basic RESRAD (*onsite*) code dan dengan memasukkan sub model adveksi-dispersi transpor air tanah (BIOMOVS II 1996). Selain itu, RESRAD-OFFSITE code mempunyai kemampuan menerima deretan waktu lepasan radionuklida dari tanah yang terkontaminasi. Sub model adveksi-dispersi transport air tanah juga telah dirancang untuk memperkirakan transport radionuklida anak selama proses transport radionuklida induk. RESRAD-OFFSITE code juga memuat sub model transport atmosfer dan air permukaan.

RESRAD-OFFSITE computer code juga mengevaluasi dosis radiologik dan resiko kanker terhadap individu yang terpapar radiasi ketika berada pada atau di luar kawasan yang tanahnya terkontaminasi radioaktif (*primer contamination*) yang merupakan sumber pelepasan radionuklida dari semua jalur pelepasan yang dimodelkan. Primer contamination tersebut diasumsikan sebagai sebuah lapisan tanah. Jalur pelepasan radionuklida dari primer contamination meliputi atmosfer, air permukaan dan air tanah.

RESRAD code juga memperhitungkan perpindahan radionuklida dari sumber kontaminan ke area pertanian, padang rumput, permukiman, sumur dan badan air permukaan serta akumulasi radionuklida pada kompartemen tersebut termasuk kontribusi radionuklida dari sumber air ke lokasi yang dievaluasi sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1⁽³⁾.



Gambar 1. Jalur Paparan Radiasi yang digunakan dalam RESRAD-OFFSITE Code

3. METODE

Penyusunan makalah dilaksanakan melalui rangkaian tahapan berikut: pengumpulan data sekunder, yang meliputi data kandungan radionuklida dalam slag timah, data geohidrologi dan data meteorologi yang dibutuhkan sebagai parameter input RESRAD-OFFSITE code, inventarisasi dan pemahaman literature terkait TENORM dan RESRAD-OFFSITE code yang 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 slag timah sebagai dasar penilaian kelayakan fasilitas landfill tersebut.

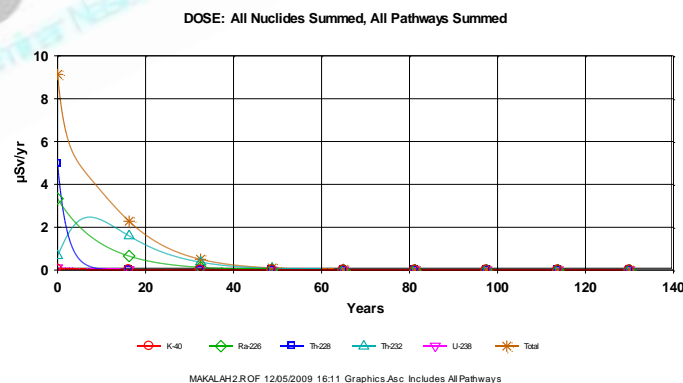
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Estimasi resiko radiologik terhadap suatu fasilitas landfill slag timah dilakukan dengan pendekatan konservatif dibandingkan situasi nyata dalam praktek sehingga dapat memberikan kepastian kelayakan suatu fasilitas landfill. Pendekatan konservatif dilakukan dengan memasukkan nilai parameter input sedemikian rupa sehingga efek radiologis yang ditimbulkan terhadap suatu individu adalah yang paling maksimum.

