

# **PENGARUH PARAMETER LOKAL PADA PENGKAJIAN KESELAMATAN RADIASI DESAIN PENIMBUSAN AKHIR LIMBAH MINERAL IKUTAN RADIOAKTIF**

**ANDRY SETIAWAN**



**PROGRAM STUDI BIOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2026**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.





@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University  
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



## RINGKASAN

ANDRY SETIAWAN. Pengaruh Parameter Lokal Pada Pengkajian Keselamatan Radiasi Desain Penimbunan Akhir Limbah Mineral Ikutan Radioaktif. Dibimbing oleh MERSI KURNIATI dan DADONG ISKANDAR.

Bangka adalah produsen timah terbesar kedua di dunia setelah Tiongkok. Hal tersebut disebabkan karena dilalui oleh *South East Asia Tin Belt* yang merentang dari Myanmar, Tailan Selatan, Malaysia, hingga Pulau Bangka. Timah di alam tidak ditemukan dalam bentuk murni, melainkan sebagai bijih yang mengandung pengotor dan hasil ikutan. Beberapa hasil ikutan, seperti monasit, zirkon, dan iluminite, memiliki nilai jual tinggi, meskipun mengandung radiasi dari Uranium, Torium, dan anak luruhnya. Industri timah menghasilkan terak timah (*tin slag*) dan limbah yang mengandung radioaktif tinggi. Terak dan limbah yang sudah tidak bernilai ekonomis lagi disimpan kedalam penimbunan akhir (*penimbunan akhir*), agar tidak memberi efek bahaya kepada manusia dan lingkungan sekitarnya.

Penelitian sebelumnya sudah dilakukan pemilihan tapak dan desain penimbunan akhir. Fokus penelitian berikutnya adalah studi sensitivitas parameter dan mencari parameter lokal untuk desain penimbunan akhir. Nilai sensitivitas parameter ini penting untuk menentukan parameter mana saja yang boleh memakai parameter regional dan parameter *default* dan mana saja yang harus memakai parameter lokal. Sehingga kajian keselamatan akan lebih akurat namun lebih hemat sumber daya baik waktu, biaya, dan tenaga karena tidak perlu semua parameter dicari nilai lokalnya. Oleh karena itu perlu diidentifikasi sensitivitas masing-masing parameter. Salah satu parameter penting dalam analisis keselamatan adalah koefisien distribusi ( $K_d$ ). Penelitian ini bertujuan untuk mencari nilai  $K_d$  untuk Uranium dan Torium yang berinteraksi dengan lempung Bangka.

Penelitian ini memakai perangkat lunak RESRAD OFFSITE 4.0. RESRAD OFFSITE memiliki 194 parameter yang perlu dicari sensitivitasnya. Sensitivitas parameter diperoleh dengan cara mengubah-ubah nilai suatu parameter menjadi 0,25x, 0,5x, 1,5x, 1,75x dari nilai *default* sedangkan parameter lainnya tetap *tabe* dan membandingkannya dengan hasil prakiraan dosis yang semua nilai parameternya *default*. Penelitian koefisien distribusi larutan Uranium dan Torium dengan lempung menggunakan prosedur Pasific North West Standard Laboratory. Larutan Uranium dan Torium dilarutkan bersama lempung diaduk dengan shaker lalu dipisahkan kemudian dianalisis menggunakan alat spektrometer UV-Vis dengan variasi waktu, konsentrasi, dan pH.

Tingkat sensitivitas parameter dalam RESRAD dibagi menjadi 4 katagori sangat rendah, rendah, sedang, dan tinggi. Sebanyak 97 parameter memiliki sensitivitas sangat rendah sehingga tidak mengubah nilai dosis. Parameter rendah sebanyak 68 parameter contohnya *Intake to Animal Product Transfer Factor U-238*.. Parameter sensitivitas sedang sebanyak 35 parameter contohnya parameter curah hujan (*precipitation*) Parameter yang memiliki sensitivitas tinggi sebanyak 13 parameter contohnya *fraction of time spent on primary contamination at indoor*.

