

**PENILAIAN BAHAYA RADIOLOGIS AKIBAT
RADIOAKTIVITAS ALAM PADA SAMPEL AIR DI SEPANJANG
SUNGAI BATANG HARI, JAMBI**

SKRIPSI



**Faza Atika An'umillah
1810441035**

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG**

2022

**PENILAIAN BAHAYA RADIOLOGIS AKIBAT
RADIOAKTIVITAS ALAM PADA SAMPEL AIR DI SEPANJANG
SUNGAI BATANG HARI, JAMBI**

SKRIPSI

**Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
dari Universitas Andalas**



**Faza Atika An'umillah
1810441035**

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG**

2022

**PENILAIAN BAHAYA RADIOLOGIS AKIBAT
RADIOAKTIVITAS ALAM PADA SAMPEL AIR DI SEPANJANG
SUNGAI BATANG HARI, JAMBI**

disusun oleh:

FAZA ATIKA AN'UMILLAH

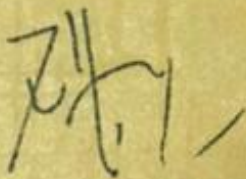
1810441035

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji

pada tanggal 17 Oktober 2022

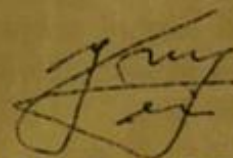
Tim Penguji

Pembimbing Utama,



Sri Oktamuliani, Ph.D
NIP. 198910032019032016

Pembimbing Pendamping,



Kusdiana, S.T
NIP.197008061992011001

Penguji I



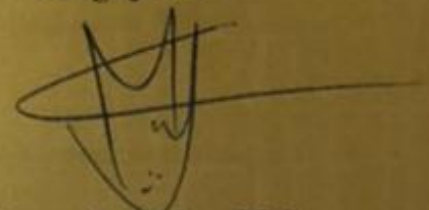
Rico Adrial, M.Si
NIP.198803212019031007

Penguji II



Dr. Ramacos Fardela, M.Sc
NIP. 198904042022031004

Penguji III



Mutva Vonnisa, M.Sc
NIP.198508122012122001

PENILAIAN BAHAYA RADIOLOGIS AKIBAT RADIOAKTIVITAS ALAM PADA SAMPEL AIR DI SEPANJANG SUNGAI BATANG HARI, JAMBI

ABSTRAK

Sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) Batang Hari masih ditemukan lokasi aktivitas PETI (Penambangan Emas Tanpa Izin) yang dapat mengkontaminasi melalui unsur-unsur radionuklida alam seperti Uranium-238 (^{238}U), Torium-232 (^{232}Th), Radium-226 (^{226}Ra), Polonium-210 (^{210}Po), Kalium (^{40}K), dan Timbel-210 (^{210}Pb). Penelitian ini bertujuan untuk mengukur konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada sampel air sungai, air sumur (bawah tanah), dan air minum dari daerah yang dialiri oleh sungai Batang Hari dan menghitung parameter bahaya radiologi pada sampel. Sampel diambil sebanyak 3 titik lokasi berbeda dari tiga jenis sampel air pada Kabupaten Muaro Jambi, Kota Jambi, Kabupaten Batanghari, Kabupaten Tebo dan Kabupaten Bungo. Sampel diukur menggunakan spektrometer gamma *High Purity Germanium* (HPGe) selama 17 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai konsentrasi aktivitas tertinggi ^{238}U terdapat pada sampel air minum yaitu $1,29 \pm 0,72$ Bq.L⁻¹ di Kabupaten Muaro Jambi, konsentrasi aktivitas tertinggi ^{232}Th terdapat pada sampel air sumur yaitu $0,04 \pm 0,03$ Bq.L⁻¹ di Kabupaten Tebo, dan konsentrasi aktivitas tertinggi ^{40}K terdapat pada sampel air minum yaitu $0,68 \pm 0,04$ Bq.L⁻¹ di Kabupaten Muaro Jambi. Nilai rata-rata dari parameter bahaya radiologi pada sampel meliputi $R_{a_{eq}}$ yaitu 0,307653, $AEDE$ yaitu $1,771 \times 10^{-6}$, dan indeks bahaya eksternal dan internal masing-masing adalah 0,00083 dan 0,00155. Konsentrasi aktivitas radionuklida dan parameter bahaya radiologi pada sampel air di sepanjang sungai Batang Hari, Jambi masih berada di bawah batas ambang yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009 yaitu sebesar 1.000 Bq.L⁻¹ untuk setiap radionuklida anggota deret uranium dan torium dan 10.000 Bq.L⁻¹ untuk kalium, WHO *Guidelines for Water Quality* 2011 untuk masing-masing ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K adalah 10 Bq.L⁻¹, 1 Bq.L⁻¹ dan 20 Bq.L⁻¹, dan UNSCEAR *Report* 2000 untuk konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada air masing-masing adalah 1 Bq.L⁻¹, 1 Bq.L⁻¹, dan 10 Bq.L⁻¹. Batas ambang yang direkomendasikan pada parameter bahaya radiologi yang meliputi $R_{a_{eq}}$ adalah 370 Bq.L⁻¹, $AEDE$ adalah 1 mSv.y⁻¹ dan indeks bahaya H_{ex} dan H_{in} masing-masing adalah 1. Penelitian ini menunjukkan bahwa air aman dan memenuhi syarat standar aspek radiologis kualitas air.

Kata kunci: air, bahaya radiologis, konsentrasi aktivitas, spektrometer gamma, sungai batang hari.

RADIOLOGICAL HAZARDS ESTIMATION BY NATURAL RADIOACTIVITY IN WATER SAMPLES ALONG BATANG HARI RIVER, JAMBI

ABSTRACT

Illegal mining activity is still operated along watershed of Batang Hari that could potentially be contaminated by natural radionuclides, which are Uranium-238 (^{238}U), Thorium-232 (^{232}Th), Radium-226 (^{226}Ra), Polonium-210 (^{210}Po), Kalium (^{40}K), and Lead-210 (^{210}Pb). This study aimed to measure activity concentrations of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K in river water, groundwater, and drinking water sample along Batang Hari River, then calculate radiological hazard parameters in the sample. The sample collects from 3 different locations from 3 sample type at Muaro Jambi District, Jambi City, District Batanghari, Tebo District and Bungo District. The samples were measured using gamma spectrometry High Purity Germanium (HPGe) for 17 hours. The results showed that the highest ^{238}U radioactivity concentration occurs in drinking water $0,1916 \pm 0,05 \text{ Bq.L}^{-1}$ from Muaro Jambi District, the highest ^{232}Th radioactivity concentration occurs in groundwater $0,04 \pm 0,03 \text{ Bq.L}^{-1}$ from Tebo District, and the highest ^{40}K radioactivity concentration occurs in drinking water $0,68 \pm 0,04 \text{ Bq.L}^{-1}$ from Muaro Jambi District. The average value of radiology hazard parameters sample consists of Ra_{eq} 0,307653, $AEDE$ that is $1,771 \times 10^{-6}$, and each external and internal hazard index are 0,00083 and 0,00155 respectively. Activity concentration of radionuclide and radiological hazard parameters in water samples along Batang Hari River, Jambi is below the limit recommended by PERKA BAPETEN 2009 that is 1.000 Bq.L^{-1} for every decay daughter radionuclides of uranium and thorium and 10.000 Bq.L^{-1} for kalium, WHO *Guidelines for Water Quality* 2011 for each ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K is 10 Bq.L^{-1} , 1 Bq.L^{-1} and 20 Bq.L^{-1} , and UNSCEAR *Report* 2000 for each ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K activity concentration in the water sample is 1 Bq.L^{-1} , 1 Bq.L^{-1} , dan 10 Bq.L^{-1} . The recommended radiology hazard parameter limit that conclude of Ra_{eq} is 370 Bq.L^{-1} , $AEDE$ is 1 mSv.y^{-1} and hazard index H_{ex} and H_{in} are 1. This study showed that the water is safe and fulfill the radiological aspect of water quality requirements.

Keywords: activity concentration, batang hari river, gamma spectrometry, radiological hazard, water.

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian dan penyusunan skripsi yang berjudul “Penilaian Bahaya Radiologis Akibat Radioaktivitas Alam Pada Sampel Air di Sepanjang Sungai Batang Hari, Jambi” dapat diselesaikan. Shalawat beserta salam penulis sampaikan untuk Baginda Rasulullah SAW, kekasih Allah SWT yang menjadi panutan umat Islam serta menjadi suri tauladan yang baik.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna baik itu dari segi materi, penulisan, dan penyajian. Sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk tulisan ini. Penelitian dan penyusunan skripsi ini telah dilakukan dengan maksimal dan mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam pembuatan skripsi ini, yaitu:

1. Kedua orang tua, Ayahanda Supathan Sugito, S.H. dan Ibunda Nurbaiti, S.Ag, M.Fil.I. yang telah mencurahkan kasih sayang dan mengirimkan doa serta semangat selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini berlangsung.
2. Ibu Sri Oktamuliani, Ph.D selaku pembimbing I yang ditengah-tengah kesibukan sebagai dosen serta aktivitas kerjanya yang padat telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan masukan, bimbingan dan

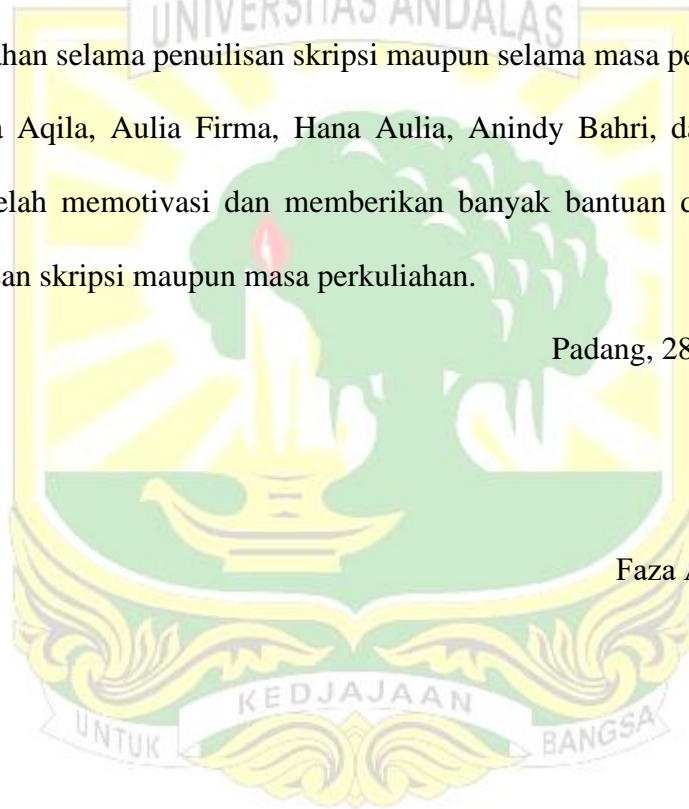
pengarahan yang bermanfaat kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

3. Bapak Kusdiana, S.T selaku pembimbing II yang ditengah-tengah kesibukan dan aktivitas kerjanya yang padat telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan masukan, bimbingan dan pengarahan yang bermanfaat kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
4. Bapak Rico Adrial, M.Si, Bapak Dr. Ramacos Fardela M.Sc, dan Ibu Mutya Vonnisa M.Sc selaku Dosen Penguji yang telah banyak memberikan saran dan masukan kepada penulis dalam menyusun skripsi ini.
5. Ibu Dr. Dwi Puryanti selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama di kampus.
6. Bapak Wahyudi, S.T selaku penanggung jawab ruang pencacahan spektrometer gamma yang telah membimbing penulis selama melakukan pencacahan sampel.
7. Bapak Eka, Bapak Bukhori, Mas Radhia, teman-teman penelitian terutama Findi dan Lia dan semua pegawai di DPLFRKST-BRIN yang telah memberikan semangat, masukan dan saran selama penelitian di DPLFRKST-BRIN.
8. Bapak Dr. Afdhal Muttaqin, M.Si selaku kepala Departemen Fisika beserta Bapak/Ibu Dosen dan seluruh staff Tata Usaha di lingkungan Jurusan Fisika yang telah membimbing dan berbagi ilmu serta semangat.

9. *Support system*, Icha, Ester, Dila, Nabila, Wije, Thasa, Fifi, Kak Wahidah dan Kak Alya yang telah mendengarkan keluh-kesah penulis dan tidak pernah lelah memberikan semangat, motivasi dan bantuan kepada penulis baik selama penulisan skripsi maupun selama masa perkuliahan.
10. Kak Indah, Fayat, Andi, Iqbal, Rafi, Abi, Bang Salman, Bang Irfan, Refki, Kayla, Eka, dan Riyandi yang telah memberikan banyak bantuan, semangat, dan arahan selama penulisan skripsi maupun selama masa perkuliahan.
11. Luthfia Aqila, Aulia Firma, Hana Aulia, Anindy Bahri, dan Dhiyah Aqila yang telah memotivasi dan memberikan banyak bantuan dan saran selama penulisan skripsi maupun masa perkuliahan.

Padang, 28 September 2022

Faza Atika An'umillah



DAFTAR ISI

	halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian	4
1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah	5
BAB II LANDASAN TEORI	6
2.1 Radiasi.....	6
2.1.1 Klasifikasi Radiasi Berdasarkan Tingkat Energi	6
2.1.2 Klasifikasi Radiasi Berdasarkan Sumbernya	7
2.2 <i>Naturally Occuring Radioactives Material (NORM)</i>	11
2.3 Radioaktivitas.....	13
2.4 Spektrometer Gamma.....	19
2.4.1 Detektor HPGe	20
2.4.2 Kalibrasi Spektrometer Gamma	21
2.4.3 Konsentrasi Zat Radioaktif.....	24
2.4.4 Ketidakpastian Pengukuran Sampel.....	24
2.5 Parameter Bahaya Radiologi	25
2.5.1 Dosis Efektif Ekuivalen Tahunan (<i>AEDE</i>).....	25

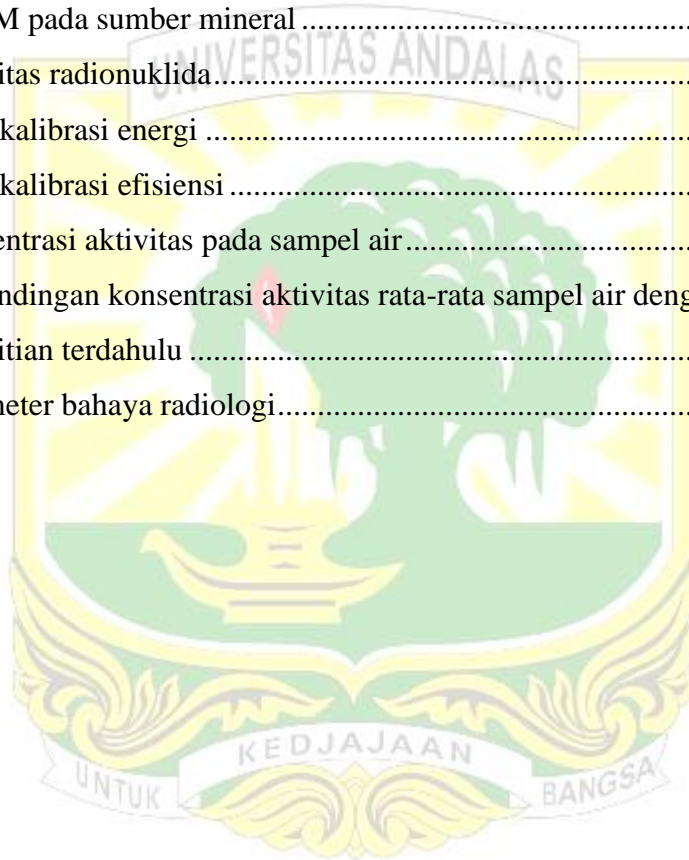
2.5.2	Aktivitas Ekuivalen Radium (Ra_{eq}).....	26
2.5.3	Indeks Bahaya Radiasi	27
2.6	Batas Ambang Konsentrasi Aktivitas dan Parameter Bahaya Radiologi.	27
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1	Waktu dan Lokasi Penelitian.....	29
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	29
3.2.1	Alat Penelitian	29
3.2.2	Bahan Penelitian.....	32
3.3	Teknik Penelitian.....	34
3.3.1	Pengambilan Sampel	35
3.3.2	Preparasi Sampel	36
3.3.3	Pengukuran Radiasi Latar.....	37
3.3.4	Kalibrasi Spektrometer Gamma	37
3.3.5	Pengukuran Radionuklida pada Sampel	37
3.3.6	Pengolahan Data	38
3.3.7	Analisis Data.....	38
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1	Kalibrasi Spektrometer Gamma	39
4.1.1	Kalibrasi Energi	39
4.1.2	Kalibrasi Efisiensi.....	40
4.2	Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada Sampel Air.....	42
4.3	Parameter Bahaya Radiologi.....	48
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	51
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran.....	51
	DAFTAR PUSTAKA	52
	LAMPIRAN-LAMPIRAN	57

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Skema peluruhan ^{60}Co	19
Gambar 2.2 Diagram alir seperangkat spektrometer gamma.....	20
Gambar 3. 1 Spektrometer Gamma detektor HPGe seri GEM-F5930-1	30
Gambar 3. 2 <i>Inspector</i> 1000 sebagai penguat tegangan.....	30
Gambar 3.3 Seperangkat komputer untuk memantau cacahan spektrum gamma	31
Gambar 3.4 <i>Software</i> Maestro untuk mengidentifikasi radionuklida	31
Gambar 3.5 Timbangan digital untuk mengukur sampel.....	32
Gambar 3.6 Tabung marinelli 1 L.....	32
Gambar 3.7 Sampel air sungai, air bawah tanah, dan air minum.....	33
Gambar 3.8 Sumber standar Gamma campuran	33
Gambar 3.9 Lem Araldite	34
Gambar 3.10 Langkah-langkah penelitian	35
Gambar 3.11 Titik lokasi pengambilan sampel.....	36
Gambar 4.1 Kurva kalibrasi energi spektrometer Gamma.....	40
Gambar 4.2 Kurva kalibrasi efisiensi spektrometer Gamma	41
Gambar 4.3 Contoh pembacaan ROI pada sampel air	43
Gambar 4.4 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K dalam air sungai di daerah <i>sampling</i>	46
Gambar 4.5 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K dalam air sumur di daerah <i>sampling</i>	46
Gambar 4. 6 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K dalam air minum di daerah <i>sampling</i>	47

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 2.1 Dosis efektif tahunan rata-rata yang diterima penduduk dunia	7
Tabel 2.2 Deret Uranium.....	9
Tabel 2.3 Deret Aktinium	10
Tabel 2. 4 Deret Torium.....	10
Tabel 2.5 NORM pada sumber mineral	12
Tabel 3.1 Aktivitas radionuklida.....	34
Tabel 4.1 Hasil kalibrasi energi	39
Tabel 4.2 Hasil kalibrasi efisiensi	41
Tabel 4.3 Konsentrasi aktivitas pada sampel air.....	44
Tabel 4.4 Perbandingan konsentrasi aktivitas rata-rata sampel air dengan penelitian terdahulu	48
Tabel 4.5 Parameter bahaya radiologi.....	49



DAFTAR LAMPIRAN

halaman

Lampiran A Dokumentasi Penelitian.....	57
A. 1 Pengambilan sampel air	57
A. 2 Preparasi sampel air	58
A. 3 Pencacahan sampel air di DPLFRKST-BRIN	59
Lampiran B Spektrum Standar Kalibrasi dan Hasil Pengukuran	
Sampel Air.....	60
B. 1 Standar Kalibrasi.....	60
B. 2 Hasil Pengukuran Sampel Air	60
Lampiran C Pembacaan ROI Hasil Pencacahan.....	68
C. 1 Kalibrasi Energi dan Efisiensi Spektrometer Gamma.....	68
C. 2 Background Spektrometer Gamma	69
C. 3 Sampel Air Sungai.....	70
C. 4 Sampel Air Sumur	75
C. 5 Sampel Air Minum	80
Lampiran D Perhitungan Kalibrasi Energi dan Efisiensi.....	85
Lampiran E Perhitungan Konsentrasi Aktivitas.....	86
E. 1 Sampel Air Sungai.....	86
E. 2 Sampel Air Sumur (Bawah Tanah).....	89
E. 3 Sampel Air Minum	91
Lampiran F Perhitungan MDC Spektrometer Gamma.....	94
Lampiran G Titik Koordinat Pengambilan Sampel.....	95

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	pemakaian pertama per halaman
AEDE	<i>Annual Effectie Dose Equivalent</i>	27
Cps	<i>Count per second</i>	25
Dps	<i>Disintegration per second</i>	17
K	Kalium	1
MDC	<i>Minimum Detected Concentration</i>	26
MCA	<i>Multi Channel Analyzer</i>	21
Th	Torium	1
U	Uranium	1
LAMBANG		
A_t	Aktivitas	16
Bq	Becquerel, Satuan internasional aktivitas	16
C_{avg}	Konsentrasi rata-rata	25
C_{sp}	Konsentrasi sampel	25
C_i	Satuan aktivitas	17
H_{ex}	Indeks bahaya radiasi eksternal	28
H_{in}	Indeks bahaya radiasi internal	29
P_γ	Kelimpahan gamma energi	25
U_T	Ketidakpastian pengukuran	25
Ra_{eq}	Aktivitas radium ekuivalen	28
^{238}U	Isotop Uranium dengan nomor massa 238	2
^{232}Th	Isotop Torium dengan nomor massa 232	2
^{40}K	Isotop Kalium dengan nomor massa 40	2

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sungai Batang Hari merupakan sungai terpanjang di pulau Sumatera yang mengalir melewati dua provinsi, yakni Provinsi Sumatera Barat dan Provinsi Jambi. Sungai Batang Hari menjadi sumber kehidupan penduduk yang tinggal di sekitar sungai, mulai dari sumber perairan irigasi pada sawah, mata pencaharian nelayan, mandi, cuci, kakus (MCK), dan jalur transportasi. Sungai Batang Hari juga dimanfaatkan sebagai sumber utama beberapa Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) yang disalurkan ke penduduk yang tinggal di Provinsi Jambi, bahkan juga dimanfaatkan untuk kegiatan Penambangan Emas Tanpa Izin (PETI) (Desrizal dkk., 2019).

Sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) Batang Hari masih ditemukan titik-titik lokasi aktivitas PETI yang masih beroperasi. Aktivitas PETI di Kabupaten Batanghari sendiri masih terlihat di Desa Danau Embat dan Desa Sungai Ruan Ilir yang berada di Kecamatan Maro Sebo Ilir serta Kecamatan Muara Tembesi, yang berlokasi di Desa Rambutan Masam, Desa Pasar Muara Tembesi, dan Desa Rantau Kapas Mudo . Tak hanya itu, aktivitas PETI di Kabupaten Batang Hari juga terjadi di Desa Terusan, Kecamatan Muara Bulian. Kabupaten Tebo juga masih marak berlangsungnya aktivitas PETI yang terjadi di aliran sungai Batang Hari di Desa Tanjung Pucuk, Kecamatan VII Koto tepatnya di kawasan PT Tebo Multi Agro (TMA) (Yulianti dkk, 2017). Selain itu, kegiatan PETI di Kabupaten Bungo saat ini

sudah beroperasi hampir di seluruh kecamatan, salah satunya berlokasi di Desa Tanjung Gedang, Kecamatan Muaro Bungo (Desrizal dkk., 2019).

