

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN .....	xv
INTISARI.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1. Latar Belakang.....	1
I.2. Rumusan Masalah .....	3
I.3. Batasan Masalah.....	3
I.4. Tujuan.....	4
I.5. Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
BAB III DASAR TEORI .....	10
III.1. Tambang Batu Bara PT. Bukit Asam Tbk.....	10
III.2. Spektrometri Gamma.....	11
III.2.1. Pengertian Spektrometri Gamma .....	11
III.2.2. Perangkat Spektrometri Gamma .....	11
III.2.3. Prinsip Kerja Spektrometer Gamma .....	13
III.3. <i>Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)</i> .....	14
III.3.1. Pengertian NORM.....	14
III.3.2. Distribusi NORM di Tanah.....	17
III.4. <i>Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactivity (TENORM)</i> .....	18
III.4.1. Pengertian TENORM.....	18



III.4.2.	Industri Penghasil TENORM .....	18
III.5.	Keseimbangan Radionuklida .....	19
III.5.1.	Keseimbangan Sekuler .....	20
III.5.2.	Keseimbangan Transien .....	21
III.5.3.	Tidak Terjadi Keseimbangan .....	22
III.6.	Dosis Radiasi .....	22
III.6.1.	Nilai Batas Dosis .....	23
III.7.	Proteksi Radiasi .....	24
III.7.1.	Dasar Proteksi Radiasi .....	24
III.7.2.	Prinsip Proteksi Radiasi .....	25
III.7.3.	Jalur Pelepasan Radiasi ke Individu .....	25
III.8.	Parameter <i>Radiological Hazards</i> .....	27
III.8.1.	Aktivitas Jenis Radium Ekuivalen .....	28
III.8.2.	Indeks Bahaya Eksternal .....	28
III.8.3.	Indeks Bahaya Internal .....	29
III.8.4.	Laju Dosis Serap dan Laju Dosis Efektif .....	29
III.8.5.	<i>Excess Lifetime Cancer Risk</i> .....	30
III.9.	Pemodelan <i>Radiological Hazards</i> dengan <i>RESRAD-ONSITE 7.2</i> .....	30
III.9.1.	Tujuan Pemodelan .....	30
III.9.2.	Model dan Kegunaan .....	31
III.9.3.	<i>RESRAD-ONSITE 7.2</i> .....	31
III.9.4.	Prediksi Dosis Menggunakan RESRAD .....	34
III.9.5.	Prediksi Risiko Kanker Menggunakan RESRAD .....	40
BAB IV	METODOLOGI PENELITIAN .....	42
IV.1.	Alat dan Bahan Penelitian .....	42
IV.1.1.	Alat Penelitian .....	42
IV.1.2.	Bahan Penelitian .....	44
IV.2.	Tata Laksana Penelitian .....	44
IV.2.1.	Survei Lokasi .....	45
IV.2.2.	Pengambilan Sampel .....	47
IV.2.3.	Preparasi Sampel .....	48



IV.2.4. Pencacahan Sampel.....	49
IV.3. Analisis Penelitian .....	50
IV.3.1. Kalibrasi Energi .....	50
IV.3.2. Kalibrasi Efisiensi .....	50
IV.3.3. Analisis Radioaktivitas dalam Sampel.....	51
IV.3.4. Analisis Parameter Bahaya Radiologi.....	52
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	54
V.1. Kalibrasi Energi dan Efisiensi Spektrometer Gamma.....	54
V.1.1. Kalibrasi Energi .....	54
V.1.2. Kalibrasi Efisiensi .....	55
V.2. <i>Lower Limit Detection</i> (LLD) .....	58
V.3. Radioaktivitas Sampel Tanah dan Batu Bara .....	59
V.4. Indeks Bahaya Sampel Tanah dan Batu Bara.....	64
V.5. Dosis Radiasi dan Risiko Kanker dengan <i>RESRAD-ONSITE 7.2</i> .....	66
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....	73
VI.1. Kesimpulan .....	73
VI.2. Saran .....	74
DAFTAR PUSTAKA .....	76
LAMPIRAN.....	85
Lampiran A. Spektrum Gamma .....	85
Lampiran B. Perhitungan Kalibrasi Energi dan Efisiensi .....	89
Lampiran C. Perhitungan Lower Limit Detection .....	92
Lampiran D. Aktivitas Jenis Radionuklida .....	92
Lampiran E. Parameter Input RESRAD-ONSITE 7.2 .....	99



