

## DAFTAR ISI

Kata Pengantar .....	i
Susunan Tim Editor .....	ii
Susunan Panitia .....	iii
Daftar Isi .....	iv
1 Pengembangan Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif Pra-Disposal : Imobilisasi Limbah Radioaktif Uranium Menggunakan Abu Batubara Sebagai Bahan Matriks <i>Synroc</i> .. <b>Gunandjar, Yuli Purwanto</b>	1
2 Pengelolaan Limbah Cair Dengan Pendekatan Konsep Eko-Efisiensi: Analisis Hubungan Antara Penerapan Program <i>Cleaner Production</i> Di Area Produksi Dengan Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) .....	14
<b>Wahyu Wikandari, Roekmijati Widaningroem Soemantojo, Tri Edhi Budhi Soesilo</b>	
3 Pengolahan Limbah <i>Methylen Blue</i> Secara Fotokatalisis Dengan TiO <sub>2</sub> Dimodifikasi Fe Dan Zeolit .....	29
<b>Agus Salim Afrozi, Rahmat Salam, Auring R, Asep Nana S</b>	
4. Kinerja Konsorsium Bakteri Dari Sungai Opak Yogyakarta Dalam Reduksi Nitrat Dengan Sumber Karbon Yang Berbeda .....	37
<b>Hanies Ambarsari, Miswanto</b>	
5. Pengelolaan Limbah Radioaktif Hasil Dekontaminasi Di Instalasi Produksi Radioisotop Paska Berhenti Operasi .....	45
<b>Suhaedi Muhammad, Nazaroh, Rr. Djarwanti, RPS</b>	
6. Pemanfaatan Limbah Oli Bekas Sebagai Bahan Bakar Pembantu Peledakan (ANFO) Pada Kegiatan Pertambangan Batubara (Kasus Pemanfaatan Limbah Oli Bekas di PT. JMB Group) .....	52
<b>Danang Widiyanto</b>	
7. Sistem Pemurnian Helium Pada Reaktor Daya Experimental (RDE) Tipe HTR-10.....	60
<b>Aisyah, Yuli Purwanto</b>	
8. Pengolahan Limbah Daun Jati Kering Dari Desa Leyangan, Ungaran Menjadi Pulp Kering Dengan Proses Soda .....	68
<b>Linda Kusumaningrum, Heny Kusumayanti</b>	
9 Pembuatan Zat Warna Alami Dari Buah Mangrove <i>Spesies Rhizophora Stylosa</i> Sebagai Pewarna Batik Ramah Lingkungan Dalam Skala Pilot Plan .....	76
<b>Paryanto, Wusana Agung Wibowo, Moch Helmy Aditya</b>	
10 Konsentrasi Faktor Pada Bioakumulasi Plutonium Oleh Siput Macan ( <i>Babylonia Spirata L.</i> ) Di Perairan Teluk Jakarta .....	82
<b>Murdahayu Makmur , Muhammad Qowi Fikri, Defri Yona, Syarifah Hikmah JS</b>	
11. Pengaruh Koefisien Distribusi <sup>137</sup> Cs Pada Keselamatan Calon Tapak Fasilitas Disposasi Limbah Radioaktif .....	93
<b>Budi Setiawan, Dadang Suganda</b>	
12. Kajian Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Beberapa Adsorben .....	105
<b>Mirawaty, Gustri Nurliati</b>	

## PENGARUH KOEFISIEN DISTRIBUSI $^{137}\text{Cs}$ PADA KESELAMATAN CALON TAPAK FASILITAS DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF

Budi SETIAWAN, Dadang SUGANDA

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310  
E-mail: bravo@batan.go.id

### ABSTRAK

**PENGARUH KOEFISIEN DISTRIBUSI  $^{137}\text{Cs}$  PADA KESELAMATAN CALON TAPAK FASILITAS DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF.** Nilai koefisien distribusi (Kd) adalah besaran yang mewakili proses kimia-fisika yang terjadi saat radionuklida kontak dengan bahan alam. Besarnya nilai Kd mengindikasikan besarnya *loading factor* bahan alam terhadap adanya radionuklida, sehingga akan meminimalkan besarnya radionuklida dapat terdispersi ke lingkungan. Bahan alam seperti tanah lokasi digunakan sebagai sistem penghalang alami pada fasilitas disposal limbah radioaktif. Besarnya nilai Kd dari tanah lokasi dapat menyebabkan terhambatnya dispersi radionuklida ke lingkungan, dan akan menentukan unjuk kerja sistem penghalang alami yang menunjukkan tingkat keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif. Perangkat lunak PRESTO digunakan bertujuan untuk mempelajari keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif dengan melihat jalur luaran  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai Kd  $^{137}\text{Cs}$  pada tanah lokasi memberikan pengaruh yang besar pada tingkat keselamatan dari suatu fasilitas disposal limbah radioaktif.

Kata Kunci : Kd, tanah lokasi,  $^{137}\text{Cs}$ , fasilitas disposal, keselamatan lingkungan.

### ABSTRACT

**EFFECTS OF DISTRIBUTION COEFFICIENT OF  $^{137}\text{Cs}$  ON THE SAFETY OF SITE CANDIDATE OF RADWASTE DISPOSAL FACILITY.** Distribution coefficient value is a representative number of chemical-physical processes in a contact of radionuclides with natural materials. The number of Kd values indicated the loading factor of natural materials to the existence of radionuclide, and it would minimize the number of radionuclides dispersed into the environment. Natural material such as site's soil is used as a natural barrier system on the radioactive waste disposal facility. The high number of Kd value of site's soil to radionuclide may retard the dispersion of radionuclides into the environment, and it will determine the performance of natural barrier system to indicate the level of safety of the candidate site of radioactive waste disposal facility. PRESTO software was used to study the safety of candidate site of disposal facility by observing  $^{137}\text{Cs}$  pathways to environment. Results showed that Kd value of  $^{137}\text{Cs}$  to site soil has been significantly effects on the safety level of a radioactive waste disposal facility.

