



ANALISIS INVENTORI RADIONUKLIDA DAN PEMBANGKITAN PANAS DALAM DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF

Suryanto *

ABSTRAK

ANALISIS INVENTORI RADIONUKLIDA DAN PEMBANGKITAN PANAS DALAM DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF. Analisis inventori radionuklida dan pembangkitan panas dalam bahan bakar bekas telah dilakukan dalam rangka mempelajari radionuklida potensial yang memberikan dampak radiologis kepada manusia akibat disposal. Penelitian dilakukan dengan menyelesaikan persamaan Bateman, rantai peluruhan radionuklida, baik hasil belah maupun aktinida secara numerik. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa Cs-137, Sr-90 dan Pu-239 mendominasi inventori dalam bahan bakar bekas selama disposal. Sedang Pu-238 dan Pu-240 mendominasi pembangkitan panas selama disposal. Karenanya radionuklida tersebut perlu diperhatikan dalam analisis keselamatan disposal bahan bakar bekas.

ABSTRACT

RADIONUCLIDE INVENTORY AND HEAT GENERATION ANALYSIS IN DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE. Radionuclide inventory and heat generation analysis on spent nuclear fuel were done in order to study the potensial radionuclides contributing radiological impact to human being caused by spent fuel disposal. The study was carried out using the Bateman equation of radionuclide decay chains for fission products and actinides. The results showed that Cs-137, Sr-90 and Pu-239 dominated inventory of spent fuel, in which Pu-238 and Pu-240 dominated heat generation during disposal. Accordingly, the above radionuclides could be considered as the reference radionuclides for safety analysis of spent nuclear fuel disposal.

PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah radioaktif, khususnya disposal bahan bakar bekas, adalah "focal point" dalam pengembangan sistem energi nuklir di Indonesia. Bahkan dalam UU No. 10 tahun 1997 tentang ketenaganukliran, ditegaskan mengenai partisipasi masyarakat dalam penentuan tapak disposal bahan bakar bekas tersebut [1]. Sejalan dengan itu, maka teknologi dan keselamatan disposal bahan bakar bekas ini perlu dipersiapkan secara seksama dan meyakinkan. Evaluasi keselamatan sendiri diterapkan baik pada tahap penentuan tapak maupun desain tempat penyimpanan bahan bakar bekas dan dilakukan secara terpadu mencakup analisis terhadap semua penghalang/jalur bagi kembalinya radionuklida kepada manusia; yakni tempat penyimpanan (*near field*), media geologi (*far field*) dan biosfer. Dalam evaluasi keselamatan disposal bahan bakar bekas, perlu

* Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif - BATAN

dipelajari radionuklida potensial yang akan memberikan dampak radiologis kepada manusia akibat disposal tersebut. Dan radionuklida tersebut perlu diperhatikan dalam perancangan repositori, skenario disposal dan penghalang rekayasa. Dalam penelitian ini akan dianalisis inventori radionuklida dan pembangkitan panas dalam bahan bakar bekas selama disposal dalam batuan geologi. Dari analisis ini diharapkan akan diketahui radionuklida yang berpotensi memberikan dampak radiologis kepada manusia.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini disposal bahan bakar bekas diasumsikan dilakukan setelah masa umur reaktor habis serta setelah pendinginan dan penyimpanan sementara yakni 50 tahun setelah reaktor pertama beroperasi. Diasumsikan bahwa PLTN di Indonesia akan beroperasi mulai tahun 2004, dengan type PWR, jumlah reaktor 10 buah dengan kapasitas masing-masing 600 MWe. Dari operasi reaktor yang pertama, reaktor sesudahnya beroperasi secara bertahap setiap 2 tahun, sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 1 [2,3]. Umur operasi reaktor diasumsikan 30 tahun. Data radionuklida yang terkandung dalam bahan bakar bekas diambil dari perhitungan menggunakan program ORIGEN-2 [4]. Untuk hasil belah

Tabel 1. Jumlah bahan bakar bekas yang ditimbulkan dari operasi PLTN di Indonesia [2].