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1. Peta Lokasi Tambang Batu Bara PT. Bukit Asam Tbk.....	10
Gambar 3. 2. Skema Peluruhan Deret Uranium.....	15
Gambar 3. 3. Skema Peluruhan Deret Thorium.....	16
Gambar 3. 4. Skema Peluruhan Deret Aktinium.....	16
Gambar 3. 5. Kesenjangan Sekuler.....	21
Gambar 3. 6. Kesenjangan Transien.....	22
Gambar 3. 7. Tidak Terjadi Kesenjangan .....	22
Gambar 3. 8. Skema jalur paparan radiasi pada <i>RESRAD-ONSITE 7.2</i> .....	33
Gambar 3. 9. Bentuk Geometri Daerah Kontaminasi untuk Perhitungan Faktor Area .....	38
Gambar 3. 10. Tampang Lintang Bentuk Geometri Daerah Kontaminasi untuk Perhitungan Faktor Area .....	38
Gambar 4. 1. Skema Alat Spektrometer Gamma.....	43
Gambar 4. 2. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian.....	45
Gambar 4. 3. Peta Titik Pengambilan Sampel .....	47
Gambar 5. 1. Spektrum Sumber Standar <i>Soil 6</i> .....	54
Gambar 5. 2. Hubungan Energi terhadap Nomor Kanal.....	55
Gambar 5. 3. Grafik Hubungan (ln Efisiensi) terhadap (ln Energi).....	57
Gambar 5. 4. Spektrum Sampel Tanah No. 1 Kluster <i>Viewpoint</i> .....	59
Gambar 5. 5. Spektrum Sampel Batu Bara No. 1 Kluster <i>Stockpile</i> .....	59
Gambar 5. 6. Perbandingan Indeks bahaya Penelitian dengan Rekomendasi UNSCEAR untuk (a) <i>Radium Equivalent</i> , (b) Indeks Bahaya Eksternal, dan (c) Indeks Bahaya Internal.....	65
Gambar 5. 7. Prediksi Laju Dosis Efektif Tahunan Rerata pada Kluster <i>Stockpile</i> terhadap Variasi Ketebalan Kontaminan .....	69
Gambar A. 1. Spektrum Sumber Standar <i>Soil 6</i> .....	85
Gambar A. 2. Spektrum Radiasi Latar .....	85
Gambar A. 3. Spektrum Sampel PT-Bb-1 .....	85



Gambar A. 4. Spektrum Sampel PT-Bb-2 .....	86
Gambar A. 5. Spektrum Sampel PT-Bb-3 .....	86
Gambar A. 6. Spektrum Sampel SP-Bb-1.....	86
Gambar A. 7. Spektrum Sampel SP-Bb-2.....	87
Gambar A. 8. Spektrum Sampel SP-Bb-3.....	87
Gambar A. 9. Spektrum Sampel TT-Th-1 .....	87
Gambar A. 10. Spektrum Sampel TT-Th-2 .....	88
Gambar A. 11. Spektrum Sampel TT-Th-3 .....	88
Gambar A. 12. Spektrum Sampel VP-Th-1 .....	88
Gambar A. 13. Spektrum Sampel VP-Th-2 .....	89
Gambar A. 14. Spektrum Sampel VP-Th-3 .....	89



## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Nilai DCF Radiasi Gamma Eksternal .....	35
Tabel 3. 2. Nilai Parameter A, B, KA, dan KB untuk Faktor Kedalaman <i>Cover</i> .	37
Tabel 4. 1. Lokasi Pengambilan Sampel .....	46
Tabel 5. 1. Energi vs Nomor Kanal Sumber Standar Soil 6 .....	54
Tabel 5. 2. Efisiensi Pencacahan Radionuklida $^{226}\text{Ra}$ .....	56
Tabel 5. 3. Nilai Efisiensi Pencacahan Tiap Radionuklida.....	58
Tabel 5. 4. <i>Lower Limit Detection</i> .....	58
Tabel 5. 5. Aktivitas Jenis Radionuklida dalam Sampel Batu Bara .....	60
Tabel 5. 6. Perbandingan Aktivitas Jenis $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , dan $^{40}\text{K}$ Sampel Batu Bara di Lokasi Air Laya dengan Berbagai Penelitain Sebelumnya.....	60
Tabel 5. 7. Aktivitas Jenis Radionuklida dalam Sampel Tanah.....	62
Tabel 5. 8. Perbandingan Aktivitas Jenis $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , dan $^{40}\text{K}$ Sampel Tanah di Lokasi Air Laya dengan Berbagai Penelitain Sebelumnya.....	63
Tabel 5. 9. Parameter Indeks Bahaya pada Sampel .....	64
Tabel 5. 10. Asumsi untuk Permodelan <i>RESRAD-ONSITE 7.2</i> .....	67
Tabel 5. 11. Hasil Simulasi Perhitungan Laju Dosis dan Risiko Kanker pada Ketebalan Kontaminan 1 m.....	71
Tabel 5. 12. Hasil Simulasi Laju Dosis Efektif pada Kluster <i>Stockpile</i> dengan Variasi Ketebalan Kontaminan .....	68
Tabel B. 1. Informasi Aktivitas Jenis Radionuklida pada <i>Soil 6</i> .....	90
Tabel B. 2. Hasil Perhitungan Efisiensi Pencacahan $^{226}\text{Ra}$ .....	90
Tabel B. 3. Validasi Persamaan Kalibrasi Efisiensi pada $^{137}\text{Cs}$ .....	91
Tabel C. 1. Hasil Perhitungan LLD .....	92
Tabel D. 1. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel SP-Bb-1 .....	93
Tabel D. 2. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel SP-Bb-2 .....	93
Tabel D. 3. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel SP-Bb-3 .....	94
Tabel D. 4. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel PT-Bb-1 .....	94
Tabel D. 5. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel PT-Bb-2 .....	95