Keywords : Kd, site's soil,  $^{137}\text{Cs}$ , disposal facility, environment safety

### PENDAHULUAN

Radionuklida seperti  $^{137}\text{Cs}$  telah mendominasi inventori limbah radioaktif (LRA) tingkat rendah-sedang, dengan waktu paro ( $t_{1/2}$ ) yang panjang ~30 tahun. Selain radionuklida itu radionuklida ini mempunyai tingkat kelarutan di media air/air tanah yang tinggi, serta mempunyai kesamaan sifat kimia dengan ion K sehingga sangat mudah berinteraksi dengan organisme yang ada di akuatik maupun di teresterial [1-5]. Apabila masuk ke dalam tubuh manusia melalui rantai makanan, radionuklida ini akan berkumpul pada jaringan lunak seperti otot [4] yang dapat menyebabkan peningkatan resiko kanker bagi yang terkena [6,7]. Sehingga keberadaan  $^{137}\text{Cs}$  pada suatu fasilitas disposal LRA perlu dipelajari tingkat serapnya pada bahan alami seperti tanah

lokasi atau tanah calon tapak fasilitas disposal LRA. Dengan mempelajari serapan  $^{137}\text{Cs}$  pada bahan alam akan dapat dipelajari cara mengontrol dispersi  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan.

Besarnya volume limbah untuk tingkat rendah-sedang yang dihasilkan menyebabkan fasilitas disposal jenis *near surface disposal* (NSD) lebih diprioritaskan untuk lebih diperhatikan. Dalam sistem disposal NSD, bahan alam dimanfaatkan sebagai sistem penghalang berlapis (*multibarrier system*) yang terdiri dari sistem penghalang alami dan sistem penghalang buatan dari fasilitas disposal LRA [8]. Sistem penghalang ini dapat tersusun dari tanah calon lokasi, bahan alam lain yang mempunyai kemampuan serap yang baik seperti bentonit, kaolin atau bahan alam yang mampu meluluskan

air dengan baik seperti pasir kuarsa [9-12]. Bahan-bahan alam seperti inilah yang sering dipakai pada fasilitas disposal LRA jenis NSD di dunia.

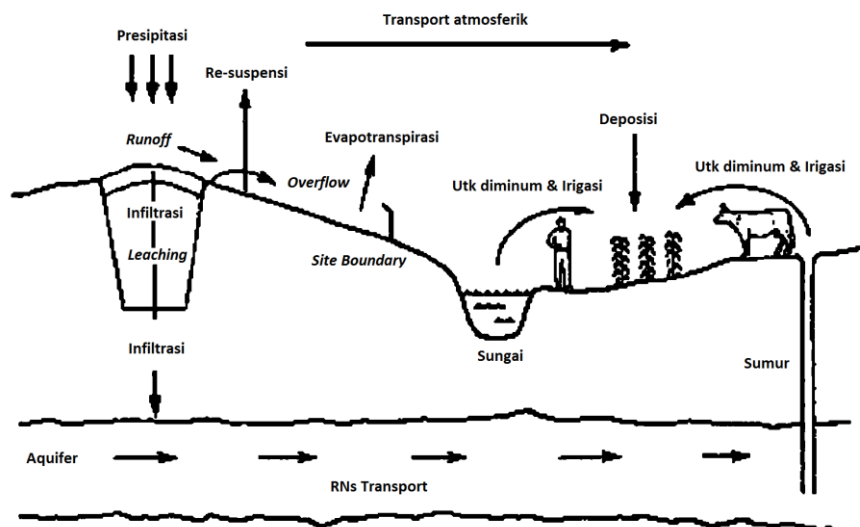
Bahan-bahan alam tersebut digunakan untuk mengisolasi radionuklida seperti  $^{137}\text{Cs}$  yang ada pada paket limbah agar dapat dikontrol, sehingga dapat menghambat tersebarnya  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan. Terbatasnya sebaran radionuklida ke lingkungan menunjukkan kemampuan unjuk kerja dari sistem disposal LRA. Untuk mengetahui unjuk kerja keselamatan fasilitas disposal maka perlu dilakukan penyelidikan kemampuan isolasi dari sistem disposal tersebut, salah satunya adalah menentukan kemampuan serap radionuklida oleh tanah lokasi dimana disposal LRA tersebut direncanakan [13]. Indikator untuk mengetahui kemampuan serap radionuklida ke bermacam bahan alam dapat diketahui dari nilai koefisien distribusi/(Kd)-nya, dimana nilai Kd merupakan ratio antara banyaknya radionuklida yang terserap di bahan alam dibandingkan dengan banyaknya radionuklida yang tersisa di larutan [14].

Nilai Kd yang tinggi pada bahan alam seperti tanah lokasi akan menyebabkan banyak  $^{137}\text{Cs}$  terserap pada tanah lokasi,  $^{137}\text{Cs}$  akan banyak terikat pada tanah lokasi dan sedikit lepas ke lingkungan sehingga lepasnya  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan dapat terkontrol dengan baik demikian pula bila sebaliknya. Nilai Kd yang tinggi juga akan mengindikasikan *loading factor* yang tinggi dan tingkat keselamatan yang tinggi, sehingga dengan tingginya Kd pada tanah calon lokasi fasilitas disposal akan membuat sistem disposal yang direncanakan menjadi lebih selamat dan ekonomis. Sebaliknya bila nilai Kd rendah yang diperoleh untuk tanah lokasi, maka fasilitas disposal tersebut perlu dikompensasi dengan sistem penghalang buatan dengan kemampuan kontrol air tanah yang lebih baik agar tingkat keselamatannya tetap tinggi.