Penambangan emas menghasilkan unsur – unsur seperti Emas ($_{79}\text{Au}$), Uranium ($_{92}\text{U}$), dan Besi ($_{26}\text{Fe}$). Sumber air yang berasal dari sungai maupun bawah tanah yang berada di daerah penambangan emas dapat terkontaminasi dengan unsur – unsur radionuklida alam seperti Uranium-238 (^{238}U), Torium-232 (^{232}Th), Radium-226 (^{226}Ra), Polonium-210 (^{210}Po), Kalium (^{40}K), dan Timbel-210 (^{210}Pb) (Jobbágy dkk, 2010). Umumnya, paparan radiasi dari unsur - unsur radionuklida tersebut tidak menyebabkan efek kesehatan secara langsung, namun dapat meningkatkan resiko kanker secara perlahan. Radiasi dengan tingkat rendah yang ditemui di lingkungan dapat menjadi kontributor minor terhadap resiko kanker (EPA, 2012) sehingga kita tetap perlu waspada dengan radiasi alam yang diterima oleh tubuh.

Isotop Uranium (^{238}U , ^{234}U , dan ^{235}U) merupakan radiotoksik yang tidak boleh diabaikan. Beberapa radionuklida yang rantai peluruhannya berasal dari ^{238}U dan ^{235}U memiliki sifat radiotoksik yang tinggi (Ahmed, 2004). Radionuklida alam ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K dapat masuk ke dalam tubuh ketika inhalasi atau ingesti. Jika konsentrasi radionuklida tersebut berada di dalam tubuh dalam jumlah yang besar, dapat menyebabkan efek kesehatan seperti berkembangnya kanker sehingga perlu dilakukan pengukuran radionuklida di daerah yang diteliti (Madzunya dkk, 2020).

Banyak peneliti yang telah melakukan penelitian mengenai kandungan radionuklida alam beserta paramater bahaya radiologi yang terdapat di dalam sumber air, seperti (Kamunda, 2021) yang meneliti konsentrasi radioaktivitas alam pada

sampel air yang berada di daerah penambangan emas Provinsi Gauteng, Afrika Selatan. Pengukuran konsentrasi aktivitas dilakukan menggunakan spektrometer gamma. Parameter bahaya radiologi yang diteliti meliputi aktivitas ekuivalen radium (R_{eq}), nilai dosis efektif tahunan ekuivalen atau *annual effective dose equivalent* ($AEDE$), dan indeks bahaya eksternal (H_{ex}) dan indeks bahaya internal (H_{in}). Nilai rata-rata R_{eq} diketahui memiliki nilai yang masih di bawah batas yakni 370 Bq.L^{-1} dan nilai $AEDE$ pada sampel adalah $1,29 \times 10^{-3} \text{ mSv.y}^{-1}$ yang masih berada di bawah rata-rata dunia yaitu $2,4 \text{ mSv.y}^{-1}$. Selain itu, nilai H_{ex} dan H_{in} pada sampel air masih berada di bawah ketetapan sehingga sampel air masih aman untuk digunakan populasi di daerah tersebut.

(Mathuthu dkk, 2021) juga melakukan penelitian bahaya radiologi pada air sumur di daerah penambangan uranium di Namibia, Afrika Selatan. Pada penelitian ini, diketahui bahwa konsentrasi aktivitas uranium pada sampel air memiliki nilai yang melebihi ketetapan WHO dan indeks bahaya radiologi dari sampel memiliki nilai yang melebihi ketetapan UNSCEAR. Nilai rata-rata D (dosis serap) pada sampel adalah $108,11 \text{ nGy.h}^{-1}$ dan H_{in} yakni $1,26 \text{ mSv.y}^{-1}$ memiliki nilai yang lebih tinggi dari nilai yang direkomendasikan oleh UNSCEAR. Namun, nilai rata-rata R_{eq} , $AEDE$, dan H_{ex} memiliki nilai yang masih berada di bawah ketetapan UNSCEAR.

(Alaboodi dkk, 2020) telah meneliti bahaya radiologi yang terdapat di berbagai sumber air dari air minum, air sungai, dan air bawah tanah pada kota Al-Hurrah, Iraq. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai $AEDE$ pada air minum dan air sungai masih berada dibawah ketetapan ICRP, sedangkan air bawah tanah

memiliki *AEDE* yang melewati batas yang telah ditetapkan ICRP. Selain itu, nilai Ra_{eq} , D , H_{ex} dan H_{in} , serta indeks level representatif (I_V) yang merujuk pada tingkatan bahaya radiasi gamma, pada sampel masih berada dibawah ketetapan sehingga air aman untuk digunakan.

Pentingnya untuk menilai kualitas air yang dikonsumsi dari aspek bahaya radiologis oleh masyarakat di sepanjang aliran sungai Batang Hari, maka perlu dilakukan penelitian pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada air sungai, air bawah tanah (sumur), dan air minum untuk mengestimasi bahaya radiologi akibat radioaktivitas alam pada sampel yang diambil dari daerah yang dialiri oleh sungai Batang Hari. Keutamaan penelitian ini adalah untuk mengetahui konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada air serta mengestimasi bahaya radiologi pada sampel air yang meliputi Ra_{eq} , *AEDE*, serta H_{ex} dan H_{in} .

1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian adalah mengestimasi bahaya radiologi pada sampel air dengan menghitung konsentrasi aktivitas, aktivitas ekuivalen Radium (Ra_{eq}), dosis efektif tahunan ekuivalen (*AEDE*) dan indeks bahaya radiasi (H_{ex} dan H_{in}) dari konsentrasi aktivitas radioaktif unsur pada air sungai, air bawah tanah, dan air minum yang berasal dari daerah Sungai Batang Hari.

Manfaat dari penelitian adalah hasil penelitian dijadikan sebagai data yang memberikan informasi tingkat bahaya radiologis pada air yang digunakan oleh penduduk yang tinggal di sepanjang sungai Batang Hari, Jambi. Informasi yang

didapatkan ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran dan kewaspadaan masyarakat sekitar untuk berhati-hati dengan air yang diingesti (konsumsi). Data penelitian ini juga dijadikan sebagai data pembanding untuk waktu yang akan datang.

1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Lokasi pengambilan sampel air dilakukan di lima kabupaten yang dialiri sungai Batang Hari yaitu Kota Jambi, Kabupaten Muaro Jambi, Kabupaten Batang Hari, Kabupaten Tebo, dan Kabupaten Bungo. Pengolahan sampel dilakukan di Laboratorium Pencacah Gamma di Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset dan Kawasan Sains Teknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (DPLFRKST–BRIN). Jenis sampel air yang diteliti adalah air sungai, air sumur, dan air minum. Pengukuran konsentrasi aktivitas dibatasi pada radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K menggunakan spektrometer gamma detektor *High Purity Germanium (HPGe)*. Kemudian, konsentrasi aktivitas digunakan untuk mengestimasi parameter bahaya radiologi pada sampel yang meliputi R_{eq} , $AEDE$, serta H_{ex} dan H_{in} . Hasil pengukuran dan estimasi ditinjau berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (PERKA BAPETEN) Nomor 9 Tahun 2009 tentang Intervensi Terhadap Paparan Radiasi yang Berasal Dari *Technologically-Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material (TENORM)*, WHO *Guidelines for Water Quality* 2011, dan UNSCEAR *Report* 2000.

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Radiasi

Radiasi adalah emisi atau perambatan energi melalui materi atau ruang dalam bentuk panas, gelombang elektromagnetik dan partikel dari sumber radiasi. Radiasi tidak berbau, tidak dapat didengar dan tidak dapat dirasa, tetapi radiasi dapat dideteksi dengan alat detektor radiasi (PTKMR-BATAN, 2014).

2.1.1 Klasifikasi Radiasi Berdasarkan Tingkat Energi

Berdasarkan tingkat energi yang dimiliki, radiasi dibedakan menjadi radiasi pengion dan radiasi bukan pengion.

1. Radiasi Pengion

Radiasi pengion adalah radiasi yang dihasilkan dari struktur atomik radioaktif berupa gelombang elektromagnetik berenergi tinggi atau berupa partikel. Sinar gamma (γ), sinar-X, partikel alfa (α), partikel beta (β), dan neutron merupakan bagian dari radiasi pengion (College, 2013).

2. Radiasi Bukan Pengion

Radiasi bukan pengion merupakan jenis radiasi berupa gelombang elektromagnetik dengan energi yang rendah sehingga tidak mampu mengionisasi materi yang dilaluinya. Gelombang radio, gelombang mikro, inframerah, cahaya tampak merupakan bagian dari radiasi bukan pengion.

2.1.2 Klasifikasi Radiasi Berdasarkan Sumbernya

Menurut laporan UNSCEAR (2000), populasi dunia menerima rata-rata dosis radiasi efektif tahunan sebesar 2,8 mSv dengan radiasi alam yang diterima sebesar 2,4 mSv dan sebesar 0,4 mSv dari sumber radiasi buatan (Tabel 2.1). Radiasi alam bersifat kontinu dan sulit dikendalikan, sedangkan radiasi buatan lebih mudah dikendalikan (Syah, 2018). Radiasi berdasarkan sumbernya dibedakan menjadi dua yaitu radiasi alam dan radiasi buatan.

Tabel 2.1 Dosis efektif tahunan rata-rata yang diterima penduduk dunia

Sumber Radiasi	Dosis Radiasi Efektif Tahunan Rata-Rata (mSv)
Sumber radiasi alamiah	
• Kosmis	0,4
• Sinar Gamma	0,5
• Internal	0,3
• Gas Radon	1,2
Jumlah	2,4 mSv
Sumber radiasi buatan	
• Kegiatan medik (kedokteran)	0,4
• Uji coba bom nuklir di atmosfer	0,005
• Kecelakaan nuklir Chernobyl	0,002
• Pusat listrik tenaga nuklir (PLTN)	0,0002
Jumlah	0,4 mSv

(Sumber: Sutarman, Syarbaini, Kudiana, 2010)

1. Radiasi alam

Radiasi alam adalah radiasi yang sudah ada di bumi sejak terbentuknya alam semesta, bahan-bahan radioaktif alam dapat berperan sebagai sumber radiasi alam. Radiasi alam berdasarkan sumbernya terbagi menjadi dua yaitu radiasi ekstra teresterial dan radiasi teresterial (Akhadi, 2000).

a. Radiasi ekstra teresterial

Radiasi ekstra teresterial adalah radiasi yang berasal dari luar angkasa atau disebut juga sebagai radiasi kosmis. Sebelum sampai ke bumi, radiasi kosmis berinteraksi dengan partikel-partikel sub-atomik yang ada di ruang angkasa membentuk senyawa atau atom baru yang memperkaya atom ataupun senyawa yang sudah ada di bumi. Radiasi kosmis berasal dari pancaran matahari, bintang- bintang yang ada di alam raya, dan juga berasal dari ledakan supernova yang terjadi di luar angkasa yang jaraknya puluhan tahun cahaya dari bumi. Radiasi kosmis memiliki daya tembus yang relatif sangat kuat, karena radiasi kosmis dapat menembus beton, batu-batuan bahkan dapat menembus lapisan bawah tanah hingga kedalaman 200 meter (Akhadi, 2000).

b. Radiasi teresterial

Radiasi teresterial adalah radiasi yang berasal dari permukaan bumi. Sumber radiasi alam di permukaan bumi berasal dari bahan-bahan radioaktif alam yang dikenal sebagai radionuklida primordial. Radionuklida primordial dapat ditemukan dalam lapisan tanah atau batuan, air, serta udara. Unsur-unsur yang termasuk dalam kelompok radioaktif alam sangat banyak, tetapi ada tiga kelompok unsur radionuklida primordial yang tergolong sangat tua karena memiliki waktu paruh induknya di atas 100 juta tahun yakni deret uranium, torium, dan aktinium (Wardhana, 2007).

1) Deret Uranium (U)

Deret uranium dimulai dengan ^{238}U yang meluruh menjadi ^{232}Th lalu menghasilkan partikel alfa dan berakhir pada timah hitam ^{206}Pb yang stabil. Kestabilan dicapai setelah melewati 14 babak yang menghasilkan 8 partikel alfa, dan 6 partikel beta. Deret ini disebut deret keseimbangan sekuler karena seluruh anak paruhnya memiliki waktu paruh yang lebih pendek daripada ^{238}U (Benenson dkk, 2006). Radiasi yang dihasilkan dari proses peluruhan ini dapat menyebabkan kerusakan pada bagian dalam paru- paru (Obid & Hamza, 2011).

Tabel 2.2 Deret Uranium

No.	Radionuklida	Peluruhan	Waktu Paruh
1.	Uranum	α	$4,5 \times 10^9$ tahun
2.	Torium	β, γ	24,1 hari
3.	Proaktinium	β, γ	6,7 jam
4.	Uranum	α, γ	$2,5 \times 10^5$ tahun
5.	Torium	α, γ	8×10^4 tahun
6.	Radium	α, γ	1620 tahun
7.	Radon	α, γ	3,82 hari
8.	Polonium	α	3,20 menit
9.	Plumbum (timbel)	β, γ	26,8 menit
10.	Bismut	α	5 hari
11.	Talium	β, γ	1,3 menit
12.	Plumbum (timbel)	β, γ	19,4 tahun
13.	Bismut	β	5,01 hari
14.	Polonium	α	138,3 hari
15.	Plumbum (timbel)	Stabil	Stabil

(Sumber: PTKMR-BATAN, 2019)

2) Deret Aktinium (Ac)

Deret aktinium dimulai dengan peluruhan ^{235}U dan berakhir pada timbel ^{207}Pb yang stabil. Kestabilan dicapai setelah meluruhkan 12 nuklida dalam 11 babak dan mengemisikan 7 partikel alfa (Harb, 2004).

Tabel 2. 3. Deret Aktinium

No.	Radionuklida	Peluruhan	Waktu paruh
1	Uranium	α, γ	$7,10 \times 10^8$ tahun
2	Torium	β, γ	25,6 jam
3	Protaktinium	α, γ	$3,43 \times 10^4$ tahun
4	Aktinium	α	21,6 tahun
5	Fransium	β	22 menit
6	Radium	α, γ	11,68 hari
7	Radon	α, γ	3,92 detik
8	Polonium	α, γ	$1,83 \times 10^{-3}$ detik
9	Plumbum (timbel)	β, γ	36,1 detik
10	Bismut	α, γ	2,15 menit
11	Talium	β, γ	4,79 menit
12	Plumbum (timbel)	Stabil	Stabil

(Sumber: PTKMR-BATAN, 2019)

3) Deret Torium (Th)

Torium alami merupakan ^{232}Th . Deret Torium dimulai dengan peluruhan ^{232}Th dan mencapai kestabilan ketika berakhir pada ^{207}Pb . Kestabilan dicapai setelah melepaskan 6 partikel alfa dalam 10 babak (Obid & Hamza, 2011).

Tabel 2. 4 Deret Torium

No.	Radionuklida	Peluruhan	Waktu paruh
1	Torium	α	$1,39 \times 10^{10}$ tahun
2	Radium	β	6,7 tahun
3	Aktinium	β, γ	6,13 jam
4	Torium	α, γ	1,91 tahun
5	Radium	α, γ	3,64 hari
6	Radon	α, γ	51,5 detik
7	Polonium	α	0,15 detik
8	Plumbum (timbel)	β, γ	10,6 jam
9	Bismut	α	60,5 menit
10	Talium	β, γ	3,10 menit
11	Plumbum (timbel)	Stabil	Stabil

(Sumber: PTKMR-BATAN, 2019)

2. Radiasi Buatan

Radiasi buatan adalah sumber radiasi yang proses terbentuknya melibatkan intervensi manusia, baik sumber tersebut dibuat secara sengaja atau merupakan hasil

samping dari pemanfaatan teknologi nuklir oleh manusia, yang tidak sengaja atau tidak dikehendaki kemunculannya (Malaka, 2019). Sejauh ini, sumber paling utama paparan radiasi buatan pada masyarakat adalah dari prosedur pengobatan seperti diagnostic sinar-X, kedokteran nuklir, dan terapi radiasi. Sebagian besar isotop yang dihasilkan adalah Iodin-131 (^{131}I), Teknesium-99m (Tc-99m), Iridium-192 (^{192}Ir), ^{137}Cs , dan lain-lain. Selain itu, masyarakat dapat terpapar radiasi dari produk-produk yang dapat dikonsumsi seperti tembakau (torium), material bangunan, bahan bakar yang mudah terbakar (gas, batu bara, dll), lensa mata, televisi, jam tangan dan jarum jam *luminous* (tritium), system pesawat sinar-X, detector asap (amerisium), material konstruksi jalan, tabung electron, dll (Thorne, M.C., 2003).

2.2 Naturally Occuring Radioactives Material (NORM)

NORM meliputi radionuklida yang berkaitan dengan rantai peluruhan ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K . Radionuklida-radionuklida tersebut memiliki usia yang lama dan memiliki anak luruh yang waktu peluruhannya lama, misalnya ^{226}Ra . Distribusi radionuklida tersebut di geosfer bergantung dengan persebaran media geologisnya. NORM di dalam keadaan alamnya yang tidak berubah dapat memberikan kontribusi terhadap potensial radiologi. NORM yang terdapat pada sumber mineral dapat dilihat pada Tabel 2.5. Adapun dua efek eksploitasi yang dapat mempengaruhi efek potensial NORM terhadap kesehatan manusia dan lingkungan yakni (IAEA, 2003):

- a. Konsentrasi NORM yang meningkat didalam suatu produk.

- b. Keberadaan pelepasan hasil NORM ke biosfer yang dapat meningkat melalui perubahan fisika-kimia atau berdasarkan metode dimana residu diatur.

Tabel 2.5 NORM pada sumber mineral

Elemen/Mineral	Sumber	Radioaktivitas
Alumunium	Bijih	250 Bq/(kg U)
	Batu kapur bauksitik, tanah	100-400 Bq/(kg Ra)
	Batu kapur bauksitik, tanah	30-130 Bq/(kg Th)
	Penambangan	70-100 Bq/(kg Ra)
Tembaga	Bijih	30-100.000 Bq/(kg U)
	Bijih	20-110 / (kg Th)
Fluorspar	Mineral	Deret Uranium
	Penambangan	4000 Bq/(kg Ra)
Besi		Deret Uranium
		Deret Torium
Molybdeum	Penambangan	Deret Uranium
Monazit	Pasir	6000-20.000 Bq/(kg U)
		Deret Torium (4% berat)
Gas alam	Gas, rata-rata dari sumur Amerika Serikat dan Kanada	2-17.000 Bq/(m ³ Rn)
	Gas, sumur individual Amerika Serikat dan Kanada	0,4-54.000 Bq/(m ³ Rn)
	Sisik ikan, residu dalam pompaan, kapal dan residu saluran pipa gas	100-50.000Bq/(kg ²¹⁰ Pb/ ²¹⁰ Po)
Minyak	Air asin atau air produksi	Rentang dari mBq ke 100 Bq/(L Ra)
	Lumpur	Rentang <i>hingga</i> 70.000 Bq/(kg Ra)
	(Sisik ikan)	Umumnya 10 ³ -10 ⁴ Bq/kg, rentangnya mencapai 4 x 10 ⁶ Bq/(kg Ra)
Fosfat	Bijih	100-4.000 Bq/(kg U _{alam})
	Bijih	15-150 Bq/(kg Th _{alam})
	Bijih	600-3.000 Bq/(kg Ra)
Kalium Karbonat		Deret Torium
		⁴⁰ K
Tantalum/niobium		Deret Uranium
		Deret Torium
Timah	Bijih dan ampas bijih	1000-2000 Bq/(kg Ra)
Titanium (rutil)	Bijih	30-750 Bq/(kg U)
Titanium (ilmenit)	Bijih	35-750 Bq/(kg Th)

Uranium	Bijih	15.000 Bq/(kg Ra)
	Lumpur	10 ⁵ Bq/(kg Ra)
	Penambangan	10.000-20.000 Bq/(kg Ra)
Vanadium		Deret Uranium
Zinc		Deret Uranium
		Deret Torium
Zirkonium (Zirkon)	Pasir	4.000 Bq/(kg U)
	Pasir	600 Bq/(kg Th)
		4.000-7.000 Bq/(g Ra)

(Sumber: IAEA, 2015)

Radionuklida yang merupakan deret peluruhan ²³⁵U tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap paparan, kecuali ²²⁷Ac, yang dapat berkontribusi secara signifikan pada paparan inhalasi. Karena potassium alami mengandung 0,0117% ⁴⁰K, maka radionuklida tersebut juga dapat ditemukan di mineral dan material mentahan. Di dalam batuan dan tanah, konsentrasi aktivitas ²³⁸U dan ²³²Th beserta anak luruhnya dan ⁴⁰K biasanya memiliki nilai yang kecil. Pada mineral tertentu, kandungan konsentrasi aktivitas uranium dan/atau torium beserta anak luruhnya biasanya tinggi (IAEA, 2015).

2.3 Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah kemampuan inti atom yang tidak stabil untuk memancarkan radiasi dan berubah menjadi inti stabil. Proses perubahan ini disebut peluruhan yang berarti perubahan inti atom yang tidak stabil menjadi inti atom yang lain. Inti atom yang tidak stabil disebut radionuklida. Materi yang mengandung radionuklida disebut zat radioaktif (Malaka, 2019). Radioaktivitas merupakan fenomena yang terjadi secara alamiah dalam sejumlah substansi. Substansi-substansi atom dihasilkan secara spontan tanpa dapat dilihat namun menghasilkan radiasi yang

memiliki energi. Radioaktivitas telah ada dalam material alam yang ada di bumi sejak bumi terbentuk (Baker, 1966) .

Aktivitas zat radioaktif menyatakan jumlah zat radioaktif yang melakukan peluruhan (disintegrasi) setiap satuan waktu (detik). Aktivitas zat radioaktif hanya menunjukkan jumlah inti radioaktif yang melakukan peluruhan, tetapi tidak menunjukkan jumlah radiasi yang dipancarkannya. Dalam setiap kali melakukan peluruhan, zat radioaktif dapat memancarkan lebih dari satu macam radiasi. Aktivitas dari suatu zat radioaktif dapat dirumuskan seperti Persamaan 2.1 (Akhadi, 2000):

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad (2.1)$$

Keterangan:

A : aktivitas zat radioaktif (Bq)

λ : konstanta peluruhan (s^{-1})

N : jumlah atom radioaktif

t : waktu (s)

Jumlah atom radioaktif selalu berkurang setiap saat karena terjadinya peluruhan. Dengan demikian, aktivitas zat radioaktif pun selalu berkurang setiap saat seperti yang dituliskan pada Persamaan 2.2 (Akhadi, 2000):

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Keterangan:

A_t : aktivitas zat radioaktif setelah waktu t

A_0 : aktivitas zat radioaktif mula-mula

Sehingga didapatkan persamaan 2.3 (Akhadi, 2000):

$$A_t = A_0(1/2)^n \quad (2.3)$$

dengan $n = t/T_{1/2}$.