Hasil penelitian koefisien distribusi Torium dengan lempung variasi waktu menunjukkan peningkatan dari menit ke-5 dan mencapai optimum pada menit ke-10 sebesar 211,889 dengan adsorpsi 87,60%, kemudian menurun akibat tercapainya kesetimbangan adsorpsi-desorpsi. Proses ini mengikuti model pseudo-first-order yang



menunjukkan mekanisme difusi cepat pada awal kontak. Selain waktu dan konsentrasi, pH sangat memengaruhi adsorpsi. Pada pH rendah, adsorpsi kurang efektif akibat protonasi permukaan lempung. Sebaliknya, pada pH 5–9, permukaan butiran lempung bermuatan negatif sehingga adsorpsi meningkat hingga mencapai 100%, menandakan interaksi optimal antara ion Torium dan lempung. Nilai koefisien distribusi Torium pada pH 5,5 sesuai lingkungan penimbunan akhir adalah 29.970 ml/gr

Nilai koefisien distribusi ( $K_d$ ) Uranium sebesar 28,70 pada satu jam pertama. Nilai  $K_d$  kemudian menurun pada 2 hingga 8 jam akibat kemungkinan desorpsi, lalu meningkat kembali pada waktu 24 jam menandakan tercapainya kesetimbangan adsorpsi. Nilai  $K_d$  pada percobaan variasi konsentrasi menunjukkan bahwa adsorpsi meningkat linier pada 50–100 ppm karena permukaan lempung masih tersedia, namun terjadi perlambatan pada 150–250 ppm disebabkan sudah terjadi kejenuhan. Pada pH asam tingkat adsorpsi rendah akibat tolakan elektrostatik dan kompetisi ion  $H^+$ . Sebaliknya, pada pH netral hingga basa, adsorpsi menjadi optimal karena permukaan lempung bermuatan negatif sehingga terjadi peningkatan interaksi dengan ion uranil. Nilai koefisien distribusi Uranium pada pH 5,5 adalah 29,55 ml/gr sesuai lingkungan penimbunan akhir.

Hasil simulasi RESRAD menggunakan parameter *default* mensimulasikan dosis hingga 50.000 tahun menunjukkan dosis masih dalam taraf aman dengan titik puncak berada di 0,405 mSv/tahun pada tahun ke-29.265 sebesar 0,405 mSv/tahun, masih di bawah batas aman 1 mSv/tahun. Simulasi menggunakan parameter koefisien distribusi lokal menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda.

Dosis radiasi akibat pancaran radionuklida K-40 meningkat hingga tahun ke-1.368 akibat migrasi material, lalu menurun cepat karena kelarutan tinggi. Ra-226 dan turunannya menurun signifikan hingga 10.000 tahun. Th-232 relatif stabil hingga 43.000 tahun selanjutnya terjadi peningkatan sedikit. U-238 dan rantai peluruhannya meningkat setelah 6.000 tahun seiring kerusakan fasilitas dan waktu paruh panjang, lalu menurun kembali. Konsentrasi radionuklida pada fasilitas seperti K-40, Pb-210, Ra-226, Th-232, dan U-238 menurun asimtotik mendekati nol selama rentang waktu puluhan ribu tahun. Penambahan resiko kanker yang diterima pada jarak 200 meter mencapai titik tertinggi pada tahun ke-29.265 yang mencapai  $4,25 \times 10^{-4}$  atau sekitar penambahan resiko 1 orang dari 2352 orang.

Sensitivitas parameter dapat mempengaruhi desain penimbunan akhir dikategorikan menjadi sangat rendah, rendah, sedang, dan tinggi. Setelah disimulasikan dengan parameter *default* dan parameter lokal dosisnya masih aman bagi masyarakat. Simulasi menggunakan parameter  $K_d$  lokal menjadi lebih akurat dan terpercaya dibandingkan dengan  $K_d$  *default*.

Kata kunci : koefisien distribusi, MIR, penimbunan akhir, RESRAD OFFSITE, tapak



### @Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## SUMMARY

ANDRY SETIAWAN. The Influence of Local Parameters on Radiation Safety Assessment of Landfill Design for TENORM Waste. Supervised by MERSI KURNIATI and DADONG ISKANDAR.

Bangka is the world's second-largest tin producer, after China. This is because it is located along the Southeast Asia Tin Belt, which stretches from Myanmar and southern Thailand to Malaysia and Bangka Island. Tin is not found in its pure form in nature but rather as ore containing impurities and by-products. Some by-products, such as monazite, zircon, and ilmenite, have high market value, despite containing radiation from Uranium, Thorium, and their derivatives. The tin industry also produces tin slag and highly radioactive waste. Slag and waste that no longer have economic value are stored in landfill to prevent harm to humans and the surrounding environment.

Previous research has focused on site selection and final landfill design. The next research focus is on parameter sensitivity studies and the search for local parameters for final embankment design. Parameter sensitivity values are crucial for determining which parameters can be regionally and default-based, and which must be local. This will allow for more accurate safety assessments while saving resources in terms of time, money, and effort, as local values are not required for all parameters. Therefore, it is necessary to identify the sensitivity of each parameter. One important parameter in safety analysis is the distribution coefficient ( $K_d$ ). This study aims to determine the  $K_d$  value for Uranium and Thorium interacting with Bangka clay.