$^{137}\text{Cs}$  berpotensi sebagai sumber paparan eksterna maupun interna terhadap pekerja dan lingkungan biosfer. Baik pada saat fasilitas disposal tersebut beroperasi maupun

pada tahap pasca penutupan. Pada saat beroperasi pekerja radiasi dapat melakukan kontak dengan paket limbah secara eksternal, atau secara internal melalui jalur injeksi dan inhalasi dari debu udara yang terkontaminasi. Sedangkan cemaran  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan dapat melalui media air tanah. Kemudian melalui jalur rantai makanan  $^{137}\text{Cs}$  dapat sampai ke manusia yang ada di sekitar fasilitas disposal LRA. Besarnya nilai  $^{137}\text{Cs}$  yang terdispersi melalui jalur paparan akan mengindikasikan kondisi keselamatan di lingkungan sekitar fasilitas disposal LRA. Semakin besar konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  dapat ditemukan pada jalur luaran (*pathway*), maka kondisi keselamatan yang diperoleh menjadi rendah. Hal ini menunjukkan bahwa tanah lokasi tersebut tidak mampu mengontrol dispersi  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan, demikian bila ditemukan hal yang sebaliknya.

*Prediction on Radiation Exposures from Shallow Trench Operations* (PRESTO) adalah kode computer yang digunakan untuk mengkaji resiko yang berkaitan dengan disposal limbah radioaktif jenis tanah dangkal, *shallow land disposal* atau NSD. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh *US Environmental Protection Agency* (US-EPA), yang digunakan untuk memperkirakan kemungkinan pengaruhnya terhadap kesehatan yang disebabkan oleh keberadaan suatu fasilitas NSD. Penumpukan dan distribusi radionuklida di lingkungan merupakan suatu proses yang rumit karena adanya pengaruh pelepasan, peluruhan waktu paro dan transport fisik dari radionuklida yang mencapai suatu konsentrasi tertentu di lingkungan. Selain itu juga digunakan untuk memperkirakan jalur-jalur lepasan radionuklida yang potensial untuk mencapai konsentrasi maksimum pada titik/lokasi tertentu di lingkungan [15-17]. Gambar 1 adalah jalur lepasan radionuklida dari fasilitas disposal ke lingkungan yang digunakan pada model PRESTO [15]. Penggunaan perangkat lunak PRESTO pada studi ini bertujuan untuk mempelajari keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif dengan melihat jalur luaran  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan.



**Gambar 1.** Jalur lepasan radionuklida pada lingkungan yang digunakan pada model PRESTO

Pada makalah ini akan dipelajari pengaruh nilai Kd terhadap dispersi  $^{137}\text{Cs}$  ke lingkungan melalui jalur injeksi, inhalasi, *air immersion* dan permukaan tanah, dengan menggunakan perangkat lunak keselamatan PRESTO yang mengacu pada metode ISAM [18]. Sebagai masukan akan digunakan 2 nilai Kd yang berbeda (tinggi, 20 dan rendah, 4). Hasilnya akan didiskusikan sebagai indikator keselamatan di lingkungan di sekitar fasilitas disposal LRA.

## METODOLOGI

Penentuan tingkat keselamatan fasilitas disposal LRA dilakukan melalui studi pustaka dengan menggunakan beberapa besaran asumsi dan pengkajian keselamatan fasilitas disposal LRA menggunakan perangkat lunak PRESTO. Sumber  $^{137}\text{Cs}$  diidentifikasi sebagai sumber radioaktif pada paket LRA.

Parameter seperti pada Tabel 1 di Lampiran telah digunakan sebagai masukan pada perangkat lunak PRESTO [12,18]. Besaran asumsi digunakan sebagai masukan dengan pendekatan yang disesuaikan dengan perkiraan limbah, desain fasilitas, kondisi tapak dan lingkungan disekitar fasilitas disposal LRA yang direncanakan [15]. Hasil luaran sebagai indikator tingkat keselamatan adalah data konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  dalam air sumur yang berjarak 30 m dari fasilitas disposal, dosis individu berdasarkan radionuklida dan pathway serta resiko insiden individu berdasarkan radionuklida dan pathway.

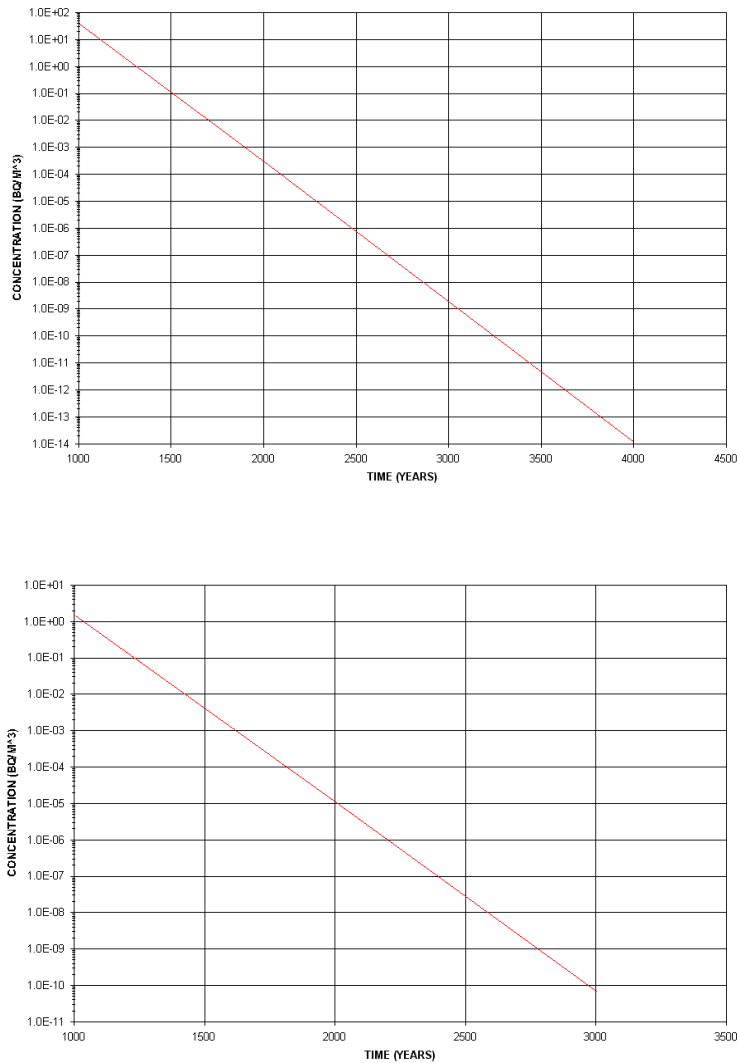
Data dosis tahunan secara total juga akan ditunjukkan pada hasil kajian keselamatan dengan perangkat lunak PRESTO. Perbandingan kecenderungan terlintasnya  $^{137}\text{Cs}$  ke sumur hipotesis dari kondisi 2 nilai Kd yang berbeda kemudian hasilnya dibandingkan dan dianalisis sehingga akan terlihat adanya perbedaan tingkat keselamatan dari adanya 2 nilai Kd yang berbeda tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Inventori  $^{137}\text{Cs}$  yang terkumpul dari LRA aktivitas rendah dari suatu pembangkit listrik tenaga nuklir dapat mencapai sekitar  $5,3 \times 10^{14}$  Bq [19]. Dengan menggunakan perangkat lunak PRESTO 4.2 dilakukan perhitungan kondisi lingkungan untuk sumur pada jarak hipotesis 30 m dari fasilitas disposal LRA, dengan asumsi bahwa jarak tersebut adalah jarak yang paling dimungkinkan untuk dijangkau oleh  $^{137}\text{Cs}$  saat terdispersi di lingkungan sehingga analisis keselamatan fasilitas disposal dapat dilakukan.