Untuk menyatakan aktivitas zat radioaktif digunakan satuan Becquerel yang disingkat dengan Bq . Satuan Bq merupakan satuan yang sangat kecil. Zat radioaktif menunjukkan aktivitas satu Bq ketika zat itu mengalami satu kali peluruhan per detik (Akhadi, 2000). Selain Becquerel (Bq), satuan lain yang menyatakan aktivitas zat radioaktif adalah Curie (Ci). Satuan Ci menunjukkan tingkat zat radioaktif yang sangat tinggi. Satu Ci didefinisikan sebagai aktivitas 1 gram ^{226}Ra yang melakukan peluruhan $3,7 \times 10^{10}$ disintegrasi per sekon (dps) karena $1 \text{ dps} = 1 \text{ Bq}$ (Akhadi, 2000).

Kedua satuan ini hingga saat ini masih digunakan. Umumnya, untuk zat radioaktif yang memiliki tingkat aktivitas rendah satuan yang digunakan adalah Bq sedangkan satuan yang digunakan untuk zat radioaktif yang memiliki tingkat aktivitas tinggi adalah satuan Ci (Akhadi, 2000).

Waktu yang dibutuhkan inti radioaktif untuk meluruh menjadi setengah aktivitas mula-mulanya disebut waktu paruh (Purwati dkk, 2016). Waktu paruh yang terjadi pada radioaktivitas alam tidak terpengaruh oleh faktor-faktor alam seperti

perubahan kondisi lingkungan (cuaca, suhu, tekanan, dll) maupun peristiwa kimia lainnya. Didapatkan nilai waktu paruh peluruhannya menjadi seperti yang dirumuskan pada Persamaan 2.4 (Safitrianaz dkk, 2019):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.4)$$

Jika λ tidak diketahui, maka rumus yang digunakan adalah Persamaan 2.5:

$$T = \frac{t}{n} \quad (2.5)$$

Sehingga didapatkan nilai konstanta peluruhannya menjadi:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (2.6)$$

Berdasarkan Persamaan 2.6, diketahui bahwa nilai waktu paruh berbanding terbalik dengan nilai konstanta peluruhannya.

Aktivitas jenis (AJ) suatu zat radioaktif didefinisikan sebagai aktivitas per satuan massa zat radioaktif. Persamaan 2.7 untuk menyatakan AJ zat radioaktif adalah sebagai berikut (Akhadi, 2000):

$$AJ = \lambda N = \frac{0,693}{t_{1/2}} \frac{N_A}{A} = \frac{4,18 \times 10^{23}}{A \times t_{1/2}} \text{Bq/gram} \quad (2.7)$$

Keterangan :

- AJ : Aktivitas jenis (Bq/gram)
- N : Jumlah atom (atom/gram)
- λ : Konstanta peluruhan (s^{-1})
- N_A : Bilangan Avogadro ($6,025 \times 10^{23}$ atom)

A : Massa zat radioaktif (gram)

$t_{1/2}$: Waktu paruh (detik)

Sebuah inti atom yang tidak stabil akan mengalami peluruhan ataupun perubahan secara spontan menjadi atom lain yang lebih stabil dan memancarkan radiasi. Radiasi yang dipancarkan dapat berupa α , β dan γ .

a. Peluruhan Alfa (α)

Peluruhan alfa merupakan radiasi partikel yang bermuatan positif. Partikel sinar alfa sama dengan inti helium ^4_2He , bermuatan $+2e$ dan bermassa 4 sma. Partikel alfa adalah partikel terberat yang dihasilkan oleh zat radioaktif. Contoh reaksi inti dari peluruhan Plutonium-239 ($^{239}_{94}\text{Pu}$) dapat dilihat pada Persamaan 2.8.

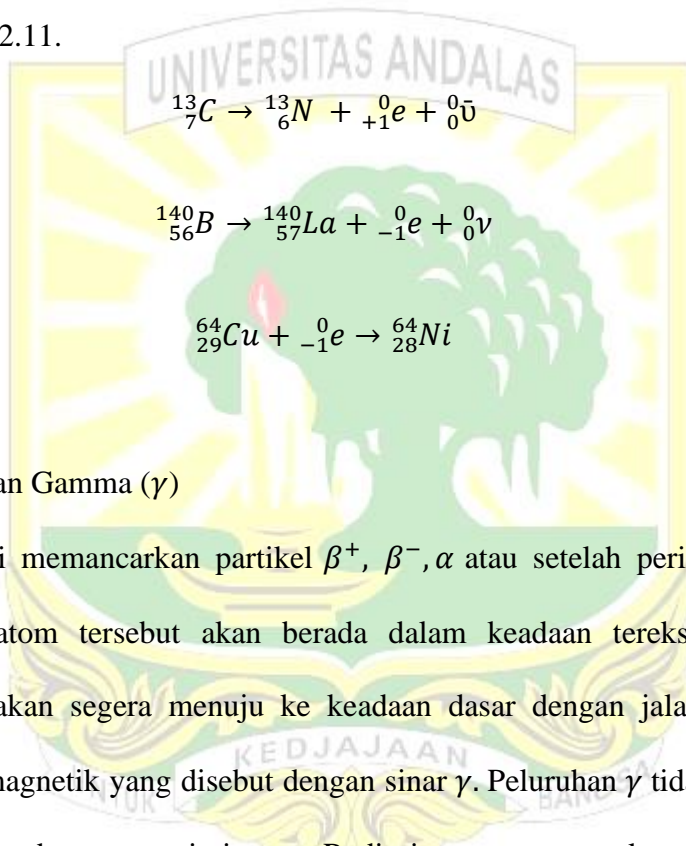


Peluruhan α terjadi pada saat ^{239}Pu berubah menjadi Uranium-235 (^{235}U), maka dua elektron akan ditangkap oleh partikel alfa sehingga nomor massanya berkurang sebanyak empat (Santiani, 2011).

b. Peluruhan Beta (β)

Peluruhan β umumnya terjadi pada inti tidak stabil yang relatif ringan. Peluruhan β memancarkan partikel β yang bermuatan positif (β^+), bermuatan negatif (β^-) dan tangkapan elektron. Istilah plus dan minus menyatakan muatan listrik yang dibawa oleh partikel tersebut. Inti atom yang mengalami peluruhan β^+ , nomor atomnya akan berkurang satu dan nomor massanya tetap sedangkan inti atom yang mengalami peluruhan β^- akan naik satu dan nomor massanya tetap. Tangkapan elektron terjadi

ketika radionuklida menarik sebuah elektron dari orbital dalam atom dan menetralkan sebuah proton dalam inti dengan penangkapan elektron orbital tersebut. Jarak jangkauan partikel beta lebih jauh dari pada partikel alfa, dapat menembus beberapa cm di udara (Santiani, 2011). Contoh peluruhan beta positif, beta negatif dan tangkapan elektron dapat dilihat masing-masing pada Persamaan 2.9, Persamaan 2.10 dan Persamaan 2.11.



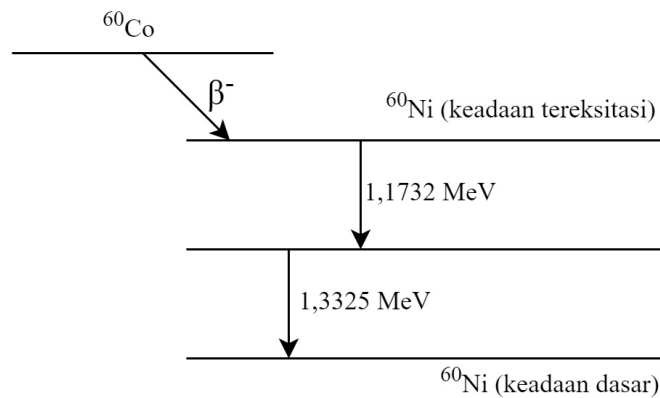
c. Peluruhan Gamma (γ)

Setelah inti memancarkan partikel β^+ , β^- , α atau setelah peristiwa tangkapan elektron, inti atom tersebut akan berada dalam keadaan tereksitasi. Inti yang tereksitasi ini akan segera menuju ke keadaan dasar dengan jalan memancarkan radiasi elektromagnetik yang disebut dengan sinar γ . Peluruhan γ tidak menimbulkan perubahan massa dan muatan inti atom. Radiasi gamma merupakan tipe radiasi yang tidak mempunyai massa dan tidak bermuatan listrik namun memiliki energi yang tinggi (Susetyo, 1988). Sinar gamma memiliki daya tembus dan jangkauan yang lebih besar dibandingkan dengan partikel alfa dan beta (Santiani, 2011).

Sebagai contoh suatu peluruhan γ , ditinjau Cobalt-60 (^{60}Co) yang meluruh menjadi Nitrogen-60 (^{60}Ni) melalui peluruhan β^- yang dapat dilihat pada Persamaan 2.12:



^{60}Ni yang terbentuk berada dalam keadaan tereksitasi, dengan 2,5057 MeV di atas keadaan dasarnya dan segera meluruh dengan memancarkan dua sinar γ , masing-masing dengan tenaga sebesar 1,1732 MeV dan 1,3325 MeV (Susetyo, 1988).



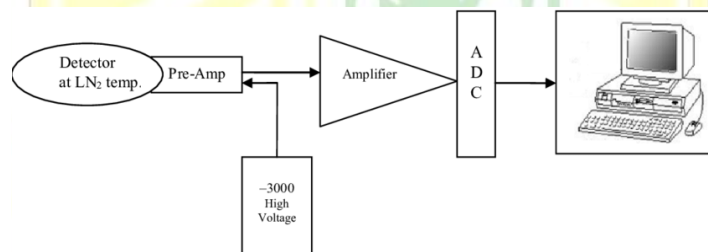
Gambar 2.1 Skema peluruhan ^{60}Co
(Sumber: Akhadi, 2000)

2.4 Spektrometer Gamma

Spektrometer Gamma adalah suatu alat yang dapat digunakan untuk melakukan analisis zat radioaktif yang memancarkan radiasi gamma. Setiap radionuklida memiliki energi yang bersifat spesifik (Luhur dkk., 2013). Spektrometer Gamma merupakan metode untuk mengukur dan mengidentifikasi zat radioaktif

dengan mengamati spektrum karakteristik yang dihasilkan dari interaksi foton- γ yang dipancarkan oleh zat radioaktif tersebut dengan detektor (Susetyo, 1988).

Spektrometer gamma terdiri dari detektor radiasi gamma dan rangkaian elektronik pendukung yang disebut *Multi Channel Analyzer (MCA)*. Detektor yang dipakai dalam spektrometer gamma adalah detektor sintilator NaI(Tl) dan detektor semi-konduktor Ge kemurnian tinggi (HpGe) serta Ge(Li) (Susetyo, 1988). Saat ini rangkaian elektronika, catu daya tegangan tinggi dan rangkaian MCA telah diintegrasikan pada *on board computer*. Perangkat lunak khusus (*Software Maestro*), pada seperangkat komputer dapat berfungsi sebagai MCA yang memiliki kemampuan dalam pengolahan dan analisis yang lebih baik (Luhur dkk, 2013). Secara skematis seperangkat spektrometer gamma dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Singh dkk, 2011).



Gambar 2.2 Diagram alir seperangkat spektrometer gamma
(Sumber: Singh, 2011)

2.4.1 Detektor HPGe (*High Purity Germanium*)

Detektor HPGe merupakan bagian yang sangat penting dari suatu sistem pencacah radiasi karena detektor yang berfungsi untuk menangkap radiasi dan mengubah menjadi sinyal dan pulsa listrik. Detektor HPGe pada prinsipnya merupakan detektor radiasi yang bisa mengubah besaran radiasi ke suatu besaran lain sehingga bisa dianalisis dan diketahui energinya.

Detektor HPGe merupakan salah satu jenis detektor semikonduktor yang prinsip kerjanya sama dengan detektor isian gas, tetapi pada detektor ini bahan gas diganti dengan zat padat yang bersifat semikonduktor seperti Si atau Ge. Apabila sinar- γ melalui gas dalam tabung detektor, maka sinar- γ akan berinteraksi dengan atom-atom gas melalui proses fotolistrik, hamburan Compton dan pembentukan pasangan. Interaksi tersebut menghasilkan elektron bebas dan ion positif.

Cacah ion (atau elektron) yang terbentuk bergantung pada besar tegangan volt yang dikenakan pada detektor. Ketika tegangan yang dikenakan masih rendah, elektron dan ion positif yang terbentuk akan segera bergabung kembali. Apabila tegangan dinaikkan maka elektron dan ion positif akan bergerak lebih cepat masing-masing ke arah elektroda yang berlawanan muatannya sehingga memperkecil kemungkinan terjadinya penggabungan kembali dan lebih banyak ion dan elektron yang mencapai elektroda (Susetyo, 1988).

2.4.2 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Spektrometer gamma sebelum digunakan, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi dengan sumber standar yang sudah diketahui aktivitasnya. Ada dua macam kalibrasi yang dilakukan yaitu kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi.

1. Kalibrasi Energi

Pada spektrometer gamma puncak-puncak spektrum pada nomor salur sistem spektrometer sebanding dengan energi sinar gamma. Oleh karena itu perlu dicari hubungan antara nomor salur dan energi sinar gamma yang biasa disebut dengan

kalibrasi energi. Hal ini dilakukan dengan melakukan pengukuran (pencacahan) sumber standar radioaktif dengan beberapa sumber energi tingkat rendah sampai dengan tingkat energi yang tinggi agar kalibrasi energi yang dilakukan mempunyai jangkauan energi yang cukup lebar. Apabila hubungan antara energi dan nomor salur dituangkan dalam grafik maka akan diperoleh gambar garis lurus yang linier. Hubungan linier tersebut dinyatakan secara matematis dalam persamaan garis lurus yang mempunyai bentuk umum dapat dilihat pada Persamaan 2.13 (Debertin, K.; Helmer, 1998).

$$Y = ax + b \quad (2.13)$$

Keterangan :

Y : Energi gamma (keV)

a : Bilangan konstanta linier

b : Bilangan konstanta linier

x : Nomor salur

Kalibrasi energi diperlukan untuk tujuan analisis kualitatif spektrometri gamma. Setelah kalibrasi energi dilakukan maka sistem spektrometer gamma dapat digunakan untuk melakukan pengukuran suatu cuplikan. Koefisien determinasi menunjukkan sejauh mana kontribusi variabel bebas dalam model regresi mampu menjelaskan variasi dari variabel berikutnya. Jika nilai mendekati 1, artinya variabel independen memberikan hampir semua informasi yang dibutuhkan untuk memprediksi variabel dependen. Misalkan nilai R^2 adalah 0,674 artinya hal ini

menunjukkan bahwa semua variabel bebas secara simultan memiliki pengaruh yaitu sebesar 67,4% terhadap variabel terikat. Sedangkan sisanya yaitu sebesar 32,6% dipengaruhi oleh variabel lainnya yang tidak diuji dalam penelitian (Chin W, 1998).

2. Kalibrasi Efisiensi

Kalibrasi Efisiensi adalah ukuran hubungan antara pencacahan yang dihasilkan detektor dengan aktivitas zat radioaktif. Nilai suatu pencacahan belum mencerminkan aktivitas yang sebenarnya dari suatu zat radioaktif. Suatu zat radioaktif selalu memancarkan sinar radioaktif ke segala arah. Pengukuran cuplikan zat radioaktif dilakukan pada jarak tertentu dari detektor, sehingga sebenarnya hanya sebagian dari sinar radiasi gamma yang dipancarkan dan terdeteksi oleh detektor. Pengukuran zat radioaktif secara spektrometri, pengukuran hanya ditujukan pada salah satu energi dari sekian banyak energi dan mode peluruhan yang ada dalam cuplikan (Luhur dkk, 2013).

Efisiensi tiap-tiap energi gamma mempunyai nilai tertentu dan untuk menghitung efisiensi tiap-tiap energi digunakan Persamaan 2.14 (PTKMR-BATAN, 1998):

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{N_s - N_{bg}}{A_t P_{\gamma}} \quad (2.14)$$

Keterangan:

ε_{γ} : efisiensi pada energi gamma teramati (%)

N_s : laju cacah standar (cacah per waktu)

N_{bg} : laju cacah latar (cacah per waktu)

A_t : aktivitas pada saat pengukuran (Bq)

P_γ : *yield* dari energi gamma (%)

2.4.3 Konsentrasi Zat Radioaktif

Pengukuran konsentrasi zat radioaktif dalam sampel digunakan Persamaan 2.16 (PTKMR-BATAN, 1998).

$$C_{avg} = \frac{N_s - N_{bg}}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m} \quad (2.15)$$

$$C_{sp} = C_{avg} \pm U_T \quad (2.16)$$

Keterangan :

m : massa sampel (L)

C_{sp} : konsentrasi zat radioaktif dalam sampel terkoreksi (Bq.L⁻¹)

C_{avg} : konsentrasi zat radioaktif dalam sampel rata-rata (Bq.L⁻¹)

U_T : ketidakpastian pengukuran (L)

2.4.4 Ketidakpastian Pengukuran Sampel

Ketidakpastian pengukuran (U_T) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.17 (PTKMR-BATAN, 1998):

$$U_T = C_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{U_N}{N_s}\right)^2 + \left(\frac{U_\varepsilon}{\varepsilon_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_P}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_m}{m}\right)^2} \quad (2.17)$$

Keterangan :

U_N : ketidakpastian pencacahan sampel (%)

U_{ε} : ketidakpastian efisiensi pada energi gamma (%)

U_p : ketidakpastian *yield* (%)

U_m : ketidakpastian berat sampel (%)

2.4.5 Minimum Detectable Concentration (MDC)

Minimum Detectable Concentration (MDC) merupakan besarnya konsentrasi minimum yang dapat dideteksi untuk suatu sistem spektrometer gamma. MDC dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.18 (PTKMR-BATAN, 1998).

$$MDC = 4,66 \frac{\sqrt{\frac{N_{bg}}{(t_{bg})^2}}}{\varepsilon_{\gamma} p_{\gamma} m} \quad (2.18)$$

Keterangan :

MDC : konsentrasi minimum terdeteksi (Bq/kg)

t_{bg} : waktu cacah latar (s)

2.5 Parameter Bahaya Radiologis

Parameter bahaya radiologi diestimasi dari konsentrasi aktivitas Uranium, Torium, dan Kalium pada sampel. Kemudian, bahaya radiologi sampel air dapat ditinjau melalui berbagai model estimasi yaitu *AEDE*, *Ra_{eq}*, dan *H_{ex}* serta *H_{in}* (Mathuthu dkk., 2021).

2.5.1 Dosis Efektif Ekuivalen Tahunan (*AEDE*)

Nilai dosis serap dapat dihitung dari nilai konsentrasi ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K dalam air dengan mengasumsikan radionuklida lainnya yang ada di dalam air seperti deret peluruhan ^{137}Cs , ^{90}Sr , dan ^{235}U dapat diabaikan jika nilai total dosisnya sangat

kecil terhadap latar lingkungan. Umumnya perkiraan konsentrasi ^{226}Ra dan ^{232}Th berdasarkan asumsi kondisi ekuilibrium radioaktif melalui pengukuran langsung isotop anak luruhnya. Nilai dosis serap tersebut dapat dilihat pada persamaan 2.19 (Mathuthu dkk., 2021):

$$D(n\text{Gy} \cdot h^{-1}) = 0,462A_U + 0,604A_{Th} + 0,0417A_K \quad (2.19)$$

Keterangan :

A_U : konsentrasi aktivitas uranium ($\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$)

A_{Th} : konsentrasi aktivitas torium ($\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$)

A_K : konsentrasi aktivitas kalium ($\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$)

Nilai dosis serap di udara pada ketinggian 1 meter di atas permukaan tanah tidak memberikan resiko radiologi terhadap individu yang terpapar. Dosis serap ini dapat dianggap sebagai dosis efektif ekuivalen tahunan (*AEDE*) dari radiasi gamma terestrial. Dengan menggunakan koefisien konversi $0,7 \text{ SvGy}^{-1}$ dosis serap di udara pada dosis efektif yang diterima oleh dewasa dan $0,2 \text{ SvGy}^{-1}$ sebagai faktor pengisi *outdoor* berdasarkan *UNSCEAR*, maka nilai dosis efektif ekuivalen tahunan (*AEDE*) dapat dilihat pada persamaan 2.20 (Mathuthu dkk., 2021):

$$AEDE(m\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}) = D(n\text{Gy} \cdot h^{-1}) \times 8760h \times 0,2 \times 0,7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \times 10^{-6} \quad (2.20)$$

2.5.2 Aktivitas Ekuivalen Radium (Ra_{eq})

Aktivitas Ekuivalen Radium (Ra_{eq}) adalah indeks yang diizinkan secara keseluruhan untuk menganalisis paparan radiasi oleh radionuklida primordial

(Uranium, Torium, dan ^{40}K). Ra_{eq} dihitung dari konsentrasi aktivitas dalam satuan Bq.L^{-1} yang dapat dilihat pada persamaan 2.21 (Mathuthu dkk., 2021).

$$Ra_{eq} = A_U + 1,43A_{Th} + 0,77A_K \quad (2.21)$$

2.5.3 Indeks Bahaya Radiasi

Untuk membatasi paparan radiasi yang menyebabkan radionuklida alam di dalam sampel terhadap batas dosis ekuivalen yang diizinkan sebesar 1 mSv.y^{-1} , yaitu Indeks Bahaya Eksternal (H_{ex}). Nilai H_{ex} maksimum haruslah sesuai dengan batasan tertinggi Aktivitas Ekuivalen Radium sebesar 370 Bq.L^{-1} (C Kamunda, 2021). Nilai H_{ex} ini dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.22 (Mathuthu dkk., 2021):

$$H_{ex} = \left(\frac{A_U}{370} + \frac{A_{Th}}{370} + \frac{A_K}{4810} \right) \quad (2.22)$$

Sedangkan nilai Indeks Bahaya Internal (H_{in}) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.23 yang merupakan nilai (Mathuthu dkk., 2021):

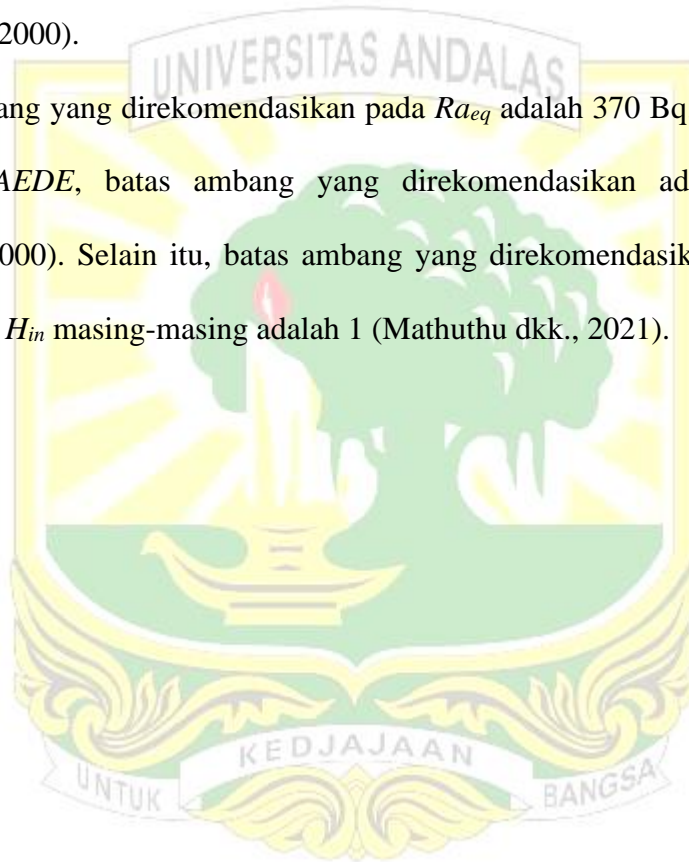
$$H_{in} = \left(\frac{A_U}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) \quad (2.23)$$

2.6 Batas Ambang Konsentrasi Aktivitas dan Parameter Bahaya Radiologi

Untuk memastikan konsentrasi aktivitas pada suatu sampel masih dalam batas aman, maka diperlukan suatu peraturan sebagai acuan sehingga konsentrasi aktivitas dan parameter radiologi pada suatu sampel dapat diestimasi. Berdasarkan Pasal 7 ayat (1) huruf b PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009, tingkat kontaminasi konsentrasi radioaktivitas yang diizinkan adalah sebesar 1.000 Bq.L^{-1} untuk setiap radionuklida

anggota deret uranium dan torium dan 10.000 Bq.L^{-1} untuk kalium (BAPETEN, 2009). WHO merekomendasikan nilai konsentrasi radioaktivitas ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada air masing-masing adalah 10 Bq.L^{-1} , 1 Bq.L^{-1} dan 20 Bq.L^{-1} (WHO, 2011). UNSCEAR merekomendasikan batas ambang konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada air masing-masing adalah 1 Bq.L^{-1} , 1 Bq.L^{-1} , dan 10 Bq.L^{-1} (UNSCEAR, 2000).