This study uses RESRAD OFFSITE 4.0 software. RESRAD OFFSITE has 194 parameters whose sensitivity needs to be found. Parameter sensitivity is obtained by changing the value of a parameter to 0.25x, 0.5x, 1.5x, 1.75x of the default value while other parameters remain default and comparing them with the dose prediction results where all parameter values are default. The study of the Distribution Coefficient of Uranium and Thorium solutions with clay uses the Pacific North West Standard Laboratory procedure. Uranium and Thorium solutions are dissolved with clay, stirred with a shaker, then separated and analyzed using a UV-Vis spectrometer with variations in time, concentration, and pH.

The level of parameter sensitivity were divided into four categories: very low, low, medium, and high. A total of 97 parameters had very low sensitivity so that they did not change the dose value. 68 parameters had low sensitivity, for example, Intake to Animal Product Transfer Factor U-238. 35 parameters had medium sensitivity, for example, precipitation parameters. 13 parameters had high sensitivity, for example, fraction of time spent on primary contamination at indoor.

The results of the Thorium distribution coefficient study with clay showed an increase from the 5th minute, reaching an optimum at 211.889 at the 10<sup>th</sup> minute, with 87.60% adsorption. This process follows a pseudo-first-order model, indicating a rapid diffusion mechanism at the beginning of contact. In addition to



# **PENGARUH PARAMETER LOKAL PADA PENGKAJIAN KESELAMATAN RADIASI DESAIN PENIMBUSAN AKHIR LIMBAH MINERAL IKUTAN RADIOAKTIF**

**ANDRY SETIAWAN**

Tesis  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Magister pada  
Program Studi Biofisika

**PROGRAM STUDI BIOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tesis:  
Prof. Dr. Husin Alatas, M.Si

---

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Judul Tesis : Pengaruh Parameter Lokal Pada Pengkajian Keselamatan Radiasi  
Desain Penimbusan Akhir Limbah Mineral Ikutan Radioaktif

Nama : Andry Setiawan

NIM : G7501232011

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Dr. Mersi Kurniati, M.Si



Pembimbing 2:

Dr. Ir. Dadong Iskandar, M.Eng

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Mersi Kurniati, M.Si

NIP. 196811171998022001

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu

Pengetahuan Alam :

Dr. Berry Juliandi, M.Si

NIP.197807232007011001.

Tanggal Ujian: 21 April 2026

(tanggal pelaksanaan ujian)

Tanggal Lulus:

(tanggal penandatanganan oleh Dekan FMIPA)



Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSRÉ, silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code



## PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Juni 2024 sampai bulan April 2026 ini ialah keselamatan radiasi desain penimbunan akhir limbah mineral ikutan radioaktif, dengan judul “Pengaruh Parameter Lokal untuk Pengkajian Keselamatan Radiasi Desain Penimbunan Akhr Limbah Mineral Ikutan Radioaktif”

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Ibu Dr. Mersi Kurniati, M.Si dan Bapak Dr. Ir. Dadong Iskandar, M.Eng yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator ujian tesis Bapak Dr Irmansyah, M.Si dan penguji luar komisi pembimbing Bapak Prof. Dr. Husin Alatas, M.Si. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah memberikan pendanaan studi, Bapak Dr Maman Kartaman yang telah memberikan kesempatan penelitian dan segenap rekan-rekan kelompok riset teknologi pengelolaan limbah radioaktif. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah mertua, ibu kandung, ibu mertua, istri serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, April 2026

*Andry Setiawan*

## DAFTAR ISI

RINGKASAN	i
SUMMARY	i
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Kebaruan ( <i>novelty</i> )	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Mineral Ikuran Radioaktif, Dampak yang Ditimbulkan dan Penimbusan Akhir	4
2.2 Pemilihan Tapak Penimbusan Akhir	6
2.3 Desain Fasilitas Penimbusan Akhir	8
2.4 Perangkat Lunak RESRAD OFFSITE 4.0	9
2.5 Koefisien Distribusi ( $K_d$ )	10
2.6 Resiko Kanker Akibat Radiasi	11
III METODE	14
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	14
3.2 Alat dan Bahan	14
3.3 Prosedur Kerja	15
3.4 Analisis data	23
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Analisis Hasil Sensitivitas Parameter RESRAD	26
4.2 Analisis Hasil Penelitian Penentuan Koefisien Distribusi ( $K_d$ )	37
4.3 Analisis Hasil Simulasi Parameter Lokal dan <i>Default</i> .	49
V SIMPULAN DAN SARAN	58
5.1 Simpulan	58
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	63
RIWAYAT HIDUP	74