Hasil yang diperoleh dari luaran PRESTO disajikan pada Gambar 2, dimana konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  yang terakumulasi di sumur hipotesis adalah sekitar 30 dan  $0,5 \text{ Bq/m}^3$  masing-masing untuk nilai Kd 4 dan 20. Nilai konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  pada sumur hipotesis ini akan terus menurun berdasarkan waktu penyimpanannya, sampai mencapai nilai yang minimum.



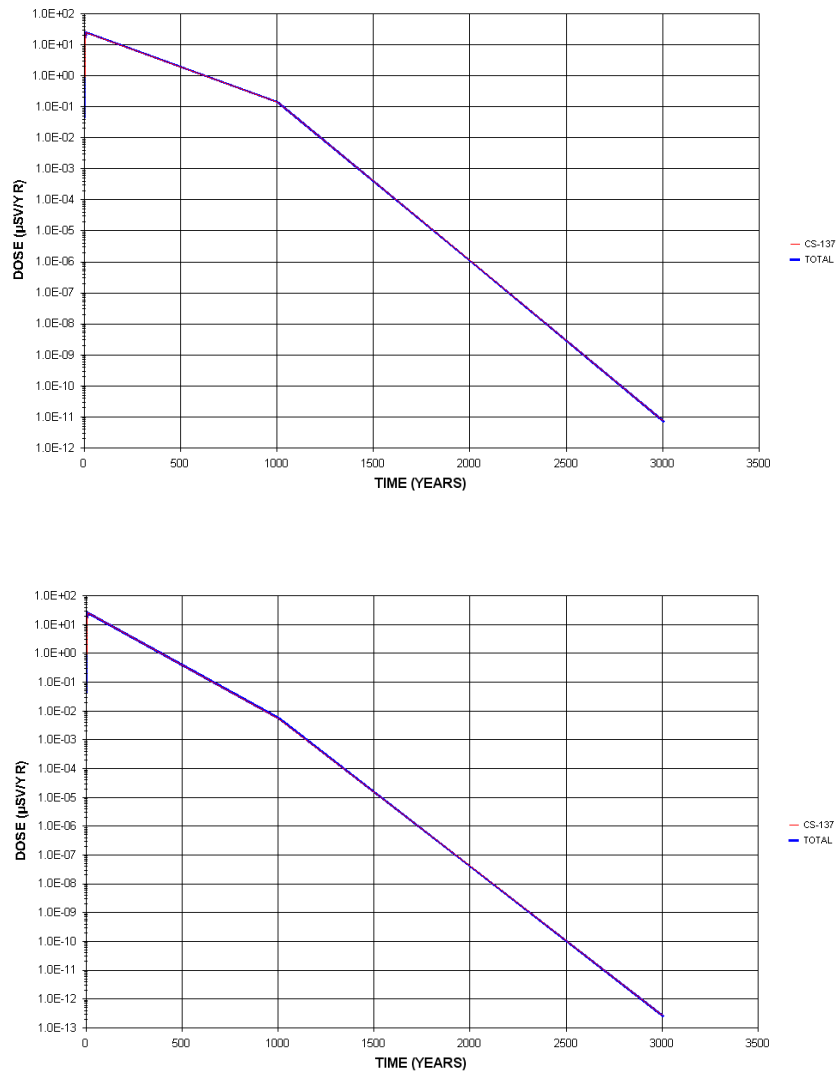


**Gambar 2.** Konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  pada air sumur hipotesis,  
(atas)  $K_d = 4$ , (bawah)  $K_d = 20$

Seperti disinggung pada pendahuluan bahwa besarnya nilai  $K_d$   $^{137}\text{Cs}$  oleh tanah lokasi dapat menyebabkan  $^{137}\text{Cs}$  akan lebih banyak terakomodasi dan lebih kuat terikat pada tanah lokasi. *Loading factor* yang besar dari tanah lokasi terhadap  $^{137}\text{Cs}$  (untuk nilai  $K_d$  yang besar) menyebabkan  $^{137}\text{Cs}$  yang terdispersi ke lingkungan menjadi lebih sedikit. Keterangan ini sesuai dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2, dimana pada nilai  $K_d$  yang kecil telah memberikan nilai konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  yang lebih besar pada sumur hipotesis.

