

**PENENTUAN AKTIVITAS SPESIFIK RADIONUKLIDA ALAM  
SUMBER MATA AIR PANAS DI KABUPATEN SOLOK  
SUMATERA BARAT**

**SKRIPSI**



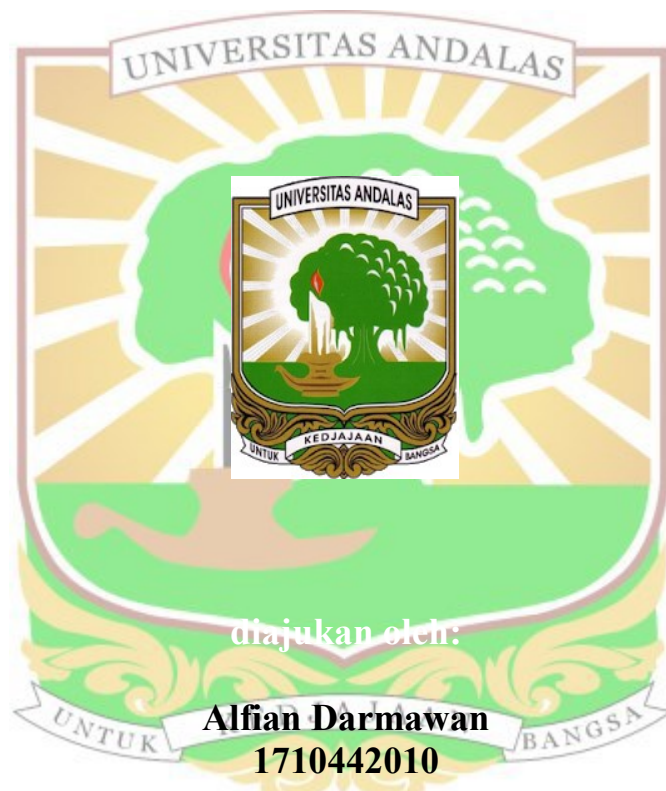
**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS ANDALAS  
PADANG**

**2024**

**PENENTUAN AKTIVITAS SPESIFIK RADIONUKLIDA ALAM  
SUMBER MATA AIR PANAS DI KABUPATEN SOLOK  
SUMATERA BARAT**

**SKRIPSI**

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



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

**2024**

**SKRIPSI**

**PENENTUAN AKTIVITAS SPESIFIK RADIONUKLIDA ALAM  
SUMBER MATA AIR PANAS DI KABUPATEN SOLOK  
SUMATERA BARAT**

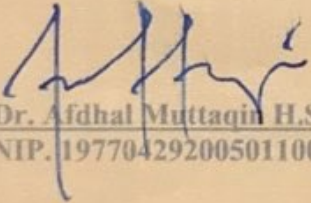
disusun oleh:

**Alfian Darmawan**  
**1710442010**

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji  
Pada tanggal 31 Juli 2024


**Tim Penguji**

**Pembimbing Utama**




**Dr. Afdhal Muttaqin H.S., M.Si**  
**NIP. 197704292005011002**

**Pembimbing Pendamping**



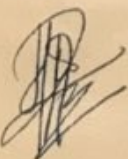
**Dr. Murdahayu Makmur, MT.**  
**NIP. 197208272000122002**

**Penguji I**




**Dr. Ramacos Fardela**  
**NIP. 198904042022031004**

**Penguji II**



**Rico Adrial, M.Si**  
**NIP. 198803212019031007**

**Penguji III**



**Elistia Liza Namigo, M.Si**  
**NIP. 198209042003122003**

# PENENTUAN AKTIVITAS SPESIFIK RADIONUKLIDA ALAM SUMBER MATA AIR PANAS DI KABUPATEN SOLOK SUMATERA BARAT

## ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang penentuan aktivitas spesifik radionuklida alam sumber air panas di Kabupaten Solok, Sumatera Barat. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui nilai aktivitas spesifik radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , dan  $^{40}\text{K}$  dan parameter awal air dari sumber mata air panas sebagai usaha dalam keselamatan dan perlindungan radiasi untuk lingkungan dan masyarakat sekitar. Sampel air diambil dari tiga tempat yang berbeda yaitu Bukik Gadang, Batu Bajanjang dan Bukik Kili. Sampel air kemudian dianalisis aktivitas spesifiknya menggunakan spektrometer gamma HPGe yang dicacah selama 72 jam untuk radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$ . Hasil pengukuran derajat keasaman (pH), temperatur dan konduktivitas air sebagai parameter awal yang diukur pada sampel masing-masing berkisar antara 6,1-6,5 untuk pH; 41-52 °C dan 156,4-164,7  $\mu\text{S}/\text{m}$ . Hasil pengukuran aktivitas spesifik pada sampel yang tertinggi terdapat pada radionuklida  $^{40}\text{K}$  berkisar antara  $(0,20 \pm 0,01)$  Bq/L sampai  $(0,58 \pm 0,02)$  Bq/L dan yang terendah pada  $^{238}\text{U}$  berada pada MDC. Beberapa hasil pengukuran sampel tidak mendeteksi semua radionuklida karena hasil yang didapatkan berada dibawah MDC. Aktivitas spesifik  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  sampel berada di bawah ambang batas dari PERKA BAPETEN No 9 Tahun 2009 yang menandakan bahwa lokasi penelitian aman dari dampak radiasi.

Kata Kunci : Aktivitas spesifik, radionuklida, air panas, parameter awal, spektrometer gamma.

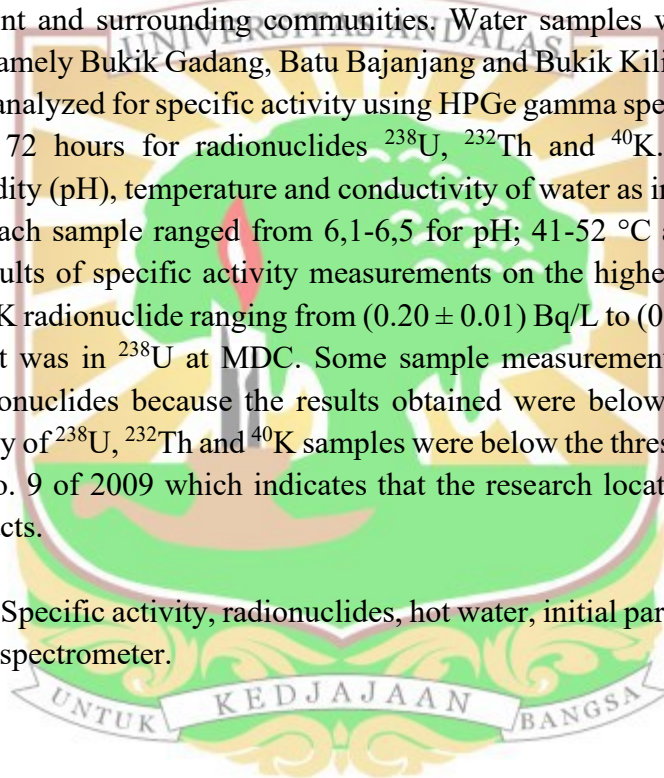


# DETERMINATION OF SPECIFIC ACTIVITIES OF NATURAL RADIONUCLIDES IN HOT WATER SOURCES IN SOLOK REGENCY WEST SUMATERA

## ABSTRACT

Research has been conducted on determination of specific activity of natural radionuclides of hot water source in Solok Regency, West Sumatera. The study aims to determine the specific activity of radionuclides  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  and initial water parameters from hot water to effort in radiation safety and protection for environment and surrounding communities. Water samples were taken from three places, namely Bukik Gadang, Batu Bajanjang and Bukik Kili. Then the water samples were analyzed for specific activity using HPGe gamma spectrometer which was chopped 72 hours for radionuclides  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ . The results of measuring acidity (pH), temperature and conductivity of water as initial parameters measured in each sample ranged from 6,1-6,5 for pH; 41-52 °C and 156,4-164,7  $\mu\text{S/m}$ . The results of specific activity measurements on the highest samples were found in the  $^{40}\text{K}$  radionuclide ranging from  $(0.20 \pm 0.01)$  Bq/L to  $(0.58 \pm 0.02)$  Bq/L and the lowest was in  $^{238}\text{U}$  at MDC. Some sample measurement results did not detect all radionuclides because the results obtained were below the MDC. The specific activity of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  samples were below the threshold of PERKA BAPETEN No. 9 of 2009 which indicates that the research location is safe from radiation impacts.

Keywords : Specific activity, radionuclides, hot water, initial parameters, gamma spectrometer.



## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Shalawat dan salam penulis kirimkan untuk nabi Muhammad SAW yang telah membawa kebaikan, petunjuk pedoman, teladan, dan ilmu pengetahuan bagi umat manusia seperti saat ini.

Selesainya penulisan skripsi ini tak terlepas oleh bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua yang telah membesarkan dan mendidik penulis dengan sepenuh hati, kakak, kedua adik dan keluarga besar yang telah memberikan dorongan, motivasi dan doa selama proses penelitian dan penulisan skripsi berlangsung.
2. Bapak Dr. Afdhal Muttaqin, M.Si. selaku dosen pembimbing utama yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing, dorongan, motivasi, kritikan, saran dan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Murdahayu Makmur, S.Si., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping di PRTKMMN-BRIN yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing, dorongan, motivasi, kritikan, saran dan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Ramacos Fardela, M.Sc., Bapak Rico Adrial, M.Si., dan Ibu Elistia Liza Namigo, S.Si., M.Si., selaku dosen penguji yang telah

memberikan kritik, saran, dan masukan kepada penulis dalam penulisan skripsi.

5. Bapak Dr. Harmadi, S.Si., M.Si., selaku dosen penasehat akademik yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis selama masa perkuliahan.
6. Bapak Kusdiana, S.ST selaku Kepala Subbidang Keselamatan Lingkungan LTKMR-BRIN dan Bapak Wahyudi, S.ST selaku penanggungjawab ruang cacah spektrometer gamma yang telah memberikan masukan serta saran selama melakukan penelitian dan membimbing dalam proses pencacahan sampel dari awal hingga selesai.
7. Ario Fito Kusuma, S.T., Ahmad Fauzan, S.T., M.T., Taufik Hidayat S.Or, dan teman lainnya serta mahasiswa seperjuangan yang melakukan penelitian di PRTKMMN-BRIN yang telah membantu penulis dalam melakukan pengambilan dan pengukuran sampel serta memberikan semangat, masukan dan saran selama penelitian.
8. Bapak Dr. Afdhal Muttaqin, M.Si., selaku Kepala Departemen Fisika, Bapak/Ibu Dosen Departemen Fisika, dan seluruh Staf Tata Usaha di lingkungan Departemen Fisika yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama perkuliahan.
9. Teman dan sahabat yang telah memberikan semangat kepada penulis dan telah mendengarkan keluh kesah penulis dan memberikan motivasi selama perkuliahan dan penulisan skripsi ini.

10. Rekan-rekan seperjuangan di Departemen Fisika yang telah menemani penulis dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar skripsi ini menjadi lebih baik. Mudah-mudahan skripsi ini dapat bermanfaat baik bagi penulis maupun bagi pembaca.



Padang, 31 Juli 2024

Alfian Darmawan



## DAFTAR ISI

	halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG</b> .....	<b>xi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	4
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Radioaktivitas.....	5
2.1.1 Sumber Radioaktif .....	6
2.1.2 Peluruhan Radioaktif .....	8
2.1.3 Laju Peluruhan dan Waktu Paro .....	10
2.1.4 Uranium dan Thorium .....	11
2.1.5 Aktivitas.....	14
2.1.6 Aktivitas Spesifik.....	15
2.2 Pemantauan Radiasi .....	16
2.3 Karakteristik Air Panas Alam .....	17
2.4 Sistem Geotermal Lokasi Penelitian .....	19
2.5 Sumber Mata Air Panas Kecamatan Lembang Jaya dan Kecamatan Kubung .....	22

2.6	Spektrometer Gamma.....	26
2.6.1	Kalibrasi Spektrometer Gamma.....	27
2.6.2	Konsentrasi Zat Radioaktif.....	29
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>31</b>
3.1	Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian .....	31
3.2	Alat dan Bahan Penelitian.....	32
3.2.1	Alat Penelitian.....	32
3.2.2	Bahan Penelitian .....	34
3.3	Variabel Penelitian .....	36
3.4	Teknik Penelitian.....	36
3.4.1	Pengambilan Sampel.....	37
3.4.2	Preparasi Sampel.....	37
3.4.3	Kalibrasi Spektrometer Gamma.....	38
3.4.4	Pengukuran Radiasi Latar .....	38
3.4.5	Pengukuran Radionuklida Pada Sampel .....	39
3.4.6	Pengolahan Data .....	39
3.4.7	Analisis Data Aktivitas Spesifik Air Panas .....	39
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>40</b>
4.1	Kalibrasi Spektrometer Gamma.....	40
4.1.1	Kalibrasi Energi .....	40
4.1.2	Kalibrasi Efisiensi.....	42
4.2	Pengukuran Aktivitas Spesifik pada Sampel Air Panas.....	44
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP.....</b>	<b>52</b>
5.1	Kesimpulan.....	52
5.2	Saran.....	52
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>
	<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>58</b>

## DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Peta Geologi di Gunung Talang – Bukit Kili .....	21
Gambar 2.2 Peta Geotermal di Gunung Talang – Bukit Kili .....	21
Gambar 2.3 Model Sistem Panas Bumi Gunung Talang-Bukit Kili .....	22
Gambar 2.4 Beberapa Titik Mata Air Panas Alam di Bukit Gadang, Kabupaten Solok .....	25
Gambar 2.5 Rangkaian Alat Pencacah Spektrometer Gamma .....	26
Gambar 3.1 Citra Satelit Beberapa Pemandian Air Panas di Kabupaten Solok .....	32
Gambar 3.2 Beaker Glass .....	33
Gambar 3.3 Seperangkat Alat Spektrometer Gamma .....	34
Gambar 3.4 Sumber Standar Radionuklida .....	35
Gambar 3.5 Tahapan Penelitian Analisis Aktivitas Spesifik dari $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ dan $^{40}\text{K}$ dan Kalibrasi Alat Ukur .....	36
Gambar 4.1 Kurva Kalibrasi Energi .....	41
Gambar 4.2 Kurva Kalibrasi Efisiensi .....	43
Gambar 4.3 Grafik Aktivitas Spesifik Pada Tiap Titik Pengambilan Sampel .....	47

## DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 2.1 Deret Uranium .....	12
Tabel 2.2 Deret Thorium .....	13
Tabel 2.3 Aktivitas Spesifik Radionuklida Pada Sampel Air Panas Alam Pada Beberapa Wilayah.....	18
Tabel 3.1 Koordinat Sampel.....	31
Tabel 3.2 Radionuklida Sumber Standar GM-014 Marinelli 1 Liter .....	35
Tabel 4.1 Hasil Kalibrasi Energi .....	41
Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi Efisiensi .....	42
Tabel 4.3 Parameter Awal Pada Sampel Air .....	44
Tabel 4.4 Aktivitas Spesifik Radionuklida Pada Sampel Air.....	46



## DAFTAR LAMPIRAN

	halaman
Lampiran A	Sertifikat Standarisasi Radionuklida ..... 58
Lampiran B	Spektrum Standar Kalibrasi dan Hasil Pengukuran Sampel ..... 59
B1	Spektrum Standar Kalibrasi ..... 59
B2	Spektrum Latar ..... 59
B3	Spektrum Sampel ..... 60
Lampiran C	Hasil Pembacaan ROI (Range of interest) ..... 64
B1	ROI Standar Kalibrasi ..... 64
B2	ROI Latar ..... 65
C3	ROI Sampel ..... 66
Lampiran D	Perhitungan Kalibrasi Efisiensi dan MDC Spektrometer Gamma ..... 76
D1	Perhitungan Kalibrasi Efisiensi ..... 76
D2	Perhitungan MDC ..... 76
Lampiran E	Perhitungan Konsentrasi Aktivitas Radionuklida ..... 77
Lampiran F	Perhitungan Manual Aktivitas Radionuklida ..... 82
Lampiran G	Dokumentasi Penelitian ..... 84

## DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	pemakaian pertama kali pada hal
BAPETEN	Badan Pengawas Tenaga Nuklir	1
BB	Batu Bajanjang	31
BG	Bukik Gadang	31
Bi	Bismuth	2
BK	Bukik Kili	31
BPS	Badan Pusat Statistik	3
BT	Bujur Timur	23
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>	1
He	Helium	8
HP-Ge	<i>Hight Purity Germanium Detector</i>	26
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>	1
K	Kalium	2
LS	Lintang Selatan	23
MCA	<i>Multi Channel Analyzer</i>	34
MDC	<i>Minimum Detecable Concentration</i>	30
Pb	Plumbum	2
PRTKMMN	Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir	31
Rn	Radon	3



TENORM	<i>Technologically-Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material</i>	39
Th	Thorium	2
U	Uranium	2
UNSCEAR	<i>United Nations · Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>	1
WHO	<i>World Health Organization</i>	2

LAMBANG

AS	Aktivitas Spesifik	15
$A_t$	Aktivitas zat radioaktif sesaat	14
Bq	Satuan aktivitas, Becquerel	15
$C_{avg}$	Konsentrasi rata-rata	29
$C_i$	Satuan aktivitas Curie	15
$C_{sp}$	Konsentrasi sampel	29
$P_\gamma$	Kelimpahan gamma energi tertentu	28
$R^2$	Koefisien regresi	42
$U_T$	Ketidakpastian pengukuran	29
$\alpha$	Alfa	8
$\beta$	Beta	8
$\gamma$	Gamma	8



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pemandian air panas alam merupakan salah satu indikasi adanya potensi geotermal (panas bumi). Keberadaan gunung api dan potensi geotermal sangat erat kaitannya dengan jalur Cincin Api Pasifik yang melintasi Indonesia. Disisi lain, gunung api juga memiliki kelimpahan dan ketersebaran radionuklida alam seperti uranium, thorium dan kalium, yang kemungkinan dapat terbawa kepermukaan dengan adanya sumber air panas (Hassan dkk., 2016). Oleh karena itu, mengetahui aktivitas spesifik dari radionuklida alam yang terdapat pada sumber air panas penting untuk meminimalisir efek kesehatan yang akan muncul.