## DAFTAR TABEL

1	Kriteria lingkungan tapak penimbunan akhir limbah MIR	7
2	Parameter masukan dalam perangkat lunak RESRAD.	20
3	Contoh tabel simulasi sensitivitas parameter	23
4	Kriteria skor yang diberikan kepada parameter berdasarkan perbedaan dengan <i>default</i>	23
5	Contoh penilaian perangkaan parameter	24
6	Contoh tabel perbandingan hasil simulasi memakai parameter $K_d$ <i>default</i> dan parameter $K_d$ lokal	25
7	Parameter yang memiliki sensitivitas rendah dan sangat rendah	27
8	Parameter yang memiliki sensitivitas sedang	33
9	Parameter yang memiliki sensitivitas tinggi	35
10	Hasil eksperimen nilai koefisien distribusi Torium variasi waktu	37
11	Hasil eksperimen nilai koefisien distribusi Torium variasi konsentrasi	38
12	Hasil eksperimen nilai koefisien distribusi Torium variasi pH	42
13	Hasil pengujian spektrometer UV-Vis terhadap variasi waktu kontak dan nilai $K_d$ pada Uranium	44
14	Hasil pengujian spektrometer UV-Vis terhadap variasi konsentrasi dan nilai $K_d$ Uranium	46
15	Hasil pengujian spektrometer UV-Vis terhadap variasi pH dan nilai $K_d$ Uranium	47
16	Perbandingan hasil prakiraan nilai menggunakan parameter $K_d$ default dan $K_d$ lokal.	56

## DAFTAR GAMBAR

1	Diagram skema peluruhan radionuklida yang terdapat pada limbah MIR	5
2	Contoh desain tempat penimbunan akhir limbah MIR.	8
3	Diagram efek radiasi terhadap manusia	12
4	Efek radiasi terhadap DNA	13
5	Diagram alir penelitian tesis	15
6	Diagram alir penentuan nilai koefisien distribusi.	19
7	Korelasi antara parameter intake to animal product transfer factor U-238 dan perkiraan dosis.	32
8	Korelasi antara parameter precipitation (curah hujan) dengan dosis.	34
9	Korelasi antara parameter fraction of time spent on primary contamination at indoor dengan dosis.	36
10	Grafik korelasi antara waktu dan koefisien distribusi.	38
11	Korelasi antara konsentrasi dan persen Torium terserap.	39
12	Grafik isoterm freudlich antara $C_e$ vs $Q_e$	40
13	Grafik isoterm langmuir korelasi antara $C_e$ dan $C_e/Q_e$	41
14	Korelasi antara pH dan persen Torium terserap.	42
15	Korelasi antara pH dan koefisien distribusi.	43

16	Hubungan waktu kontak dengan konsentrasi uranium nitrat ads	45
17	Hubungan antara waktu kontak dengan koefisien distribusi ( $K_d$ )	45
18	Korelasi konsentrasi Uranium Nitrat dengan nilai koefisien distribusi ( $K_d$ )	46
19	Hubungan konsentrasi Uranium Nitrat dalam larutan ( $C_aq$ ) dan yang teradsorpsi pada lempung ( $C_{ads}$ )	47
20	Hubungan antara pH dengan % absorben	48
21	Hubungan pH Uranium Nitrat dengan nilai koefisien distribusi ( $K_d$ ).	48
22	Dosis yang diterima oleh masyarakat pada jarak 200 meter dari titik pusat penimbunan akhir hingga 50.000 tahun.	50
23	Dosis yang diterima oleh masyarakat pada jarak 200 meter dari titik pusat penimbunan akhir hingga 125 tahun.	51
24	Grafik dosis akan diterima pada jarak 200 meter dari fasilitas penimbunan akhir yang dihasilkan oleh K-40, Ra-226, dan Th-232.	51
25	Grafik dosis yang diterima pada jarak 200 meter yang diakibatkan Uranium dan turunannya.	52
26	Konsentrasi aktivitas radionuklida sebagai fungsi waktu pada kontaminasi primer.	53
27	Penambahan risiko kanker pada orang yang berjarak 200 meter dari fasilitas penimbunan akhir.	54
28	Simulasi dosis selama 50.000 tahun dengan nilai koefisien distribusi ( $K_d$ ) lokal.	55
29	Simulasi penambahan resiko kanker selama 50.000 tahun dengan nilai koefisien distribusi ( $K_d$ ) lokal.	56

## DAFTAR LAMPIRAN

1	Hasil simulasi dosis radiasi untuk nilai <i>default</i> dan nilai perubahannya untuk 100 Tahun, 500 Tahun, dan 1000 Tahun.	64
2	Nilai perubahan parameter dibandingkan dengan nilai prakiraan dosis yang diperoleh dari nilai parameter <i>default</i>	67
3	Data rangking parameter RESRAD	71
4	Dokumentasi foto penelitian tesis	74