Nilai baku tingkat radioaktivitas dalam air tanah serta batas masukan tahunan telah ditetapkan oleh Perka BAPETEN [20,21], dimana hal tersebut sangat tergantung dari sifat

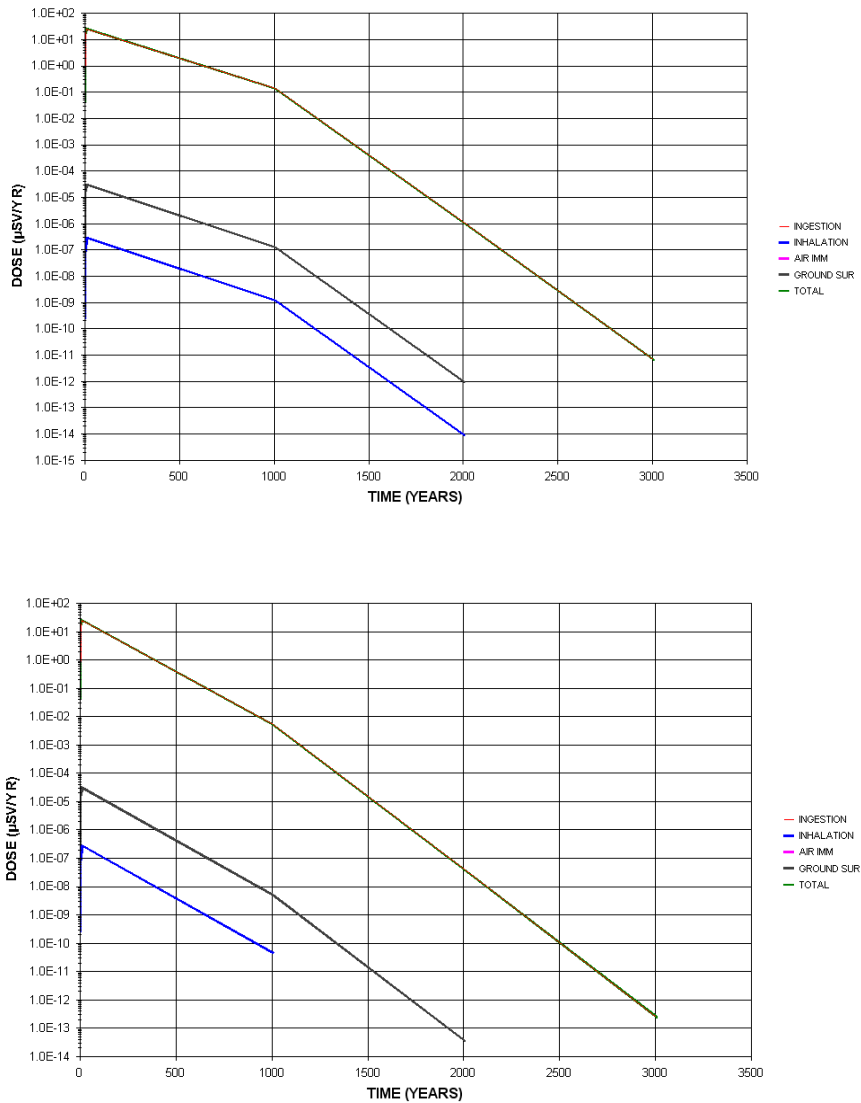
dan jenis radionuklida. Di lingkungan air tanah, pada prakteknya sangat sulit untuk dapat membedakan sifat radionuklida yang terlarut dan tak terlarut karena hasil pengukuran radionuklida merupakan hasil akumulasi radionuklida yang berasal dari bermacam sumber kontaminan yang ada di lingkungan. Nilai baku ini juga mempertimbangkan nilai batas masukan ke manusia sebagai batas pengaruh radiologik pada manusia, sehingga nilai batas tersebut akan selaras dengan kadar/konsentrasi tertinggi yang diijinkan di air tanah/lingkungan. Nilai batas konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  yang diijinkan atau maksimal boleh ada di air tanah adalah  $2,5 \times 10^2$  Bq/m<sup>3</sup>, sehingga nilai-nilai yang diperoleh dari kajian ini masih jauh lebih rendah dari nilai batas yang diijinkan.



**Gambar 3.**Dosis yang diterima seseorang dari paparan  $^{137}\text{Cs}$ ,  
(atas)  $K_d = 4$ , (bawah)  $K_d = 20$

Gambar 3 menunjukkan besar dosis yang diterima seseorang karena adanya  $^{137}\text{Cs}$  pada sumur hipotesis. Berdasarkan hasil dari PRESTO di awal tahun ke-0, individu akan menerima dosis yang sama besarnya (sekitar 20  $\mu\text{Sv}/\text{th}$ ), tetapi dengan berjalannya waktu dosis yang diterima menjadi berbeda. Untuk fasilitas disposal yang mempunyai nilai  $K_d$  lebih kecil akan menerima dosis yang lebih besar. Misalnya pada waktu penyimpanan 1000 tahun, nilai dosis

untuk nilai  $K_d$  yang kecil telah memberikan nilai dosis sekitar 0,1  $\mu\text{Sv}/\text{th}$  dibandingkan dengan nilai dosis yang hanya 0,006 $\mu\text{Sv}/\text{th}$  untuk nilai  $K_d$  yang lebih besar. Dosis ini diperoleh dari akumulasi nilai dosis yang berasal dari seluruh jalur paparan yang mengarah ke sumur hipotesis. Ambang nilai dosis untuk masyarakat umum adalah 1 mSv/th [22-26], yang masih jauh diatas dari nilai dosis individu yang diterima oleh individu.