Paparan radiasi dari radionuklida tidak secara langsung berdampak terhadap kesehatan, namun secara perlahan bisa meningkatkan risiko tumbuhnya sel kanker. Radiasi di lingkungan dengan tingkat yang rendah bisa menjadi salah satu faktor pemicu terjadinya kanker (Cohen, 2002). Dalam upaya pencegahan, badan keamanan atom, nuklir, dan lingkungan tentang radiasi dunia seperti EPA (*Environmental Protection Agency*), UNSCEAR (*United Nations - Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) dan IAEA (*International Atomic Energy Agency*) mengeluarkan aturan tentang tingkat radiasi yang dapat diterima oleh manusia. Selain rekomendasi dunia, Indonesia juga mempunyai rekomendasi nasional yang telah diatur oleh BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir).

Pemetaan radiasi gamma telah dilakukan di Sumatera Barat pada 28 titik area. Pemetaan dilakukan dengan sistem deteksi radiasi exploranium GR-130



dengan pengambilan sampel dibagi dalam area 40x40 km<sup>2</sup>. Hasil yang diperoleh relatif sama dengan rata-rata tingkat radiasi gamma di Indonesia. Namun, beberapa hasil yang diperoleh sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa wilayah di Indonesia. Laju dosis radiasi yang tinggi di beberapa daerah di Sumatera Barat menunjukkan tingginya tingkat radioaktivitas lingkungan, yang kemungkinan memiliki kaitan erat dengan keberadaan jalur gunung api, termasuk pada sumber air panas alam yang ada di Sumatera Barat. (Kusdiana dkk., 2013)

Banyak penelitian yang sudah dilakukan untuk mengetahui aktivitas spesifik radionuklida alam pada air panas alam. Salah satu penelitian yang sudah dilakukan berada di Yaman. Penelitian dilakukan pada beberapa wilayah Yaman dan penelitian menggunakan spektrometer gamma. Pada lokasi penelitian ditemukan radionuklida alam <sup>236</sup>Ra, <sup>232</sup>Th dan <sup>40</sup>K. Hasil pengukuran melebihi nilai batas maksimum yang telah diatur oleh *World Health Organization* (WHO) sehingga air panas alam yang berlokasi di dalam penelitian ini tidak layak dikonsumsi oleh manusia (El-Mageed dkk., 2013).

Penelitian lain dilakukan di Timur Aljazair, konsentrasi aktivitas radionuklida alam <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th, dan <sup>40</sup>K diukur menggunakan Spektrometer gamma dari dua sumber mata air panas. Radionuklida <sup>238</sup>U, <sup>234</sup>Th, <sup>210</sup>Pb, dan <sup>226</sup>Ra yang diukur pada sampel air tidak mencapai nilai aktivitas minimum yang dapat dideteksi. Aktivitas <sup>238</sup>U dominan berasal dari peluruhan radionuklida <sup>214</sup>Pb dan <sup>214</sup>Bi (Kebir dan Boucenna, 2017).

Pengukuran aktivitas spesifik radionuklida alam <sup>222</sup>Rn, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th dan <sup>40</sup>K pernah dilakukan provinsi Sumatra Barat pada sumber air panas di Nagari

Pariangan, Kabupaten Tanah Datar. Sampel diukur menggunakan *Durridge Rad7 Radon Detector* dan spektrometer gamma. Hasil pengukuran dari penelitian yang dilakukan berada di bawah ambang batas, mengacu pada nilai yang diatur oleh EPA untuk  $^{222}\text{Rn}$  dan PERKA BAPETEN No 9 tahun 2009 untuk  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  (Yuliandari dkk., 2021).

Salah satu daerah yang memiliki sumber mata air panas di Sumatera Barat adalah di Kabupaten Solok. Kabupaten Solok terdapat memiliki  $\pm 15$  sumber air panas alam, diantaranya berada di Kecamatan Lembang Jaya (BPS, 2019b) dan Kecamatan Kubung (BPS, 2019a). Sumber mata air panas digunakan oleh masyarakat untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari dan rekreasi. Hal inilah yang melandasi pentingnya penelitian untuk mengukur dan mengetahui aktivitas spesifik radionuklida terutama alam pada sumber air panas di Kabupaten Solok, terutama pada beberapa radionuklida yang tergolong dalam deret thorium dan uranium. Deret thorium dan uranium adalah deret radionuklida yang dihasilkan dari peluruhan thorium dan uranium.

## 1.2 Tujuan Penelitian

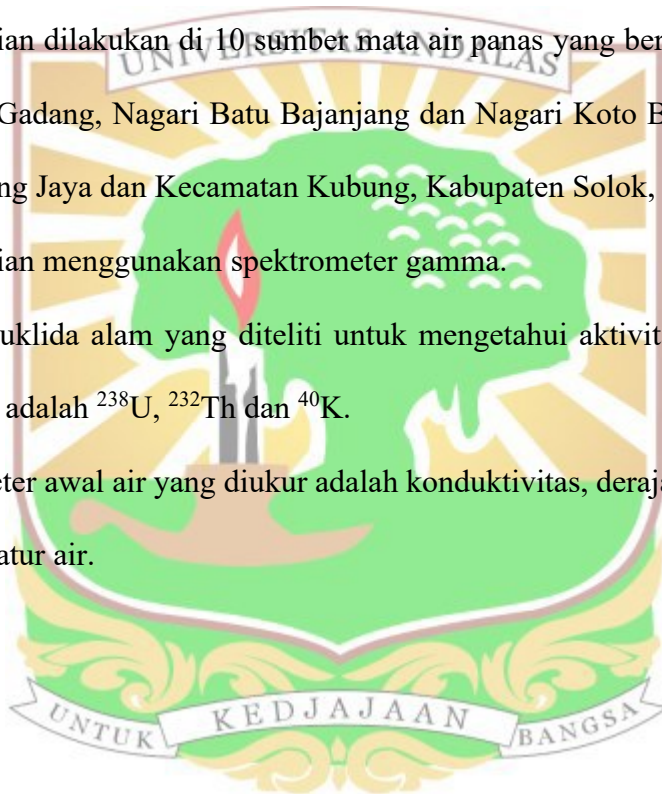
Tujuan penelitian ini adalah menentukan dan mengetahui nilai aktivitas spesifik radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  dan parameter awal air dari sumber mata air panas di Kabupaten Solok sebagai usaha dalam keselamatan dan perlindungan radiasi untuk lingkungan dan masyarakat sekitar.

### 1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini dapat memberikan informasi hasil pengukuran aktivitas spesifik terhadap radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  dari air panas alam yang berada di Kabupaten Solok, yang dapat dijadikan acuan kelayakan mata air panas pada lokasi penelitian untuk masyarakat.

### 1.4 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

1. Penelitian dilakukan di 10 sumber mata air panas yang berlokasi di Nagari Bukik Gadang, Nagari Batu Bajanjang dan Nagari Koto Baru, Kecamatan Lembang Jaya dan Kecamatan Kubung, Kabupaten Solok, Sumatera Barat.
2. Penelitian menggunakan spektrometer gamma.
3. Radionuklida alam yang diteliti untuk mengetahui aktivitas spesifik pada sampel adalah  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$ .
4. Parameter awal air yang diukur adalah konduktivitas, derajat keasaman dan temperatur air.



## BAB II LANDASAN TEORI

### 2.1 Radioaktivitas

Radioaktivitas awal mula ditemukan oleh ilmuwan Perancis pada tahun 1896, Antonie Henry Becquerel. Becquerel mendapatkan adanya unsur uranium (U) yang memiliki daya tembus yang tinggi (kuat) seperti sinar-X yang ditemukan oleh Fisikawan Jerman pada tahun 1895, Wilhelm Conrad Röntgen. Jadi pemancaran radiasi langsung dari uranium diistilahkan dengan radioaktivitas, sedangkan bahannya (uranium) yang memancarkan radiasi diistilahkan dengan zat radioaktif (ATSDR, 2013).

Radioaktivitas merupakan gejala pemancaran radiasi secara impulsif yang menyebabkan pergantian keadaan inti atom. Gejala pemancaran ini memiliki keterkaitan yang kuat dengan kestabilan inti atom. Kestabilan inti atom diindikasikan dari perbandingan proton dan neutron pada intinya. Inti atom yang setimbang tak mengindikasikan gejala radioaktivitas, namun sebaliknya unsur yang tak setimbang mengindikasikan gejala radioaktivitas. Keadaan ini disebabkan oleh unsur yang mempunyai inti atom yang tak setimbang, ini akan meluruh sampai keadaan yang setimbang secara impulsif dengan memancarkan radiasi. Unsur yang memancarkan radiasi secara impulsif ini disebut sebagai unsur radioaktif dan inti dari atomnya disebut radionuklida (Malaka, 2019).

### 2.1.1 Sumber Radioaktif

Sumber Radioaktif dikelompokkan berdasarkan energi ion, sumber bagi tubuh manusia, dan keberadaannya.

1. Berdasarkan sumber bagi tubuh manusia
  - a. Sumber radiasi eksternal, ialah sumber radiasi yang ada di sekitar manusia tetapi di luar tubuh manusia. Sebagian orang dapat menerima radiasi eksternal karena jenis pekerjaannya. Orang yang bekerja di tambang menerima radiasi dari batuan. Pekerja bagian medis menerima radiasi dari instalasi yang berhubungan dengan radiasi secara langsung dari alat-alat medis seperti pesawat sinar-X irradiator, akselerator dan alat-alat yang memancarkan radiasi lainnya (Nurmansya dkk., 2021).
  - b. Sumber radiasi internal, ialah sumber radiasi yang ada di dalam tubuh manusia. Sumber radiasi internal berasal dari unsur radioaktif. Unsur ini masuk dan terikat ke dalam tubuh oleh organ tertentu. Masuknya unsur radioaktif ke dalam tubuh berawal dari udara dan melalui makanan kemudian melewati hidung dan mulut. Selanjutnya diproses di dalam organ tubuh. Unsur radioaktif akan terikat oleh organ manusia seperti paru-paru dan hati. Pada hakikatnya, organ tak bisa mengenali unsur yang stabil maupun unsur radioaktif. Unsur radioaktif bisa mengganggu kinerja organ dalam jangka waktu lama (Siegel dan Bryan, 2014).
2. Berdasarkan energi ion
  - a. Radiasi pengion, radiasi yang mampu mengionisasi materi yang dilewatinya. Karena terjadinya proses ionisasi, sehingga pada materi yang

dilewatinya akan tercipta pasangan ion positif dan negatif. Pada umumnya, radiasi pengion terdiri dari dua jenis yaitu radiasi elektromagnetik (EM) dan radiasi partikel. Contoh radiasi dari EM adalah sinar-X dan sinar gamma. Kemudian contoh dari radiasi partikel adalah hasil peluruhan inti dari radiasi partikel alfa, beta, positron, neutron, dan inti ringan (ATSDR, 2019).

b. Radiasi nonpengion, radiasi yang tak mampu mengionisasi materi yang dilewatinya. Gelombang mikro, radio, sinar inframerah, cahaya tampak dan sinar ultraviolet adalah contoh radiasi nonpengion (Andinty, 2022).

3. Berdasarkan keberadaannya

a. Radiasi Alam, radiasi yang bersumber langsung dari fenomena alam yang terjadi tanpa campur tangan manusia dan sudah ada di bumi sejak terbentuknya alam semesta. Radiasi alam dapat berasal dari bumi dan luar angkasa. Contoh radiasi alam dari bumi adalah radionuklida alam, salah satunya radium. Contoh radiasi alam dari luar angkasa adalah radiasi kosmik galaksi, radiasi dari matahari, dan radiasi yang ada terdapat pada medan magnet bumi (Deiss, 2017).

b. Radiasi Buatan, radiasi yang dihasilkan oleh aktivitas manusia. Radiasi buatan bersumber dari berbagai aplikasi dan aspek kehidupan seperti penggunaan sumber radioaktif dalam pengobatan medis, industri, dan penelitian, pengobatan radioterapi, pengecekan material merujuk kepada ketebalan dan kekerasannya, dan penggunaan reaktor nuklir yang menghasilkan foton gamma dan neutron dari hasil fisinya (Malaka, 2019).

### 2.1.2 Peluruhan Radioaktif

Pancaran radiasi secara kontinu dari inti radioaktif akan berakibat pada kurangnya jumlah inti atom radioaktif. Peluruhan radiasi ialah peristiwa pengurangan jumlah inti atom. Artinya, dengan berkurangnya jumlah inti radioaktif maka jumlah radiasi yang dipancarkan inti radioaktif juga berkurang.

Satu inti atom yang tak setimbang (inti radioaktif) secara impulsif akan berganti menjadi inti atom lain yang lebih setimbang dengan memancarkan energi radiasi. Radiasi yang dipancarkan ini bisa berwujud partikel alfa (partikel  $\alpha$ ), partikel beta (partikel  $\beta$ ), atau sinar gamma (sinar  $\gamma$ ).

#### 1. Peluruhan Alfa (Peluruhan $\alpha$ )

Peluruhan alfa adalah suatu pemancaran atau radiasi inti helium ( ${}^4_2\text{He}$ ), sehingga suatu inti yang mengalami ini akan mengalami pengurangan nomor massa 4 dan nomor atom 2. Secara umum, peluruhan alfa sering terjadi pada nuklida yang memiliki nomor massa besar tetapi energi ikatnya rendah. Inti yang dihasilkan dari peluruhan alfa biasanya masih berada pada tingkat eksitasi dan meluruh lebih lanjut. Proses peluruhan alfa dapat dilihat pada Persamaan 2.1.



Sifat dari partikel alfa (partikel  $\alpha$ ) adalah sebagai berikut:

- i. Partikel alfa berupa inti atom He dan bermuatan listrik positif sebesar dua kali muatan elektron.
- ii. Daya ionisasi partikel alfa sangat besar sehingga jarak tempuhnya di materinya pendek bergantung pada energi sinar alfa.

iii. Partikel alfa bermuatan listrik positif maka berkas partikel alfa akan dibelokkan jika melewati medan magnet atau medan listrik.

## 2. Peluruhan Beta (Peluruhan $\beta$ )

Peluruhan beta terjadi pada inti tidak stabil yang relatif ringan. Peluruhan ini akan memancarkan partikel beta yang bermuatan negatif atau bermuatan positif. Pemakaian istilah positif dan negatif menyatakan muatan listrik yang dibawa oleh partikel beta tersebut. Proses peluruhan beta negatif dan positif dapat dilihat pada Persamaan 2.2 dan 2.3.



Sifat partikel beta (partikel  $\beta$ ) adalah sebagai berikut:

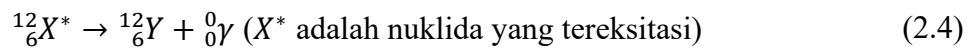
- i. Daya ionisasi di materi sama dengan 1% dari daya ionisasi partikel alfa.
- ii. Kecepatan partikel beta dapat dipancarkan hingga 99% kecepatan cahaya.
- iii. Partikel beta mudah dihamburkan jika melewati medium.
- iv. Partikel beta akan dibelokkan jika melewati medan magnet atau medan listrik dengan sudut pembelokan yang lebih besar dibandingkan partikel alfa

## 3. Peluruhan Gamma (Peluruhan $\gamma$ )

Peluruhan gamma memancarkan sinar  $\gamma$  yang merupakan radiasi gelombang elektromagnetik. Peluruhan gamma biasanya mengikuti peluruhan alfa dan beta. Komposisi proton dan neutron sudah berada pada komposisi stabilnya, tetapi tingkat energinya masih melebihi energi



dasarnya, sehingga untuk mencapai tingkat energi dasar atau keadaan stabil dilakukan pelepasan energi melalui peluruhan  $\gamma$ . Proses peluruhan gamma dapat dilihat pada Persamaan 2.4.



Sifat dari sinar gamma adalah sebagai berikut:

- i. Sinar gamma adalah radiasi elektromagnetik.
- ii. Tidak bermuatan, daya ionisasinya di dalam medium sangat kecil.
- iii. Daya tembusnya sangat besar dibandingkan sinar alfa dan beta (Ikhsan, 2012).

### 2.1.3 Laju Peluruhan dan Waktu Paro

Laju peluruhan masing-masing zat radioaktif bertumpu pada jenis zat radioaktifnya. Jumlah setelah peluruhan zat radioaktif juga bertumpu pada jumlah zat radioaktif awalnya. Dalam kondisi ini, masing-masing zat radioaktif memiliki konstanta peluruhannya ( $\lambda$ ). Konstanta peluruhan adalah jenis zat radioaktif yang meluruh ( $\Delta N/N$ ) setiap satuan waktu ( $\Delta t$ ) yang diartikan dalam Persamaan di bawah ini sehingga mendapatkan jumlah zat radioaktif sesuai Persamaan 2.5 (Akhadi, 2000).

$$\int_0^{Nt} \frac{\Delta N}{N} = \int_0^t \lambda \cdot \Delta t$$

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

Keterangan:

$N_t$  : Jumlah zat radioaktif per waktu

$N_0$  : Jumlah zat radioaktif awal (cacah)

$\lambda$  : Konstanta peluruhan ( $s^{-1}$ )

$t$  : Lama waktu peluruhan (s)

#### 2.1.4 Uranium dan Thorium

Uranium alam mempunyai dua isotop yang bersifat radioaktif salah satunya dengan nomor atom 238 ( $^{238}\text{U}$ ). Uranium adalah unsur yang tidak stabil yang selalu memancarkan radiasi secara terus-menerus dengan radiasi alfa. Uranium memiliki waktu paro sekitar  $4.47 \times 10^9$  tahun.  $^{238}\text{U}$  merupakan salah satu isotop yang paling melimpah di alam dengan perkiraan 0.00018% di alam dan 99.3% uranium di alam. Uranium dapat ditemukan pada batuan dan terkandung dalam air tanah dalam hasil anak luruhan, hanya dalam tanah. Uranium digunakan dalam berbagai aspek contohnya seperti bahan bakar dalam reaktor nuklir untuk menghasilkan energi nuklir. Uranium dapat memberikan dampak kepada manusia dalam bentuk asap dari hasil peluruhan uranium yang dimanfaatkan dalam penelitian dan eksperimen ilmiah dalam bidang fisika nuklir (Hussain dan Hussain, 2011).