Year of Operation	Plant 1	Plant 2	Plant 3	Plant 4	Plant 5	Plant 6	Plant 7	Plant 8	Plant 9	Plant 10	Total
2004-2006	spent	54	0	0	0	0	0	0	0	0	54
2006-2008	spent	126	54	0	0	0	0	0	0	0	180
2008-2010	spent	198	126	54	0	0	0	0	0	0	378
2010-2012	spent	270	198	126	54	0	0	0	0	0	648
2012-2014	spent	342	270	198	126	54	0	0	0	0	1026
2014-2016	spent	414	342	270	198	126	54	0	0	0	1410
2016-2018	spent	486	414	342	270	198	126	54	0	0	1794
2018-2020	spent	558	486	414	342	270	198	126	54	0	2178
2020-2022	spent	630	558	486	342	270	198	126	54	0	2562
2022-2024	spent	702	630	558	486	342	270	198	126	54	2946
2024-2026	spent	774	702	630	558	486	342	270	198	126	3330
2026-2028	spent	846	774	702	630	558	486	342	270	198	3714
2028-2030	spent	918	846	774	702	630	558	486	342	270	4098
2030-2032	spent	990	918	846	774	702	630	558	486	342	4482
2032-2034	spent	1062	990	918	846	774	702	630	558	486	4866
2034-2036	spent	1134	1062	990	918	846	774	702	630	558	5250
2036-2038	spent	0	1134	1062	990	846	774	702	630	558	5634
2038-2040	spent	0	0	1134	1062	990	846	774	702	630	6018
2040-2042	spent	0	0	0	1134	1062	990	846	774	702	6402
2042-2044	spent	0	0	0	0	1134	1062	990	846	774	6786
2044-2046	spent	0	0	0	0	0	1134	1062	990	846	7170
2046-2048	spent	0	0	0	0	0	0	1134	1062	990	7554
2048-2050	spent	0	0	0	0	0	0	0	1134	1062	7938
2050-2052	spent	0	0	0	0	0	0	0	0	1134	8322
2052-2054	spent	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8706

Each reactor contributes = 1134 spent fuel assemblies during the reactor life time
Total number of fuel assemblies = 1134 x 10 = 11,340 spent fuel assemblies

diambil radionuklida dengan waktu paruh lebih besar dari 25 tahun. Sedangkan untuk aktinida diambil radionuklida dengan aktivitas tinggi. Komposisi radionuklida hasil belah dan aktinida utama dalam bahan bakar bekas diberikan pada Tabel 2. Rantai peluruhan aktinida selama disposal diperlihatkan pada

Gambar 1. Inventori (konsentrasi) aktinida dihitung dengan memecahkan persamaan diferensial dari rantai aktinida sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 2, melalui persamaan Bateman [3] yang diperlihatkan pada persamaan (1). Inventori radionuklida hasil belah dihitung dengan menggunakan persamaan peluruhan sederhana atau persamaan Bateman dengan $i \leq 3$.

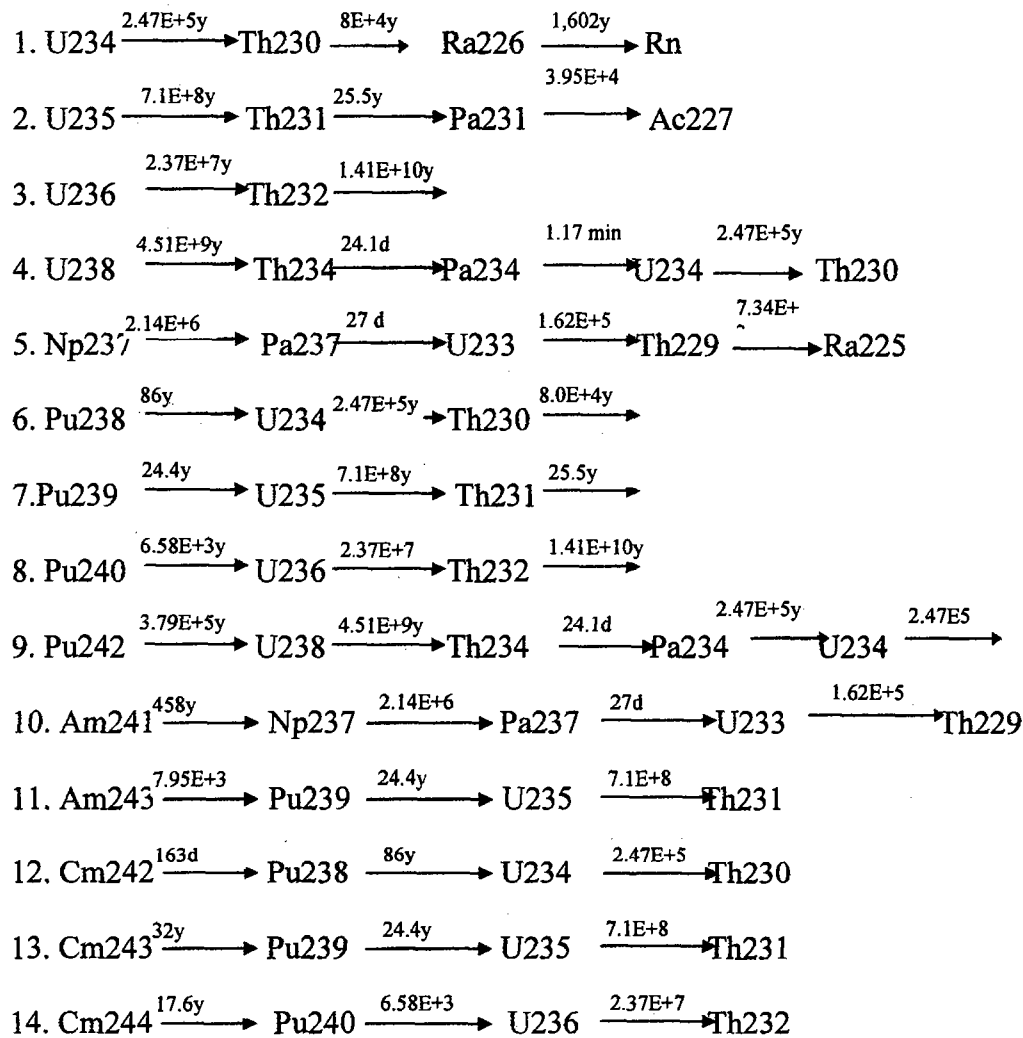
Tabel 2. Aktivitas dan energi partikel yang dipancarkan radionuklida dalam bahan bakar bekas.