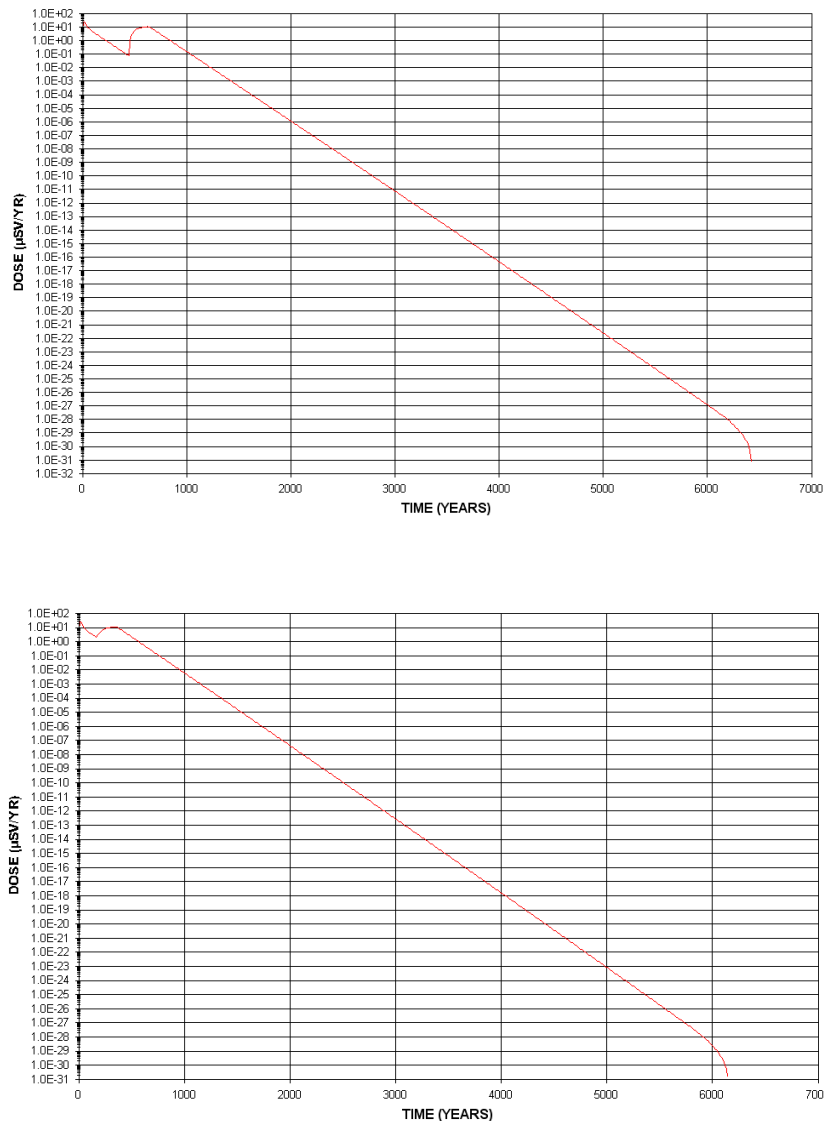
**Gambar 4.** Dosis yang diterima seseorang berdasarkan jalur luarannya, (atas)  $K_d = 4$ , (bawah)  $K_d = 20$

Berdasarkan jalur luarannya dosis yang diterima pada sumur hipotesis ditunjukkan pada Gambar 4. Jalur injesti terlihat memberikan kontribusi yang sangat besar dibandingkan dengan 2 jalur lainnya yaitu permukaan dan inhalasi. Hal ini berarti *release*  $^{137}\text{Cs}$  melalui air tanah sangat penting untuk diperhatikan pada pengkajian keselamatan ini dibandingkan dengan jalur luaran lainnya. Nilai dosis total terlihat berimpit rapat dengan nilai dosis yang berasal dari jalur luaran injesti, yang berarti nilai dosis yang berasal dari jalur luaran permukaan dan inhalasi sangat berbeda jauh dibandingkan yang berasal dari jalur injesti.

Gambar 5 memperlihatkan bahwa  $^{137}\text{Cs}$  yang terdispersi ke air sumur telah memberikan besaran yang sama untuk kedua nilai  $K_d$ , sekitar  $100 \mu\text{Sv/th}$  (yang diinformasikan dengan dosis tahunan total) pada tahun ke 0. Dosis total ini kemudian menurun sampai sekitar tahun ke-440 dan 160 penyimpanan. Dosis tersebut mengalami peningkatan lagi karena adanya akumulasi  $^{137}\text{Cs}$  di lingkungan sampai tahun ke-600 dan 320, dengan maksimum dosis tahunan total  $\sim 10 \text{ mSv/th}$ . masing-masing untuk nilai  $K_d$  4 dan 20 mL/g. Setelah masa itu dosis tahunan total akan terus menurun.

Perbedaan waktu untuk mencapai nilai dosis tahunan total yang maksimum terlihat jelas dari kedua nilai Kd. Pada nilai Kd yang lebih kecil, waktu untuk mengakumulasi  $^{137}\text{Cs}$  di sumur hipotesis terlihat lebih lambat

dibandingkan dengan dengan nilai Kd yang besar sehingga waktu yang diperlukan untuk disperse  $^{137}\text{Cs}$  ke sumur hipotesis lebih lama dibandingkan dengan nilai Kd yang lebih besar.



**Gambar 5.** Dosis tahunan total dari  $^{137}\text{Cs}$  yang terakumulasi pada sumur, (atas) Kd = 4, (bawah) Kd = 20

Hal ini menunjukkan bahwa pada nilai Kd yang besar,  $^{137}\text{Cs}$  akan terikat lebih kuat pada tanah calon lokasi dibandingkan dengan nilai Kd yang kecil. Hal tersebut dibuktikan dengan kecilnya nilai konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  di sumur hipotesis, kecilnya dosis yang diterima oleh individu dan kecilnya dosis total tahunan. Atau dengan kata lain adalah banyaknya  $^{137}\text{Cs}$  yang terdispersi ke lingkungan lebih sedikit

dibandingkan pada lokasi yang mempunyai nilai Kd yang kecil. Hasil yang diperoleh ini bila dibandingkan dengan nilai dosis tertinggi yang ada pada Peraturan BAPETEN menunjukkan bahwa batas untuk pelepasan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  jauh lebih kecil, dimana pada peraturan tersebut nilai dosisnya berkisar antara 20-50 mSv/th untuk pekerja radiasi dan 1 mSv/th untuk masyarakat umum [20-26].