Batas ambang yang direkomendasikan pada $R_{a_{eq}}$ adalah 370 Bq.L^{-1} (UNSCEAR, 2000). Pada $AEDE$, batas ambang yang direkomendasikan adalah 1 mSv.y^{-1} (UNSCEAR, 2000). Selain itu, batas ambang yang direkomendasikan untuk indeks bahaya H_{ex} dan H_{in} masing-masing adalah 1 (Mathuthu dkk., 2021).



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan selama \pm 6 bulan dimulai dari pengambilan sampel, preparasi sampel, dan pengambilan data konsentrasi aktivitas. Sampel dari aliran Sungai Batang Hari diambil dari lima kabupaten, yakni Kabupaten Muaro Jambi, Kota Jambi, Kabupaten Batanghari, Kabupaten Tebo, dan Kabupaten Bungo. Preparasi sampel dilakukan dengan memanaskan air dan hasilnya disimpan pada tabung marinelli selama 30 hari. Pengambilan data dilakukan di Laboratorium Pencacah Gamma, DPLFRKST-BRIN.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

1. Spektrometer Gamma

Spektrometer Gamma detektor HPGe digunakan untuk menganalisis unsur radioaktif yang memancarkan radiasi gamma. Spektrometer Gamma detektor HPGe ini model GEM-F5930-1 buatan ORTEC-USA dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Spesifikasi Spektrometer Gamma:

Nama alat	: Spektrometer Gamma Detektor HPGe
No. Seri	: GEM-F5930-1
No. Invert	: 080.01.0199.450216.0000.2009/2.08.02.05.004.2
Status Kalibrasi	: 14 April 2022



Gambar 3. 1 Spektrometer Gamma detektor HPGe seri GEM-F5930-1

2. *Inspector*

Inspector berfungsi sebagai penguat tegangan, penguat pulsa dan membedakan pulsa berdasarkan energi radiasi gamma. *Inspector* dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2 Inspector 1000 sebagai penguat tegangan

3. Seperangkat Komputer

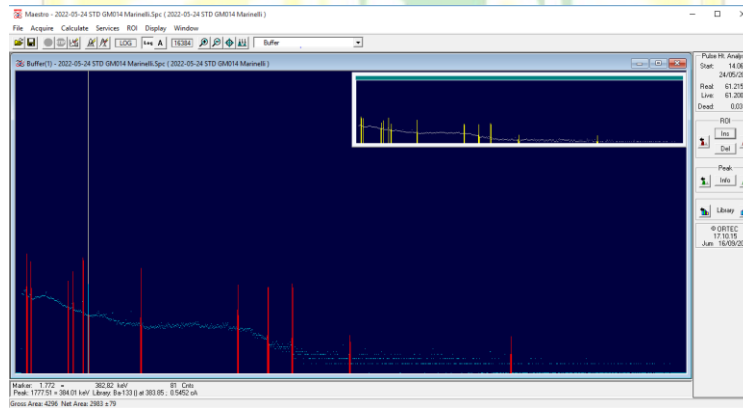
Komputer digunakan untuk melihat cacahan spektrum radiasi gamma. Seperangkat komputer yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Seperangkat komputer untuk memantau cacahan spektrum gamma

4. *Software Maestro*

Software Maestro yang digunakan yaitu *Software Maestro for windows 7.01 version*. *Software Maestro* digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur radioaktif yang memancarkan radiasi gamma. Tampilan *Software Maestro* dapat dilihat pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 *Software Maestro* untuk mengidentifikasi radionuklida

5. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk menimbang massa dari sampel air. Timbangan digital dapat dilihat pada Gambar 3.5.

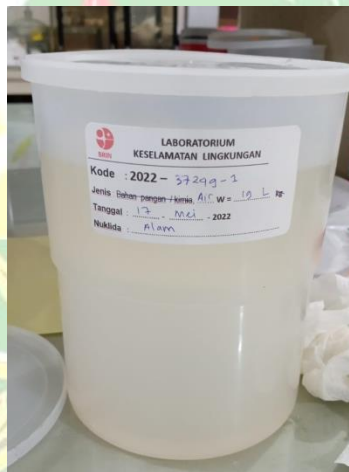


Gambar 3.5 Timbangan digital untuk mengukur sampel

6. Tabung Marinelli 1 L

Tabung marinelli 1 L digunakan sebagai wadah untuk menyimpan sampel.

Timbangan marinelli dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Tabung marinelli 1 L

3.2.2 Bahan Penelitian

1. Sampel Air

Sampel air yang digunakan berasal dari daerah yang dialiri Sungai Batang Hari berupa air sungai, air bawah tanah, dan air minum. Sampel air dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Sampel air sungai, air bawah tanah, dan air minum

2. Sumber standar radionuklida

Sumber standar campuran digunakan sebagai sumber standar untuk kalibrasi spektrometer gamma. Sumber standar gamma campuran yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.8 dan radionuklida yang terkandung dalam sumber gamma campuran dapat dilihat pada Tabel 3.1.



Gambar 3.8 Sumber standar Gamma campuran

Spesifikasi Sumber Standar:

Kode : GM-014 Marinelli 1L/PTKMR
 Nomor : No. 04/IS/KN/KMR/. 5. 2/11/2017
 Matriks : Coffe Granule
 Tanggal Referensi : 18 Oktober 2017

Tabel 3. 1. Aktivitas radionuklida

Nuklida	Aktivitas (Bq)
^{60}Co	$37,44 \pm 2,35$
^{137}Cs	$40,01 \pm 2,48$
^{133}Ba	$65,00 \pm 1,28$
^{210}Pb	$364,16 \pm 2,54$
^{214}Am	$387,31 \pm 2,00$

(Sumber: PTKMR-BATAN)

3. Lem Araldhite

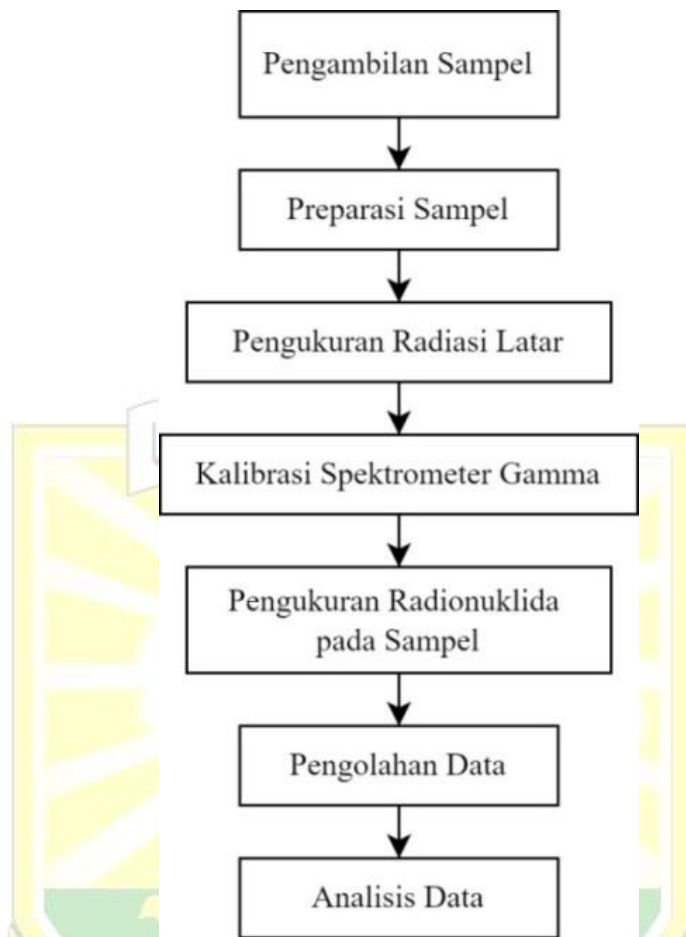
Lem araldhite digunakan untuk merekatkan penutup marinelli. Lem Araldite dapat dilihat pada Gambar 3.9



Gambar 3.9 Lem Araldite

3.3 Teknik Penelitian

Teknik penelitian sesuai dengan prosedur standar yang ditetapkan oleh (PTKMR-BATAN, 1998) dimulai dari tahapan pengambilan sampel, tahap persiapan, tahap pengolahan dan analisis data. Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.10.

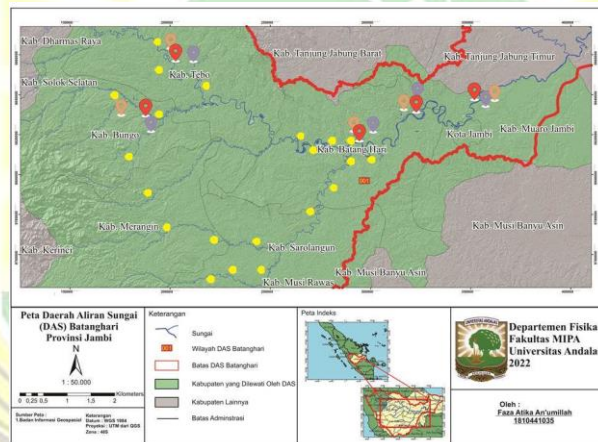


Gambar 3.10 Langkah-langkah penelitian

3.3.1 Pengambilan Sampel

Masing- masing sampel air diambil dari lima kabupaten di Provinsi Jambi yang daerahnya dialiri sungai Batang Hari terutama di dekat daerah penambangan emas. Setiap daerah diambil 3 sampel yang masing-masing terdiri dari air sungai, air bawah tanah, dan air minum sehingga total sampel yang dikumpulkan adalah 15 sampel. Perbedaan lokasi ini dilakukan agar adanya perbandingan hasil yang didapatkan untuk tiap-tiap titik lokasi.

Lokasi pengambilan sampel secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.11. Titik koordinat pengambilan sampel dapat dilihat pada Lampiran G. Titik lokasi berwarna merah menunjukkan titik pengambilan sampel air sungai, titik lokasi berwarna oranye menunjukkan titik pengambilan sampel air sumur dan titik lokasi berwarna biru menunjukkan titik pengambilan sampel air minum. Titik berwarna kuning menunjukkan daerah aktivitas PETI yang berada di Provinsi Jambi. Dari setiap lokasi, air diambil sebanyak 20 liter dan selanjutnya sampel dimasukkan ke wadah dan diberi label lalu dibawa ke laboratorium.



Gambar 3.11 Titik lokasi pengambilan sampel

3.3.2 Preparasi Sampel

Tahapan preparasi sampel sebagai berikut:

1. Sampel air yang telah diambil, dipanaskan *hingga* mencapai volume 1 L agar air mencapai standar pengukuran radionuklida yang ada di Laboratorium Keselamatan Lingkungan di DPLFRKST-BRIN.

2. Sampel air ditimbang dengan timbangan digital untuk memastikan massa sampel sudah menjadi 1 L.
3. Sampel air ditempatkan ke dalam wadah marinelli dan disegel menggunakan lem.
4. Sampel air didiamkan selama 1 bulan supaya terjadi kesetimbangan radioaktif antara radionuklida dengan anak luruhnya yang memancarkan radiasi gamma.

3.3.3 Pengukuran Radiasi Latar

Pengukuran radiasi latar dilakukan dengan cara mengukur tabung marinelli kosong menggunakan spektrometer gamma selama 17 jam. Hal ini bertujuan untuk mengetahui radiasi awal sebelum melakukan kalibrasi dan sebelum melakukan pengukuran radionuklida pada sampel.

3.3.4 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Pengukuran kalibrasi energi gamma merupakan analisis kualitatif yang bertujuan untuk mengetahui kondisi latar belakang ruang pencacahan sumber standar. Kalibrasi ini mempunyai dua macam perbedaan yaitu kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi. Kalibrasi energi dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nomor salur dengan energi gamma (keV) yang terkandung dalam sumber standar. Sedangkan, kalibrasi efisiensi dilakukan untuk mengetahui hubungan antara efisiensi dan energi radionuklida yang terkandung dalam sumber standar.

3.3.5 Pengukuran Radionuklida pada Sampel

Pengukuran radionuklida pada sampel air dilakukan menggunakan spektrometer gamma detektor HPGe sedangkan kontrol dan analisis pengukuran

dilakukan menggunakan komputer dengan *Software Maestro for windows* versi 7.01. Pengukuran sampel dilakukan selama 17 jam per masing-masing sampel. Selanjutnya, dilakukan pengolahan data kemudian data dianalisis untuk mengetahui konsentrasi aktivitas radionuklida terkandung dalam sampel air tersebut.

3.3.6 Pengolahan Data

Pengolahan data untuk mengetahui konsentrasi aktivitas yang terkandung dalam sampel dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.16 sedangkan untuk menghitung konsentrasi minimum yang dapat dideteksi spektrometer Gamma menggunakan Persamaan 2.18. Kemudian parameter bahaya radiologi ditestimasi berdasarkan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida sehingga didapatkan nilai *AEDE* dengan menggunakan Persamaan 2.20, $R_{a_{eq}}$ menggunakan Persamaan 2.21, dan indeks bahaya radiasi menggunakan Persamaan 2.22 dan Persamaan 2.23.

3.3.7 Analisis Data

Nilai konsentrasi aktivitas radionuklida $R_{a_{eq}}$, *AEDE*, dan indeks bahaya radiasi yang diperoleh kemudian ditinjau berdasarkan nilai batas maksimum yang telah ditetapkan oleh PERKA BAPETEN Nomor 9 Tahun 2009, *WHO Guidelines for Water Quality* 2011, dan *UNSCEAR Report* 2000.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kalibrasi Spektrometer Gamma

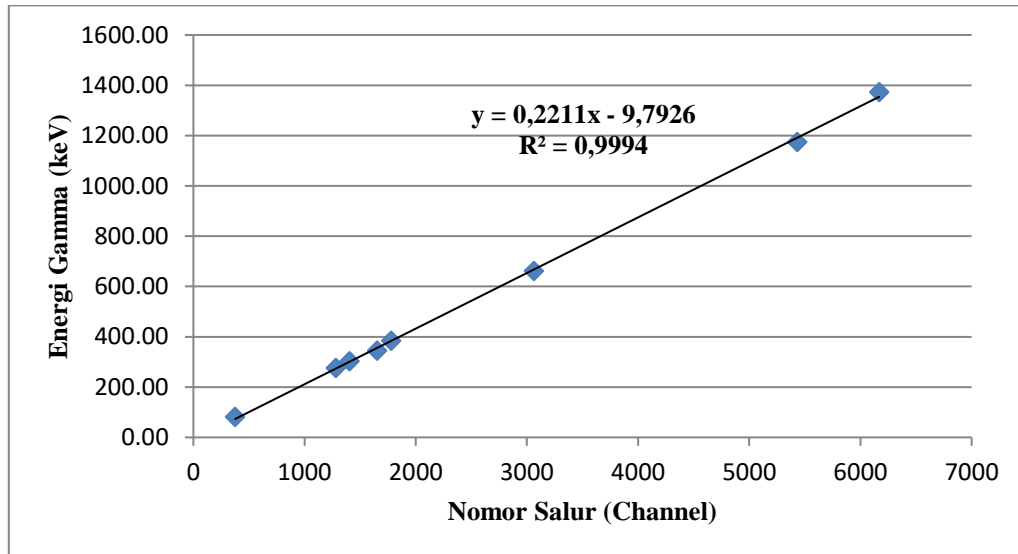
Spektrometer gamma dikalibrasi dengan mencacah sumber standar dengan aktivitas radionuklida yang telah diketahui berdasarkan nilai acuan Sertifikat Standardisasi Radionuklida No.B-14696-2/LT/STD/03/2022. Kalibrasi spektrometer gamma penting dilakukan karena memiliki dampak yang signifikan pada pengukuran sampel. Spektrometer gamma adalah metode pengukuran yang bersifat nisbi (relatif). Oleh karena itu, sebelum pengukuran spektrometer gamma dapat digunakan, alat perlu dikalibrasi. Kalibrasi spektrometer sinar gamma dibagi menjadi dua bagian yakni, kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi.

4.1.1 Kalibrasi Energi

Kalibrasi energi dilakukan untuk mengetahui nomor salur (*channel*) dari masing-masing radionuklida sumber. Nomor salur menunjukkan rentang energi yang dipancarkan oleh radionuklida. Hasil kalibrasi energi menggunakan *software Maestro* dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1

Tabel 4.1 Hasil kalibrasi energi

No.	Nuklida	Energi (keV)	Nomor Salur
1.	^{133}Ba	80,82	375
2.	^{133}Ba	276,49	1280
3.	^{133}Ba	302,98	1430
4.	^{133}Ba	345,39	1651
5.	^{133}Ba	384,01	1778
6.	^{137}Cs	662,04	3063
7.	^{60}Co	1173,90	5431
8.	^{60}Co	1373,25	6169



Gambar 4. 1 Kurva kalibrasi energi spektrometer gamma

Kalibrasi energi dilakukan dengan tujuan untuk menentukan radionuklida yang tepat berdasarkan energi radionuklida dengan nomor salur. Hal ini dibuktikan dengan hubungan linear antara energi radionuklida dengan nomor salur (Susetyo, 1988). Gambar 4.1 menunjukkan hubungan energi yang sebanding dengan nomor salur. Semakin tinggi energi sinar gamma yang terdeteksi maka semakin tinggi nomor salurnya. Koefisien determinasi (R^2) bernilai 0,9994 dengan grafik berbentuk garis lurus menunjukkan bahwa spektrometer gamma telah terkalibrasi dengan baik sehingga dapat digunakan sebagai alat pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida.

4.1.2 Kalibrasi Efisiensi

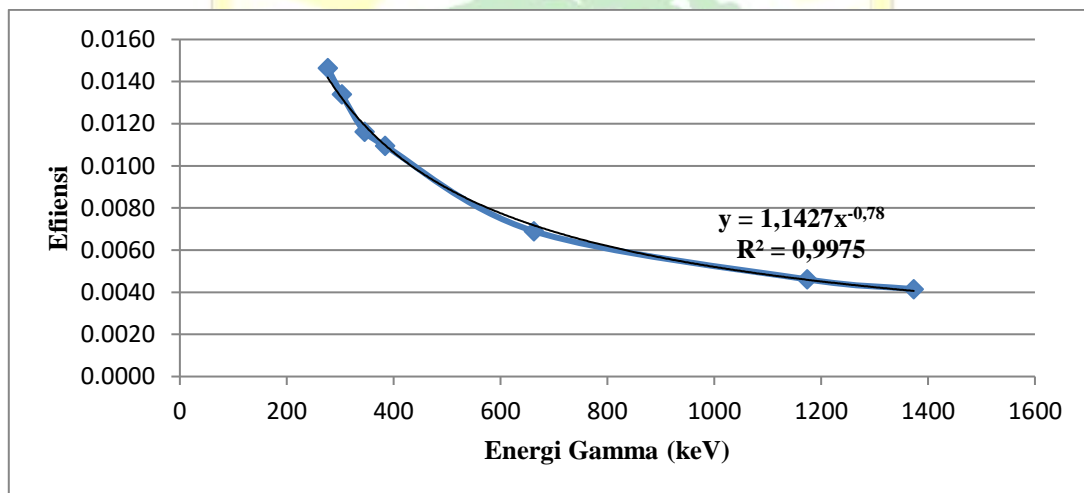
Kalibrasi efisiensi dilakukan untuk mengetahui keakuratan detektor pada spektrometer gamma dalam menangkap energi gamma yang dipancarkan dari

radionuklida yang ada didalam sampel. Hasil kalibrasi efisiensi dapat dilihat pada

Tabel 4.2 dan Gambar 4.2

Tabel 4. 2. Hasil kalibrasi efisiensi

No.	Nuklida	Energi (keV)	Efisiensi (%)
1.	¹³³ Ba	80,82	0,0091
2.	¹³³ Ba	276,49	0,0146
3.	¹³³ Ba	302,98	0,0134
4.	¹³³ Ba	345,39	0,0116
5.	¹³³ Ba	384,01	0,0109
6.	¹³⁷ Cs	662,04	0,0069
7.	⁶⁰ Co	1173,9	0,0046
8.	⁶⁰ Co	1373,25	0,0042



Gambar 4. 2 Kurva kalibrasi efisiensi spektrometer gamma

Berdasarkan Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa hubungan antara energi dengan efisiensi sesuai dengan persamaan garis pada persamaan 4.1.

$$y = 1,1427e^{-0,78x}$$

Keterangan:

y : Efisiensi (%)

x : Energi Gamma (keV)

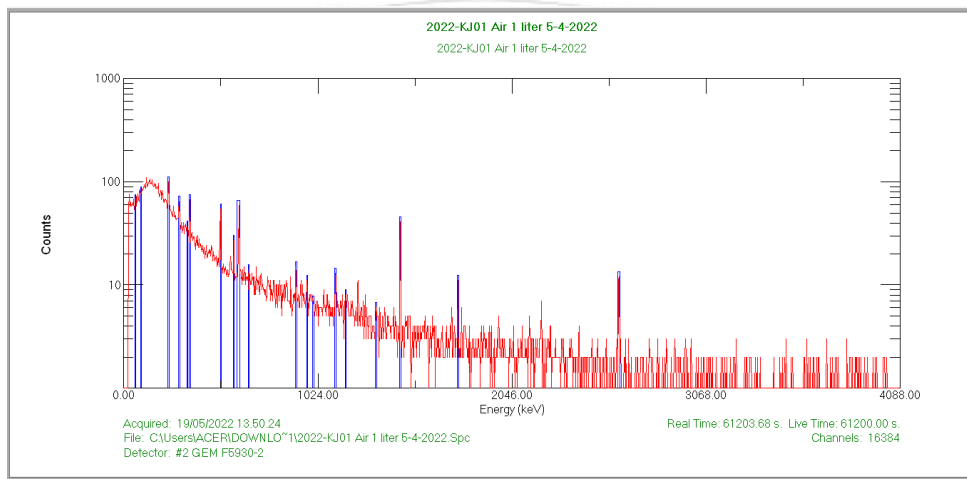
Koefisien determinasi menunjukkan sejauh mana kontribusi energi gamma dalam model regresi mampu menjelaskan variasi dari efisiensi. Hubungan antara energi yang dipancarkan radionuklida dan efisiensi menunjukkan korelasi yang baik karena nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati nilai 1. Hal ini menunjukkan bahwa spektrometer gamma telah terkalibrasi dengan baik, sehingga dapat digunakan untuk melakukan analisis dengan baik (Susetyo, 1988).