Tabel D. 6. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel PT-Bb-3 .....	95
Tabel D. 7. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel TT-Th-1 .....	96
Tabel D. 8. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel TT-Th-2 .....	96
Tabel D. 9. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel TT-Th-3 .....	97
Tabel D. 10. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel VP-Th-1 .....	97
Tabel D. 11. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel VP-Th-2 .....	98
Tabel D. 12. Hasil Perhitungan Aktivitas Jenis Sampel VP-Th-3 .....	98
Tabel E. 1. Parameter Input <i>RESRAD-ONSITE</i> 7.2 .....	99



## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

### Lambang Romawi

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
A	Aktivitas jenis radionuklida	Bq/kg
A <sub>0</sub>	Aktivitas radionuklida pada kondisi awal	Bq
A <sub>t</sub>	Aktivitas radionuklida pada waktu ke t	Bq
B	<i>Build-up factor</i>	-
C	Cacah radiasi	cacah
C <sub>d</sub>	ketebalan bahan pelindung	Satuan panjang
D	Laju dosis serap	Gy/jam
D <sub>F</sub>	Faktor risiko fatal	Sv <sup>-1</sup>
D <sub>L</sub>	Umur hidup rerata manusia	tahun
E	Laju dosis ekuivalen efektif	Sv/tahun
E <sub>γ</sub>	Energi radiasi gamma	keV
f <sub>k</sub>	Faktor serapan diri sumber	-
H	Dosis ekuivalen	Sv
H <sub>ex</sub>	Indeks bahaya eksternal	-
H <sub>in</sub>	Indeks bahaya internal	-
m	Massa	gram
N	Jumlah nuklida	-
R	Radius	Satuan panjang
R <sub>aeq</sub>	Aktivitas radium ekuivalen	Bq/kg
t	Waktu pencacahan	Satuan waktu
t <sub>1/2</sub>	Waktu paruh radionuklida	Satuan waktu
T <sub>a</sub>	Jarak dari titik tengah reseptor ke bidang antarmuka sumber dan udara	Satuan panjang
T <sub>c</sub>	Ketebalan material <i>cover</i> di lapisan tanah	Satuan panjang
T <sub>s</sub>	Ketebalan sumber di lapisan tanah	Satuan panjang





X	Paparan radiasi	C/kg
$p_y$	Yield radiasi gamma	%

### Lambang Yunani

Lambang	Kuantitas	Satuan
$\varepsilon$	Efisiensi pencacahan	-
$\lambda$	Konstanta peluruhan	Satuan waktu <sup>-1</sup>
$\rho$	Densitas material	g/cm <sup>3</sup>
$\mu_m$	Koefisien atenuasi massa	g/cm <sup>2</sup>
$\mu$	Koefisien atenuasi linier	/cm <sup>1</sup>

### Subskrip

Lambang	Deskripsi
Bg	Background
eq	Ekuivalen
ex	Eksternal
in	Internal
spl	Sampel
st	Standar

### Singkatan

Lambang	Deskripsi
AARST	American Association of Radon Scientists and Technologists
ADC	Analog to Digital Converter
ALARA	As Low as Reasonably Achievable
BAPETEN	Badan Pengawas Teknologi Nuklir
BATAN	Badan Tenaga Nuklir Nasional
BBM	Bahan Bakar Minyak
BF	Branching Factor
BRIN	Badan Riset dan Inovasi Nasional
DCF	Dose Conversion Factor
DSR	Dose/Source Ratio



ED	Durasi Paparan
EDE	<i>Effective Dose Equivalent</i>
ELCR	<i>Excess Lifetime Cancer Risk</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETF	<i>Environment Transfer Factor</i>
FA	<i>Area Factor</i>
FCD	<i>Cover-Depth Factor</i>
FD	<i>Depth Factor</i>
FGR	<i>Federal Guidance Report</i>
FO	Faktor Hunian dan Pelindung
FS	<i>Source Factor</i>
HPGe	<i>High purity germanium</i>
HV	<i>High Voltage</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
LLD	<i>Lower Limit Detection</i>
MCA	<i>Multi-Channel Analyzer</i>
NBD	Nilai batas dosis
NORM	<i>Naturally Occurring Radioactivity Material</i>
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PTBA	PT. Bukit Asam Tbk
QF	<i>Quality Factor</i>
RESRAD	<i>Residual Radioactivity</i>
RS	Koefisien Rasio akibat Paparan Eksternal
SF	<i>Source Factor</i>
TENORM	<i>Technologically Enhanced Occurring Radioactivity Material</i>
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