## KESIMPULAN

Hasil yang diperoleh dari analisis kajian ini menunjukkan bahwa nilai Kd sangat berpengaruh pada keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif. Semakin besar nilai Kd yang dimiliki oleh suatu lokasi, semakin aman lokasi tersebut terhadap kemungkinan terjadinya dispersi radionuklida ke lingkungan yang ditandai dengan besarnya konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  dan dosis yang diterima pada sumur hipotesis. Semakin sedikitnya dispersi radionuklida ke lingkungan berarti semakin selamat lokasi tersebut dari adanya cemaran radionuklida.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Westinghouse, *Generic Design Assessment: Summary of Disposability Assessment for Wastes and Spent Fuel Arising from Operation of the Westinghouse AP1000*, USA, 2014.
2. Westinghouse, *AP1000 Nuclear Power Plant*, USA, 2011.
3. H. Persson, *Migration of Radiocaesium in Six Swedish Pasture Soils After The Chernobyl Accident*. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet; 2008.
4. C. Poinssot, B. Baeyens, M.H. Bradbury, Experimental and Modeling Studies of Cesium Sorption on Illit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999; 6: 3217-3227.
5. A. Cremers, A. Elsen, P. De Preter and A. Maes. Quantitative Analysis of Radiocaesium Retention in Soils. *Nature*. 1998; 335: 247-249.
6. Center for Disease Control and Prevention, *Cesium-137*. Dept. Health and Human Service, USA, 2004
7. Anonim, *Human Health Fact Sheet-Cesium*. ANL, 2001
8. Sasaki, T., *Safety Design and Evaluation Methodology of Tunnel Repository for Low Level Radwaste Disposal in Japan*. JNFL, 2007.
9. Setiawan, B., Sorption Characterization of Radiocesium by Host Rock of Candidate Site as Reliability Indication of Radwaste Disposal Site, Proc. 4<sup>th</sup> Environment Technology and Management Conference-ITB. Nov 3-4. 2011; Bandung.
10. Setiawan, B., Sriwahyuni, H., Ekaningrum, NEE., Sumantry, T.,  $^{137}\text{Cs}$  Sorption into Bentonite from Cidadap-Tasikmalaya as Buffer Material for Disposal Demonstration Plant Facility at Serpong. AIP Conf. Proc. 1589, doi: 10.1063/1.4868816. 2014; Bandung
11. Setiawan, B., Mayasari, E., Meidhika, S., Evaluation of Radiocesium Sorption in Some Materials as Safety Barrier System of Radioactive Waste Disposal Demonstration Facility. *Procedia Chemistry-Elsevier*. 2015; 16: 445-450.
12. Setiawan, B., Karakterisasi Permeabilitas dan Sorpsi-Desorpsi Bentonit Sebagai Bahan Penyangga (*buffer material*). Prosid. Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir II-PEBN-BATAN. 1996; Jakarta.
13. IAEA, *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities*, Vol.1, IAEA-Vienna, 2004.
14. Cornell, RM., Adsorption Behaviour of Cesium on MARL, *Clay Minerals* 27, 1992, 363-371
15. Hung, CY., *User's Guide for PRESTO-EPA-CPG/POP Operation System, Ver.4.2*, US-EPA, Washington DC, 2000
16. Uslu, I., Fields, DE., Yalcintas, MG., *PRESTO-II Computer Code for Safety Assessment on Shallow Land Disposal of Low-Level Wastes*, contract No. DE-ACOS-840821400, the Office of Health and Environmental Research, U.S. Department of Energy, USA, 1987.
17. Fields, DE., Emerson, CJ., Chester, RO., *PRESTO-II: A Low-Level Waste Environmental Transport and Risk Assessment Code*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA (1986).
18. IAEA, *Scenario Generation and Justification for the Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal System*, ISAM Scenario Generation and Justification Working Group Document, Ver. 1.1, IAEA-Vienna, 2000
19. Chapman, NA., McKinley, IG., *The Geological Disposal of Nuclear Waste*, John Wiley & Sons, Chichester, 1987.
20. BAPETEN no.02/Ka-BAPETEN/V-99 tentang *Nilai Baku Tingkat Radioaktivitas di Lingkungan*, Jakarta, 1999.
21. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 7 Tahun 2013 tentang *Nilai Batas Radioaktivitas di Lingkungan*, Jakarta, 2013

22. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2013 tentang *Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*, Jakarta, 2013
23. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 33 Tahun 2007 tentang *Keselamatan Radiasi Pencion dan Keamanan Sumber Radioaktif*, Jakarta, 2007
24. Haditjahyono, H., *Proteksi Radiasi dalam Pekerjaan*, Pusdiklat-BATAN, Jakarta 2005
25. IAEA, *Occupational Radiation Protection*, RS-G-1.1, IAEA-Vienna, 1999
26. IAEA, *Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye*, TECDOC 1731, IAEA-Vienna, 2013

## Lampiran

**Tabel 1.**Data Tapak Untuk Pengkajian Keselamatan Fasilitas Disposal Dengan Perangkat Lunak PRESTO

No.	Aspek	Sub-aspek	Parameter	Satuan
1.	Karakteristik Tapak	Hidrologi	1. Curah hujan tahunan total	2,9 m
			2. Laju aliran sungai tahunan	4,73 x 10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> /th
			3. Jarak ke sumur terdekat	30 m
			4. Jarak antara sisi tapak dan saluran	10 m
			5. Faktor curah hujan	250 R/th
		Erosi	6. Faktor erodibilitas tanah	0,23 ton/are
			7. Faktor pengelolaan tanaman	0,3
			8. Faktor penerapan pengendalian erosi	0,3
			9. Faktor ratio pengiriman sedimen	1,0
			10. Faktor kecuraman dari panjang lereng	0,27
			11. Faktor kejenuhan residual	0,17
			12. Factor of total annual precipitation for infiltration calculation	0
			13. Fraksi runoff curah hujan pada lapisan permukaan tanah	0,005
			14. Friksi runoff curah hujan pada lapisan tanah bagian bawah	0,1
			15. Active depth of soil in surface-contamina ted region	0,1
			16. Width of the contaminated site measured perpendicular to groundwater flow	100 m
			17. Panjang situs terkontaminasi yg sejajar dgn aliran air tanah	30 m