a). Data hasil belah

Nuklida	Waktu Paruh (Tahun)	Aktivitas / Tahun (Curie)	Energi (Mev)
Se - 79	6.50E+4	1.08E+1	0.064
Sr - 90	2.77E+1	2.09E+6	0.221
Zr - 93	1.50E+6	5.15E+1	0.040
Tc - 99	2.12E+5	3.90E+2	0.114
Pd - 107	7.00E+6	3.00E+0	0.014
Sn - 126	1.00E+5	1.49E+1	0.182
Cs - 135	3.00E+6	7.71E+0	0.082
Cs - 137	3.00E+1	2.44E+6	0.276
Sm-151	8.70E+1	4.41E+6	0.030

b).Data Aktinida

Nuklida	Waktu Paruh (tahun)	Aktivitas / tahun (Curie)	Energi (Mev)
U - 234	2.45E+5	1.94E+1	4.856
U - 235	7.10E+8	0.46E+0	4.681
U - 236	2.39E+7	7.22E+0	4.573
U - 238	4.51E+9	8.56E+0	4.268
Np - 237	2.14E+6	1.44E+1	4.956
Pu - 238	8.60E+1	1.01E+5	5.592
Pu - 239	2.44E+4	8.82E+3	5.243
Pu - 240	6.58E+3	1.30E+4	5.255
Pu - 242	3.76E+5	3.76E+1	4.980
Am - 241	4.58E+2	4.53E+3	5.640
Am - 243	7.95E+3	4.77E+2	5.434
Cm - 242	0.50E+0	4.40E+5	6.217
Cm - 243	3.20E+1	9.03E+1	6.150
Cm - 244	1.76E+1	7.38E+4	5.902



Gambar 1. Rantai peluruhan aktinida.

$$N_i = N_i^0 \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{i-1} \sum_{j=1}^i \frac{e^{-\lambda_j t}}{\lambda_j - \lambda_k} \quad (i > 1) \quad (1)$$

$$k = 1$$

$$k \neq j$$

dimana N = jumlah radionuklida (atom); λ = konstanta peluruhan radioaktif (detik^{-1}); N_i^0 = jumlah radionuklida (konsentrasi) pada $t = 0$; i, j, k = nomor rantai peluruhan.

Panas yang dibangkitkan oleh radionuklida dihitung dengan menggunakan persamaan (2) dan (3) [4].

$$P_i(t) = 5.9 \times 10^{-3} A_i(t) \sum y_j \cdot E_j \quad (2)$$

$$P(t) = \sum P_i(t) \quad (3)$$

dimana P_i = daya yang dibangkitkan oleh Nuklida i (watt); A_i = radioaktivitas Nuklida i (Ci); E_j = energi untuk partikel j (Mev); y_j = fraksi disintegrasi melalui mode j .