Radionuklida thorium alami mempunyai dua isotop yang bersifat radioaktif, salah satunya dengan nomor atom 232 ( $^{232}\text{Th}$ ). Thorium juga merupakan unsur yang tidak stabil dan selalu memancarkan radiasi secara kontinu dengan membawa radiasi alfa. Thorium memiliki waktu paro sekitar  $1,405 \times 10^{10}$  tahun.  $^{232}\text{U}$  merupakan salah satu isotop yang paling umum dan melimpah dengan keberlimpahan 0,0006% di alam dan sekitar 99,98% thorium di alam. Keberadaan thorium bisa ditemukan pada batuan, tanah, pasir pantai, dan mineral tertentu. Pemanfaatan thorium diaplikasikan pada pengembangan energi nuklir dan industri. Thorium memberikan dampak ke tubuh manusia jika terpapar berlebihan terlebih

fokusnya kepada industri, penanganan limbah radioaktif, dan kendala teknis saat eksperimen (Sofyan dan Akhadi, 2004).

Kemudian radionuklida kalium alami mempunyai tiga isotop yang bersifat radioaktif, salah satunya dengan nomor atom 40 ( $^{40}\text{K}$ ). Kalium adalah unsur yang tak stabil yang selalu memancarkan radiasi secara kontinu dengan memancarkan radiasi beta. Kalium memiliki waktu paro yang relatif lama dalam tahunan yaitu  $1,28 \times 10^9$  tahun. Kalium adalah radionuklida alam dengan kelimpahan unsur yang cukup banyak yaitu sebesar 0,0118%. Kalium dapat ditemukan pada tanah dan batuan baik di darat ataupun di perairan termasuk sumber dari air panas. Faktanya, Kalium terdapat di dalam tubuh manusia sebagai salah satu unsur yang sangat penting. Pada setiap 1 kg berat badan laki-laki dewasa terkandung 2 g kalium. Jika diukur maka keberadaan  $^{40}\text{K}$  di dalam tubuh mempunyai aktivitas spesifik sekitar 60 Bq/kg (Akhadi, 2000).

Peluruhan zat radioaktif disebutkan tak dapat diketahui waktu keberlangsungannya, tapi dengan mengetahui waktu paro dan ditinjau dari sekumpulan inti, dapat diperkirakan kemungkinan terjadinya peluruhan. Waktu paro didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh zat radioaktif agar aktivitasnya menjadi setengah bagian semula. Seperti pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2, Waktu paro zat radioaktif bervariasi antara satu dengan lainnya dan itu bergantung dengan zat radioaktif.

Tabel 2.1 Deret Uranium

Radionuklida	Lambang	Radiasi	Waktu Paro
Uranium	$^{238}\text{U}$	$\alpha$	$4,5 \times 10^9$ tahun
Thorium	$^{234}\text{Th}$	$\beta, \gamma$	24,1 hari
Protaktinium	$^{234}\text{Pa}$	$\beta, \gamma$	6,7 jam
Uranium	$^{234}\text{U}$	$\alpha, \gamma$	$2,5 \times 10^5$ tahun

Thorium	$^{230}\text{Th}$	$\alpha, \gamma$	$8 \times 10^4$ tahun
Radium	$^{226}\text{Ra}$	$\alpha, \gamma$	1620 tahun
Radon	$^{222}\text{Rn}$	$\alpha, \gamma$	3,82 hari
Polonium	$^{218}\text{Po}$	$\alpha$	3,20 menit
Plumbum	$^{214}\text{Pb}$	$\beta, \gamma$	26,8 menit
Bismuth	$^{214}\text{Bi}$	$\alpha$	5 hari
Talium	$^{210}\text{Tl}$	$\beta, \gamma$	1,3 menit
Plumbum	$^{210}\text{Pb}$	$\beta, \gamma$	19,4 tahun
Bismuth	$^{210}\text{Bi}$	$\beta$	5,01 hari
Polonium	$^{210}\text{Po}$	$\alpha$	138,3 hari
Plumbum	$^{210}\text{Pb}$	Stabil	Stabil

Sumber: (BATAN, 2019)

Tabel 2.2 Deret Thorium

Radionuklida	Lambang	Radiasi	Waktu Paro
Thorium	$^{232}\text{Th}$	$\alpha$	$1,39 \times 10^{10}$ tahun
Radium	$^{228}\text{Ra}$	$\beta$	6,7 tahun
Aktinium	$^{228}\text{Ac}$	$\beta, \gamma$	6,13 jam
Thorium	$^{228}\text{Th}$	$\alpha, \gamma$	1,91 tahun
Radium	$^{224}\text{Ra}$	$\alpha, \gamma$	3,64 hari
Radon	$^{220}\text{Rn}$	$\alpha, \gamma$	51,5 detik
Polonium	$^{216}\text{Po}$	$\alpha$	0,15 detik
Plumbum	$^{212}\text{Pb}$	$\beta, \gamma$	10,6 jam
Bismuth	$^{212}\text{Bi}$	$\alpha$	60,5 menit
Talium	$^{208}\text{Tl}$	$\beta, \gamma$	3,10 menit
Plumbum	$^{208}\text{Pb}$	Stabil	Stabil

Sumber: (BATAN, 2019)

Waktu paro zat radioaktif bervariasi mulai dari detik hingga jutaan tahun. Lamanya waktu paro menentukan keberlimpahan radionuklida di alam. Semakin lama waktu paro unsur radionuklida, semakin banyak pula keberlimpahannya di alam. Waktu paro didapatkan dari Persamaan 2.5 lalu disederhanakan dengan mensubstitusikan jumlah zat radioaktif akhir ( $N_t$ ) dengan jumlah zat radioaktif setelah reaksi pertama ( $1/2 (N_0)$ ) dan lama waktu peluruhan ( $t$ ) menjadi waktu paro ( $t_{1/2}$ ) hingga dirumuskan seperti pada Persamaan 2.6 (Safitrianaz dkk., 2019).

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$t_{1/2}$  : Waktu paro (s)

$\lambda$  : Konstanta peluruhan ( $s^{-1}$ )

### 2.1.5 Aktivitas

Aktivitas zat radioaktif menyatakan jumlah zat radioaktif yang meluruh setiap satuan waktu. Aktivitas zat radioaktif juga disebut sebagai laju peluruhan inti radioaktif, yang menyatakan bahwa semakin besar aktivitas maka semakin banyak inti atom meluruh persatuan waktu. Aktivitas zat radioaktif hanya menunjukkan jumlah inti radioaktif yang melakukan peluruhan, tetapi tidak menunjukkan jumlah radiasi yang dipancarkan. Hal ini karena dalam setiap kali melakukan peluruhan, zat radioaktif dapat memancarkan lebih dari satu macam radiasi. Persamaan aktivitas zat radioaktif dapat dilihat pada Persamaan 2.7 berikut ini (Safitrianaz dkk., 2019).

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

Dengan:

$A_t$  : aktivitas zat radioaktif sesaat (dps)

$A_0$  : aktivitas zat radioaktif awal (dps)

$t$  : waktu peluruhan (s)

Peluruhan setiap detik dapat dinyatakan dengan satuan disintegrasi persekon (dps atau atom/s) yaitu Becquerel (Bq). Satu becquerel setara dengan 1 disintegrasi per sekon (dps). Selain Bq, terdapat satuan yang sudah digunakan, yaitu Curie (Ci). Ci diartikan sebagai aktivitas 1 gram Radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) yang melakukan  $3,7 \times 10^{10}$  peluruhan atau disintegrasi per sekon (dps). Satuan Ci menunjukkan tingkat aktivitas zat radioaktif yang sangat tinggi (Sari, 2009).

### 2.1.6 Aktivitas Spesifik

Aktivitas spesifik (AS) diartikan sebagai aktivitas dari suatu sampel per satuan massa (Bq/kg), per satuan volume (Bq/L atau Bq/m<sup>3</sup>) dan per satuan luas (Bq/m<sup>2</sup>) dari zat radioaktif. Aktivitas spesifik dari suatu sampel disebut juga dengan konsentrasi radionuklida. Aktivitas spesifik dipengaruhi oleh waktu paro dari setiap zat radioaktif yang akan diukur. Aktivitas spesifik secara langsung dipengaruhi oleh aktivitas zat radioaktif. Jika diketahui massa dari zat radioaktif ( $A$ ) dan bilangan avogadro ( $N_A$ ), dengan substitusi maka aktivitas spesifik dari suatu zat dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.8 (Henriksen, 2013).

$$AS = \lambda N = \frac{0,693}{t_{1/2}} \frac{6,02 \times 10^{23}}{A} = \frac{4,17 \times 10^{23}}{A \times t_{1/2}} \quad (2.8)$$

Keterangan:

$AS$  : Aktivitas spesifik (Bq/L)

$\lambda$  : Konstanta peluruhan (s<sup>-1</sup>)

$N$  : Jumlah atom

$A$  : massa atom (gram)

## 2.2 Pemantauan Radiasi

Penggunaan radiasi bisa mendapatkan manfaat yang optimal, maka keselamatan radiasi harus menjadi prioritas utama. Salah satu cara untuk mendapatkan tujuan ini dengan cara memantau radiasi secara berkala. Umumnya pemantauan radiasi dibagi menjadi dua, yakni pemantauan dosis perorangan dan pemantauan radiasi area atau sektor. Pemantauan dosis perorangan memakai alat ukur yang mendeteksi berbagai tipe radiasi (Akhadi, 2000).

Pemantauan radiasi terhadap suatu Kawasan atau sektor bisa diaplikasikan di area kegiatan formal dan lingkungan. Pemantauan area kegiatan dituju untuk memastikan bahwa kondisi area terjamin keamanannya dari radiasi. Pemantauan ini bisa berguna untuk menginformasikan tentang peringatan dini jika insiden penyimpangan dari keadaan praktik normal. Pemantauan lingkungan dituju dan menjadi jaminan bahwa tak ada zat radioaktif yang lepas ke lingkungan secara sengaja. Pemantauan ini bisa diaplikasikan secara langsung atau secara tidak langsung dengan pengumpulan sampel-sampel di lingkungan seperti air, mineral, tanah, rumput, udara, dan lainnya sesuai kebutuhan termasuk air yang bersumber dari air panas. Sampel-sampel ini kemudian dikerjakan sesuai prosedur di laboratorium lalu diukur tingkat kandungan radioaktifnya. Pemantauan lingkungan bisa diaplikasikan di area sesuai kebutuhan dengan urgensi termasuk sumber air panas dan pemandian air panas untuk menginformasikan tingkatan radioaktivitas lingkungan di area pengukuran sebagai data induk. Pemantauan selanjutnya dituju untuk menginformasikan perkisaran selisih tingkat radioaktivitas di area pengukuran tersebut (Akhadi, 2000).

### 2.3 Karakteristik Air Panas Alam

Air panas alam merupakan air yang bersuhu tinggi yang berasal dari panasnya bumi. Keberadaan panas bumi biasanya diikuti dengan adanya gunung api yang aktif. Selain panas bumi, tentunya air panas berasal dari permukaan bumi yang bersinggungan langsung dengan tanah dan batuan. Dari tanah dan batuan ini, kandungan dari air panas bisa dipengaruhi oleh kedua komponen tersebut. Kandungan air panas terdiri dari beberapa zat kimia dan ada yang bersifat radioaktif. Beberapa radioaktif yang terkandung dalam sumber air panas alam diantaranya uranium, thorium, dan kalium (Ojovan dan Lee, 2014).

Kandungan uranium dipengaruhi oleh tanah dan batuan di beberapa lokasi tempat di bumi. Seperti yang terdapat di Aljazair dari pengukuran sampel air panas memiliki aktivitas spesifik dalam interval  $(0,56 \pm 0,2)$  hingga  $(1,13 \pm 0,2)$  Bq/L (Kebir dan Boucenna, 2017). Sedangkan beberapa desa di Mashad, Iran dengan sampel air tanah memiliki aktivitas spesifik dengan interval 1,75-15,88 Bq/L (Dhahir dkk., 2020). Kandungan uranium di Iraq dari pengukuran sampel tanah memiliki aktivitas spesifik dengan interval 11,87-16,66 Bq/kg (Mostafa dkk., 2021).

Sama halnya dengan uranium, kandungan thorium juga dipengaruhi oleh tanah dan batuan di beberapa tempat di bumi. Pengukuran kandungan uranium di Iraq dengan sampel tanah memiliki aktivitas spesifik dalam interval 12,19-16,66 Bq/kg (Mostafa dkk., 2021). Sedangkan di beberapa desa di Mashad, Iran, pengukuran pada sampel air tanah memiliki aktivitas spesifik sampai dengan 1,55 Bq/L (Dhahir dkk., 2020). Di Habigonj, Bangladesh, pengukuran pada sampel



air memiliki aktivitas spesifik sampai dengan  $14,0196 \pm 0,00265$  Bq/L (Sakib, 2015).

Kandungan kalium di beberapa tempat juga memiliki perbedaan. Di Kroasia, melalui pengukuran sampel air konsentrasi aktivitas spesifik dalam rentang 64,4-6540 Bq/L (Krmpotić dkk., 2018). Sedangkan di Dehloran, Iran pengukuran pada sampel tanah, diperoleh konsentrasi aktivitas spesifik kalium dalam rentang 101-240 Bq/kg (Adelikhah dkk., 2020). Pengukuran Kalium di Nagari Pariangan, Sumatera Barat dengan sampel air konsentrasi aktivitas spesifik dalam rentang 1,24-62,49 Bq/L (Yuliandari dkk., 2021). Beberapa hasil penelitian tingkat aktivitas spesifik dari berbagai wilayah di dunia ditampilkan pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Aktivitas Spesifik Radionuklida Pada Sampel Air Panas Alam Pada Beberapa Wilayah

No	Daerah (Peneliti)	Aktivitas Spesifik (Bq/L)		
		<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
1	Aljazair (Kebir dan Boucenna, 2017)	1,13	1,55	-
2	Kroasia (Krmpotić dkk., 2018)	0,03	-	10,68
3	Hungaria (Kovács-Bodor dkk., 2019)	0,07	-	-
4	Mashad, Iran (Dhahir dkk., 2020)	7,79	-	-
5	Kab. Bogor, Indonesia (Zulfa dkk., 2024) - <sup>1</sup> Gunung Panjang - <sup>2</sup> Gunung Pancar	<sup>1</sup> 18,24 <sup>2</sup> 1,87	<sup>1</sup> 86,13 <sup>2</sup> 0,81	<sup>1</sup> 361,32 <sup>2</sup> 1,85
6	Kab. Tanah Datar, Indonesia (Yuliandari dkk., 2021)	-	0,53	41,87

## 2.4 Sistem Geotermal Lokasi Penelitian

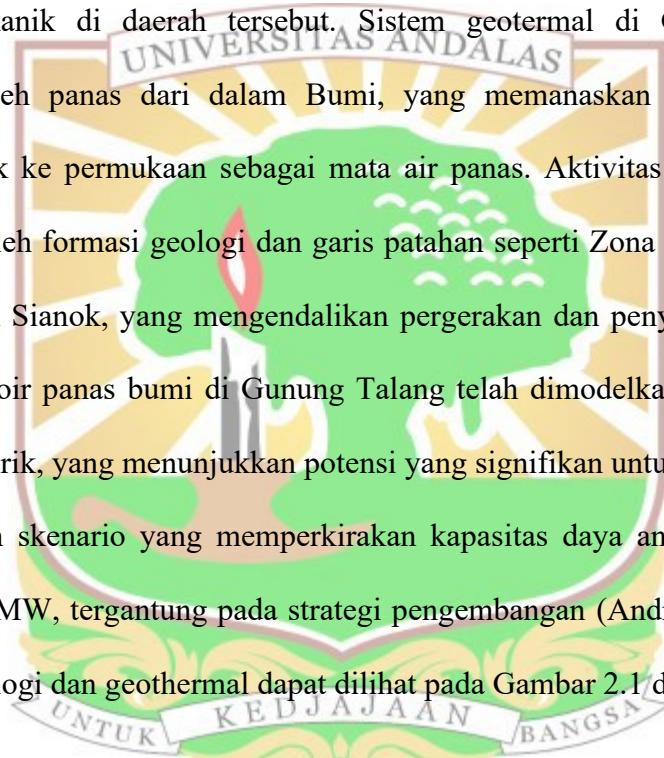
Indonesia memiliki geologi yang kompleks dengan pengaruh letak geografis di sepanjang cincin api pasifik dan lempeng tektonik yang aktif sehingga memiliki ketersediaan geotermal yang cukup melimpah (Hakim dkk., 2022). Daerah penelitian terletak pada dua kecamatan di Kabupaten Solok yaitu Lembang Jaya dan Kubung. Daerah ini dipengaruhi geologi dari keberadaan Pegunungan Bukit Barisan yang merupakan rangkaian pegunungan yang membentang sepanjang Pulau Sumatera. Daerah ini juga dipengaruhi oleh potensi geotermal yang bersumber dari Gunung Talang dengan aktivitas vulkaniknya dan jenis gunung api bertipe A (Direktorat Panas Bumi, 2017). Jarak Gunung Talang sebagai tempat berpotensi adanya geotermal dari titik pengambilan sampel berjarak  $\pm 2.5-20$  km menuju Kecamatan Lembang Jaya dan Kecamatan Kubung.