4.2 Konsentrasi Aktivitas Radionuklida pada Sampel Air

Pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel air dilakukan dengan menggunakan spektrometer gamma selama 17 jam. Spektrum hasil pengukuran konsentrasi aktivitas dapat dilihat pada Lampiran B. Selanjutnya dilakukan pembacaan ROI (*Range of Interest*) hasil cacahan yang dapat dilihat pada Lampiran C. Pembacaan ROI dilakukan dengan menandai spektrum di setiap puncak peluruhan yang memiliki energi tertinggi pada radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K beserta anak luruhnya. Spektrum berwarna biru menunjukkan puncak peluruhan pada sampel sedangkan spektrum berwarna merah menunjukkan radiasi latar pada sampel (Gambar 4.3).

Nilai konsentrasi aktivitas ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K terdeteksi pada sampel air sungai, air bawah tanah dan air minum dari daerah aliran Batang Hari Jambi (Tabel 4.3). Konsentrasi aktivitas ^{238}U pada sampel air berkisar antara $0,00 \pm 0,00 \text{ Bq.L}^{-1}$ hingga $1,29 \pm 0,72 \text{ Bq.L}^{-1}$ dengan rata-rata $0,266 \pm 0,428 \text{ Bq.L}^{-1}$, konsentrasi aktivitas ^{232}Th berkisar antara $0,01 \pm 0,12 \text{ Bq.L}^{-1}$ hingga $0,04 \pm 0,10 \text{ Bq.L}^{-1}$ dengan rata-rata $0,025 \pm 0,119 \text{ Bq.L}^{-1}$, dan konsentrasi aktivitas ^{40}K berkisar antara $0,31 \pm 0,03 \text{ Bq.L}^{-1}$

hingga $0,68 \pm 0,04 \text{ Bq.L}^{-1}$ dengan rata-rata $0,467 \pm 0,034 \text{ Bq.L}^{-1}$. Nilai *MDC* menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida berada dibawah batas limit deteksi alat. Secara keseluruhan, konsentrasi aktivitas tertinggi air terdapat pada kode sampel MJ03 berupa ^{238}U dengan nilai $1,29 \pm 0,72 \text{ Bq.L}^{-1}$ yang nilainya lebih tinggi dari batas yang direkomendasikan oleh UNSCEAR.



Gambar 4. 3 Contoh pembacaan ROI pada sampel air

Tingginya konsentrasi ^{228}U dapat terjadi karena proses alamiah seperti penyerapan dari tanah atau proses teknologis yang melibatkan pembentukan material radioaktif yang terjadi secara alami seperti produksi fertilisasi fosfat atau pemrosesan mineral dan pasir (WHO, 2011). Selain itu, konsentrasi aktivitas uranium yang tinggi dapat disebabkan oleh *leaching effect*. *Leaching effect* tersebut dapat memberikan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi konsentrasi uranium pada air sumur seperti sebagai berikut (Fakeha dkk, 2011):

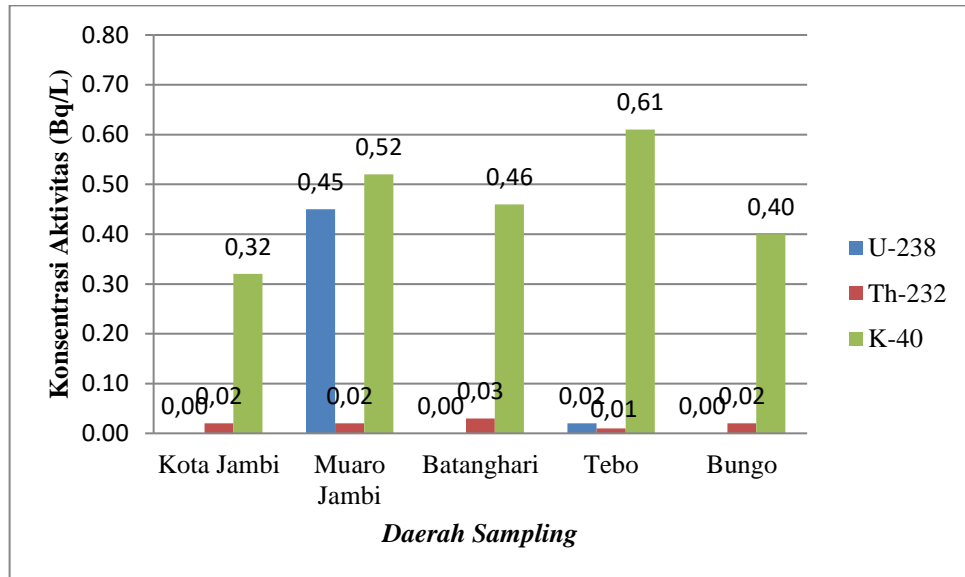
- a. Kadar uranium yang berasal dari sumber batuan, sedimen atau tanah, dan yang berkaitan dengan uranium dapat mengalami peluruhan.

- b. Dekatnya air dengan sumber uranium.
- c. Derajat isolasi hidrolik air pada air permukaan atau bawah tanah.
- d. Keadaan oksidasi air
- e. Konsentrasi perantara yang sesuai, yang dapat menambah kelarutan uranium.

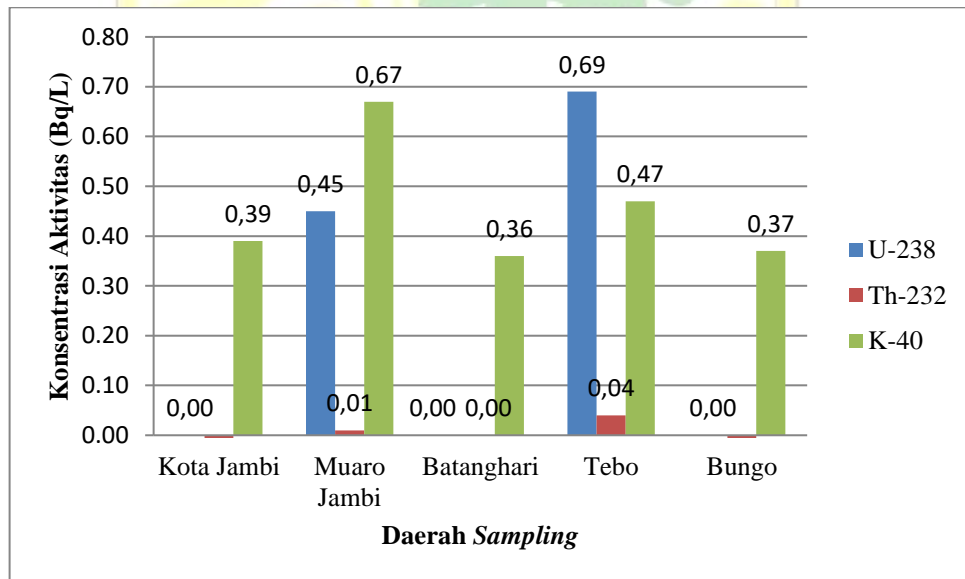
Konsentrasi aktivitas ^{232}Th tertinggi terdapat pada sampel air sumur dengan kode TB02 dengan nilai $0,04 \pm 0,03 \text{ Bq.L}^{-1}$ sedangkan konsentrasi aktivitas ^{40}K tertinggi yaitu $0,68 \pm 0,04 \text{ Bq.L}^{-1}$ yang terdapat pada sampel air minum yang memiliki kode MJ03. Daerah pengambilan kedua sampel tersebut masing – masing berada di Kabupaten Tebo dan Kabupaten Muaro Jambi yang memiliki aktivitas perkebunan. Perkebunan biasanya menggunakan sejumlah besar pupuk yang sebagian besar terdiri dari Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Potassium (K) serta ^{40}K yang memiliki limbah potasium alam. Pupuk tersebut juga dapat mengandung beberapa radioaktif alam (NORM). Beberapa material pupuk dapat dibersihkan (secara terpisah) ke dalam sungai sehingga dapat mengakibatkan pengendapan pada sedimen pinggiran sungai. Akumulasi material radioaktif dapat terjadi di sedimen sungai dan tanah pinggiran sungai yang mengikis dan mengendap dari tempat ke tempat sepanjang sungai. Hal ini dapat menyebabkan meningkatnya radioaktivitas alam di area tertentu (Santawamaitre dkk, 2010). Namun, nilai rata-rata konsentrasi aktivitas ^{232}Th dan ^{40}K yang terdapat pada sampel air memiliki nilai yang masih dibawah batas yang telah ditetapkan oleh PERKA BAPETEN, WHO, dan UNSCEAR.

Tabel 4.3 Konsentrasi aktivitas pada sampel air

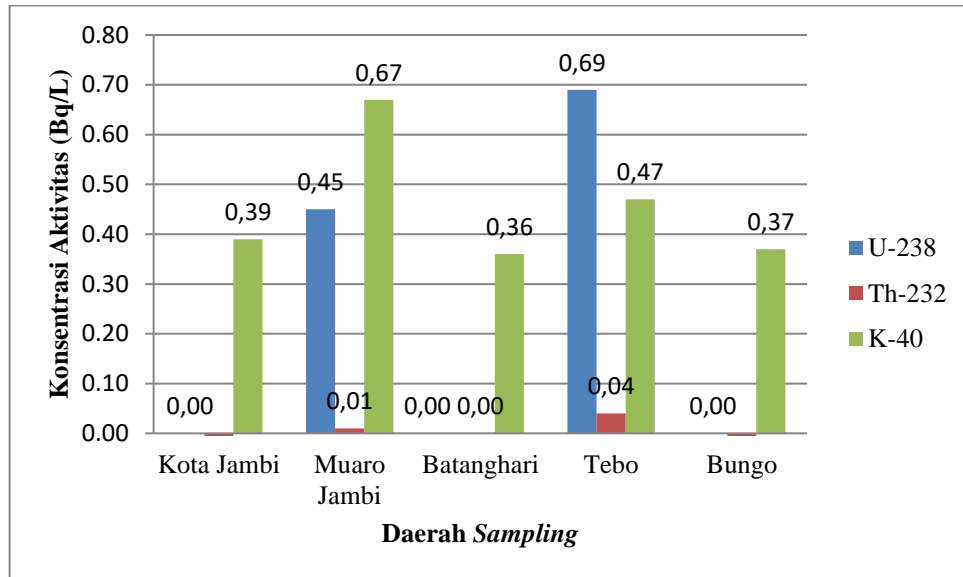
No.	Kode Sampel	Konsentrasi Aktivitas (Bq/L)		
		²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K
Kota Jambi				
1.	KJ01	0,00±0,00	0,02±0,01	0,32±0,03
2.	KJ02	0,00±0,00	MDC	0,32±0,03
3.	KJ03	0,00±0,00	0,02±0,01	0,40±0,03
Muaro Jambi				
4.	MJ01	0,45±0,83	0,02±0,01	0,52±0,04
5.	MJ02	0,45±0,76	0,01±0,01	0,67±0,04
6.	MJ03	1,29±0,72	0,02±1,13	0,68±0,04
Batanghari				
7.	BH01	0,00±0,00	0,03±0,01	0,46±0,03
8.	BH02	0,00±0,00	0,03±0,01	0,46±0,03
9.	BH03	0,00±0,00	MDC	0,31±0,03
Tebo				
10.	TB01	0,02±0,01	0,01±0,12	0,61±0,04
11.	TB02	0,69±3,24	0,04±0,03	0,47±0,04
12.	TB03	1,09±0,86	0,02±0,10	0,63±0,04
Bungo				
13.	BG01	0,00±0,00	0,02±0,01	0,40±0,03
14.	BG02	0,00±0,00	MDC	0,40±0,03
15.	BG03	0,00±0,00	0,01±0,01	0,41±0,03
Rata-Rata		0,266±0,428	0,025±0,119	0,467±0,034
Minimum		0,00±0,00	0,01±0,12	0,31±0,03
Maksimum		1,29±0,72	0,04±0,03	0,68±0,04
MDC 95%		11,54	0,47	3,20
Batas Ambang				
BAPETEN (BAPETEN, 2009)		1.000	1.000	10.000
WHO (WHO, 2011)		10	1	20
UNSCEAR (UNSCEAR, 2000)		1	1	10



Gambar 4.4 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K dalam air sungai di daerah *sampling*



Gambar 4.5 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K dalam air sumur di daerah *sampling*



Gambar 4.6 Histogram konsentrasi aktivitas radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K dalam air minum di daerah *sampling*

Berdasarkan jenis airnya, konsentrasi aktivitas tertinggi sampel air sungai adalah ^{40}K dengan nilai $0,61 \pm 0,04 \text{ Bq.L}^{-1}$ yang terdapat pada sampel dengan kode TB01. Hal ini disebabkan karena pengambilan sampel tersebut berada di Kabupaten Tebo yang memiliki aktivitas perkebunan. Konsentrasi aktivitas tertinggi air sumur terdapat pada kode sampel TB02 berupa ^{238}U dengan nilai $0,69 \pm 0,01 \text{ Bq.L}^{-1}$. Selain aktivitas perkebunan, Kabupaten Tebo juga memiliki aktivitas PETI yang banyak. Semakin besar aktivitas PETI di suatu daerah, maka semakin tinggi konsentrasi ^{238}U yang ada di tempat tersebut (Kamunda dkk, 2016). Konsentrasi aktivitas tertinggi air minum terdapat pada sampel MJ03.

Berdasarkan Tabel 4.3, dapat diketahui bahwa konsentrasi aktivitas terkecil adalah radionuklida ^{232}Th . Umumnya, Torium memiliki sifat yang sulit untuk larut didalam air sehingga nilainya sangat kecil (USEPA, 2020). Nilai konsentrasi aktivitas

^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K pada sampel air dari daerah aliran sepanjang sungai Batang Hari dibandingkan dengan penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya beserta hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.4 .

Tabel 4.4 Perbandingan konsentrasi aktivitas rata-rata sampel air dengan penelitian terdahulu

No.	Negara	Jenis Air	Konsentrasi Aktivitas (Bq.L^{-1})			Referensi
			^{238}U	^{232}Th	^{40}K	
1.	Iraq	Air Sungai	-	0,98	22,29	(Alaboodi dkk., 2020)
2.	Nigeria	Air Sungai	1,30	1,11	4,94	(Avwiri dkk, 2014)
3.	Afrika Barat	Air Sungai	0,12	0,50	0,68	(Awudu dkk, 2010)
		Air Sumur	0,14	0,65	0,64	
		Air Minum	0,15	0,24	0,46	
4.	Namibia	Air Sumur	233,41	0,46	0,002	(Mathuthu dkk, 2021)
5.	Afrika Selatan	Air Sumur	0,66	0,56	7,36	(Kamunda, 2021)
7.	Polandia	Air Minum	2,76	-	-	(Skwarzec dkk, 2001)
9.	Jambi, Indonesia	Air Sungai	0,094	0,02	0,462	Penelitian bahaya radiologi pada sampel air di sepanjang aliran sungai Batang Hari, Jambi
		Air Sumur	0,228	MDC	0,452	
		Air Minum	0,476	0,006	0,486	

4.3 Parameter Bahaya Radiologi

Parameter bahaya radiologi dari sampel air dapat dilihat pada Tabel 4.5. Nilai rata-rata $R_{a_{eq}}$ dalam satuan Bq.L^{-1} adalah 0,307653 yang masih berada di bawah batas yang diizinkan yaitu 370 Bq.L^{-1} (UNSCEAR, 2000). Nilai $AEDE$ sampel air yang menunjukkan hasil paparan radiasi eksternal dari lokasi penelitian memiliki rentang

nilai antara $-3,96 \times 10^{-7} \text{ mSv.y}^{-1}$ hingga $7,799 \times 10^{-6} \text{ mSv.y}^{-1}$. Nilai rata-rata *AEDE* pada sampel yaitu $7,799 \times 10^{-6} \text{ mSv.y}^{-1}$ ini masih berada di bawah batas ambang yang telah ditentukan yaitu 1 mSv.y^{-1} (UNSCEAR, 2000).

Tabel 4.5 Parameter bahaya radiologi

No.	Kode Sampel	R_{eq} (Bq.L ⁻¹)	<i>AEDE</i> (mSv.y ⁻¹)	H_{ex}	H_{in}
Kota Jambi					
1.	KJ01	0,05324	$3,091 \times 10^{-7}$	0,00012	0,000144
2.	KJ02	-0,08437	$-3,96 \times 10^{-7}$	-0,00014	-0,00023
3.	KJ03	0,05940	$3,493 \times 10^{-7}$	0,00014	0,00016
Muaro Jambi					
4.	MJ01	0,51864	$2,959 \times 10^{-6}$	0,00138	0,002618
5.	MJ02	0,51589	$2,961 \times 10^{-6}$	0,00138	0,002610
6.	MJ03	1,37096	$7,799 \times 10^{-6}$	0,00368	0,007192
Batanghari					
7.	BH01	0,07832	$4,535 \times 10^{-7}$	0,00018	0,000211
8.	BH02	0,02772	$1,81 \times 10^{-7}$	$7,5 \times 10^{-5}$	$7,48 \times 10^{-5}$
9.	BH03	-0,03333	$-1,4 \times 10^{-7}$	$-4,4 \times 10^{-5}$	-9×10^{-5}
Tebo					
10.	TB01	0,08127	$4,941 \times 10^{-7}$	0,00021	0,000274
11.	TB02	0,78339	$4,442 \times 10^{-6}$	0,00207	0,003982
12.	TB03	1,16711	$6,641 \times 10^{-6}$	0,00313	0,0061
Bungo					
13.	BG01	0,0594	$3,493 \times 10^{-7}$	0,00014	0,00016
14.	BG02	-0,02871	$-1,1 \times 10^{-7}$	$-3,1 \times 10^{-5}$	$-7,8 \times 10^{-5}$
15.	BG03	0,04587	$2,802 \times 10^{-7}$	0,00011	0,000124
	Rata-Rata	0,307653	$1,771 \times 10^{-6}$	0,00083	0,00155
	Minimum	-0,08437	$-3,96 \times 10^{-7}$	-0,00014	-0,00023
	Maksimum	1,37096	$7,799 \times 10^{-6}$	0,00368	0,007192
	Batas Ambang	370 (UNSCEAR, 2000)	1 (UNSCEAR, 2000)	1 (Mathuthu dkk, 2021)	1 (Mathuthu dkk, 2021)

Nilai rata-rata indeks bahaya eksternal (H_{ex}) pada sampel air penelitian diketahui sebesar 0,00083 sedangkan nilai rata-rata indeks bahaya internal (H_{in}) sampel air adalah 0,00155. Nilai H_{ex} dan H_{in} tersebut masih di bawah ketentuan yang telah diizinkan, sehingga sampel air jika ditinjau berdasarkan keamanan radiasi

eksternal terhadap populasi dapat dinyatakan aman. Ketentuan indeks H_{ex} dan H_{in} yang diizinkan adalah 1 (Mathuthu dkk, 2021).

Dengan demikian, diketahui bahwa air sungai, air sumur, dan air minum yang berada di daerah aliran sungai Batang Hari masih berada di dalam batas aman karena nilai konsentrasi aktivitas pada unsur radioaktif masih berada di bawah batas ambang sehingga nilai R_{aq} , $AEDE$, serta indeks bahaya eksternal dan internal pada sampel air sangat kecil.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa seluruh hasil konsentrasi aktivitas ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K sampel air yang diambil dari daerah sepanjang aliran Sungai Batang Hari dideteksi menggunakan spektrometer gamma. Secara keseluruhan nilai konsentrasi aktivitas ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K masih berada di bawah batas ambang yang direkomendasikan oleh PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009, WHO *Guidelines for Water Quality* 2011, dan UNSCEAR *Report* 2000. Parameter bahaya radiologi pada air meliputi R_{eq} , $AEDE$, dan indeks bahaya eksternal dan internal. Nilai rata-rata dari parameter bahaya radiologi pada sampel masih berada di bawah batas ambang yang direkomendasikan. Dengan demikian, dapat diketahui bahwa air aman untuk digunakan dan memenuhi syarat standar radiologi kualitas air.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan agar menambahkan perhitungan konsentrasi aktivitas Radon-222 (^{222}Rn) dan aktivitas *gross alpha* dan *beta* sehingga dapat lebih membantu estimasi permasalahan radiologi yang berkaitan dengan air permukaan dan bawah tanah pada daerah yang diteliti terhadap paparan yang diberikan ke manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, M. (2000). *Dasar - Dasar Proteksi Radiasi*. Rineka Cipta.
- Alaboodi, A., & All., E. (2020). Radiological hazards due to natural radioactivity and radon concentrations in water samples at Al-Hurrah city, Iraq. *International Journal of Radiation Research*, 18(1), 1–11.
- Alaboodi, A. S., Kadhim, N. A., Abojassim, A. A., & Baqir Hassan, A. (2020). Radiological hazards due to natural radioactivity and radon concentrations in water samples at Al-Hurrah city, Iraq. *International Journal of Radiation Research*, 18(1), 1–11.
- Avwiri, G. O., Ononugbo, C. P., & Nwokeoji, I. E. (2014). Radiation Hazard Indices and Excess Lifetime cancer risk in soil, sediment and water around mini-okoro/oginigba creek, Port Harcourt, Rivers State, Nigeria. *Comprehensive Journal of Environment and Earth Sciences*, 3(1), 38–50.
- Awudu, A. R., Darko, E. O., Schandorf, C., Hayford, E. K., Abekoe, M. K., & Ofori-Danson, P. K. (2010). Determination of activity concentration levels of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K in drinking water in a gold mine in Ghana. *Health Physics*, 99(SUPPL. 2).
- Baker, D. G. (1966). An Introduction to Radioactivity. *Radiation Botany*, 6(2), 182.
- BAPETEN. (2009). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 9 Tahun 2009 Tentang Intervensi Terhadap Paparan yang Berasal dari Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*.
- Bello, S. (2020). Annual effective dose associated with radon, gross alpha and gross beta radioactivity in drinking water from gold mining areas of Shanono and Bagwai, Kano state, Nigeria. *Microchemical Journal*.