Persamaan (1), (2) dan (3) diselesaikan secara numerik. Program dibuat dalam bahasa FORTRAN dan dieksekusi dengan menggunakan komputer PC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan inventori untuk radionuklida hasil belah memperlihatkan bahwa untuk waktu disposal di bawah disposal 500 tahun radionuklida yang dominan adalah Cs-137 dan Sr-90 [6]. Sedangkan untuk waktu 500 tahun keatas, radionuklida yang dominan dalam bahan bakar bekas adalah Tc-99. Hal ini disebabkan karena radionuklida Cs-137 dan Sr-90 mempunyai aktivitas (yield) yang besar ketika dilepas PLTN dan mempunyai waktu paro yang relatif pendek dibandingkan radionuklida hasil belah lainnya. Sedang Tc-99 meskipun mempunyai aktivitas yang relatif besar namun mempunyai waktu paro yang panjang $\pm 2.12 \times 10^5$ tahun, sehingga pada disposal 500 tahun keatas terlihat masih belum terjadi pengurangan aktivitas yang berarti.

Untuk inventori aktinida diperlihatkan bahwa untuk disposal di bawah 100 tahun, radionuklida Pu-240 mendominasi inventori bahan bakar bekas [6]. Sedang untuk disposal lebih dari 100 tahun radionuklida Pu-239 dan Pu-238 yang dominan. Hal ini karena walaupun Pu-240 mempunyai aktivitas awal cukup tinggi dan juga dihasilkan dari peluruhan Cm-241, namun radionuklida ini mempunyai waktu paro yang relatif pendek dibandingkan dengan radionuklida lain, sehingga untuk disposal di atas 100 tahun Pu-240 tidak mendominasi. Sedangkan Pu-239, walaupun mempunyai aktivitas awal yang lebih kecil tapi mempunyai waktu paro yang cukup panjang dibandingkan dengan Pu-240, sehingga mampu mendominasi inventori bahan bakar bekas untuk disposal 100 tahun ke atas.

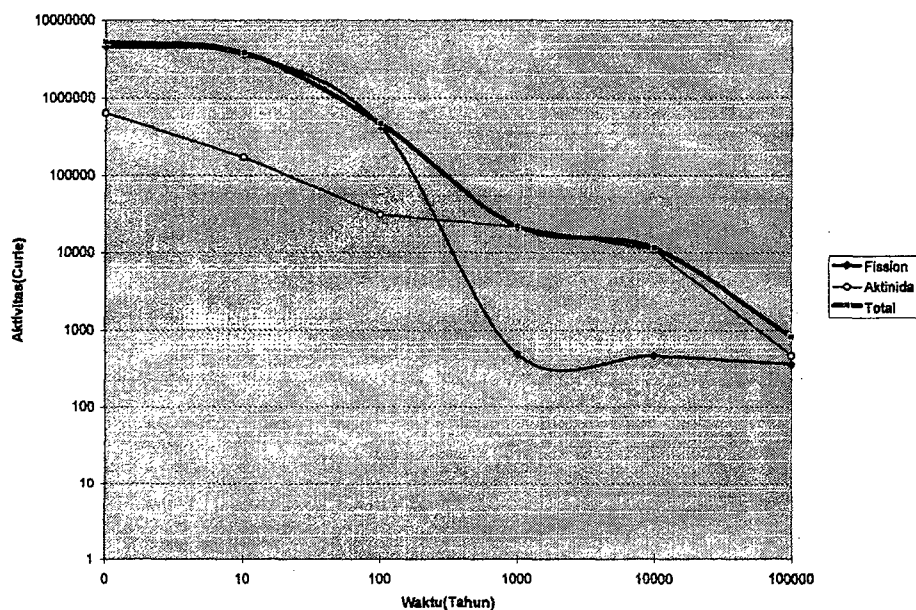
Gambar 2 memperlihatkan inventori radionuklida hasil belah dan aktinida dalam disposal bahan bakar bekas. Dari Gambar 2 terlihat bahwa untuk disposal di bawah 500 tahun, aktivitas total dari bahan bakar bekas didominasi oleh radionuklida hasil belah terutama Cs-137 dan Sr-90. Sedang untuk disposal di atas 500 tahun, aktinida cenderung mendominasi inventori bahan bakar bekas. Hal ini disebabkan karena hasil belah umumnya mempunyai waktu paro yang relatif pendek dibandingkan dengan aktinida. Selain itu rantai peluruhan hasil belah umumnya relatif pendek. Sementara itu, aktinida selain mempunyai waktu paro dan rantai yang panjang juga turunannya masih termasuk jenis aktinida, sehingga untuk disposal > 500 tahun, aktinida mendominasi inventori bahan bakar bekas.