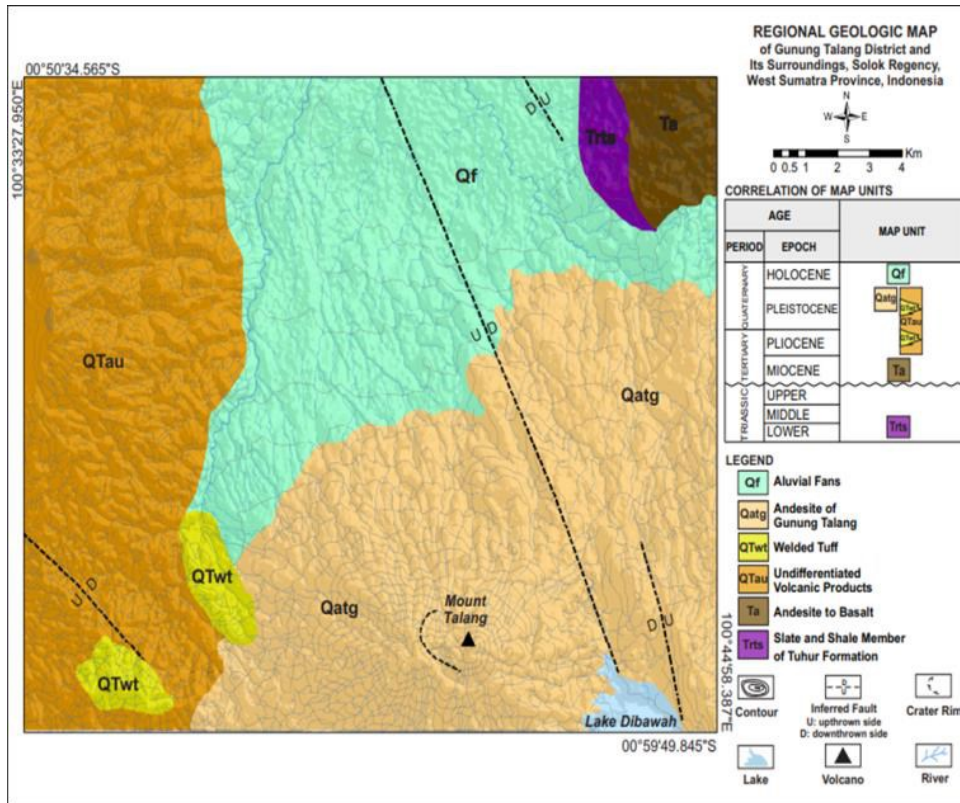
Bukit Barisan adalah rangkaian pegunungan aktif dengan ciri geologi yang kompleks. Bukit Barisan didominasi oleh formasi geologis berupa batuan beku (piroklastik), sedimen dan metamorf (metamorfik). Gunung Talang yang terletak di dekatnya adalah gunung berapi aktif yang mempengaruhi geologi kawasan sekitar (Direktorat Panas Bumi, 2017). Batuan beku daerah penelitian merupakan batuan bertipe riolitik dan cenderung lebih asam yang merupakan produk dari aktivitas vulkanik pada masa lalu (Andreas dan Putra, 2018). Beberapa jenis dari batuan beku tersebut memiliki potensi geotermal lebih tinggi karena magma yang dekat dengan permukaan dapat memanaskan air dari sumbernya (Sharmin dkk., 2023). Formasi batuan sedimen seperti batu pasir, batu lempung, dan batu gamping ditemukan di daerah penelitian (Kahfi dkk., 2023). Batuan metamorf daerah penelitian berasal

dari batuan sedimen yang mengalami pengerosan dari batu kapur, batu pasir bahkan dari batuan beku (Kahfi dkk., 2023). Komposisi mineral dipengaruhi oleh ketiga jenis batuan sehingga memiliki karakteristik pada sumber air panas (Oping dkk., 2023).

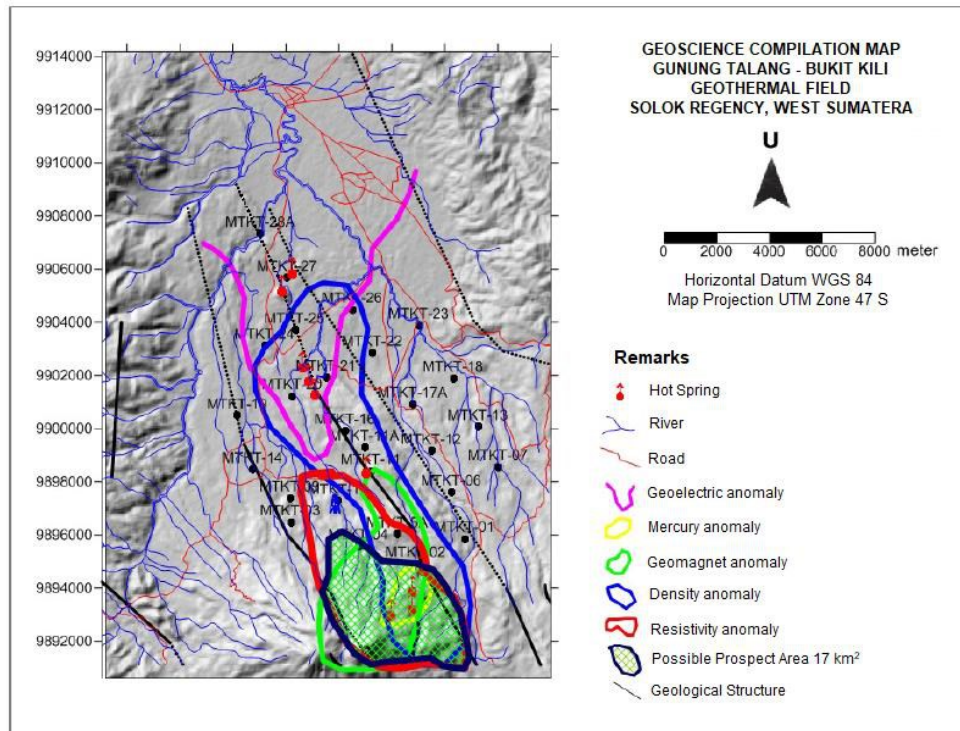
Sistem geotermal mencakup kombinasi batuan vulkanik dan reservoir panas bumi. Sistem geotermal di wilayah ini terkait erat dengan struktur geologi dan aktivitas vulkanik di daerah tersebut. Sistem geotermal di Gunung Talang digerakkan oleh panas dari dalam Bumi, yang memanaskan air tanah yang kemudian naik ke permukaan sebagai mata air panas. Aktivitas panas bumi ini dipengaruhi oleh formasi geologi dan garis patahan seperti Zona Sesar Sumatera, Lembang, dan Sianok, yang mengendalikan pergerakan dan penyimpanan cairan panas. Reservoir panas bumi di Gunung Talang telah dimodelkan menggunakan simulasi numerik, yang menunjukkan potensi yang signifikan untuk pembangkitan listrik, dengan skenario yang memperkirakan kapasitas daya antara 41,83 MW hingga 79,53 MW, tergantung pada strategi pengembangan (Andrifa dkk., 2021). Pemetaan geologi dan geothermal dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.

Aktivitas panas bumi di Gunung Talang juga memengaruhi komposisi kimia mata air panas, termasuk keberadaan radionuklida alami seperti uranium dan thorium. Unsur-unsur ini dapat muncul ke permukaan melalui cairan panas bumi, dan aktivitas spesifiknya dapat bervariasi tergantung pada kondisi geologis, seperti jenis batuan dan suhu reservoir panas bumi (Putriyana dan Soekarno, 2020).



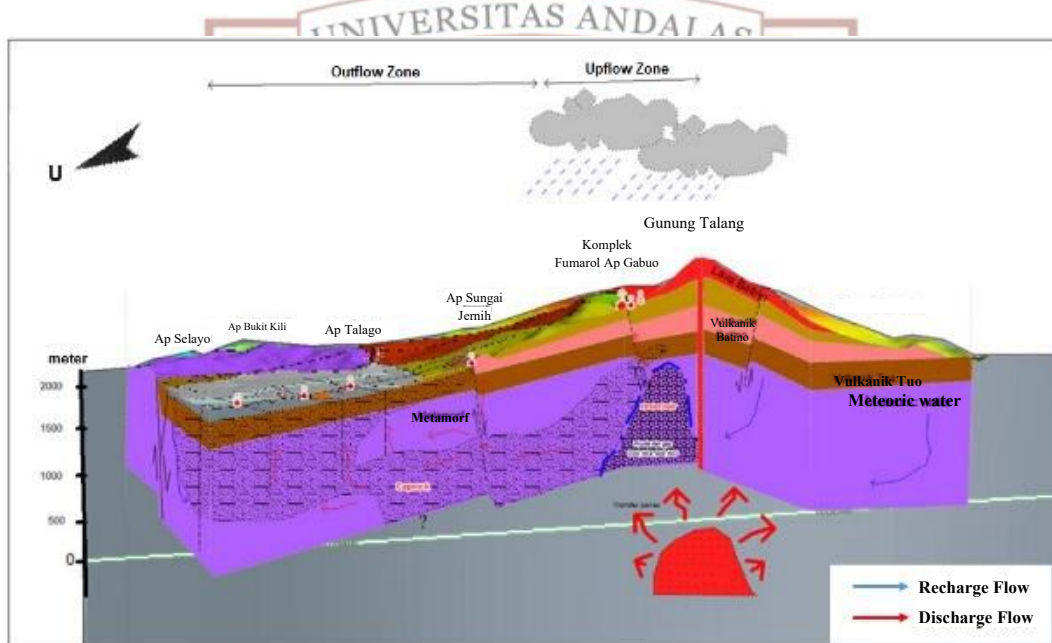


Gambar 2.1 Peta Geologi di Gunung Talang – Bukit Kili  
(Sumber: Putriyana dan Soekarno, 2020)



Gambar 2.2 Peta Geotermal di Gunung Talang – Bukit Kili  
(Sumber: Putriyana dan Soekarno, 2020)

Suhu tinggi dan kondisi geologis yang unik di wilayah ini dapat menyebabkan peningkatan kadar radionuklida tertentu di pemandian air panas. Hal ini khususnya relevan untuk studi tentang dampak lingkungan dan potensi risiko kesehatan yang terkait dengan mandi di pemandian air panas ini. Memahami aktivitas spesifik radionuklida di perairan panas bumi sangat penting untuk menilai keamanan dan potensi penggunaan sumber daya ini (Putriyana dan Soekarno, 2020). Aliran panas yang membawa radionuklida dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Model Sistem Panas Bumi Gunung Talang-Bukit Kili  
(Sumber: Putriyana dan Soekarno, 2020)

## 2.5 Sumber Mata Air Panas Kecamatan Lembang Jaya dan Kecamatan Kubung

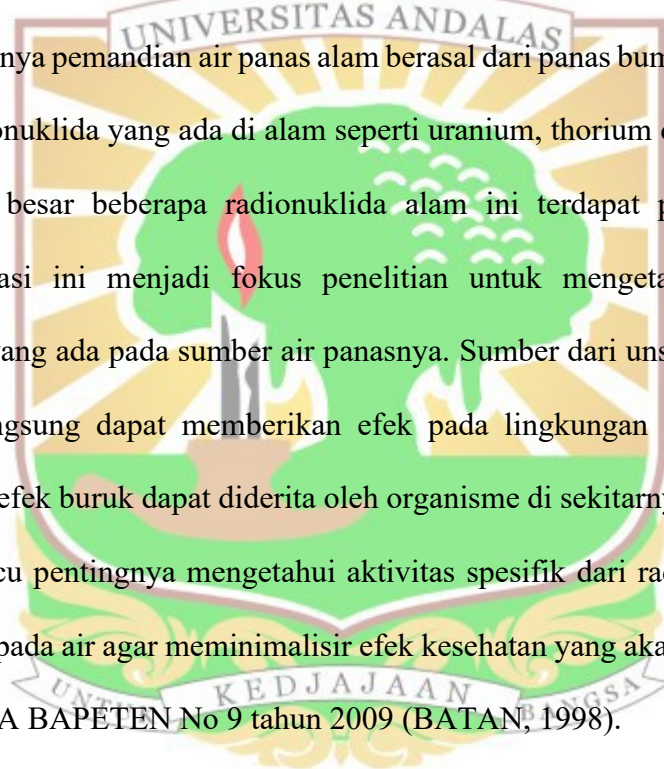
Sumatera Barat memiliki ketersediaan panas bumi yang cukup melimpah salah satunya di Kabupaten Solok. Kabupaten Solok mempunyai gunung api aktif, Gunung Talang dan tentunya ada sumber air panas alam yang digunakan sebagai tempat pemandian air panas yang berada di Kecamatan Lembang Jaya dan

Kecamatan Kubung. Kecamatan Lembang Jaya memiliki jumlah penduduk sebanyak 27089 jiwa (BPS, 2019b). Sedangkan, Kecamatan Kubung memiliki jumlah penduduk sebanyak 60809 jiwa (BPS, 2019a). Kecamatan Lembang Jaya dan Kubung tentunya berada di sekitar Gunung Talang memiliki ketinggian 2597 mdpl dan berjarak sekitar 75 km dari kota Padang yang merupakan salah satu gunung api aktif di Sumatera Barat (BPS, 2019a).

Kecamatan Lembang Jaya dan Kubung berlokasi dekat di sekitar lereng Gunung Talang, Kabupaten Solok, Provinsi Sumatera Barat. Kecamatan Lembang Jaya terletak pada koordinat  $00^{\circ}54'16''$  –  $00^{\circ}58'59''$  LS dan  $100^{\circ}40'36''$  –  $100^{\circ}46'09''$  BT dengan luas daerah mencapai 99,90 km<sup>2</sup> dan ketinggian sampai dengan 1445 mdpl (BPS, 2019b). Sedangkan Kecamatan Kubung terletak pada koordinat  $00^{\circ}47'30''$  –  $00^{\circ}56'36''$  LS dan  $100^{\circ}31'16''$  –  $100^{\circ}44'18''$  BT dengan luas daerah mencapai 192,00 km<sup>2</sup> dan ketinggian sampai dengan 733 mdpl (BPS, 2019a). Gunung Talang merupakan salah satu gunung berapi aktif yang berada di Sumatera Barat. Kondisi geografis yang seperti ini menjadikan Kecamatan Lembang Jaya dan Kubung sebagai salah tujuan wisata yang menarik dikunjungi oleh semua kalangan umur, biasanya dikunjungi pada malam hari. Air panas yang ada di Kecamatan Lembang Jaya dan Kubung memiliki masing-masing sumber berada pada titik-titik mata air yang berbeda. Berdasarkan PERKA BAPETEN No. 9 Tahun 2009 menjelaskan bahwa uranium, thorium, dan kalium berada di daerah sekitar panas bumi dan sumber mata air panas (BATAN, 1998).

Kecamatan Lembang Jaya dan Kubung memiliki wisata yang berpotensi untuk dikembangkan dan salah satunya merupakan wisata pemandian air panas. Objek wisata pemandian air panas ini terletak cukup jauh dari jalan utama Kota Padang-Solok, dengan jarak sekitar 10 km. Air panas yang ada di Kecamatan Lembang Jaya dan Kubung memiliki sumber yang berbeda, masing-masing sumber berada pada titik-titik mata air yang berbeda. Selain itu, beberapa tempat air panas ini digunakan oleh masyarakat untuk kebutuhan sehari-hari (BPS, 2019b).

Umumnya pemandian air panas alam berasal dari panas bumi dan membawa beberapa radionuklida yang ada di alam seperti uranium, thorium dan kalium. Ada kemungkinan besar beberapa radionuklida alam ini terdapat pada lokasi ini. Beberapa lokasi ini menjadi fokus penelitian untuk mengetahui kandungan radionuklida yang ada pada sumber air panasnya. Sumber dari unsur radioaktif ini secara tak langsung dapat memberikan efek pada lingkungan sekitarnya. Ada kemungkinan efek buruk dapat diderita oleh organisme di sekitarnya. Persoalan ini menjadi pemicu pentingnya mengetahui aktivitas spesifik dari radionuklida alam yang terdapat pada air agar meminimalisir efek kesehatan yang akan muncul sesuai dengan PERKA BAPETEN No 9 tahun 2009 (BATAN, 1998).





(a) BG1



(b) BG2



(c) BG4



(d) BG5

Gambar 2.4 Beberapa Titik Mata Air Panas Alam di Bukit Gadang, Kabupaten Solok

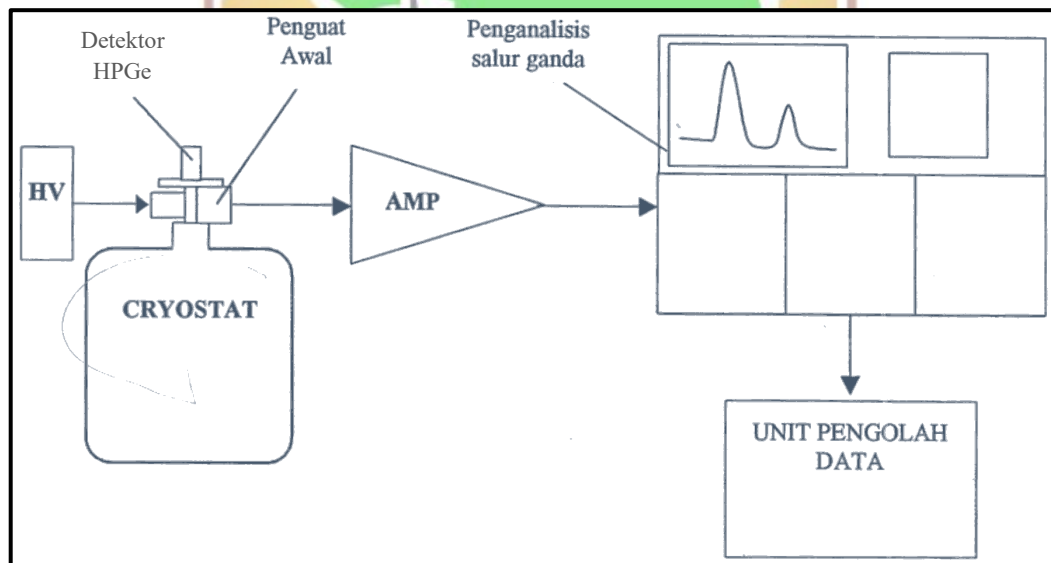
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



## 2.6 Spektrometer Gamma

Setiap radionuklida memiliki tingkatan energi yang berbeda. Dengan adanya energi tersebut, konsentrasi radionuklida dapat ditentukan dengan berbagai cara, salah satunya dengan metode spektrometer gamma. Spektrometer gamma merupakan suatu alat yang dapat digunakan untuk mengukur dan mengidentifikasi zat radioaktif yang memancarkan radiasi gamma. Spektrometer gamma mengamati spektrum karakteristik yang ditimbulkan oleh interaksi foton- $\gamma$  yang dipancarkan oleh zat-zat radioaktif tersebut dengan detektor (Safitri dkk., 2017).

Perangkat spektrometer gamma yang digunakan untuk menentukan konsentrasi zat radioaktif dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.5 Rangkaian Alat Pencacah Spektrometer Gamma  
(Sumber: Mulyaningsih, 2002)

Rangkaian utama spektrometer gamma terdiri atas detektor HP-Ge, rangkaian elektronik standar (sumber tegangan tinggi, amplifier, pengubah sinyal analog ke digital), dan penganalisis salur ganda (*Multi Channel Analyzer*).