- Benenson, W., Harris, J. W., Stöcker, H., & Lutz, H. (2006). *Handbook of physics*. Springer Science & Business Media.
- Chin W, M. G. (1998). The Partial Least Squares Approach to Structural Formula Modeling. *Advances in Hospitality and Leisure*, 8 (2) (April), 5.
- College, A. O. (2013). *Ionizing and Non-Ionizing Radiation Study Guide*. 9–15.
- Debertin, K.; Helmer, R. . (1998). *Gamma and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detector*.
- Desrizal, D., Carlo, N. and Syah, N. (2019). The Impacts of PETI on the Batang Hari River to the Decline of Water Quality, Land Transfer Function, Socio-Cultural Life and the Community Economy. *Sumatra Journal of Disaster, Geography and Geography Education*, 3(1), 54–61.
- EPA. (2012). Radiation : Facts , Risks and Realities. In *United States Environmental Protection Agency* (Issue April).
- Fakeha, A., Hamidalddin, S., Alamoudy, Z., & Al-Amri, A. (2011). Concentrations of natural radioactivity and their contribution to the absorbed dose from water samples from the Western Province, Saudi Arabia. *Journal of King Abdulaziz University-Science*, 23(2), 17–30.
- Harb, S. (2004). On the human radiation exposure as derived from the analysis of natural and man-made radionuclides in soils. *ZSR, Hanover University, Germany*.
- IAEA. (2003). *Extent of Enviromental Contamination by Naturally Occuring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation*. IAEA.
- IAEA. (2015). *Naturally Occuring Radioactive Material (NORM VII)*. IAEA.
- Jobbágy, V., Wätjen, U. and Meresova, J. (2010). Current status of gross alpha/beta

activity analysis in water samples: A short overview of methods. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 286(2), 393–399.

Kamunda, C. (2021). Toxicity of natural radioactivity in water samples from a gold mine in Gauteng Province , South Africa. *International Journal of Enviromental Quality*, 41, 1–8.

Kamunda, Caspah. (2021). *Toxicity of natural radioactivity in water samples from a gold mine in Gauteng Province , South Africa*. 41, 1–8.

Kamunda, Caspah, Mathuthu, M., & Madhuku, M. (2016). An assessment of radiological hazards from gold mine tailings in the province of Gauteng in South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1).

Luhur, N., Kadarusmanto, & Subiharto. (2013). Uji Banding Sistem Spektrofotometer Gamma dengan Metoda Analisis Sumber Eu-152. *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, x(1), 22–30.

Madzunya, D., Dudu, V. P., Mathuthu, M., & Manjoro, M. (2020). Radiological health risk assessment of drinking water and soil dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa. *Heliyon*, 6(2).

Malaka, M. (2019). Dampak Radiasi Radioaktif Terhadap Kesehatan. *Foramadiahi*, 11(2), 199–211.

Mathuthu, M., Uushona, V., & Indongo, V. (2021). Radiological safety of groundwater around a uranium mine in Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 122(June 2020), 102915.

N.K. Ahmed. (2004). Natural radioactivity of ground and drinking water in some areas of Upper Egypt. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 28(6), 345–354.

- Obid, R., & Hamza, H. (2011). Natural Occurring Radionuclide Materials. *Radioisotopes - Applications in Physical Sciences, June*.
- PTKMR-BATAN. (1998). *Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan*.
- Purwati, T., Fisika, J., Sains, F., & Diponegoro, U. (2016). Penentuan Waktu Paro Biologi Tc 99M Mdp Pada Pemeriksaan Bone Scanning. *Youngster Physics Journal, 5(4)*, 261–268.
- Safitrianaz, D., Latifah, N., Saragih, P. Y., & Saraswati, D. L. (2019). Analogi Waktu Paruh Dan Konstanta Peluruhan (Disintegrasi) Radioaktif. *Jurnal Pendidikan Fisika, 7(2)*, 179.
- Santawamaitre, T., Regan, P. H., Bradley, D. A., Matthews, M., Malain, D., & Al-Sulaiti, H. A. (2010). An evaluation of the level of naturally occurring radioactive material in soil samples along the Chao Phraya river basin. In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (Vol. 619, Issues 1–3).
- Santiani. (2011). *Nuklir, Fisika Inti dan Politik Energi Nuklir* (Issue July). Intimedia.
- Singh, V. P., Veerendra, D. D., Dileep, B. N., Sheikh, Q., Managanvi, S. S., Badiger, N. M., & Bhat, H. R. (2011). Background minimisation of HPGe detector by passive graded shielding. *International Journal of Low Radiation, 8(4)*, 313–328.
- Skwarzec, B., Strumińska, D. I., & Borylo, A. (2001). *The Radionuclides 234U, 238U and 210Po in Drinking Water in Gdańsk Agglomeration (Poland)*.
- Susetyo, W. (1988). *Spektrometri Gamma*. Gajah Mada University Press.
- Sutarman, Syarbaini, Kudiana, dan A. S. (2010). Pemantauan Lingkungan untuk Keselamatan Radiasi Publik di Indonesia. *Seminar Nasional Keselamatan*

Kesehatan Dan Lingkungan VI, 15–16.

Syah, A. K. (2018). Analisis Tingkat Radioaktivitas Air dan Tanaman Pangan di Daerah Kabupaten Mamuju. *Skripsi*, 1–98.

UNSCEAR. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation Volume I: Sources. In *UNSCEAR 2000 Report: Vol. I*.

USEPA. (2020). *Thorium*. USEPA.

Wardhana, W. A. (2007). Teknologi Nuklir: Proteksi Radiasi dan Aplikasinya. *Andi Yogyakarta*, H, 155.

WHO. (2011). *Water quality for drinking: WHO guidelines*.

Yulianti, R., Sukiyah, E., & Sulaksana, N. (2017). Dampak Limbah Penambangan Emas Tanpa Izin (Peti) Terhadap Kualitas Air Sungai Limun Kabupaten Sarolangun Propinsi Jambi - The Impact Of Illegal Gold Mining Activity To The Water Quality Of Limun River, Sarolangun District, Jambi Province. *Bulletin of Scientific Contribution*, 14(3), 251.



LAMPIRAN-LAMPIRAN

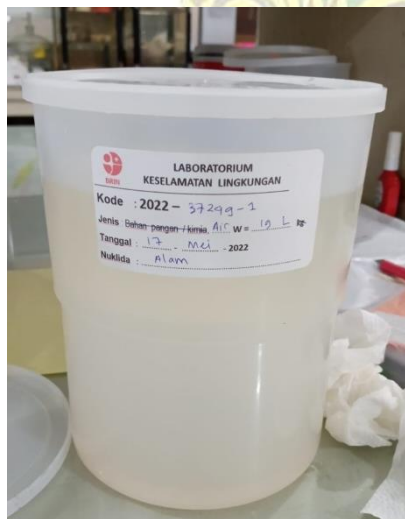
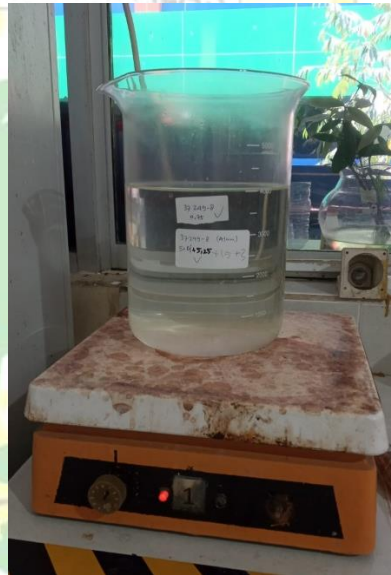
Lampiran A Dokumentasi Penelitian

A. 1 Pengambilan sampel air





A. 2 Preparasi sampel air

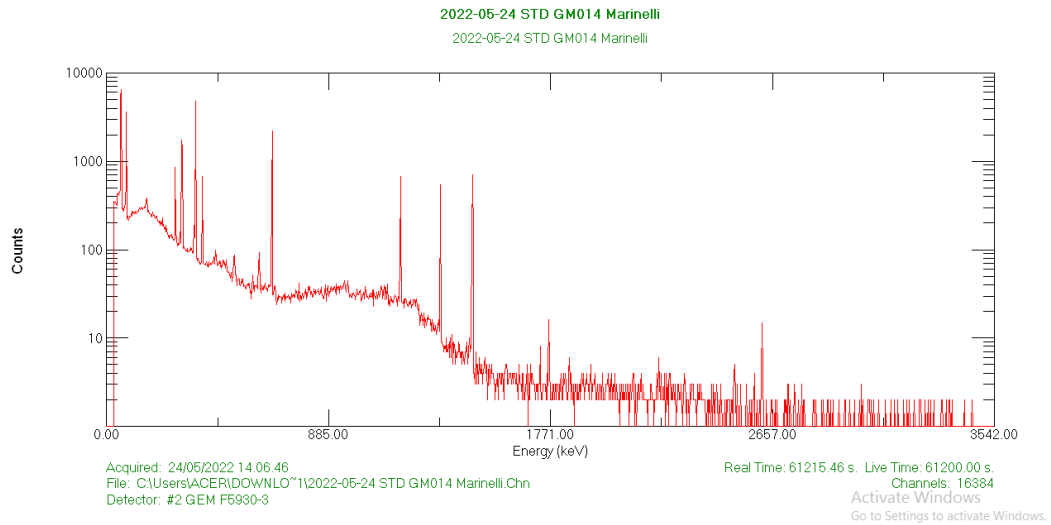


A. 3 Pencacahan sampel air di DPLFRKST-BRIN



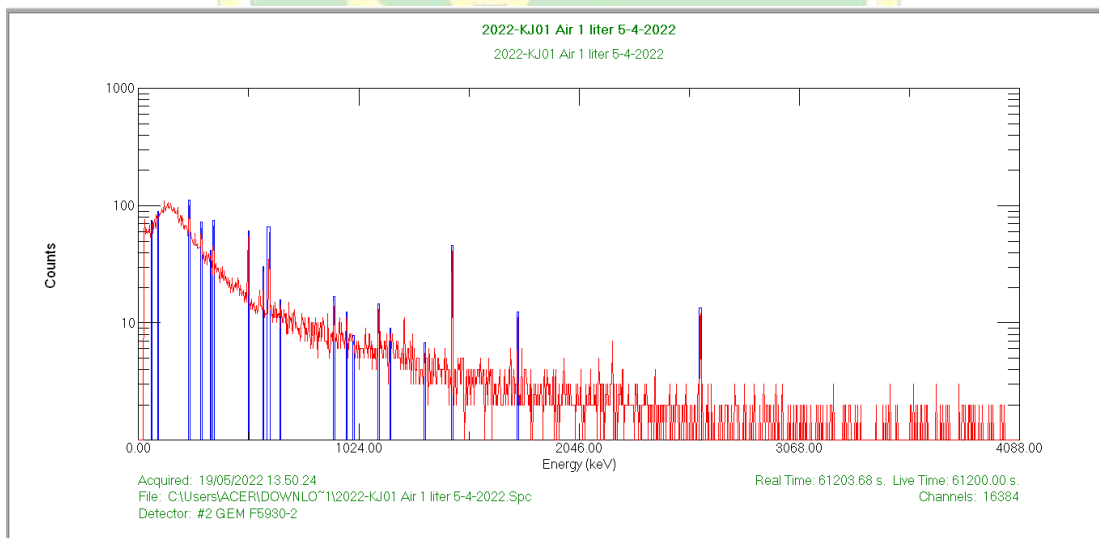
Lampiran B Spektrum Standar Kalibrasi dan Hasil Pengukuran Sampel Air

B. 1 Standar Kalibrasi

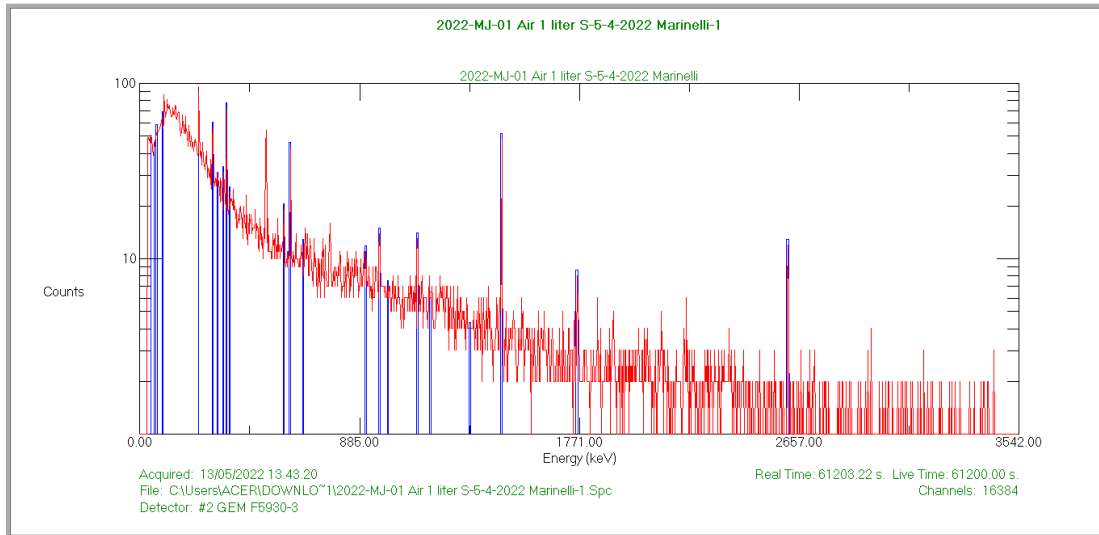


B. 2 Hasil Pengukuran Sampel Air

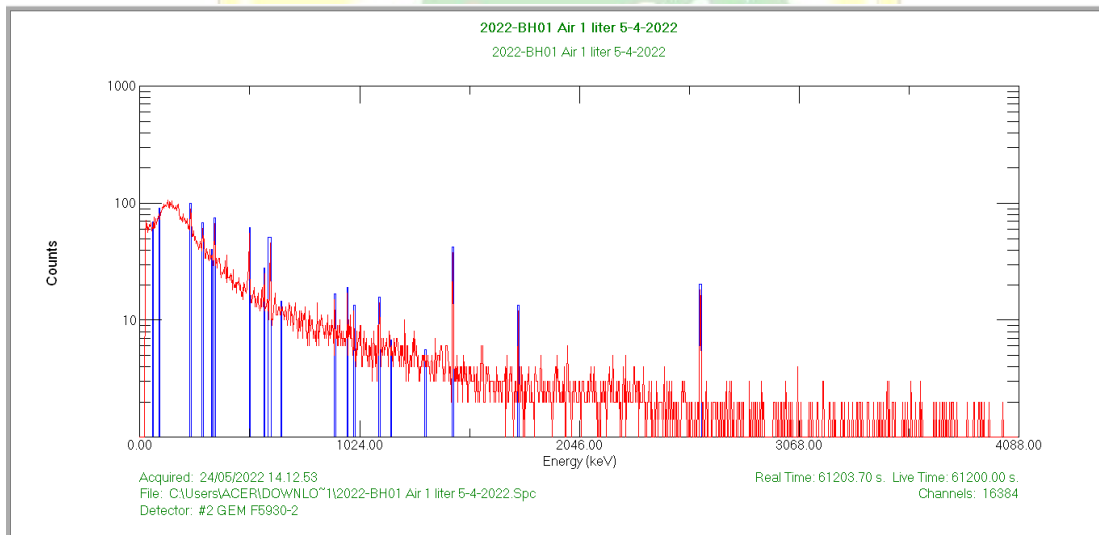
1. Sampel Air Sungai



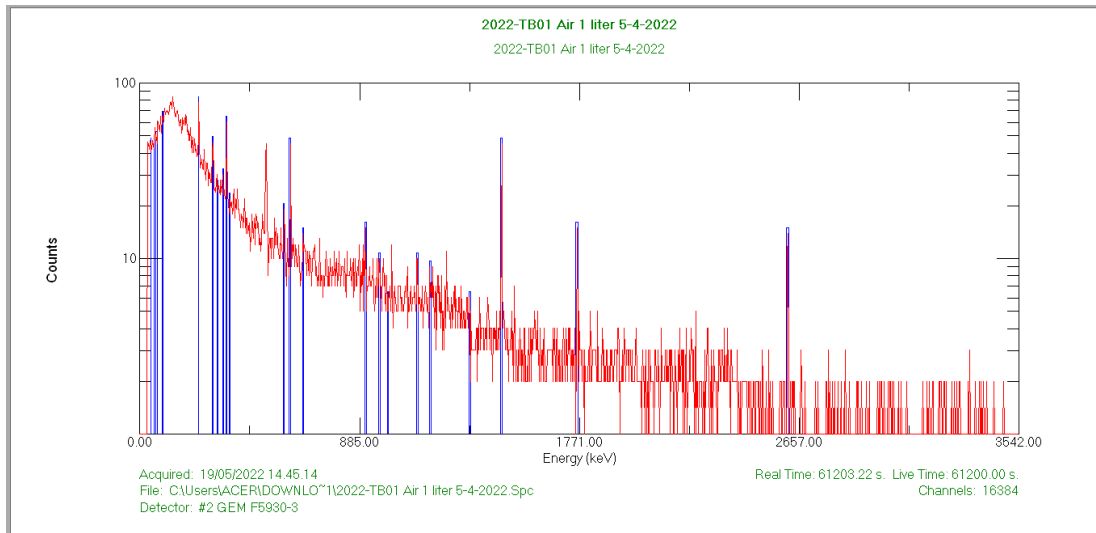
Spektrum Sampel KJ01



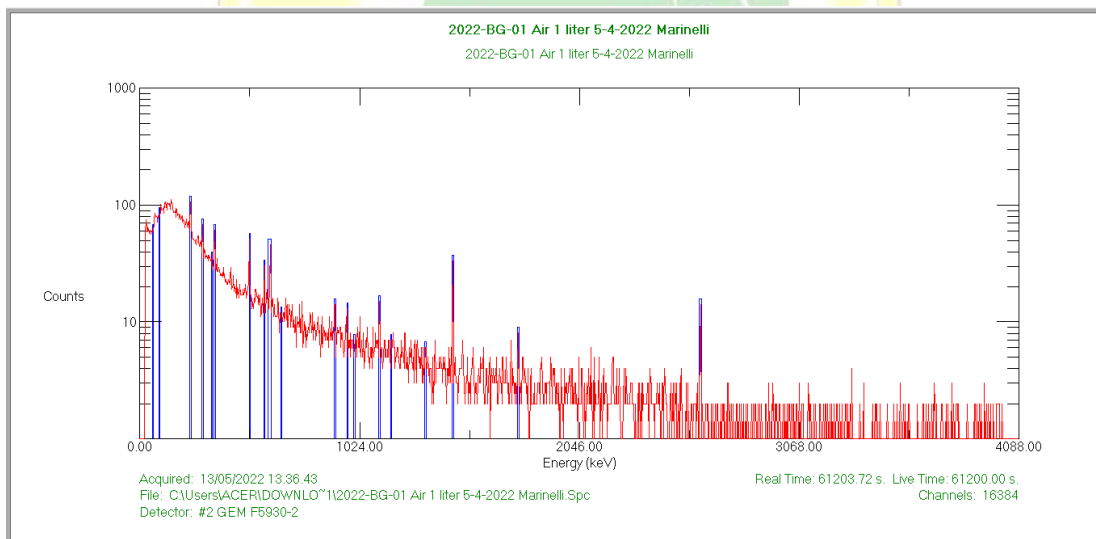
Spektrum Sampel MJ01



Spektrum Sampel BH01

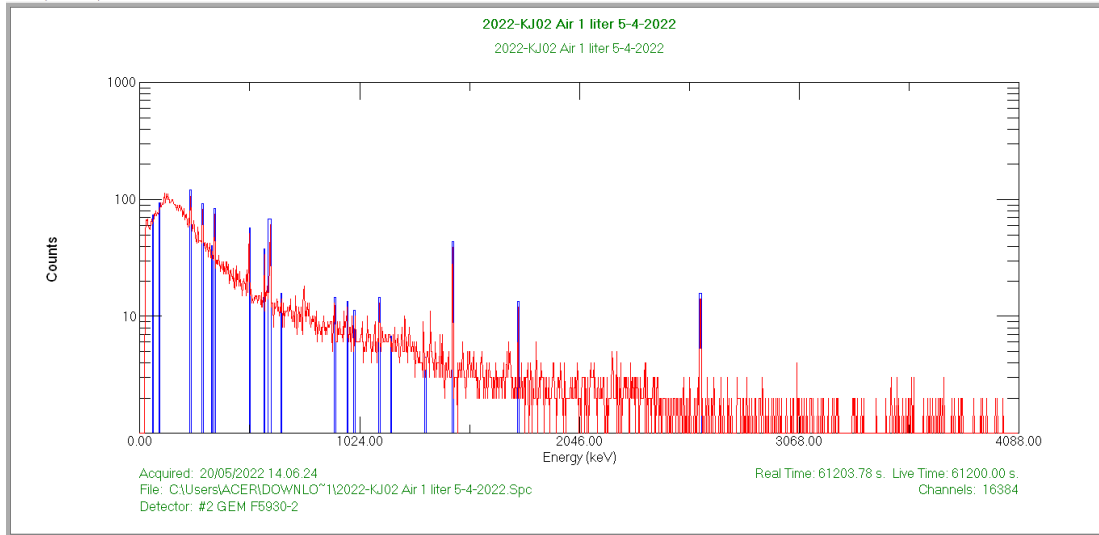


Spektrum Sampel TB01

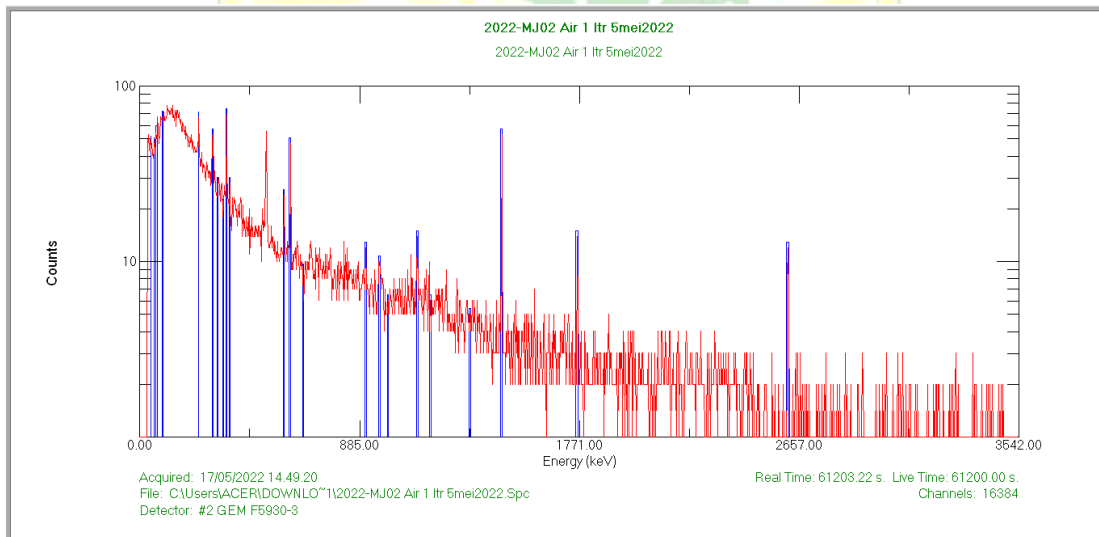


Spektrum Sampel BG01

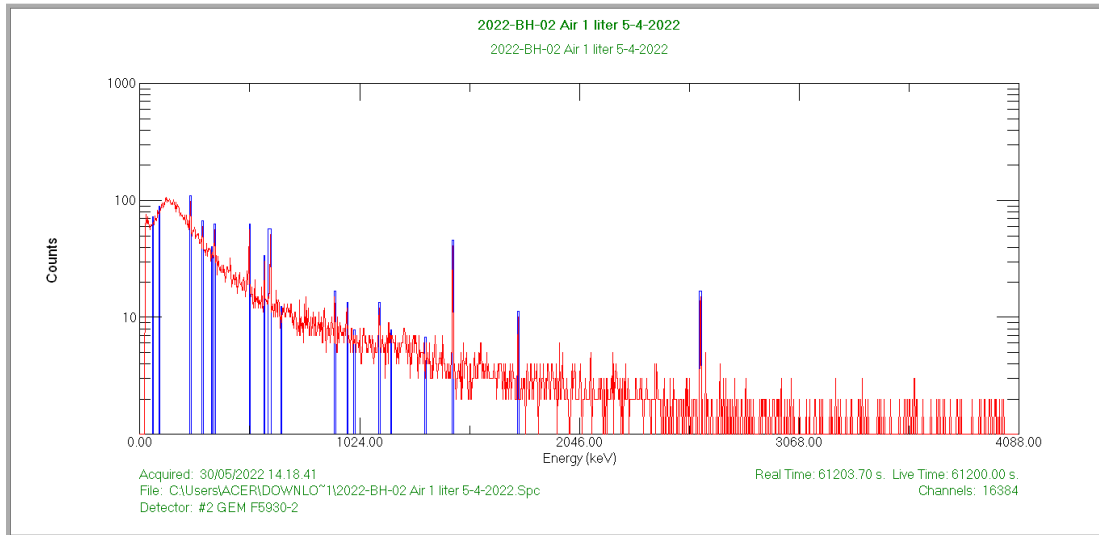
2. Sampel Air Sumur (Bawah Tanah)