Dari hasil perhitungan panas yang dibangkitkan oleh radionuklida dalam bahan bakar bekas, radionuklida Cs-137 dan Sr-90 terlihat mendominasi pembangkitan panas untuk radionuklida hasil belah pada disposal di bawah 500 tahun. Sedang untuk disposal 500 tahun ke atas panas yang dibangkitkan didominasi oleh Tc-cc [6].

Sementara itu untuk kelompok aktinida, Pu-238 mendominasi pembangkitan panas untuk waktu disposal dibawah 500 tahun. Sedangkan untuk disposal di atas 500 tahun, Pu-240 mendominasi pembangkitan panas. Sesuai

dengan persamaan (2), radionuklida yang mendominasi panas dalam disposal bahan bakar bekas disebabkan selain karena memiliki inventori yang besar, juga karena tingginya energi partikel yang dipancarkannya [6].

Gambar 3 memperlihatkan perbandingan antara panas yang dibangkitkan oleh aktinida dan hasil belah dalam disposal bahan bakar bekas. Dari Gambar 3 terlihat bahwa dalam bahan bakar bekas, secara umum, panas dibangkitkan oleh aktinida. Ini disebabkan terutama karena aktinida banyak memancarkan partikel- α berenergi tinggi.



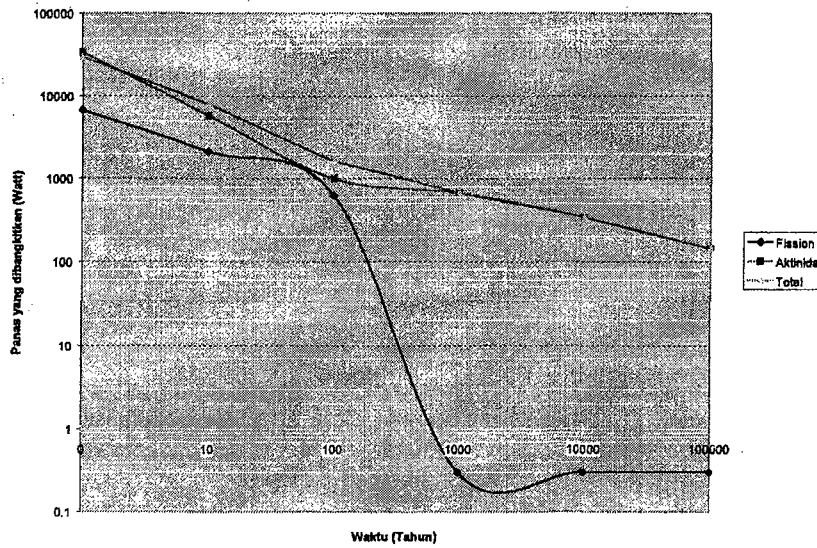
Gambar 2. Inventori radionuklida dalam disposal bahan bakar bekas.

Dari pembahasan inventori dan panas yang dibangkitkan oleh radionuklida dalam disposal bahan bakar bekas, maka dapat dirumuskan hasil sebagai berikut :

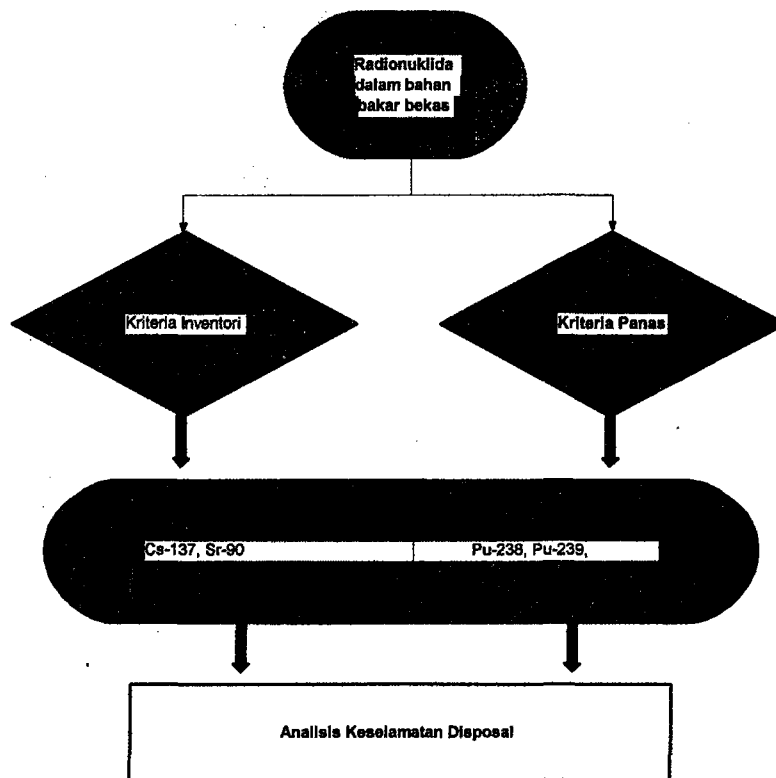
1. Inventori bahan bakar bekas didominasi oleh:
 - a. Cs-137, Sr-90 untuk $t \leq 500$ tahun
 - b. Pu-239, Pu-240 untuk $t > 500$ tahun
2. Panas yang dibangkitkan bahan bakar bekas didominasi oleh :
 - a. Pu-238 untuk $t \leq 500$ tahun
 - b. Pu-240 untuk $t > 500$ tahun