Spektrometer gamma dilengkapi dengan detektor, sinar gamma yang masuk ke dalam detektor akan menghasilkan arus listrik yang menimbulkan pulsa. Hasil Pulsa akan diperkuat dengan amplifier dan dikirim ke suatu alat yang dapat mengkalibrasi pulsa berdasarkan tingginya, yang kemudian dinyatakan dalam cacah salur. *Data numeric* hasil pencacahan akan diakumulasi sampai waktu cacah selesai. Hasil cacah dapat dilihat dalam bentuk spektrum gamma pada layar penganalisis salur ganda ataupun *plotter* (Purwanto dkk, 2013).

### 2.6.1 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Spektrometer gamma diatur terlebih dahulu dengan sumber standar yang diketahui aktivitasnya sebelum dipakai untuk pengukuran sampel. Kalibrasi dilakukan dengan menguji kelayakan dan kestabilan alat dengan mencacah sumber standar secara berulang. Kalibrasi pada spektrometer gamma berfokus pada kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi.

Kalibrasi energi adalah kalibrasi yang dilakukan untuk analisis kualitatif zat radioaktif. Kalibrasi energi perlu dikerjakan untuk mengetahui hubungan antara nomor kanal dengan energi sinar gamma. Nomor kanal adalah nomor yang diketahui nilai dari rentang energi. Keadaan ini dilaksanakan dengan menerapkan pengukuran sumber standar radioaktif dengan sumber-sumber energi dengan level rendah-tinggi agar mempunyai rentang energi yang cukup lebar. Jika hubungan energi dan nomor kanal ditampilkan dalam grafik, maka akan didapatkan hubungan *linier* yang dijelaskan secara matematis dalam Persamaan 2.9 (BATAN, 1998).

$$y = ax + b \quad (2.9)$$

keterangan:

$y$  : Energi gamma (keV)

$x$  : Nomor kanal

$a, b$  : Bilangan konstanta linier

Kalibrasi efisiensi adalah kalibrasi yang dilakukan untuk analisis kuantitatif dan berkaitan dengan nilai cacahan dari spektrum yang dipancarkan. Kalibrasi efisiensi dari setiap energi gamma memiliki nilai sudah diketahui. kalibrasi ini dilakukan dengan mencacah sumber standar yang telah didapatkan nilai aktivitasnya. Keluaran dari kalibrasi dan pengukuran terlihat seperti pada Gambar 2.2. Kalibrasi efisiensi bertujuan untuk mengetahui efisiensi setiap energi dan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.10 (BATAN, 1998).

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{N_s - N_{bg}}{A_t P_{\gamma}} \quad (2.11)$$

Keterangan:

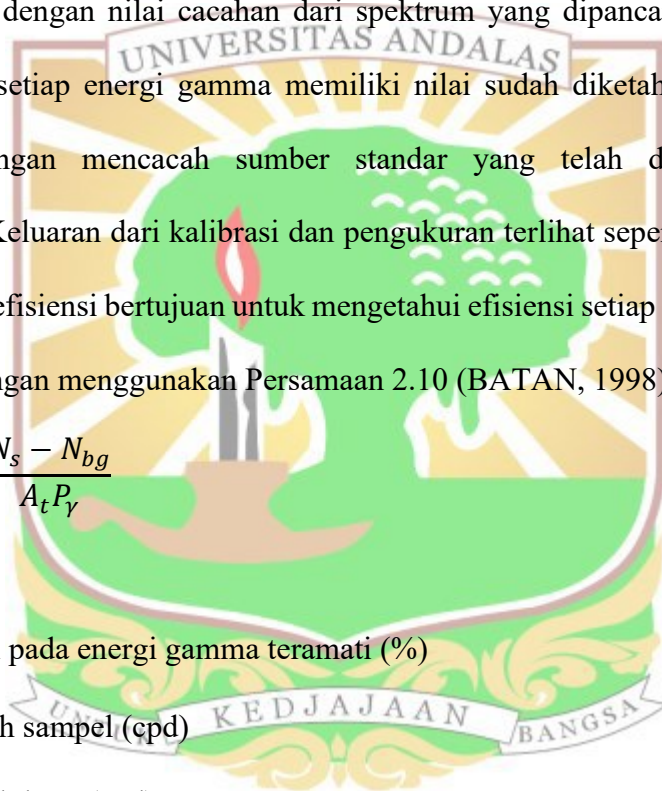
$\varepsilon_{\gamma}$  : efisiensi pada energi gamma teramati (%)

$N_s$  : laju cacah sampel (cpd)

$N_{bg}$  : laju cacah latar (cpd)

$A_t$  : aktivitas saat pengukuran (Bq)

$P_{\gamma}$  : yield energi gamma tertentu (%)



## 2.6.2 Konsentrasi Zat Radioaktif

Konsentrasi atau aktivitas spesifik zat radioaktif dalam sampel pada pengukuran menggunakan spektrometer gamma dapat dihitung dengan Persamaan 2.12 dan Persamaan 2.13 (BATAN, 1998).

$$C_{sp} = C_{avg} \pm U_T \quad (2.12)$$

keterangan:

$C_{sp}$  : konsentrasi zat radioaktif dalam sampel (Bq/l)

$C_{avg}$  : konsentrasi rata-rata zat radioaktif dalam sampel (Bq/l)

$U_T$  : Ketidakpastian pengukuran (Bq/l)

$$C_{avg} = \frac{N_{sp} - N_{bg}}{\varepsilon_{\gamma} P_{\gamma} w_{sp}} \quad (2.13)$$

eterangan:

$N_{sp}$  : laju cacah sampel (cpd)

$N_{bg}$  : laju cacah latar (cpd)

$\varepsilon_{\gamma}$  : efisiensi pada energi gamma (%)

$P_{\gamma}$  : yield dari energi gamma (%)

$w_{sp}$  : volume atau berat sampel (lt atau kg)

Ketidakpastian pengukuran atau Uncertainty ( $U_T$ ) adalah nilai yang mungkin mengalami kesalahan (error) dengan rentang tertentu. Ketidakpastian pengukuran diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.14 (BATAN, 1998).

$$U_T = C_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{U_N}{N_S}\right)^2 + \left(\frac{U_{\varepsilon}}{\varepsilon_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{U_P}{P_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{U_m}{m}\right)^2} \quad (2.14)$$

keterangan:

$U_N$  : Ketidakpastian pencacahan sampel (%)

$U_\varepsilon$  : Ketidakpastian efisiensi pada energi gamma (%)

$U_P$  : Ketidakpastian yield (%)

$U_m$  : Ketidakpastian volume atau berat sampel (%)

Kapabilitas suatu alat untuk melakukan berbagai pengukuran tergantung pada detail dan kerja alat tersebut. MDC (*Minimum Detectable Concentration*) merupakan besarnya konsentrasi ambang yang bisa dilacak spektrometer gamma. MDC dipengaruhi oleh efisiensi pencacahan, cacahan latar, massa sampel. MDC dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.15 dengan tingkat kepastian mencapai 95% (BATAN, 1998).

$$MDC = 4,66 \frac{\sqrt{\frac{N_{bg}}{(t_{bg})^2}}}{\varepsilon_\gamma P_\gamma m} \quad (2.15)$$

Keterangan:

$MDC$  : Konsentrasi minimum terukur (Bq/l)

$N_{bg}$  : laju cacah latar (cpd)

$t_{bg}$  : waktu cacah latar (d)

## BAB III METODE PENELITIAN

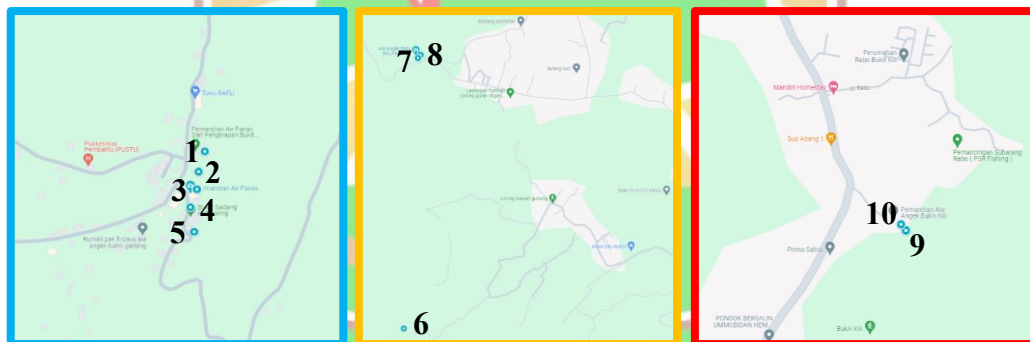
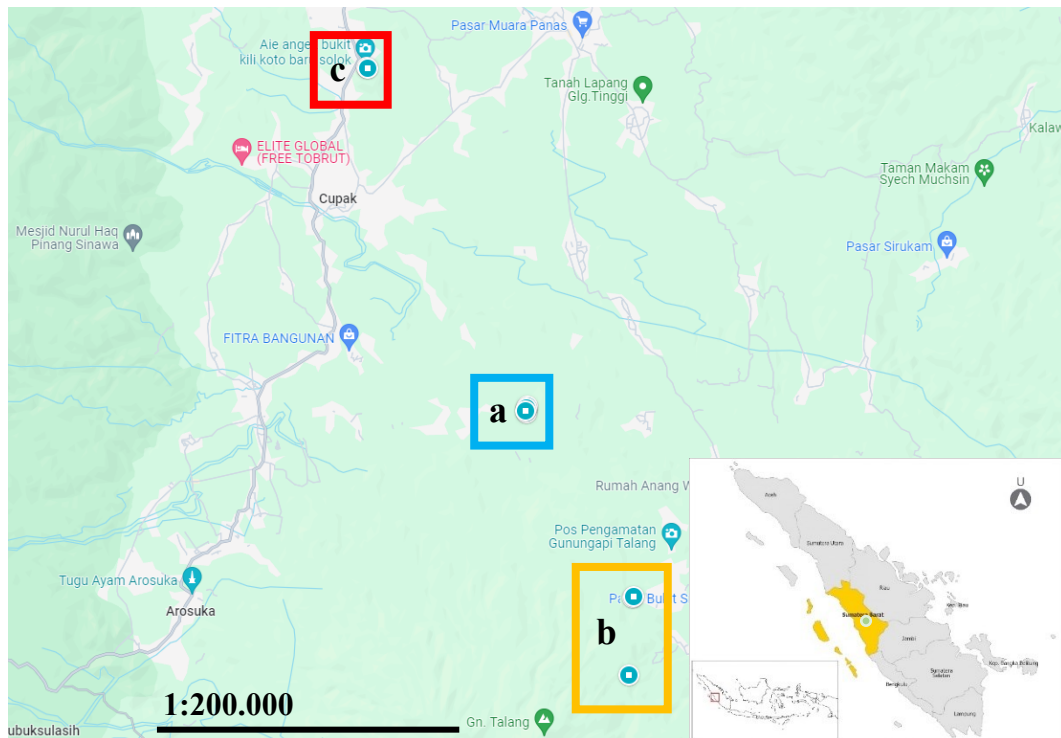
### 3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilakukan mulai dari November 2023 sampai dengan Mei 2024. Penelitian dilakukan selama 6 bulan. Sampel air panas yang diperoleh berada di dua Kecamatan yaitu Kecamatan Lembang Jaya dan Kecamatan Kubung, Sumatera Barat yang terlihat pada Gambar 3.1. Sampel yang diperoleh berada di sekitar Nagari Koto Anau, Nagari Batu Bajanjang, dan Nagari Koto Baru pada Pemandian Air Panas Enam Saudara, Pemandian Air Panas Musholla Zam-Zam, dan Pemandian Air Panas Masjid Al-Ikhwan dan Lereng Gunung Talang. Perencanaan dan persiapan sampel dilaksanakan di Laboratorium Material Departemen Fisika Universitas Andalas. Pengukuran sampel dilaksanakan di Laboratorium Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN) - BRIN. Pengerjaan data dilakukan di Laboratorium Departemen Fisika Universitas Andalas.

Tabel 3.1 Koordinat Sampel

Nomor Titik	Nama Titik Sampel	Koordinat
1	BG1	0°54'59.2"LS – 100°40'51.1"BT
2	BG2	0°55'00.4"LS – 100°40'50.7" BT
3	BG3	0°55'01.4"LS – 100°40'50.6" BT
4	BG4	0°55'02.4"LS – 100°40'50.3" BT
5	BG5	0°55'03.9"LS – 100°40'50.5" BT
6	BB1	0°57'53.0"LS – 100°41'56.9" BT
7	BB2	0°57'02.9"LS – 100°41'59.5" BT
8	BB3	0°57'02.4"LS – 100°41'60.0" BT
9	BK1	0°51'21.3"LS – 100°39'07.9" BT
10	BK2	0°51'20.7"LS – 100°39'07.5" BT

BG = Bukik Gadang  
BB = Batu Bajanjang  
BK = Bukik Kili



(a) Bukik Gadang      (b) Batu Bajanjang      (c) Kubung

Gambar 3.1 Citra Satelit Beberapa Pemandian Air Panas di Kabupaten Solok (Google Maps, 2023)

### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

#### 3.2.1 Alat Penelitian

1. Tabung Marinelli 1 Liter

Tabung Marinelli 1 Liter dimanfaatkan untuk tempat atau wadah dari sampel yang sudah diuapkan.

2. Timbangan Digital

Timbangan digital dimanfaatkan untuk mengukur massa dari sampel yang ditempatkan dalam tabung marinelli.

3. Jerigen 20 Liter

Jerigen 20 Liter dimanfaatkan sebagai wadah sampel dari lokasi pengambilan.

4. Kertas Tempel

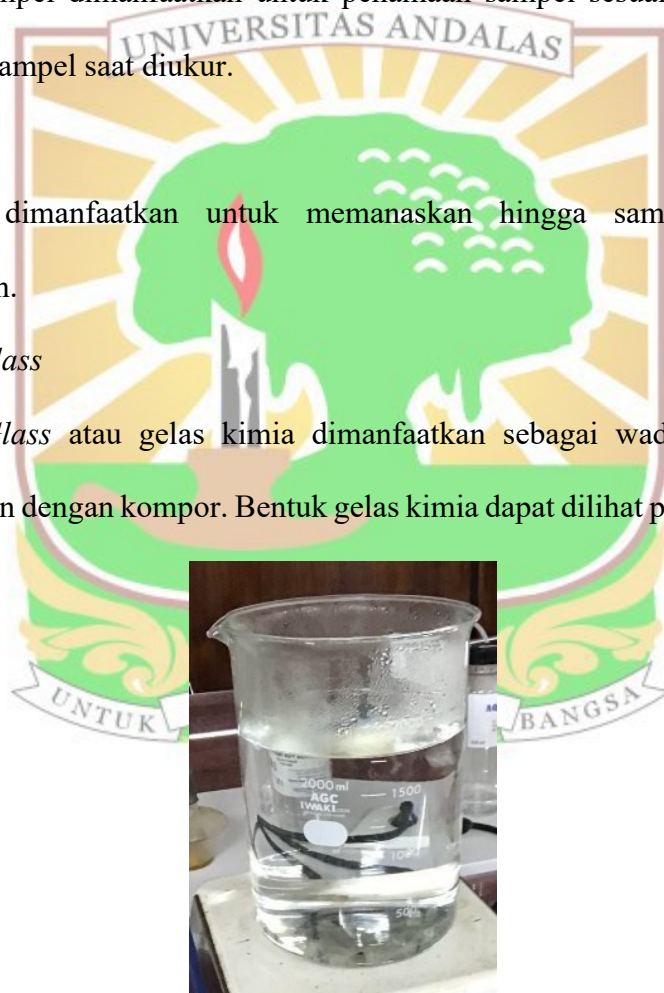
Kertas tempel dimanfaatkan untuk penamaan sampel sesuai kebutuhan dan penanda sampel saat diukur.

5. Kompor

Kompor dimanfaatkan untuk memanaskan hingga sampel mengalami penguapan.

6. *Beaker Glass*

*Beaker Glass* atau gelas kimia dimanfaatkan sebagai wadah sampel saat dipanaskan dengan kompor. Bentuk gelas kimia dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Beaker Glass

7. Alat ukur pH, Konduktivitas Air, dan Temperatur

Alat ukur pH, Konduktivitas Air, dan Temperatur dimanfaatkan untuk mengukur pH air, konduktivitas air, dan suhu air.



## 8. Seperangkat alat Spektrometer Gamma

Spektrometer gamma dimanfaatkan untuk mengetahui dan menganalisis unsur-unsur radioaktif dengan spektrum radiasi yang menyinarakan radiasi gamma. Alat tersebut terdiri dari detektor HP-Ge, *High Voltage Power Supply* (HVPS), *amplifier*, *Multi Channel Analyzer* (MCA) dan *software* khusus (Maestro) pada *Personal Computer* (PC). Alat spektrometer gamma dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Seperangkat Alat Spektrometer Gamma

### 3.2.2 Bahan Penelitian

#### 1. Sampel: Air Panas

Air panas diambil pada tanggal 5 Desember 2023 di sekitar pemandian air panas Bukik Gadang, pemandian air panas Enam Saudara, pemandian air panas

Musholla Zam-Zam, pemandian air panas Masjid Al-Ikhwan dan lereng Gunung Talang. Sampel tersebut diambil sebanyak 10 sampel dengan titik pengambilan sebanyak 10 sumber sebanyak 20 Liter.