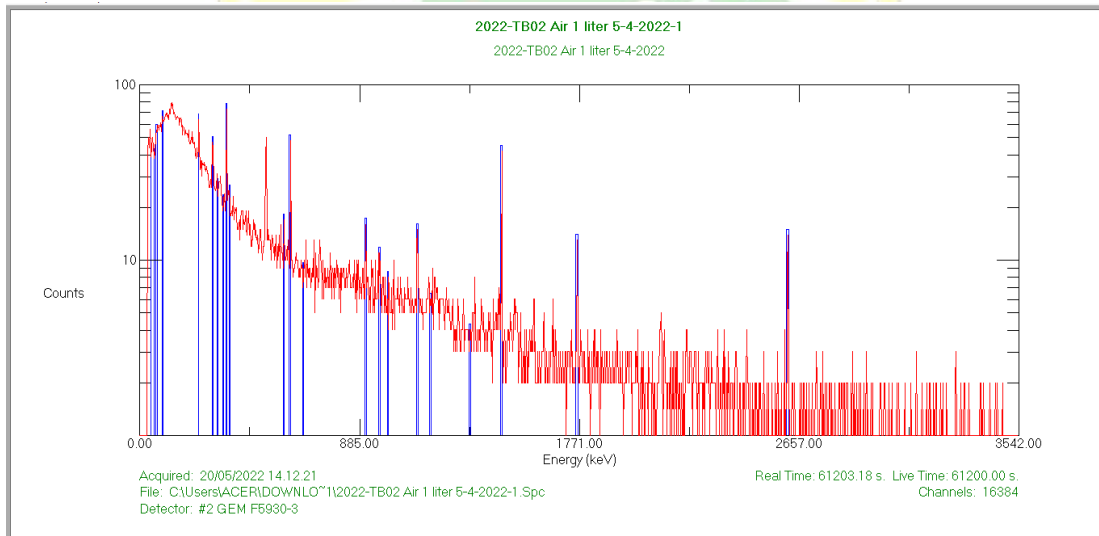
Spektrum Sampel KJ02



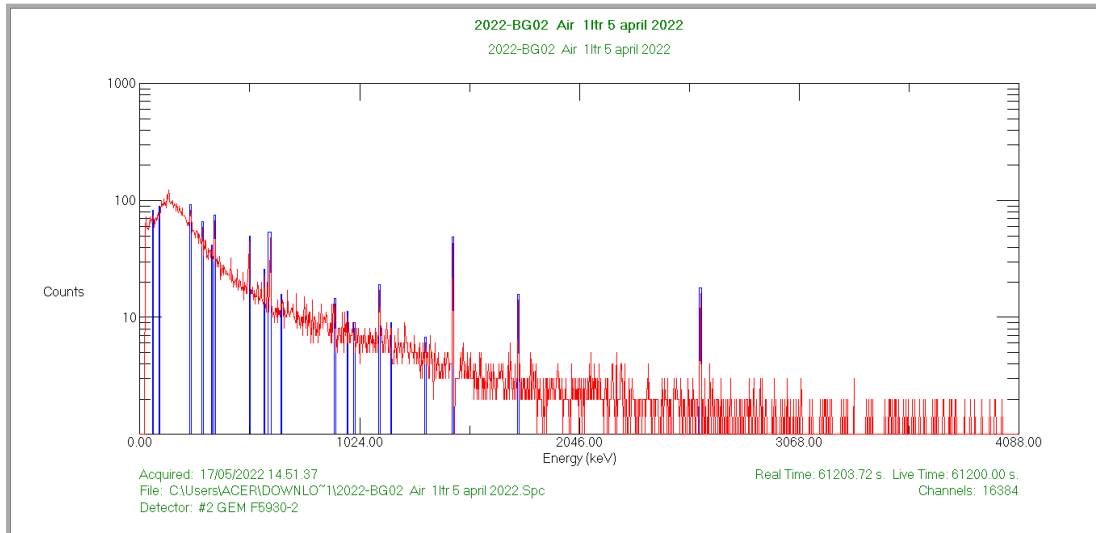
Spektrum Sampel MJ02



Spektrum Sampel BH02

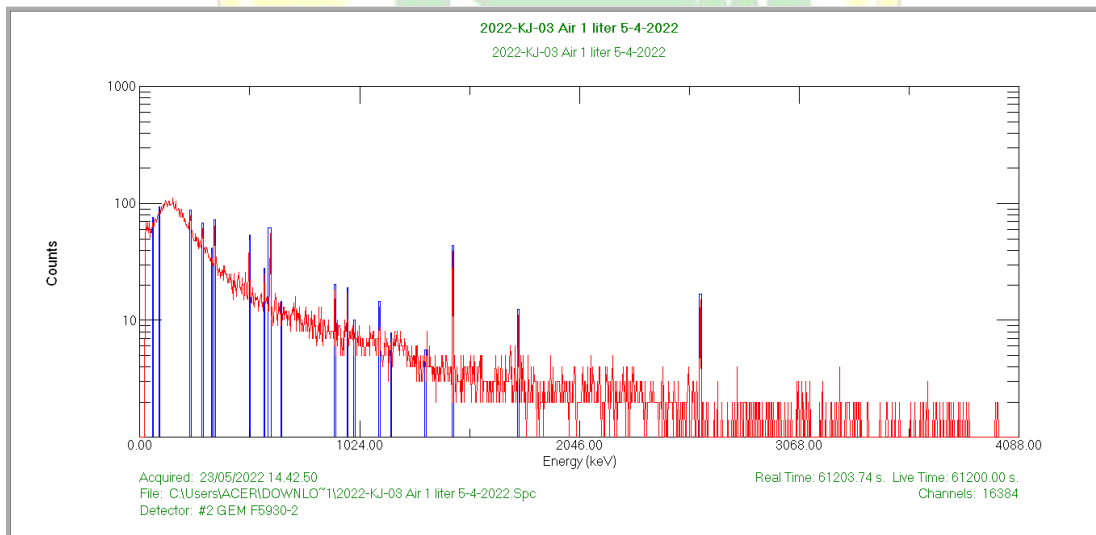


Spektrum Sampel TB02

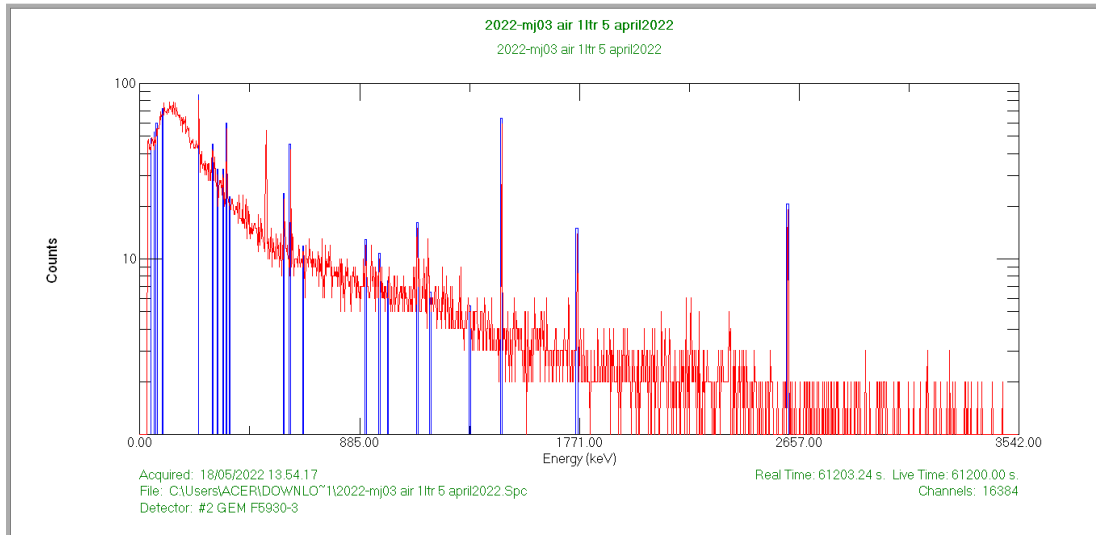


Spektrum Sampel BG02

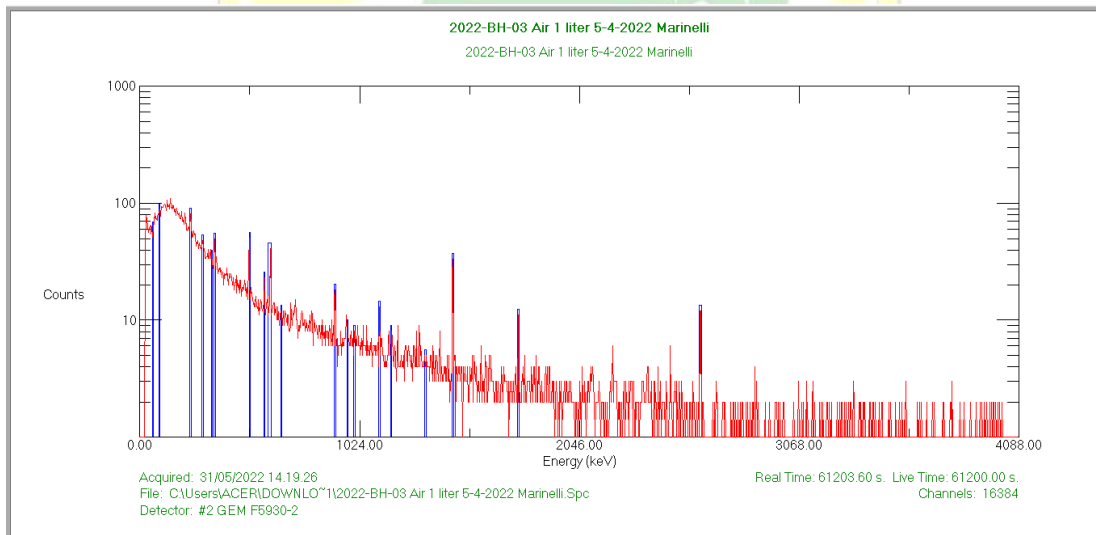
3. Sampel Air Minum



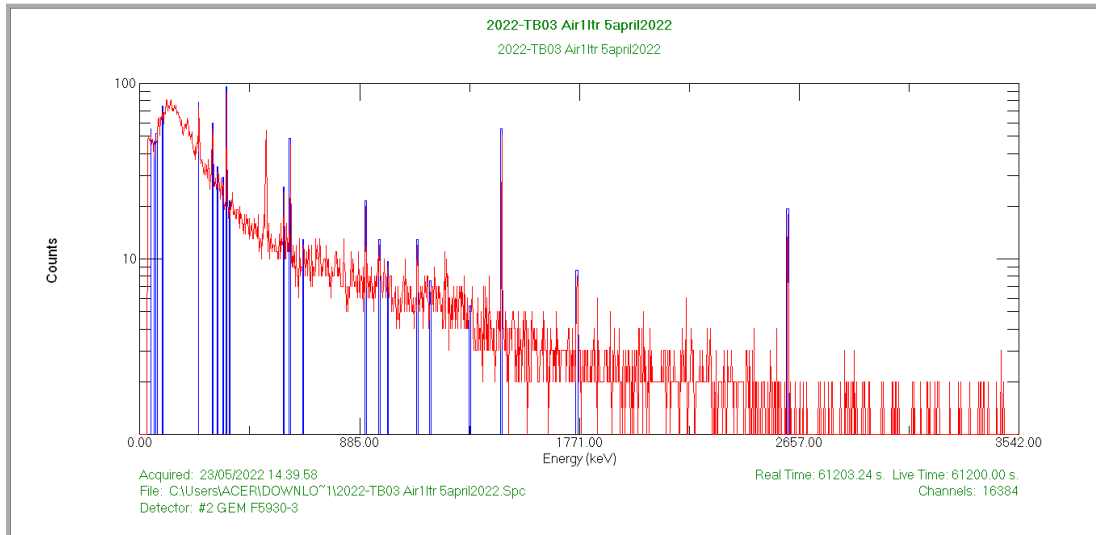
Spektrum Sampel KJ03



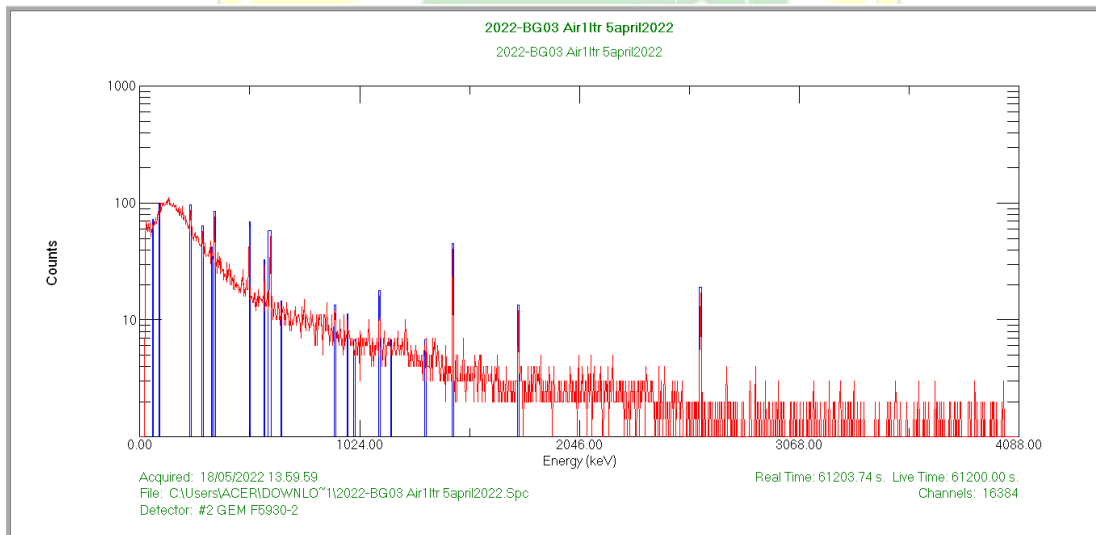
Spektrum Sampel MJ03



Spektrum Sampel BH03



Spektrum Sampel TB03



Spektrum Sampel BG03

Lampiran C Pembacaan ROI Hasil Pencacahan

C. 1 Kalibrasi Energi dan Efisiensi Spektrometer Gamma

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	57,63	61,09	24540	18156	172	59,30	0,61	0,96	Ta-182	59,32
2	79,68	82,49	14626	10137	126	80,82	0,62	0,97	Ba-133	81,00
3	274,49	278,39	5187	3170	86	276,49	0,91	1,38	Ba-133	276,40
4	301,09	304,98	9322	7482	107	302,98	0,93	1,39	Ba-133	302,85
5	354,06	358,39	23671	21984	161	356,18	0,93	1,47	Kr-89	356,16
6	381,95	386,28	4296	2983	79	384,01	0,96	1,45	Ba-133	383,85
7	659,15	66,2	13746	13055	125	662,04	1,21	1,92	Cs-137	661,66
8	1170,07	1177,21	5730	5186	87	1173,90	1,72	2,52	Co-60	1173,24
9	1329,21	1336,78	4940	4628	78	1333,25	1,72	2,69	Co-60	1332,50
10	1458,29	1464,78	6454	6382	81	1461,64	1,82	2,8	K-40	1460,75
11	1760,57	1767,92	131	90	16	1765,97	0,32	2,13	Bi-214	1764,49
12	2609,44	2618,96	143	98	19	2616,85	0,5	2,74	Co-56	2598,46



C. 2 Background Spektrometer Gamma

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,78	240,03	567	167	28	238,67	0,79	1,03	Pb-212	238,63
2	293,69	297,15	463	197	26	295,19	0,76	1,23	Pb-214	295,22
3	336,53	340,2	330	28	25	338,73	0,25	0,44	Pb-212	338,63
4	349,94	354,05	635	285	33	352,01	0,91	1,30	Pb-214	351,99
5	580,8	585,56	206	49	22	583,45	0,43	0,92	Tl-208	583,19
6	607,62	611,73	378	241	23	609,54	1,23	1,59	Bi-214	609,32
7	658,47	664,09	149	29	24	663,11	0,38	0,54	Cs-137	661,66
8	907,93	913,99	142	69	18	910,81	0,45	1,88	Ac-228	911,16
9	966,35	972,84	133	81	17	969,17	1,22	2,88	Ac-228	968,97
10	998,58	1003,56	67	27	12	1002,29	0,26	0,52	U-238	1001,00
11	1117,8	1123,42	144	67	18	1121,04	0,32	2,56	Bi-214	1120,28
12	1457,91	1465,27	407	354	24	1461,24	1,09	2,71	K-40	1460,75
13	1761,25	1768,39	106	78	14	1764,48	0,35	2,17	Bi-214	1764,51
14	2610,68	2620,63	122	98	16	2614,93	0,94	1,40	Tl-208	2614,53



C. 3 Sampel Air Sungai

1. Sampel KJ01

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	980	228	38	238,26	0,87	1,45	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	729	93	36	295,13	0,33	1,46	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	484	82	30	336,87	0,58	1,53	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	647	234	34	351,62	1,09	1,78	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	238	91	21	583,05	0,97	1,21	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	411	212	29	609,22	1,00	1,71	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	139	-19	19	661,44	0,25	0,40	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	171	67	19	911,43	0,64	2,00	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	93	32	14	969,58	0,31	1,09	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	83	13	13	1003,28	0,25	0,40	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	148	72	17	1120,74	1,12	2,23	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	281	233	20	1460,75	1,42	2,17	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	90	62	12	1764,32	0,99	1,93	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	108	84	14	2612,79	1,81	2,33	Tl-208	2614,53



2. Sampel MJ01

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,66	240,11	619	100	32	238,66	0,68	1,25	Pb-212	238,63
2	293,09	296,98	487	110	30	295,39	0,57	1,16	Pb-214	295,22
3	336,33	340,01	325	25	25	338,46	0,36	0,65	Pb-212	338,63
4	349,95	354,28	565	183	33	352,08	0,99	1,40	Pb-214	351,99
5	580,66	585,42	218	84	21	583,68	0,90	1,40	Tl-208	583,19
6	607,25	611,58	320	159	23	609,54	1,06	1,76	Bi-214	609,32
7	658,5	663,26	149	30	19	660,60	1,93	2,48	Cs-137	661,66
8	909,1	914,29	162	62	19	911,75	0,56	2,87	Ac-228	911,16
9	966,18	971,8	134	57	18	969,34	0,99	2,16	Ac-228	968,97
10	999,04	1003,58	69	7	13	1001,21	1,73	1,86	U-238	1001,00
11	1118,4	1124,02	133	70	17	1121,09	1,46	2,09	Bi-214	1120,28
12	1458,73	1465,21	390	343	23	1461,86	1,89	2,83	K-40	1460,75
13	1761,86	1769,22	82	76	10	1765,53	2,59	2,85	Bi-214	1764,51
14	2612,04	2621,12	118	96	15	2615,85	0,73	1,15	Tl-208	2614,53



3. Sampel BH01

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	934	134	38	238,25	0,90	1,45	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	681	153	34	294,76	1,01	1,42	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	522	28	33	339,46	0,25	0,40	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	648	225	34	351,74	1,03	1,96	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	228	42	22	583,19	0,45	1,68	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	418	214	29	609,34	1,11	1,78	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	145	-9	19	662,19	0,25	0,40	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	146	46	19	911,12	0,7	1,65	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	126	65	15	969,06	0,41	1,59	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	75	-6	13	1000,03	0,28	0,45	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	133	49	17	1120,57	0,85	1,66	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	322	307	19	1460,85	1,84	2,85	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	86	67	11	1763,71	1,57	2,16	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	123	123	11	2612,43	0,90	2,18	Tl-208	2614,53