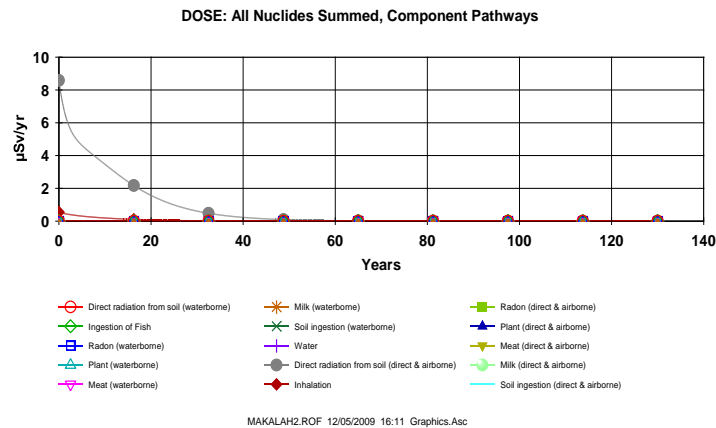
Individu diasumsikan berdomisili secara permanen pada jarak 200 m dari lokasi landfill meskipun pada kenyataannya lokasi industri penghasil slag timah berada pada radius beberapa kilometer dari lokasi timbunan slag timah/fasilitas landfill. Pemenuhan kebutuhan air individu dirancang hanya berasal dari air tanah/sumur dengan laju konsumsi yang wajar sesuai dengan nilai yang ditetapkan dalam RESRAD-OFFSITE code. Individu juga diasumsikan mengkonsumsi sayur, buah, daging, dll yang hanya berasal dari lokasi setempat. Fasilitas landfill dirancang dengan dimensi 35 m x 35 m x 4 m dan tanpa penutup untuk maksud memperbesar luas permukaan paparan radiasi sehingga mempertinggi probabilitistik radiasi yang diterima oleh individu. Untuk data meteorologi, dikondisikan pada nilai kecepatan angin tertinggi dengan frekuensi arah angin menuju ke individu dirancang paling dominan.

Hasil simulasi terhadap disain fasilitas landfill slag timah sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 2, menunjukkan bahwa dosis efektif yang diterima oleh individu dari seluruh jalur paparan semakin menurun dengan bertambahnya usia landfill. Dosis tertinggi terjadi pada saat landfill tersebut mulai beroperasi, yaitu sekitar 9,13 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Nilai dosis tersebut dibawah nilai pembatas dosis yang diperkenankan terhadap satu kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir, yaitu sebesar 0,3 mSv/tahun.

Telaahan terhadap dosis radiasi total yang diterima individu harus melihat dengan trend dosis radiasi yang diterima individu untuk setiap jalur paparan sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 3 yang memiliki trend grafik identik dengan Gambar 2.



Gambar 2. Dosis Efektif Individu Dari Semua Jalur Paparan



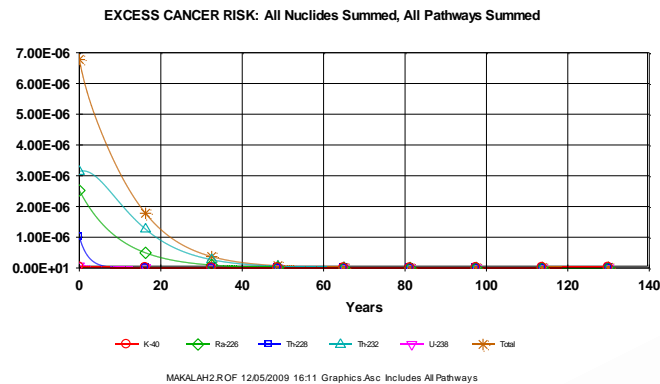
Gambar 3. Dosis Efektif Individu Untuk Setiap Jalur Paparan

Gambar 3 memperlihatkan bahwa jalur paparan radiasi langsung melalui tanah dan airborne memberikan kontribusi tertinggi terhadap dosis yang diterima individu karena jalur paparan ini adalah jalur paparan yang paling mudah bagi radionuklida untuk mencapai individu dibandingkan jalur paparan lain seperti injeksi melalui rantai makanan yang jalur paparannya lebih rumit dan kompleks sehingga jalur paparan melalui radiasi langsung dapat segera memberikan kontribusi terhadap dosis efektif individu sejak landfill yang mengandung slag timah. Pada kasus ini, dapat dipastikan bahwa radiasi langsung melalui airborne adalah yang memberikan kontribusi terhadap dosis karena individu berdomisili di luar kawasan (lokasi landfill) sehingga sudah pasti individu tidak mendapatkan paparan dari tanah landfill dan kecepatan serta arah angin yang dimasukkan dalam parameter input memegang peran terhadap waktu tempuh airborne dapat segera mencapai individu. Dosis efektif individu semakin menurun dengan bertambahnya usia landfill antara lain disebabkan oleh konsentrasi radionuklida karena peluruhan, pengaruh alam seperti penguapan, angin, presipitasi, pelindian, terikat dalam organ individu yang nantinya hilang sebagai hasil dari metabolisme individu yang bergantung dari umur biologi radionuklida dan terikat pada kompartemen lingkungan lain.