## 2. Sampel Standar Radionuklida

Sampel Standar Radionuklida dimanfaatkan untuk pengecek kalibrasi spektrometer gamma. Sampel tersebut dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Sumber Standar Radionuklida

Spesifikasi Sumber Standar Marinelli :

Kode : GM-014 Marinelli 1 L/PTKMR

Nomor : 04/IS/KN/KMR 5.2/11/2017

Matriks : Coffee Granule

Tanggal referensi : 18 Oktober 2017

Radionuklida yang ada pada Gambar 3.4 dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Radionuklida Sumber Standar GM-014 Marinelli 1 Liter

No	Radionuklida	Aktivitas (Bq)
1.	$^{60}\text{Co}$	$37,44 \pm 2,35$
2.	$^{137}\text{Cs}$	$40,01 \pm 2,48$
3.	$^{133}\text{Ba}$	$65,00 \pm 1,28$
4.	$^{210}\text{Pb}$	$364,16 \pm 2,54$
5.	$^{241}\text{Am}$	$387,31 \pm 2,00$

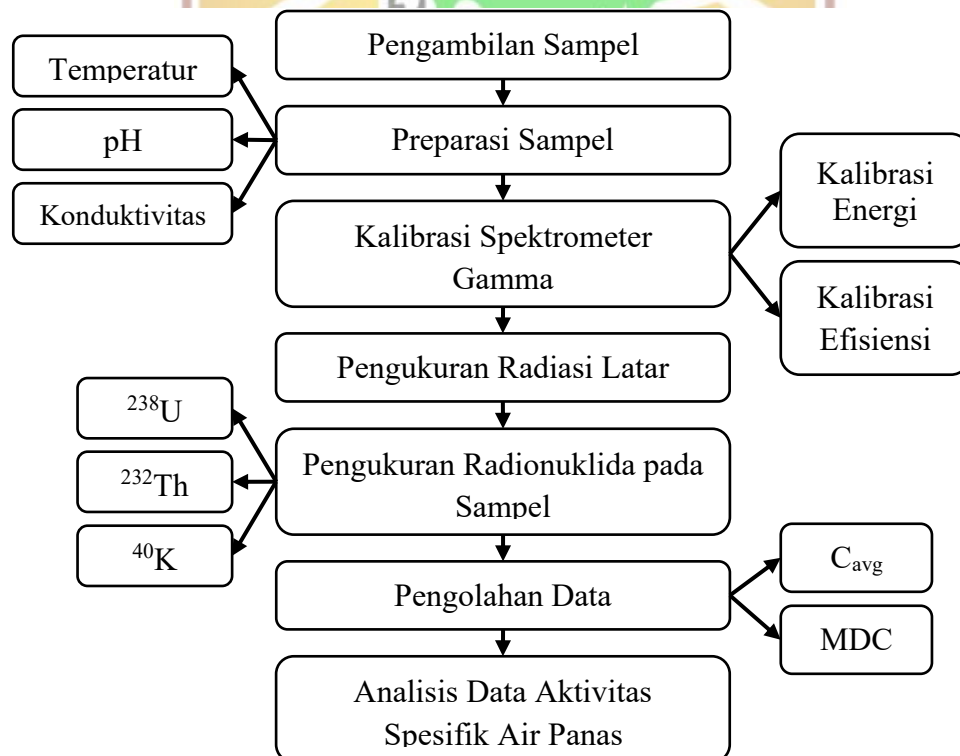
(Sumber: Sertifikat Sumber Standar Milik PTKMR-BRIN)

### 3.3 Variabel Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan jenis penelitian empirik. Data yang digunakan adalah data primer. Data primer adalah data yang diambil langsung ke lapangan dengan sampel. Data primer yang diukur adalah aktivitas spesifik dari  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$ . Kemudian sampel diukur dan dianalisis di PRTKMMN-BRIN.

### 3.4 Teknik Penelitian

Teknik Penelitian yang dilakukan sesuai standar prosedur melalui beberapa tahapan pada diagram alir di bawah. Tahapan penelitian dimulai dari tahapan pengambilan sampel, persiapan sampel, pengukuran radiasi latar, kalibrasi spektrometer gamma, pengukuran radionuklida pada sampel, pengolahan data, analisis data (BATAN, 1998). Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Tahapan Penelitian Analisis Aktivitas Spesifik dari  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  dan Kalibrasi Alat Ukur

### 3.4.1 Pengambilan Sampel

Sampel air panas yang diperoleh bersumber di sekitar Pemandian Air Panas Bukik Gadang, Pemandian Air Panas Enam Saudara, Pemandian Air Panas Musholla Zam-Zam, Pemandian Air Panas Masjid Al-Ikhwan dan Lereng Gunung Talang, Kecamatan Lembang Jaya dan Kecamatan Kubung, Kabupaten Solok, Provinsi Sumatera Barat. Sampel-sampel diperoleh dari 10 lokasi yang berbeda. Setiap lokasi diambil sebanyak 1 sampel. Sampel ini ditempatkan ke dalam sebuah jerigen sebanyak 20 liter sebanyak 1 jerigen setiap lokasinya dan dikasih penamaan sesuai titik sampel.

Sampel air panas yang sudah diperoleh dari titik-titik pengambilan diukur beberapa parameter awal. Parameter yang diukur adalah derajat keasaman (pH), temperatur air, dan konduktivitas air. Cara pengukuran dari ketiga parameter kurang lebih sama dengan mencelupkan alat ukur ke sampel. Kemudian parameter yang dibutuhkan secara langsung hasil terlihat melalui alat ukur dari derajat keasaman (pH), temperatur air, dan konduktivitas air.

### 3.4.2 Preparasi Sampel

Sampel air dipreparasi dengan metode penguapan. Sampel pada metode penguapan, sampel yang berada dalam jerigen 20 liter disaring dan diuapkan hingga menjadi 1 liter. Sampel dipindahkan ke dalam tabung marinelli dan ditutup rapat. Kemudian sampel yang sudah berada di dalam tabung marinelli dibiarkan selama 30 hari. Sampel dibiarkan agar terjadi kesetimbangan radioaktif antara radionuklida dengan anak luruhnya yang memancarkan radiasi gamma (BATAN, 1998).

Kemudian sampel di timbang dengan timbangan digital. Selanjutnya, sampel diantarkan ke Laboratorium Keselamatan Lingkungan di PRTKMMN-BRIN untuk mengukur dan mengolah data aktivitas spesifik radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$ .

### 3.4.3 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Kalibrasi spektrometer gamma dilaksanakan untuk memaksimalkan hasil analisis agar akurat. Kalibrasi spektrometer gamma dilakukan dengan mengukur cacahan sumber standar gamma campuran yang telah diketahui aktivitas radionuklidanya. Kalibrasi dari spektrometer gamma dilaksanakan dengan menakar sumber standar yang sudah ditentukan aktivitasnya (BATAN, 1998).

Kalibrasi ini diklasifikasikan menjadi dua yaitu kalibrasi energi dan efisiensi. Kalibrasi energi dikerjakan untuk mendapatkan hubungan antara nomor kanal dengan energi dari radionuklida yang termuat pada sumber standar. Kalibrasi efisiensi dikerjakan untuk menentukan interaksi antara energi dan efisiensi dari radionuklida yang termuat pada sumber standar. Nilai efisiensi dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.11.

### 3.4.4 Pengukuran Radiasi Latar

Pengukuran radiasi latar dijalankan dengan cara mengukur tabung marinelli kosong memakai spektrometer gamma minimal dalam 72 jam. Pengukuran radiasi latar diharapkan dapat mengetahui radiasi awal sebelum melakukan kalibrasi dan sebelum melakukan pengukuran radionuklida pada sampel (BATAN, 1998).

### 3.4.5 Pengukuran Radionuklida Pada Sampel

Pengukuran radionuklida pada sampel air memakai spektrometer gamma HP-Ge (*High Purity Germanium Detector*). Pengukuran dikerjakan minimal selama 72 jam untuk setiap sampel. Berikutnya dikerjakan pengolahan data untuk mendapatkan informasi tentang aktivitas spesifik radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  di dalam sampel air panas. Pengolahan data menggunakan Persamaan 2.13.

### 3.4.6 Pengolahan Data

Aktivitas spesifik radionuklida alam  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  di dalam sampel air panas dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan ( $C_{\text{avg}}$ ). Untuk menentukan nilai ketidakpastiannya digunakan Persamaan ( $U_T$ ), dan untuk menentukan konsentrasi minimum yang terdeteksi oleh spektrometer sinar gamma (MDC) digunakan masing-masing Persamaan 2.15 dan 2.16.

### 3.4.7 Analisis Data Aktivitas Spesifik Air Panas

Nilai aktivitas spesifik radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  diperoleh sesaat selesai sampel dianalisis menggunakan spektrometer gamma. Nilai aktivitas spesifik ditinjau berdasarkan PERKA BAPETEN No 9 tahun 2009 tentang intervensi terhadap paparan radiasi yang berasal dari *Technologically-Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material* (TENORM), dengan nilai batasan aktivitas spesifik radionuklida  $^{238}\text{U}$  dan  $^{232}\text{Th}$  adalah 1000 Bq/L serta batasan untuk  $^{40}\text{K}$  sebesar 10000 Bq/L.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan mengenai aktivitas spesifik  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  adalah sebagai berikut:

### 4.1 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Kalibrasi spektrometer gamma dilakukan karena hasil pengukuran aktivitas spesifik sampel dipengaruhi oleh hasil kalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan cara mencacah sumber standar yang sudah diketahui aktivitas spesifiknya dari nilai acuan sertifikat pada Lampiran A. Kalibrasi spektrometer gamma dibagi menjadi kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi.

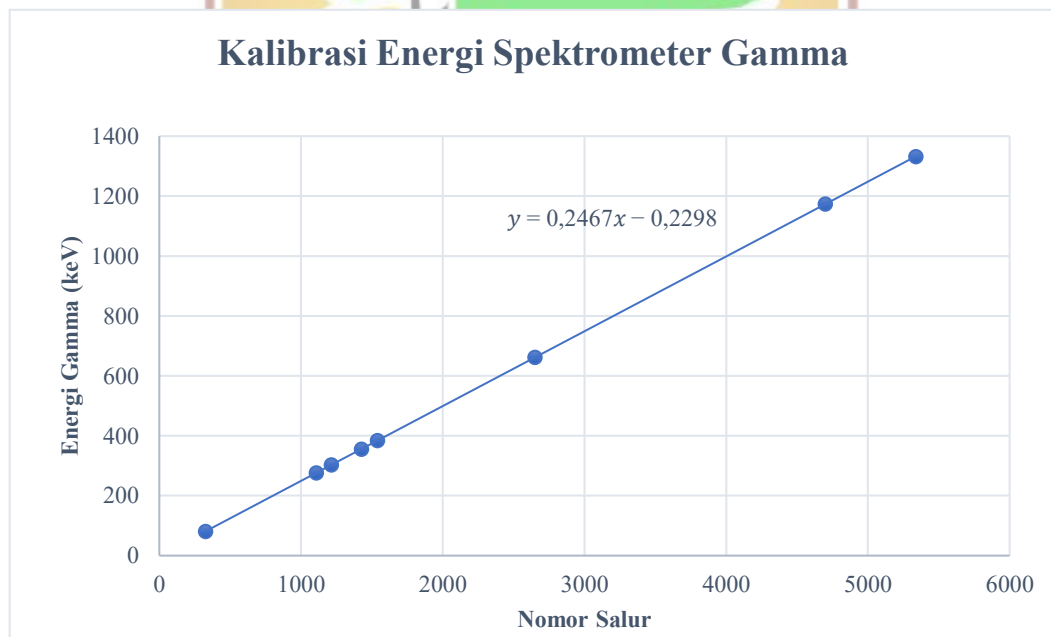
#### 4.1.1 Kalibrasi Energi

Kalibrasi energi dilakukan pada sumber standar dengan radionuklida  $^{60}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  dan  $^{241}\text{Am}$  yang memiliki rentang energi yang cukup lebar. Kalibrasi dilakukan untuk mendapatkan nomor salur energi gamma pada setiap radionuklida sumber standar. Nomor salur (*Channel*) merupakan nomor yang menunjukkan rentang energi. Rentang energi radionuklida sumber standar sangat beragam, dari radionuklida yang memiliki energi rendah yaitu 46,54 keV hingga memiliki energi yang tinggi yaitu 1332,23 keV. Karakteristik dari masing-masing radionuklida ditunjukkan pada energi dan *yield* yang dianalisis dari pembacaan spektrum, sedangkan nomor salur dibaca pada layar komputer menggunakan software Maestro. Spektrum energi dan nomor salur ditampilkan pada komputer dapat ditentukan dari spektrum energi. Hal ini bisa dilakukan dengan cara mencocokkan spektrum energi dengan energi sumber standar, jika pada spektrum

tertentu mendapatkan energi, maka nomor salur bisa dilihat pada deskripsi spektrum energi tersebut. Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 menunjukkan hasil kalibrasi energi.

Tabel 4.1 Hasil Kalibrasi Energi

No.	Radionuklida	Energi (keV)	Nomor Salur
1	Ba-133	81,01	325
2		276,29	1107
3		302,71	1214
4		355,86	1426
5		383,7	1538
6	Cs-17	661,62	2651
7	Co-60	1173,23	4699
8		1332,23	5337



Gambar 4.1 Kurva Kalibrasi Energi

Berdasarkan Gambar 4.1 didapatkan bahwa nomor salur dan energi gamma dihubungkan menjadi persamaan garis linier sesuai dengan persamaan 4.1.



$$y = 0,2467x - 0,2298 \quad (4.1)$$

Dengan :

$y$  : Energi gamma (keV)

$x$  : Nomor salur

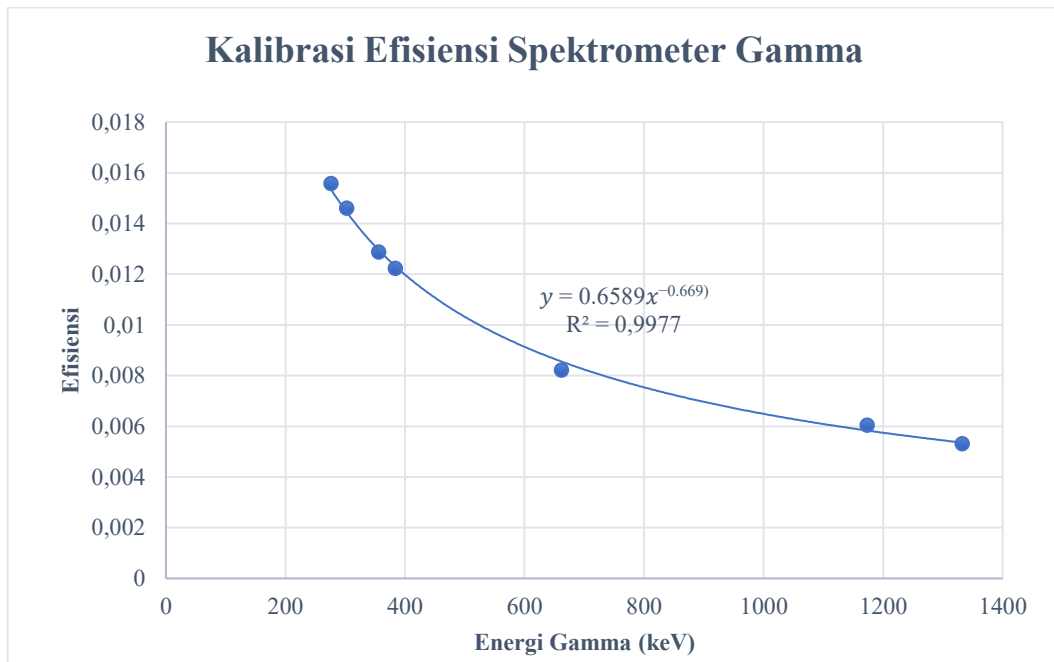
Korelasi yang sempurna ditunjukkan pada hubungan nomor salur dan energi gamma, dengan nilai koefisien regresi ( $R^2$ ) sama dengan 1. Jika nilai  $R^2$  hampir atau sama dengan 1, maka spektrometer gamma dalam kondisi baik digunakan untuk analisis kualitatif (Fitri, 2022).

#### 4.1.2 Kalibrasi Efisiensi

Kalibrasi efisiensi dilakukan dengan mencacah sumber standar radionuklida yang sudah didapatkan aktivitas pertamanya. Kemampuan detektor dalam menangkap energi radionuklida yang memancarkan radiasi gamma berguna dalam kalibrasi. Aktivitas dari sumber standar diketahui dari sumber standar yang sudah dikalibrasi menggunakan persamaan 2.11 dan lalu efisiensi bisa didapatkan. Tabel 4.2 dan Gambar 4.2 menunjukkan hasil kalibrasi efisiensi.

Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi Efisiensi

No.	Radionuklida	Energi (keV)	Efisiensi (%)
1	Ba-133	81,01	1,43
2		276,29	1,56
3		30,71	1,46
4		355,86	1,29
5		383,7	1,22
6	Cs-17	661,62	0,82
7	Co-60	1173,23	0,60
8		1332,23	0,53



Gambar 4.2 Kurva Kalibrasi Efisiensi

Berdasarkan Gambar 4.2 didapatkan antara energi dengan efisiensi dihubungkan menjadi persamaan garis, sesuai dengan persamaan 4.2.

$$y = 0.6589x^{-0.669} \quad (4.2)$$

Dengan :

$y$  : Efisiensi (%)

$x$  : Energi gamma (keV)

Energi dengan efisiensi menunjukkan hubungan yang sempurna dengan nilai koefisien regresi ( $R^2$ ) hampir sama dengan 1 yaitu 0,9977. Jika  $R^2$  hampir atau sama dengan 1, maka efisiensi detektor masih optimal kemudian bisa digunakan untuk analisis kuantitatif (Cohen dkk., 1992).

## 4.2 Pengukuran Aktivitas Spesifik pada Sampel Air Panas

Pengukuran aktivitas spesifik menggunakan spektrometer gamma menghasilkan rincian data yang dapat dilihat pada Lampiran D. Parameter awal sampel untuk mengetahui derajat keasaman, temperatur dan konduktivitas air. Pengukuran parameter awal dibagi menjadi tiga sesuai nama lokasi pengambilan sampel. Hasil pengukuran ketiga parameter awal dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Parameter Awal Pada Sampel Air

No	Kode Sampel	Derajat Keasaman, pH	Temperatur (°C)	Konduktivitas Air (µS/m)
1	BG1	6,1	41	164,7
2	BG2	6,3	45	156,4
3	BG3	6,5	48	158,9
4	BG4	6,3	46	159,2
5	BG5	6,2	47	159,6
<b>Rata-rata :</b>		6,28	45,4	159,76
6	BB1	6,2	44	161,3
7	BB2	6,2	52	159,4
8	BB3	6,1	41	157,9
<b>Rata-rata :</b>		6,17	45,7	159,53
9	BK1	6,3	43	162,1
10	BK2	6,3	42	162,4
<b>Rata-rata :</b>		6,3	42,5	162,25

BG = Bukik Gadang  
BB = Batu Bajanjang  
BK = Bukik Kili

Tabel 4.3 menunjukkan nilai derajat keasaman, temperatur, dan konduktivitas air bervariasi pada setiap lokasi pengambilan sampel. Rata-rata derajat keasaman pada masing-masing Bukit Gadang, Batu Bajanjang dan Bukit Kili adalah 6,28; 6,17 dan 6,3. Rata-rata temperatur pada masing-masing Bukit Gadang, Batu Bajanjang dan Bukit Kili adalah 45,4 °C; 45,7 °C dan 42,5 °C. Rata-rata konduktivitas air pada masing-masing Bukit Gadang, Batu Bajanjang dan Bukit Kili adalah 159,76  $\mu\text{S/m}$ ; 159,53  $\mu\text{S/m}$  dan 162,25  $\mu\text{S/m}$ . Nilai derajat keasaman pada ketiga lokasi pengambilan sampel menunjukkan bahwa sumber air panas berada di skala netral jika diperhatikan dari skala pH, namun sedikit asam. Air dengan pH 6,0-7,0 umumnya aman bagi kulit manusia tanpa menyebabkan iritasi atau kerusakan pada kulit (Skotnicki, 2020).