4. Sampel TB01

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,66	240,11	695	125	34	238,62	0,38	1,21	Pb-212	238,63
2	293,09	296,98	511	80	31	295,3	0,74	1,49	Pb-214	295,22
3	336,33	340,01	308	11	24	337,8	0,29	0,50	Pb-212	338,63
4	349,95	354,28	552	195	32	352,06	0,98	1,46	Pb-214	351,99
5	580,66	585,42	228	78	22	583,72	1,29	1,78	Tl-208	583,19
6	607,25	611,58	317	180	22	609,73	1,12	1,51	Bi-214	609,32
7	658,5	663,26	137	-24	20	660,23	0,22	0,35	Cs-137	661,66
8	909,1	914,29	168	47	20	911,77	0,52	1,61	Ac-228	911,16
9	966,18	971,8	123	33	18	969,65	0,57	0,81	Ac-228	968,97
10	999,04	1003,58	68	24	11	1000,22	2,97	3,26	U-238	1001,00
11	1118,4	1124,02	110	74	14	1120,68	2	2,41	Bi-214	1120,28
12	1458,73	1465,21	426	395	22	1461,51	1,72	3,09	K-40	1460,75
13	1761,86	1769,22	103	74	14	1765,22	0,49	2,27	Bi-214	1764,51
14	2612,04	2621,12	138	124	14	2615,63	0,91	3,21	Tl-208	2614,53



5. Sampel BG01

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	959	175	38	238,27	0,63	1,31	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	692	92	35	295,02	0,74	1,16	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	491	48	31	336,94	0,27	0,44	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	624	204	34	351,74	1,24	1,66	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	281	102	23	583,19	0,89	1,84	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	388	193	29	609,33	1,46	2,01	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	155	-17	20	661,94	0,25	0,40	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	159	96	17	911,31	0,9	2,76	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	102	41	14	969,15	0,51	0,71	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	61	5	12	1002,03	0,31	1,87	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	146	46	18	1120,18	0,62	0,89	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	312	273	20	1461,12	2,26	2,96	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	73	50	11	1764,82	1,50	2,42	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	107	89	13	2613,37	1,42	2,58	Tl-208	2614,53



C. 4 Sampel Air Sumur

1. Sampel KJ02

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	998	201	39	238,26	0,81	1,30	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	727	130	36	294,87	0,60	1,15	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	522	-45	34	338,71	0,25	0,40	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	693	253	35	351,66	1,14	1,83	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	270	81	23	583,17	0,78	1,26	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	475	254	31	609,28	1,16	1,96	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	182	7	21	662,89	0,34	0,83	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	163	67	19	910,34	0,27	0,42	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	116	74	13	969,05	0,42	1,96	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	78	-10	14	1003,28	0,50	0,80	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	130	66	16	1120,15	1,42	2,12	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	316	272	20	1460,69	1,81	2,81	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	92	69	12	1763,89	0,73	1,41	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	117	105	12	2612,53	1,39	2,80	Tl-208	2614,53



2. Sampel MJ02

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,66	240,11	679	169	33	238,64	0,85	1,49	Pb-212	238,63
2	293,09	296,98	538	171	31	295,35	1,11	1,47	Pb-214	295,22
3	336,33	340,01	290	35	23	337,73	1,64	1,82	Pb-212	338,63
4	349,95	354,28	541	226	31	352,06	0,89	1,30	Pb-214	351,99
5	580,66	585,42	241	80	23	583,17	0,65	1,45	Tl-208	583,19
6	607,25	611,58	350	213	23	609,64	1,29	1,68	Bi-214	609,32
7	658,5	663,26	116	-3	18	660,88	0,25	0,76	Cs-137	661,66
8	909,1	914,29	145	45	19	911,62	1,29	1,94	Ac-228	911,16
9	966,18	971,8	109	46	16	969,38	0,51	1,44	Ac-228	968,97
10	999,04	1003,58	62	7	12	999,81	1,45	1,62	U-238	1001,00
11	1118,4	1124,02	145	50	19	1121,74	0,49	1,38	Bi-214	1120,28
12	1458,73	1465,21	465	424	24	1461,69	1,53	3,00	K-40	1460,75
13	1761,86	1769,22	105	58	16	1765,43	0,55	1,92	Bi-214	1764,51
14	2612,04	2621,12	137	115	15	2616,12	1,49	2,98	Tl-208	2614,53



3. Sampel BH02

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	1026	205	39	238,25	0,91	1,92	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	682	139	35	294,91	0,92	1,15	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	497	0	32	336,84	2,44	2,63	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	616	136	35	351,74	0,87	1,36	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	274	88	23	583,10	0,91	1,42	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	412	195	30	609,34	0,94	1,74	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	142	9	18	661,23	0,33	0,7	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	170	74	19	911,05	0,93	1,62	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	121	52	15	969,34	0,74	1,21	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	68	26	11	1000,85	0,83	1,62	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	112	16	17	1120,49	0,32	1,10	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	299	255	20	1460,85	1,49	2,72	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	90	53	13	1764,32	1,93	2,26	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	103	85	13	2613,60	0,41	2,74	Tl-208	2614,53



4. Sampel TB02

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,66	240,11	576	91	31	238,54	0,52	1,31	Pb-212	238,63
2	293,09	296,98	507	143	30	295,47	0,87	1,35	Pb-214	295,22
3	336,33	340,01	342	60	24	338,38	0,75	0,95	Pb-212	338,63
4	349,95	354,28	523	208	31	352,04	1,04	1,57	Pb-214	351,99
5	580,66	585,42	215	35	23	583,51	0,44	1,18	Tl-208	583,19
6	607,25	611,58	355	197	24	609,53	0,88	1,86	Bi-214	609,32
7	658,5	663,26	101	-3	17	661,20	0,41	0,55	Cs-137	661,66
8	909,1	914,29	139	43	18	911,56	0,98	1,57	Ac-228	911,16
9	966,18	971,8	126	13	20	969,94	0,41	0,6	Ac-228	968,97
10	999,04	1003,58	74	-3	14	1002,72	0,22	0,35	U-238	1001,00
11	1118,4	1124,02	139	76	17	1121,3	0,65	1,62	Bi-214	1120,28
12	1458,73	1465,21	383	316	24	1461,56	1,50	2,81	K-40	1460,75
13	1761,86	1769,22	94	76	12	1765,56	1,11	2,47	Bi-214	1764,51
14	2612,04	2621,12	153	103	20	2616,80	0,74	2,69	Tl-208	2614,53



5. Sampel BG02

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	889	129	37	238,33	0,94	1,16	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	706	157	35	295,06	1,36	2,06	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	528	28	33	336,46	0,25	0,40	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	645	148	36	351,76	1,03	1,38	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	252	49	23	583,20	1,12	1,37	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	405	188	30	609,28	1,22	2,03	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	170	12	20	660,94	0,27	0,43	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	153	49	19	911,39	1,56	1,97	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	100	19	15	969,86	0,4	0,64	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	80	3	13	1002,53	0,25	0,4	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	152	60	18	1121,07	0,58	1,07	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	306	258	21	1461	1,12	2,79	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	97	69	13	1764,67	0,43	1,85	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	118	100	13	2613,94	0,59	2,17	Tl-208	2614,53



C. 5 Sampel Air Minum

1. Sampel KJ03

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	911	106	38	238,35	0,68	1,63	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	667	115	34	294,52	0,37	0,72	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	527	42	33	337,92	0,47	0,77	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	622	155	35	351,62	1,14	1,4	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	272	72	23	583,03	1,36	1,74	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	430	209	30	609,27	1,00	1,81	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	148	8	18	662,69	0,29	0,50	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	166	74	19	910,99	0,75	2,09	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	119	65	14	969,29	0,33	1,46	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	73	10	12	1001,28	0,27	0,44	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	109	69	13	1120,04	0,65	1,36	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	302	273	19	1460,61	1,43	2,73	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	94	43	15	1763,78	0,95	1,64	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	109	91	13	2612,96	0,60	2,73	Tl-208	2614,53



2. Sampel MJ03

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,66	240,11	619	100	32	238,66	0,68	1,25	Pb-212	238,63
2	293,09	296,98	487	110	30	295,39	0,57	1,16	Pb-214	295,22
3	336,33	340,01	325	25	25	338,46	0,36	0,65	Pb-212	338,63
4	349,95	354,28	565	183	33	352,08	0,99	1,40	Pb-214	351,99
5	580,66	585,42	218	84	21	583,68	0,90	1,40	Tl-208	583,19
6	607,25	611,58	320	159	23	609,54	1,06	1,76	Bi-214	609,32
7	658,5	663,26	149	30	19	660,60	1,93	2,48	Cs-137	661,66
8	909,1	914,29	162	62	19	911,75	0,56	2,87	Ac-228	911,16
9	966,18	971,8	134	57	18	969,34	0,99	2,16	Ac-228	968,97
10	999,04	1003,58	69	7	13	1001,21	1,73	1,86	U-238	1001,00
11	1118,4	1124,02	133	70	17	1121,09	1,46	2,09	Bi-214	1120,28
12	1458,73	1465,21	390	343	23	1461,86	1,89	2,83	K-40	1460,75
13	1761,86	1769,22	82	76	10	1765,53	2,59	2,85	Bi-214	1764,51
14	2612,04	2621,12	118	96	15	2615,85	0,73	1,15	Tl-208	2614,53



3. Sampel BH03

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	841	116	36	238,17	0,79	1,11	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	647	29	35	295,37	0,76	1,01	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	460	-25	32	337,71	0,25	0,4	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	575	92	34	351,40	0,6	1,58	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	234	69	21	583,26	1,14	1,38	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	361	170	28	609,33	1,26	1,79	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	153	-15	20	662,07	0,47	0,64	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	160	64	19	911,52	0,58	2,55	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	107	30	15	968,76	0,77	1,12	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	79	9	13	1003,28	0,29	0,50	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	110	46	15	1120,25	1,14	1,50	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	289	226	21	1460,76	2,11	2,46	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	87	59	12	1764,29	0,70	2,05	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	108	84	14	2612,84	1,39	3,07	Tl-208	2614,53



4. Sampel TB03

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,66	240,11	640	167	32	238,68	0,66	1,02	Pb-212	238,63
2	293,09	296,98	513	133	30	295,25	0,85	1,41	Pb-214	295,22
3	336,33	340,01	324	-6	25	338,39	0,41	0,55	Pb-212	338,63
4	349,95	354,28	609	301	32	352,12	0,70	1,41	Pb-214	351,99
5	580,66	585,42	233	45	24	583,44	0,78	1,61	Tl-208	583,19
6	607,25	611,58	353	213	23	609,56	1,09	1,77	Bi-214	609,32
7	658,5	663,26	163	-2	21	661,91	0,32	0,95	Cs-137	661,66
8	909,1	914,29	136	65	17	911,81	0,66	1,58	Ac-228	911,16
9	966,18	971,8	117	49	16	969,62	0,69	1,55	Ac-228	968,97
10	999,04	1003,58	76	-19	15	Could	Not	properly	U-238	1001,00
11	1118,4	1124,02	132	28	19	1120,96	0,97	1,35	Bi-214	1120,28
12	1458,73	1465,21	454	402	24	1461,68	1,64	2,87	K-40	1460,75
13	1761,86	1769,22	83	54	13	1765,60	0,50	1,44	Bi-214	1764,51
14	2612,04	2621,12	151	129	16	2615,70	1,08	2,9	Tl-208	2614,53



5. Sampel BG03

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	236,19	239,95	919	154	37	238,21	1,14	1,36	Pb-212	238,63
2	292,96	297,21	728	98	36	294,90	1,44	2,04	Pb-214	295,22
3	335,71	340,21	530	45	33	338,21	0,86	1,85	Pb-212	338,63
4	349,47	354,22	658	185	35	351,72	0,90	1,34	Pb-214	351,99
5	580,71	585,71	279	86	23	583,02	0,34	1,52	Tl-208	583,19
6	606,45	612,7	470	219	32	609,23	1,39	1,78	Bi-214	609,32
7	658,69	663,69	173	-27	21	Could	Not	properly	Cs-137	661,66
8	908,59	914,58	148	52	18	911,26	1,60	2,05	Ac-228	911,16
9	966,8	972,3	124	28	17	969	1,12	1,42	Ac-228	968,97
10	999,28	1004,28	62	-8	12	1000,92	0,42	0,62	U-238	1001,00
11	1117,94	1123,69	129	37	17	1120,31	0,78	1,52	Bi-214	1120,28
12	1457,59	1464,58	332	279	21	1460,89	1,70	2,66	K-40	1460,75
13	1761,66	1768,4	93	51	14	1764,44	0,36	1,00	Bi-214	1764,51
14	2609,35	2618,08	142	118	15	2613,22	1,2	2,93	Tl-208	2614,53



Lampiran D Perhitungan Kalibrasi Energi dan Efisiensi

Nuklida	A ₀ (Bq)	T (hari)	T1	T2	t (hari)	t/T	λ*t	e	A _t
Cs-137	36	10968,25	28/03/2022	24/05/2022	57	0,005196818	-0,003601395	0,996405082	36,35882145
Co-60	18	19,239,515	28/03/2022	24/05/2022	57	2,96265x10 ⁻⁶	-2,05312 x10 ⁻⁶	0,999997947	18,39996222
Ba-133	50	3,846,735	28/03/2022	24/05/2022	57	1,48178 x10 ⁻⁵	-1,02687 x10 ⁻⁵	0,999989731	49,79948862

Nuklida	Energi Gamma (keV)	Yield Gamma	Nomor Salur (Chanel)	Waktu Paruh (hari)	Gross Area	Net. Area	σPγ (SD)	Peak	At	Efisiensi
Ba-133	80,9979	0,3661	375	61200	14626	10137	126	375,29	49,79948862	0,009085177
Ba-133	276,3989	0,071	1778	61200	5187	3170	86	1777,51	49,79948862	0,014649561
Ba-133	302,8508	0,1833	1403	61200	9322	7482	107	1402,74	49,79948862	0,013393033
Ba-133	356,0129	0,621	1280	61200	23671	21984	161	1280,24	49,79948862	0,011615524
Ba-133	383,8485	0,0894	1651	61200	4296	2983	79	1650,82	49,79948862	0,010948117
Cs-137	661,657	0,85	3063	61200	13746	13055	125	3063,36	36,35882145	0,006902346
Co-60	1173,228	0,99824	5431	61200	5730	5186	87	1173,9	18,39996222	0,004613486
Co-60	1132,492	0,99	6169	61200	4940	4628	78	1333,25	18,39996222	0,004151354

Lampiran E Perhitungan Konsentrasi Aktivitas

E. 1 Sampel Air Sungai

1. Sampel KJ01

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	82	30	25	20	0,2	1,00	0,03	0,01
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	67	19	44	20	0,2	1,00	0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	32	14	24	20	0,2	1,00	0,01	0,00
														0,02	0,01
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	233	20	59	20	0,2	1	0,32	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

2. Sampel MJ01

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	25	25	25	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	62	19	44	20	0,2	1,00	0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	57	18	24	20	0,2	1,00	0,03	0,01
														0,02	0,01

K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	343	23	59	20	0,2	1	0,52	0,04
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	7	13	25	20	0,2	1	-0,45	-0,83

3. Sampel BH01

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P _γ)	σP _γ (SD)	Efisiensi	σ _ε	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	28	33	25	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	46	19	44	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	65	15	24	20	0,2	1,00	0,04	0,01
														0,03	0,01
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	307	19	59	20	0,2	1	0,46	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

4. Sampel TB01

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	11	24	25	20	0,2	1,00	-0,01	-0,02
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	47	20	44	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	33	18	24	20	0,2	1,00	0,01	0,00
														-0,01	0,12
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	395	22	59	20	0,2	1	0,61	0,04
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	24	11	25	20	0,2	1	-0,02	-0,01

5. Sampel BG01

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	48	31	25	20	0,2	1,00	0,01	0,01
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	96	17	44	20	0,2	1,00	0,03	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	41	14	24	20	0,2	1,00	0,02	0,01
														0,02	0,01
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	273	20	59	20	0,2	1	0,40	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

E. 2 Sampel Air Sumur (Bawah Tanah)

1. Sampel KJ02

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P _γ)	σP _γ (SD)	Efisiensi	σ _ε	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	-45	34	25	20	0,2	1,00	-0,04	-0,03
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	67	19	44	20	0,2	1,00	0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	74	13	24	20	0,2	1,00	0,04	0,01
														-0,08	0,10
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	272	20	59	20	0,2	1	0,39	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

2. Sampel MJ02

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P _γ)	σP _γ (SD)	Efisiensi	σ _ε	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	35	23	25	20	0,2	1,00	0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	45	19	44	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	46	16	24	20	0,2	1,00	0,02	0,01
														0,01	0,01
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	424	24	59	20	0,2	1	0,67	0,04
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	7	12	25	20	0,2	1	-0,45	-0,76

3. Sampel BH02

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P _γ)	σP _γ (SD)	Efisiensi	σε	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	0	32	25	20	0,2	1,00	-0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	74	19	44	20	0,2	1,00	0,02	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	52	15	24	20	0,2	1,00	0,02	0,01
														0,02	0,01
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	255	20	59	20	0,2	1	0,36	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

4. Sampel TB02

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P _γ)	σP _γ (SD)	Efisiensi	σε	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	60	24	25	20	0,2	1,00	0,02	0,01
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	43	18	44	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	13	20	24	20	0,2	1,00	-0,01	-0,01
														-0,04	0,03
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	316	24	59	20	0,2	1	0,47	0,04
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	-3	14	25	20	0,2	1	-0,69	-3,24

5. Sampel BG02

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P _γ)	σP _γ (SD)	Efisiensi	σε	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	28	33	25	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	49	19	44	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	19	15	24	20	0,2	1,00	0,00	0,00
														-0,04	-0,15
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	258	21	59	20	0,2	1	0,37	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

E. 3 Sampel Air Minum

1. Sampel KJ03

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P _γ)	σP _γ (SD)	Efisiensi	σε	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	42	33	25	20	0,2	1,00	0,01	0,01
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	74	19	44	20	0,2	1,00	0,02	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	65	14	24	20	0,2	1,00	0,04	0,01
														0,02	0,01
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	273	19	59	20	0,2	1	0,40	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

2. Sampel MJ03

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	-6	25	25	20	0,2	1,00	-0,02	-0,07
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	33	19	44	20	0,2	1,00	-0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	52	18	24	20	0,2	1,00	0,02	0,01
														-0,02	1,13
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	430	24	59	20	0,2	1	0,68	0,04
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	-27	15	25	20	0,2	1	-1,29	-0,72

3. Sampel BH03

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	-25	32	25	20	0,2	1,00	-0,03	-0,04
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	64	19	44	20	0,2	1,00	0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	30	15	24	20	0,2	1,00	0,01	0,00
														-0,04	-0,08
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	226	21	59	20	0,2	1	0,31	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

4. Sampel TB03

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	-6	25	25	20	0,2	1,00	-0,02	-0,07
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	65	17	44	20	0,2	1,00	0,01	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	49	16	24	20	0,2	1,00	0,02	0,01
														-0,02	0,10
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	402	24	59	20	0,2	1	0,63	0,04
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	-19	15	25	20	0,2	1	-1,09	-0,86

5. Sampel BG03

Nuklida	Waktu paruh (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	σ_{ϵ}	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	45	33	25	20	0,2	1,00	0,01	0,01
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	52	18	44	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	28	17	24	20	0,2	1,00	0,00	0,00
														0,01	0,01
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	279	21	59	20	0,2	1	0,41	0,03
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	25	14	25	20	0,2	1	0,00	0,00

Lampiran F Perhitungan MDC Spektrometer Gamma

Nuklida	Waktu Paro (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gamma (P γ)	$\sigma_{P\gamma}$ (SD)	Efisiensi	$\Sigma\varepsilon$	Live Time (s)	Net. Area	SD	Net. Latar	Wsp (kg)	uw (%)	Growth	Kons (Bq/kg)	Unct (Bq/kg)
Th-232	5,13x10 ¹²	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	61200	11	24	25	20	0,2	1,00	-0,01	-0,02
	5,13x10 ¹²	911,16	0,266	0,003	0,006	0,0001	61200	47	20	44	20	0,2	1,00	0,00	0,00
	5,13x10 ¹²	968,97	0,162	0,002	0,006	0,0001	61200	33	18	24	20	0,2	1,00	0,01	0,00
														-0,01	0,12
K-40	126x10 ⁷	1460,82	0,107	0,001	0,004	0,0001	61200	395	22	59	20	0,2	1	0,61	0,04
U-238	4,47x10 ⁹	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00008	61200	24	11	25	20	0,2	1	-0,02	-0,01



Lampiran G Titik Koordinat Pengambilan Sampel

No.	Kode Sampel	Sumber	Lokasi	pH	Altitude (AMSL)	Latitude	Longitude
1.	KJ01	Sungai	Kota Jambi	8,0	16 m	1°35'14,32''S	103°35'4,23''E
2.	KJ02	Sumur	Kota Jambi	6,5	17 m	1° 35'43,65''S	103° 35'2,11''E
3.	KJ03	Air Minum	Kota Jambi	7,2	19 m	1° 35'51,22''S	103° 35'29,15''E
4.	MJ01	Sungai	Muaro Jambi	8,2	9 m	1° 34'17,12''S	103° 30'35,61''E
5.	MJ02	Sumur	Muaro Jambi	6,9	16 m	1° 34'3,17''S	103° 31'3,88''E
6.	MJ03	Air Minum	Muaro Jambi	7,7	18 m	1° 34'0,08''S	103° 31'15,22''E
7.	BH01	Sungai	Batang Hari	5,5	49 m	1° 42'11,50''S	103° 6'18,60''E
8.	BH02	Sumur	Batang Hari	5,4	51 m	1° 42'8,30''S	103° 6'23,80''E
9.	BH03	Air Minum	Batang Hari	6,5	55 m	1° 41'55,57''S	103° 6'13,28''E
10.	TB01	Sungai	Tebo	8,2	97 m	1° 34'27,12''S	102° 43'21,23''E
11.	TB02	Sumur	Tebo	6,9	99 m	1° 34'36,54''S	102° 43'15,45''E
12.	TB03	Air Minum	Tebo	6,5	89 m	1° 34'32,13''S	102° 43'41,11''E
13.	BG01	Sungai	Bungo	7,2	105 m	1° 28'15,27''S	102° 8'23,82''E
14.	BG02	Sumur	Bungo	6,0	101 m	1° 28'48,33''S	102° 8'27,36''E
15.	BG03	Air Minum	Bungo	6,2	106 m	1° 28'54,61''S	102° 8'38,42''E



PENILAIAN BAHAYA RADIOLOGIS AKIBAT RADIOAKTIVITAS ALAM PADA SAMPEL AIR DI SEPANJANG SUNGAI BATANG HARI, JAMBI

ORIGINALITY REPORT

5%

SIMILARITY INDEX

5%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

1%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

jurnal.batan.go.id

Internet Source

1%

2

www.chem.missouri.edu

Internet Source

1%

3

scholar.unand.ac.id

Internet Source

1%

4

smukmin.blogspot.com

Internet Source

1%

5

jfu.fmipa.unand.ac.id

Internet Source

1%

Exclude quotes On

Exclude bibliography On

Exclude matches < 1%