Dari lima radionuklida yang terkandung dalam slag timah, Th-232 memberikan model kontribusi dosis yang berbeda dibandingkan empat radionuklida lain. Kontribusi Th-232 terhadap dosis individu mengalami peningkatan dibandingkan tahun awal pengoperasian landfill yang kemudian menurun setelah pengoperasian landfill mencapai usia sekitar 8 tahun. Perbedaan tersebut disebabkan Th-232 mempunyai konstanta peluruhan yang paling kecil, yaitu $1,564 \cdot 10^{-8}$ /detik yang berarti bahwa fraksi Th-232 yang mengalami peluruhan menjadi nuklida turunannya lebih kecil dibandingkan empat radionuklida lain.

Resiko kanker terhadap individu yang diakibatkan oleh paparan radiasi yang berasal dari fasilitas landfill slag timah semakin berkurang dengan semakin bertambahnya usia fasilitas atau sebanding dengan berkurangnya dosis yang diterima oleh individu. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa resiko kanker pada awal pengoperasian fasilitas landfill bernilai $6,8 \cdot 10^{-6}$, yang dapat diartikan bahwa kemungkinan paparan

radiasi yang diterima individu dapat mengakibatkan kanker adalah $6,8 \cdot 10^{-6}$ kali dari keseluruhan kemungkinan penyebab kanker terhadap individu.



Gambar 4. Kemungkinan Resiko Kanker Akibat Paparan Radiasi dari Landfill Slag Timah

5. KESIMPULAN

1. Dosis efektif individu akibat paparan radiasi yang ditimbulkan oleh fasilitas landfill slag timah yang disimulasikan adalah $9,13 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$ dan dibawah nilai pembatas dosis yaitu $0,3 \text{ mSv}/\text{tahun}$ sehingga keberadaan fasilitas landfill tersebut tidak memberikan dampak berarti terhadap individu.
2. Jalur paparan radiasi langsung melalui tanah dan airborne merupakan jalur paparan yang memberikan kontribusi terbesar terhadap dosis efektif individu karena jalur paparan ini memiliki akses yang lebih cepat untuk sampai ke individu.
3. Dosis efektif individu mengalami penurunan sebanding dengan bertambahnya waktu yang diakibatkan radionuklida yang terkandung dalam slag timah mengalami peluruhan, pengaruh alam seperti penguapan, angin, presipitasi, pelindian, terikat dalam organ individu yang nantinya hilang sebagai hasil dari metabolisme individu yang bergantung dari umur biologi radionuklida dan terikat pada kompartemen lingkungan lain.
4. Perangkat lunak Resrad Offsite dapat digunakan sebagai alat bantu bagi penghasil TENORM dalam menentukan disain yang tepat dan membantu BAPETEN dalam memberikan penilaian kelayakan fasilitas landfill dengan dosis efektif individu yang diterima oleh pekerja dan masyarakat sebagai indikatornya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IAEA, TECDOC 1472, Naturally occurring radioactive materials (NORM IV) Proceedings of an international conference held in Szczyrk, Poland, 17–21 May 2004, 2005
- [2] NORM Waste Management Technical Committee, Technical Report on the Management of Naturally Occuring Radioactive Material (NORM) in Waste, February, 2005
- [3] C-Yu, User's Manual for RESRAD-OFFSITE, Version 2, Argonne National Laboratory, Juni, 2007.IAEA, SRS-19, Generic Models for Use in the Assessing the Impact of Discharge of Radioactive Substance to the Environment, Vienna, 2001.
- [4] IAEA, SRS-19, Generic Models for Use in the Assessing the Impact of Discharge of Radioactive Substance to the Environment, Vienna, 2001