Nilai konduktivitas air pada sampel ketiga lokasi pengambilan sampel menunjukkan bahwa konduktivitas sebesar ini tergolong dalam mineral yang rendah (Khairunnas dan Gusman, 2018). Konduktivitas air dengan mineral yang rendah menunjukkan air tersebut memiliki kandungan mineral yang tak terlalu tinggi dan aman dikonsumsi.

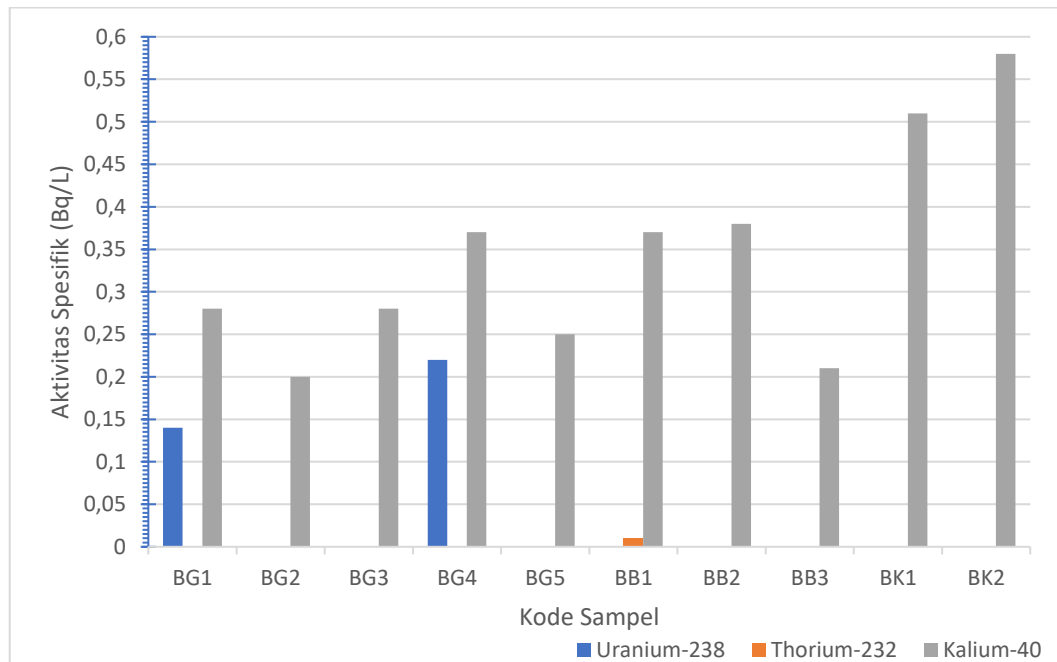
Air panas yang mengalir dari formasi batuan yang memiliki kandungan mineral yang tinggi dapat dilihat dari tingkat konduktivitas air yang tinggi. Kandungan mineral atau senyawa dalam air panas berasal dari interaksi batuan beku atau sedimen yang kaya dengan mineral, bergantung pada lokasi geologinya. Kandungan garam, sulfat, klorida, atau mineral yang lain dapat meningkatkan konduktivitas air (Nugraha dkk., 2021). Hasil ini menunjukkan bahwa air panas dari 10 titik pengambilan sampel tidak banyak mengandung mineral terlarut.

Berdasarkan Tabel 4.4 dan dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 4.3, dapat diketahui bahwa aktivitas spesifik radionuklida  $^{40}\text{K}$  ada pada ketiga tempat, dengan aktivitas spesifik  $^{40}\text{K}$  tertinggi ada di Bukit Kili. Namun  $^{238}\text{U}$  dan  $^{232}\text{Th}$  hanya ada di Bukit Gadang dan Batu Bajanjang. Hasil ini lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil pemetaan dengan mengambil sampel tanah yang dilakukan oleh Kusdiana dkk., 2013.

Tabel 4.4 Aktivitas Spesifik Radionuklida Pada Sampel Air

No	Kode Sampel	Aktivitas Spesifik (Bq/L)		
		$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
1	BG1	$0,14 \pm 0,07$	MDC	$0,28 \pm 0,01$
2	BG2	MDC	MDC	$0,20 \pm 0,01$
3	BG3	MDC	MDC	$0,28 \pm 0,01$
4	BG4	$0,22 \pm 0,08$	MDC	$0,37 \pm 0,01$
5	BG5	MDC	MDC	$0,25 \pm 0,01$
<b>Rata-rata :</b>		MDC	MDC	$0,276 \pm 0,01$
6	BB1	MDC	$0,01 \pm 0,00$	$0,37 \pm 0,02$
7	BB2	MDC	MDC	$0,38 \pm 0,01$
8	BB3	MDC	MDC	$0,21 \pm 0,01$
<b>Rata-rata :</b>		MDC	MDC	$0,320 \pm 0,01$
9	BK1	MDC	MDC	$0,51 \pm 0,02$
10	BK2	MDC	MDC	$0,58 \pm 0,02$
<b>Rata-rata :</b>		MDC	MDC	$0,545 \pm 0,02$
Rata-rata keseluruhan		MDC	MDC	$0,34 \pm 0,01$
MDC		0,12	0,003714	0,02
Perka BAPETEN No.9 tahun 2009		1000	1000	10000

BG = Bukit Gadang  
BB = Batu Bajanjang  
BK = Bukit Kili



Gambar 4.3 Grafik Aktivitas Spesifik Pada Tiap Titik Pengambilan Sampel

Jika dihubungkan dengan nilai pengukuran konduktivitas air, terlihat bahwa air panas dari 10 titik sampel memiliki konduktivitas yang rendah, menunjukkan bahwa kandungan ion terlarut pada sampel air panas juga rendah. Ini dapat berarti bahwa kandungan mineral yang berasal dari batuan terlarut yang dibawa bersama air panas dari perut bumi juga cukup rendah. Hal ini dapat berdampak pada rendahnya kandungan unsur radionuklida yang terdapat didalam sampel air panas.

Nilai aktivitas spesifik ini juga masih rendah jika dibandingkan dengan aktivitas radiasi alam terukur di beberapa titik di Sumatera Barat (Kusdiana dkk., 2013). Pada pengukuran sampel tanah, tingkat aktivitas radiasi dapat lebih tinggi diakibatkan oleh penyebaran debu yang mengandung unsur radioaktif, atau akibat penggunaan pupuk pertanian. Berbeda halnya dengan sampel air panas, kontaminasi materi dari masyarakat sekitar seperti pertambangan atau industri dapat dihindarkan. Selain faktor eksternal akibat kontaminasi, aktivitas

spesifik radionuklida dalam suatu lingkungan bisa dipengaruhi diantaranya oleh faktor keadaan geologi suatu tempat, derajat keasaman, temperatur dan konduktivitas air. Oleh karena itu, untuk air permukaan pada lokasi penelitian perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk melihat nilai radioaktivitas alam yang dimiliki oleh sumber air permukaan yang di konsumsi masyarakat.

Berdasarkan hasil pengukuran dengan skala peta, jarak sumber air panas dari Gunung Talang sebagai dapur geotermal bervariasi dari 2,5-20 km. Rentang jarak yang tidak terlalu dekat tersebut yang kemungkinan mempengaruhi interaksi dengan batuan tidak terlalu tinggi. Sehingga konsentrasi uranium, thorium dan kalium juga tidak terlalu tinggi. Menurut Kölbel dkk., 2020, semakin dekat air dengan sumber panas bumi, semakin tinggi suhunya dan semakin intens interaksi air dengan batuan, yang menyebabkan konsentrasi uranium, thorium, dan kalium lebih tinggi.

Jika ditinjau dari formasi geologi dan sistem geotermal pada semua tempat pengambilan sampel dengan karakteristik formasi geologi dan sistem geotermal yang relatif sama, dapat disimpulkan bahwa formasi geologi dari daerah tempat pengambilan sampel tidak kaya dengan unsur uranium, thorium dan kalium. Hal ini dikarenakan tingkat aktivitas spesifik radionuklida berkaitan dengan dominasi formasi geologi dan sistem geotermal di sekitar lokasi sumber air panas. Semua tempat pengambilan sampel berada pada daerah yang memiliki sumber daya energi geotermal (Direktorat Panas Bumi, 2017).

Aktivitas spesifik radionuklida  $^{232}\text{Th}$  lebih rendah dari  $^{238}\text{U}$  pada semua sampel air panas. Jika ditinjau dari letak geografis lokasi pengambilan sampel,

lokasinya berada di area sekitar lereng Gunung Talang yang merupakan gunung api aktif. Kelimpahan dan distribusi uranium, thorium dan kalium berasal dari sumber batuan yang dihasilkan dari lokasi sampel. Jenis batuan di sekitar lereng Gunung Talang adalah batuan lava dan piroklastika (Welayaturromadhona, 2013). Mengacu pada Chakraborty dkk., 2013, seharusnya ketika sumber air panas mengalir pada batuan, batuan yang mengandung radionuklida dapat larut ke dalam air karena terjadi interaksi dan meningkatkan aktivitas unsur radiokatif. Namun, dari 10 titik yang di ukur, nilai uranium, thorium dan kalium pada sampel tidak terlalu tinggi. Selain temperatur air, kemungkinan derajat keasaman (pH) pada air juga mempengaruhi kelarutan batuan yang mengandung radionuklida.

Berdasarkan pengukuran derajat keasaman (pH), pH air panas alam pada sampel penelitian berada pada 6,1-6,5. Hasil yang diperoleh menunjukkan pH sampel air sedikit asam dan hampir mendekati netral. Rendahnya aktivitas spesifik radionuklida  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{238}\text{U}$  pada sampel air boleh jadi diakibatkan karena pH sampel air netral, sehingga kemampuan air dalam melarutkan zat menjadi menurun.

Derajat keasaman pada air panas alam berperan penting dalam perilaku mineral termasuk radionuklida. Dari hasil pengukuran, beberapa mineral yang mengandung radionuklida  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{238}\text{U}$  di area sampel yang diambil tergolong dalam mineral yang rendah (Khairunnas dan Gusman, 2018). Pada keadaan asam, mineral yang mengandung radionuklida dapat meningkatkan kelarutan pada  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{238}\text{U}$  sehingga aktivitas spesifik meningkat. Semakin asam kondisi air maka semakin larut suatu mineral sehingga dapat melepaskan radionuklida ke dalam air (Erfurt, 2021).



Berdasarkan pengukuran temperatur dan konduktivitas, temperatur air panas alam yang berada pada 3 lokasi dengan rentang suhu 41-52 °C pada semua titik pengambilan. Konduktivitas air pada air panas alam yang ada di 3 lokasi berada pada interval 156,4-164,7  $\mu\text{S/m}$ . Dalam sistem geotermal, interaksi antara suhu, formasi geologi, pH, dan konduktivitas sangat kompleks.

Suhu yang lebih tinggi berkorelasi dengan peningkatan konduktivitas dan aktivitas spesifik dari uranium, thorium, dan kalium yang menunjukkan bahwa potensi geotermal dan geologi dapat meningkatkan kemampuan radionuklida untuk tersebar di permukaan bumi (Madi dkk., 2014). Keberadaan mineral seperti sulfat dan karbonat dapat menyebabkan radionuklida kurang larut. Sulfat dan karbonat terdapat pada batuan beku dan piroklastik seperti andesit, tuf, piroklastik, filit dan endapan (Putriyana dan Soekarno, 2020). Kehadiran sulfat dan karbonat menyebabkan aktivitas spesifik radionuklida rendah bahkan saat konduktivitasnya tinggi (Han dan Park, 2018). Oleh karena itu, untuk hasil yang lebih baik, perlu dilakukan pengukuran sulfat dan karbonat untuk melihat korelasi rendahnya nilai radionuklida pada sampel dengan kandungan sulfat dan karbonat.

Jika ditinjau dari PERKA BAPETEN No. 9 tahun 2009 aktivitas spesifik radionuklida pada sampel penelitian berada di bawah ambang batas. Menurut PERKA BAPETEN No. 9 tahun 2009, batas ambang untuk  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{238}\text{U}$  adalah 1000 Bq/L dan  $^{40}\text{K}$  adalah 10000 Bq/L. Hal ini mendeskripsikan bahwa sampel air panas di lokasi penelitian aman dan bisa digunakan untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari dan sebagai tempat rekreasi tanpa ada risiko bahaya radiasi.

Aktivitas spesifik radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  pada sampel air lokasi penelitian lebih rendah jika dibandingkan dengan pemandian air panas alam lainnya (Tabel 2.3), Hal ini mengindikasikan bahwa rendahnya aktivitas spesifik radionuklida air panas alam pada beberapa Nagari di Kabupaten Solok aman sesuai dengan PERKA BAPETEN No. 9 tahun 2009 dibandingkan dengan air panas alam pada lokasi penelitian di beberapa negara.



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa tingkat radioaktivitas tertinggi pada sampel terdapat pada  $^{40}\text{K}$  berkisar antara  $0,20 \pm 0,01$  Bq/L sampai dengan  $0,58 \pm 0,02$  Bq/L dan yang terendah pada  $^{238}\text{U}$  tidak terdeteksi oleh alat (MDC). Derajat keasaman (pH), temperatur dan konduktivitas air masing-masing berada pada rentang 6,1-6,5 untuk pH; titik tertinggi pada BB2 yaitu  $52^\circ\text{C}$  dan titik tertinggi pada BG1 yaitu  $164,7 \mu\text{S/m}$ . Tidak semua radionuklida terdeteksi pada semua sampel dikarenakan beberapa hasil yang didapatkan berada dibawah MDC. Hasil pengukuran aktivitas spesifik  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan oleh PERKA BAPETEN No 9 Tahun 2009 yang menandakan bahwa lokasi penelitian aman dari dampak radiasi dan mempunyai kandungan radionuklida yang rendah.

### 5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan agar:

1. Melakukan penelitian radioaktivitas pada sampel air permukaan pada lokasi penelitian karena adanya faktor eksternal yang dapat mempengaruhi nilai radioaktivitas air permukaan.
2. Mengukur parameter awal air lainnya seperti konsentrasi sulfat dan karbonat yang mempengaruhi kelarutan zat radioaktif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adelikhah, M., Shahrokhi, A., Chalupnik, S., Tóth-Bodrogi, E., dan Kovács, T., 2020, High Level of Natural Ionizing Radiation at A Thermal Bath in Dehloran, Iran, *Heliyon*, Vol. 6, no. 7.
- Akhadi, M., 2000, *Dasar-Dasar Proteksi Radiasi*, Rineka Cipta, Jakarta.
- Andreas, A. dan Putra, A., 2018, Perbandingan Karakteristik Batuan Beku Erupsi Gunung Gamalama dan Gunung Talang, *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 7, no. 4, pp 293- 298.
- Andrifa, J., Sulaksana, N., Gentana, D., dan Sulastrri, M., 2021, Geological Lineament Pattern and Geomorphic Indices Characteristic Related to Geothermal Manifestation Appearance: A Case Study from Gunung Talang District and Its Surroundings, Solok Regency, West Sumatra Province, Indonesia, *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, Vol. 8, no. 3, pp 323- 336.
- ATSDR, 2013, *Toxicological Profile For Uranium*, (C. J. Portier, Ed.), U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta.
- ATSDR, 2019, *Toxicological Profile for Thorium*, (C. J. Portier, Ed.), U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta.
- BATAN, 1998, *Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan*, BATAN, Jakarta.
- BPS, 2019a, *Kecamatan Kubung Dalam Angka 2019*, (U. A. Rahmi, Ed.), CT Adyta, Solok.
- BPS, 2019b, *Kecamatan Lembang Jaya Dalam Angka 2019*, (U. A. Rahmi, Ed.), CT Adyta, Solok.
- Chakraborty, S. R., Azim, R., Rahman, A. K. M. R., dan Sarker, R., 2013, Radioactivity Concentrations in Soil and Transfer Factors of Radionuclides from Soil to Grass and Plants in the Chittagong City of Bangladesh, *Journal of Physical Science*, Vol. 24, no. 1, pp 95- 113.
- Cohen, B. L., 2002, Cancer Risk from Low-Level Radiation, *American Journal of Roentgenology*, Vol. 179, no. 5, pp 1137- 1143.
- Cohen, A. S., Belshaw, N. S., dan Keith O'nions, R., 1992, High Precision Uranium, Thorium and Radium Isotope Ratio Measurements by High Dynamic Range Thermal Ionisation Mass Spectrometry, *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, Vol. 116, pp 71- 81.