2.	Penutup & limbah	Penutup	18. Ketebalan	1
			19. Densitas	2,4 g/cm <sup>3</sup>
			20. Porositas	0,3
			21. Permeabilitas	0,03 m/jam
			22. Kemiringan rata2 lereng	0,37 m/m
			23. Panjang lereng rata2	34,5 m
			24. <i>Pellicular water deficit</i>	0,01 m
			25. <i>Gravity water deficit</i>	3,1 m
		Komponen porositas	26. <i>Pellicular water</i>	0,47
			27. <i>Gravity water</i>	0,01
		<i>Eq. upward</i> limbah	28. Difusivitas	8 x 10 <sup>-5</sup> m/jam
			29. Konduktivitas hidrolis	9 x 10 <sup>-5</sup> m/s
			30. Ketebalan	6 m
			31. Densitas	2,4 g/cm <sup>3</sup>
			32. Porositas	0,3
			33. Permeabilitas	0,3 m/jam
		Fraksi lepasan	34. <i>Absorbing waste</i>	10 <sup>-1</sup>
35. <i>Activated metals</i>	10-1			
36. <i>Solidified waste</i>	10-1			
37. <i>Containerized fraction</i>	0			
3.	Zona Vertikal dan Akuifer	Zona vertikal	38. Ketebalan	2 m
			39. Densitas	2,6 g/cm <sup>3</sup>
			40. Porositas	0,3
			41. Permeabilitas	3 x10 <sup>-4</sup> m/jam
		Akuifer	42. Ketebalan	25 m
			43. Densitas	2,6 g/cm <sup>3</sup>
			44. Porositas	0,3
			45. Permeabilitas	0,3 m/jam
			46. Fraksi kejenuhan air	1
			47. Kecepatan air tanah	26,3 m/th
			48. Sudut dispersi	1 <i>radian</i>
			49. <i>Allow aquifer to stream flow</i>	30 m
			4.	Atmosfer
51. Kecepatan deposisi	0,01 m/s			
52. Kec. endap secara gravitasi	0,01 m/s			
53. <i>Onsite dust loading from mechanical disturbance</i>	50 g/m <sup>3</sup>			
54. <i>Fraction of time the wind blows in direction of interest</i>	0,5			
55. <i>Annual av. windspeed in direction of interest</i>				
56. <i>Resuspension equation parameter</i>	1) 1 x 10 <sup>-6</sup> 2) -0,15 3) 1 x 10 <sup>-11</sup>			
57. <i>Stability category indicator</i>	D			
58. <i>Pasquill-Gifford atmospheric stability class formation</i>	1			
59. <i>Height of the inversion layer</i>	2 m			
60. <i>Hosker's roughness parameter</i>	0,01 m			
61. <i>Atmospheric transport parameter</i>	5,186 x 10 <sup>-8</sup>			

5.	<i>Basement</i>		62. Fraksi emanasi Rn-222 untuk tanah tercemar	0,3
			63. Kedalaman <i>basement</i> bawah permukaan	2 m
			64. Ketebalan beton lantai <i>basement</i>	0,2 m
			65. Porositas beton lantai	0,18
			66. Panjang tepi <i>basement</i>	40 m
			67. <i>Negative indoor house pressure</i>	2,4 Pa
			68. <i>Perimeter shrinkage crack width</i>	0,001 m
			69. Laju ventilasi <i>basement</i>	2,78 x 10 <sup>-4</sup> change/s
			70. Luas lantai <i>basement</i>	900 m <sup>2</sup>
			71. <i>Basement occupancy fraction</i>	0,6
			72. <i>Outdoor, onsite occupancy fraction</i>	0,2
6.	Tanaman & Binatang	produktivitas Pertanian	73. Rumput	0,5 kg/m
			74. Vegetasi lain	0,5 kg/m
		Konsumsi air Harian	75. Sapi perah	30 L/hari
			76. Kambing perah	4 L/hari
			77. <i>Beef cattle</i>	25 L/hari
		Waktu antara Panen & konsumsi	78. Rumput	6 jam
			79. <i>Stored feed</i>	720 jam
			80. Dedaunan	24 jam
			81. Buah/biji2an	720 jam
		Waktu Pemaparan Dlm udara tercemar	82. Rumput	1401,6 jam
			83. Hasil panen	1410,6 jam
		Konsumsi makanan	84. Kambing perah	4 kg/hari
			85. <i>Beef cattle</i>	30 kg/hari
			86. <i>Transport time from animal feed to human receptor</i>	48 jam
			87. <i>Time from animal slaughter to human consumption</i>	480 jam
			88. <i>Weathering removal decay constant</i>	0,0021/jam
			89. <i>C-14 fractional equilibrium value</i>	1
			90. Kelembaman absolut udara	(81,5%) g/m <sup>3</sup>
			91. Kedalaman akar	1 m
			92. Laju irigasi	0,015 L/m-jam
93. Fraksi infiltrasi dan presipitasi	0,5			
94. <i>Fraction of year that crops are irrigated</i>	0,5			
95. <i>Fraction of yera animals graze on the pasture grass</i>	0,25			
96. <i>Fraction of animal's daily feed that is fresh grass</i>	0,5			



7.	<i>Human uptake</i>	97. <i>Human uptake</i> terhadap sayuran	73 kg/th
		98. <i>Human uptake</i> terhadap hasil panen	100 kg/th
		99. <i>Human uptake</i> terhadap susu sapi	0
		100. <i>Human uptake</i> terhadap susu kambing	0
		101. <i>Human uptake</i> terhadap air minum	365 L/th
		102. <i>Human uptake</i> terhadap daging	36,5 kg/th
		103. <i>Human uptake</i> terhadap ikan	36,5 kg/th
		104. <i>Human uptake</i> terhadap tanah	1,1 kg/th
		105. <i>Human inhalation rate</i>	7300 m <sup>3</sup> /th
		106. Fraksi air minum yg disuplai dari sumur	0,5
		107. Fraksi air minum yg disuplai dari sungai	0,2
		108. Fraksi air irigasi yg disuplai dari sumur	0,1
		109. Fraksi air irigasi yg disuplai dari sungai	0,9
		110. Fraksi air minum hewan yg disuplai dari sumur	0,5
111. Fraksi air minum hewan yg disuplai dari sungai	0,5		