Dengan demikian berdasarkan kriteria aktivitas (inventori) dan panas yang dibangkitkan dalam disposal bahan bakar bekas, maka radionuklida Cs-137, Sr-90 dan Pu-238, Pu-239, Pu-240 adalah radionuklida acuan yang perlu mendapat perhatian dalam analisis keselamatan disposal bahan bakar bekas sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4. Karena radionuklida inilah yang diduga akan memberi dampak radiologis bila bahan bakar bekas didisposal. Kemudian,

radionuklida yang dominan dalam membangkitkan panas perlu diperhatikan dalam perlindungan penghalang rekayasa.



Gambar 3. Panas yang dibangkitkan oleh Radionuklida dalam disposal bahan bakar bekas.



Gambar 4. Radionuklida acuan dan kriteria yang diusulkan dalam analisis keselamatan disposal bahan bakar bekas.

KESIMPULAN

Dari pembahasan di muka, maka dapat disimpulkan bahwa inventori radionuklida dan panas yang dibangkitkan dalam bahan bakar bekas selama disposal dapat digunakan sebagai kriteria dalam penentuan radionuklida acuan dalam analisis keselamatan disposal bahan bakar bekas. Nuklida Pu-238, Pu-239, Pu-240, Cs-137 dan Sr-90 adalah radionuklida acuan yang perlu diperhatikan dalam analisis keselamatan bahan bakar bekas, karena radionuklida-radionuklida tersebut mendominasi inventori dan panas yang dibangkitkan. Untuk analisis lebih lanjut perlu dirumuskan kriteria lain yang lebih lengkap seperti indeks bahaya, baik didasarkan pada konsep MPC (*Maximum Permissible Concentration*) ataupun berdasarkan konsep ALI (*Annual Limit Intake*), serta kelakuan radionuklida dalam tempat penyimpanan menembus batuan geologi, sampai kepada manusia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Bapak Dr. Mulyanto, Peneliti di PTPLR, atas diskusi dan saran sehingga terselesaikannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lembaran Negara , UU No. 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Sek.Neg.,1997.
2. YUDI U. IMARDJOKO, DANIEL B. BULLEN, SOFYAN YATIM, "Performance Asscesment Modelling of the proposed high level radioactive waste disposal facility at Genting Island, Karimun Jawa, Indonesia" (belum dipublikasikan).
3. IYOS R. SUBKI, ADI WARDOYO, "Recent Development in Indonesia's First NPP Feasibility Study in Muria Peninsula", Proceeding The Third Scientific Meeting, Indonesia Atomic Energy Student in Japan, 4 Maret 1994, Tokyo, 1994.
4. MANSON BENEDICT, THOMAS H. PIGFORD, HANS WOLFGANG LEVI, *Nuclear Chemical Engineering*, 2nd, McGraw-Hill Book Company, USA, 1981.
5. MULYANTO, *Majalah Batan*, 1997 (akan dipublikasikan).
6. SURYANTO, "Radionuklida Acuan dalam Analisis Keselamatan Disposal Limbah Radioaktif", (akan dipublikasikan).
7. TAKAO OHI, "Research Geological Disposal of high level Radioactive waste", dipresentasikan di PTPLR, Serpong, 26 Pebruari - 9 Maret 1996, FY 1995 STA Scientist Exchange Program, Serpong, 1996.