- Dhahir, D. M., Mdekil, A. S., dan Abojassim, A. A., 2020, Evaluation of Natural Radionuclides in Groundwater Samples of Some Villages of Mashhad-Iran, *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, Vol. XII, no. III, pp 4480- 4485.
- Direktorat Panas Bumi, 2017, *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*, Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- El-Mageed, A. I. A., El-Kamel, A. E. H., Abbady, A. E. B., Harb, S., dan Saleh, I. I., 2013, Natural Radioactivity of Ground and Hot Spring Water in Some Areas in Yemen, *Desalination*, Vol. 321, pp 28- 31.
- Erfurt, P., 2021, The Geoheritage of Hot Springs, dalam *Geoheritage, Geoparks and Geotourism*, Springer, Cham.
- Fitri, R. A., 2022, Analisis Radionuklida Cs-137, Co-60, dan I-131 pada Sampel Tanah di Kota Tangerang Menggunakan Spektrometer Gamma, *Skripsi*, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, Jakarta.
- Hakim, A. F., Krismadiana, Sholihah, F., Ismawati, R., dan Dewantari, N., 2022, Potensi dan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Indonesia, *Indonesian Journal of Conservation*, Vol. 11, no. 2, pp 71- 77.
- Han, C. H. dan Park, J. W., 2018, Analysis of The Natural Radioactivity Concentrations of The Fine Dust Samples in Jeju Island, Korea and The Annual Effective Radiation Dose by Inhalation, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 316, no. 3, pp 1173- 1179.
- Hassan, N. M., Mansour, N. A., Fayez-Hassan, M., dan Sedqy, E., 2016, Assessment of Natural Radioactivity in Fertilizers and Phosphate Ores in Egypt, *Journal of Taibah University for Science*, Vol. 10, no. 2, pp 296-306.
- Henriksen, T., 2013, *Radiation and Health*, University of Oslo, Oslo.
- Hussain, R. O. dan Hussain, H. H., 2011, Natural Occurring Radionuclide Materials, dalam Singh, N. (ed.), *Radioisotopes - Applications in Physical Sciences*, InTech, Kufa.
- Ikhsan, M., 2012, Penentuan Sr-90 Dalam Sampel Urin Manusia Menggunakan LSC (Liquid Scintillation Counter), *Skripsi*, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatulla, Jakarta.
- Kahfi, M. Al, Marlinda, L., Adhitya, B., dan Megasukma, Y., 2023, Geologi dan Geokimia Fluida Mata Air Panas Untuk Estimasi Temperatur Bawah Permukaan di Desa Balai dan Sekitarnya, Kecamatan Gunung Talang Kabupaten Solok Provinsi Sumatra Barat, *Jurnal Teknik Kebumian*, Vol. 10, no. 1.

- Kebir, H. dan Boucenna, A., 2017, Natural Radionuclide Concentrations in Thermal Springs of East Algeria, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 76, no. 52.
- Khairunnas dan Gusman, M., 2018, Analisis Pengaruh Parameter Konduktivitas, Resistivitas dan TDS Terhadap Salinitas Air Tanah Dangkal pada Kondisi Air Laut Pasang dan Air Laut Surut di Daerah Pesisir Pantai Kota Padang, *Jurnal Bina Tambang*, Vol. 3, no. 4, pp 1751- 1760.
- Kölbel, L., Kölbel, T., Maier, U., Sauter, M., Schäfer, T., dan Wiegand, B., 2020, Water–Rock Interactions in The Bruchsal Geothermal System by U–Th Series Radionuclides, *Geothermal Energy*, Vol. 8, no. 1, pp 24.
- Kovács-Bodor, P., Csondor, K., Eröss, A., Szieberth, D., Freiler-Nagy, Á., Horváth, Á., Bihari, Á., dan Mádl-Szőnyi, J., 2019, Natural Radioactivity of Thermal Springs And Related Precipitates in Gellért Hill area, Buda Thermal Karst, Hungary, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 201, pp 32- 42.
- Krmpotić, M., Rožmarić, M., Petrinc, B., Bituh, T., Fiket, Ž., dan Benedik, L., 2018, Radionuclide and Major element analysis of thermal and mineral waters in Croatia with a related dose assessment, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 181, no. 3, pp 199- 207.
- Kusdiana, Setiawan, A., Pudjadi, E., dan Syarbaini, 2013, Mapping of Environmental Gamma Radiation Dose Rate in West Sumatera Province, hlm. 211–214, dalam *International Conference on the Source, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, BATAN, Bali.
- Madi, K., Nyabeze, P., Gwavava, O., Sekiba, M., dan Zhao, B., 2014, Uranium, Thorium and Potassium Occurrences in The Vicinity of Hot Springs in The Northern Neotectonic Belt in The Eastern Cape Province, South Africa, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 301, no. 2, pp 351- 363.
- Malaka, M., 2019, Dampak Radiasi Radioaktif Terhadap Kesehatan, *Jurnal Kajian Pendidikan Keislaman*, Vol. 11, no. 2.
- Mostafa, M. Y. A., Kadhim, N. F., Ammer, H., dan Baqir, Y., 2021, The Plant Transfer Factor of Natural Radionuclides and The Soil Radiation Hazard of Some Crops, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 193, no. 6, pp 320.
- Mulyaningsih, Th. R., 2002, Analisis Sampel Geologi dengan Metode Analisis Aktivitas Neutron di RSG-GAS, dalam *Prosiding Seminar Nasional ke-8 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*, BATAN, Jakarta.

- Nugraha, E. D., Hosoda, M., Mellawati, J., Untara, U., Rosianna, I., Tamakuma, Y., Modibo, O. B., Kranrod, C., Kusdiana, K., dan Tokonami, S., 2021, Radon Activity Concentrations in Natural Hot Spring Water: Dose Assessment and Health Perspective, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 18, no. 3, pp 1- 8.
- Nurmansya, V. A., Miskiyah, Z., dan Winarno, 2021, Radioterapi Kanker Cervix Dengan Linear Accelerator (LINAC), *Jurnal Biosains Pascasarjana*, Vol. 23, no. 02, pp 75- 86.
- Ojovan, M. I. dan Lee, W. E., 2014, Naturally Occurring Radionuclides, *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*, pp 31- 39.
- Oping, I. S. J., Londa, T. K., dan Wenas, D. R., 2023, Karakteristik Mineral Batuan Pada Daerah Manifestasi Mata Air Panas Menggunakan SEM-EDAX Dan FTIR Di Desa Candirejo Kecamatan Modayag Kabupaten Bolaang Mongondow, *Jurnal FisTa : Fisika dan Terapannya*, Vol. 4, no. 1, pp 30- 34.
- Purwanto, A. T. dan Nuraeni, E., 2013, Optimasi Parameter Spektroskopi Gamma Dengan Detektor HPGE, dalam *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir*, BATAN, Yogyakarta.
- Putriyana, L. dan Soekarno, H., 2020, Numerical Modelling of Geothermal Reservoir in Gunung Talang, Erst Sumatera, Indonesia, *RISSET Geologi dan Pertambangan*, Vol. 30, no. 1, pp 11- 20.
- Safitri, R. A., Setiawati, E., dan Wijaya, G. S., 2017, Analisis Aktivitas Radionuklida Alam dan Dosis Paparan Radiasi Pada Material Bangunan, *Youngster Physics Journal*, Vol. 6, no. 1, pp 1- 8.
- Safitrianaz, D., Latifah, N., Saragih, P. Y., dan Saraswati, D. L., 2019, Analogi Waktu Paruh dan Konstanta Peluruhan (Disintegrasi) Radioaktif, *Jurnal Pendidikan Fisika*, Vol. VII, no. 2.
- Sakib, K. N., 2015, Determination of Natural and Artificial Radionuclides in Water Samples of Habiganj District, Bangladesh, *Advances in Physics Theories and Applications*, Vol. 40, pp 24- 28.
- Sari, Y. P., 2009, Penentuan Kemurnian Radionuklida Radioisotop 1-125 Dan Pengembangan Program Komputer Untuk Sistem Pemrosesan Data Dan Dokumentasi, *Skripsi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Sharmin, T., Khan, N. R., Akram, M. S., dan Ehsan, M. M., 2023, A State-of-the-Art Review on Geothermal Energy Extraction, Utilization, and Improvement Strategies: Conventional, Hybridized, and Enhanced Geothermal Systems, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 18.

- Siegel, M. D. dan Bryan, C. R., 2014, Radioactivity, Geochemistry, and Health, *Treatise on Geochemistry: Second Edition*, Vol. 11, pp 191- 256.
- Skotnicki, S., 2020, Skin pH, Epidermal Barrier Function, Cleansers, and Skin Health, dalam Alavi, A. dan Maibach, H. I. (ed.), *Local Wound Care for Dermatologists*, Springer, Cham.
- Sofyan, H. dan Akhadi, M., 2004, Radionuklida Primordial Untuk Penanggalan Geologi dan Arkeologi, *Buletin Alara*, Vol. 6, no. 2, pp 85- 96.
- Welayaturromadhona, 2013, Analisis Fisis Aktivitas Gunung Talang – Sumatera Barat Berdasarkan Karakteristik Spektral dan Estimasi Hiposenter Gempa Vulkanik, *Skripsi*, Universitas Brawijaya, Malang.
- Yuliandari, A., Milvita, D., dan Shilfa, S. N., 2021, Penentuan Aktivitas Spesifik Radionuklida Alam pada Sumber Air Panas di Nagari Pariangan Sumatera Barat, *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 10, no. 3, pp 371- 376.
- Zulfa, N. A., Adrial, R., Makmur, M., Yahya, M. N., Putra, D. I. P., dan Priasetyono, Y., 2024, Penentuan Aktivitas Radionuklida Alam pada Pemandian Air Panas Gunung Panjang dan Gunung Pancar di Kabupaten Bogor Jawa Barat, *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, Vol. 13, no. 4, pp 541- 548.
- Andinty, N., 2022, *Radiasi dalam Bidang Media*, Direktorat Jenderal Pelayanan Kesehatan - Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, [https://yankes.kemkes.go.id/view\\_artikel/991/radiasi-dalam-bidang-media](https://yankes.kemkes.go.id/view_artikel/991/radiasi-dalam-bidang-media), diakses tanggal 12 Juli 2024.
- Deiss, H., 2017, *Why Space Radiation Matters*, National Aeronautics and Space Administration, <https://www.nasa.gov/missions/analog-field-testing/why-space-radiation-matters>, diakses tanggal 12 Juli 2024.



# LAMPIRAN

## Lampiran A Sertifikat Standarisasi Radionuklida



**DEPUTI BIDANG INFRASTRUKTUR RISET DAN INOVASI**  
**DIREKTORAT PENGELOLAAN LABORATORIUM, FASILITAS RISET, DAN**  
**KAWASAN SAINS DAN TEKNOLOGI**  
**LABORATORIUM TEKNOLOGI KESELAMATAN DAN METROLOGI RADIASI**  
Jalan Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta 12440  
Telp.(021) 7513906, E-mail: layanan\_sains@brin.go.id

### SERTIFIKAT STANDARDISASI RADIONUKLIDA

**NO. B-14696-2 / LT / STD / 03 / 2022**

Pemilik Radionuklida : Laboratorium Keselamatan Lingkungan  
Laboratorium Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (LTKMR)  
Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)  
Alamat Pemilik : Jalan Lebak Bulus Raya No.49, Jakarta  
Jenis Radionuklida : Mix Cs-137 + Co-60 + Ba-133  
No. Kode : GM-014  
Bentuk : Matriks Coffe Granule  
Volume : Marinelli 1 Liter  
Aktivitas : Cs-137 = 36,49 Bq, Co-60 = 18,40 Bq, Ba-133 = 49,80 Bq  
Ketidakpastian Bentangan : Cs-137 = 9,22%, Co-60 = 14,86%, Ba-133 = 9,03%  
Tingkat Kepercayaan : 95% (k=2)  
Waktu Paro : Cs-137 = (30,05 ± 0,08) tahun, Co-60 = (5,2711 ± 0,0008) tahun,  
Ba-133 = (10,539 ± 0,006) tahun  
Tanggal Acuan : 20 Januari 2022

#### KONDISI LINGKUNGAN :

Suhu (°C) / Kelembaban (%) : 25 / 65  
Lokasi Pelaksanaan : LTKMR-BRIN

#### SUMBER STANDAR YANG DIGUNAKAN :

Sumber Standar yang digunakan : Eu-152  
Kode : SRS 114540  
Ketertelusuran : *National Institute of Standards and Technology (NIST)*  
Metode Standardisasi : Relatif  
Diukur menggunakan spektrometer gamma detektor *High Purity Germanium (HPGe)*

Berdasarkan Pasal 16 Peraturan Kepala BAPETEN No.1/2006, sumber standar wajib distandardisasi.

Jakarta, 28 Maret 2022  
Laboratorium Standardisasi Radionuklida  
Manajer,

 **TT ELEKTRONIK**

Holnisar  
NIP. 19671210 198802 1 001

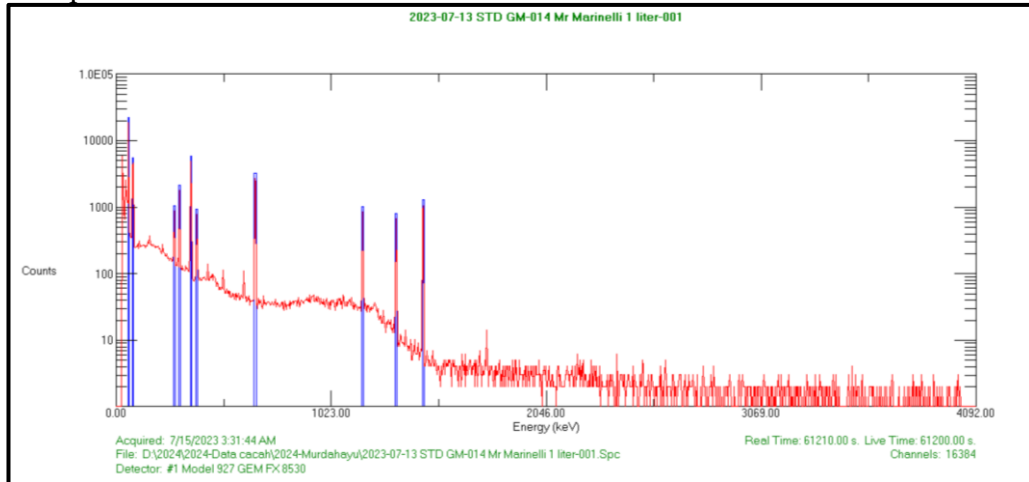


Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSR.E, silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code

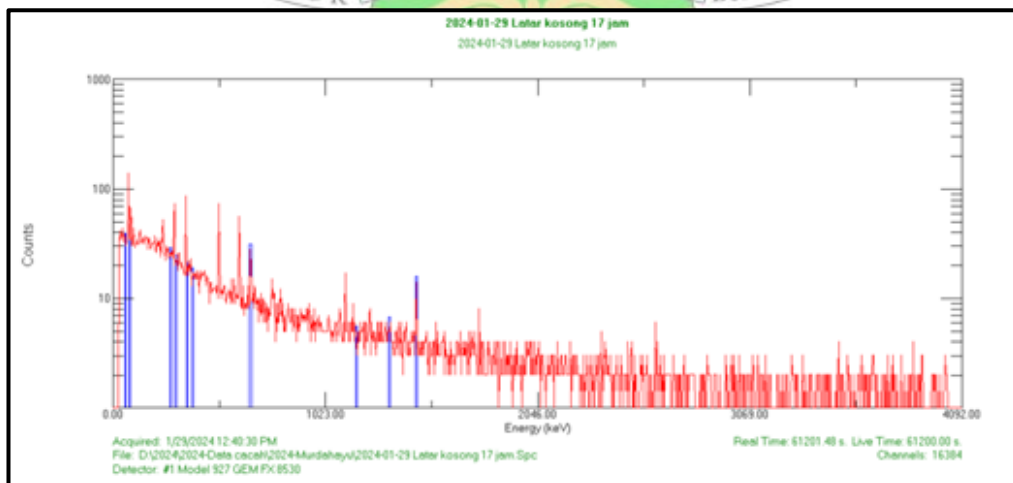
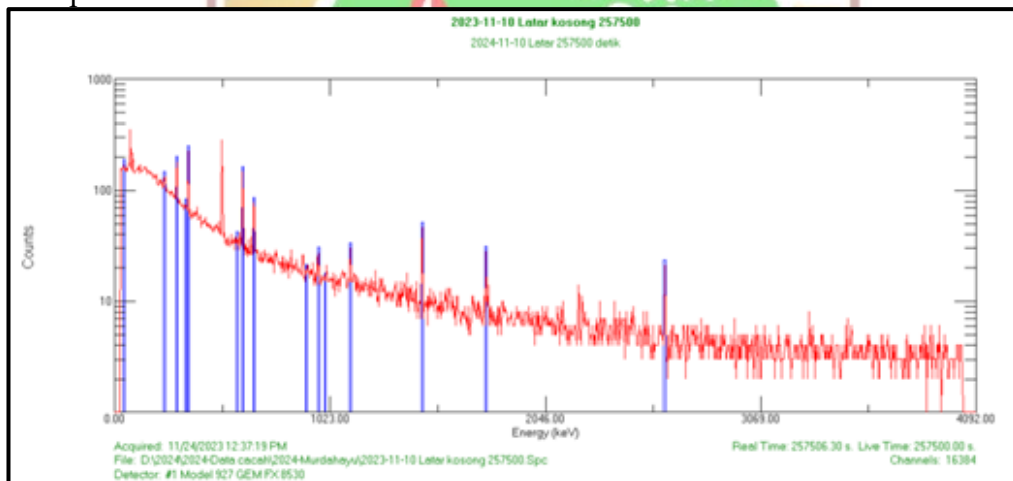
FM 005 SOP 009.003/STD (Maret 2022)

## Lampiran B Spektrum Standar Kalibrasi dan Hasil Pengukuran Sampel

### B1 Spektrum Standar Kalibrasi

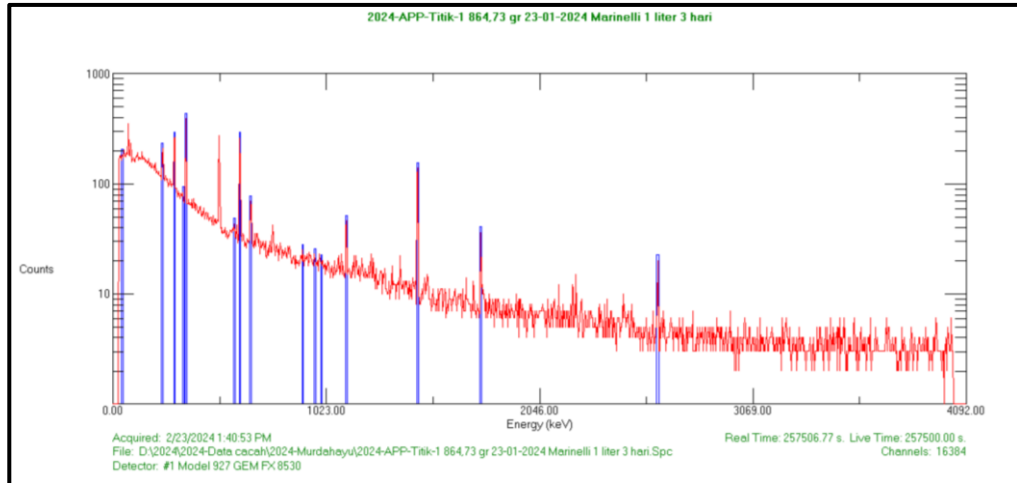


### B2 Spektrum Latar

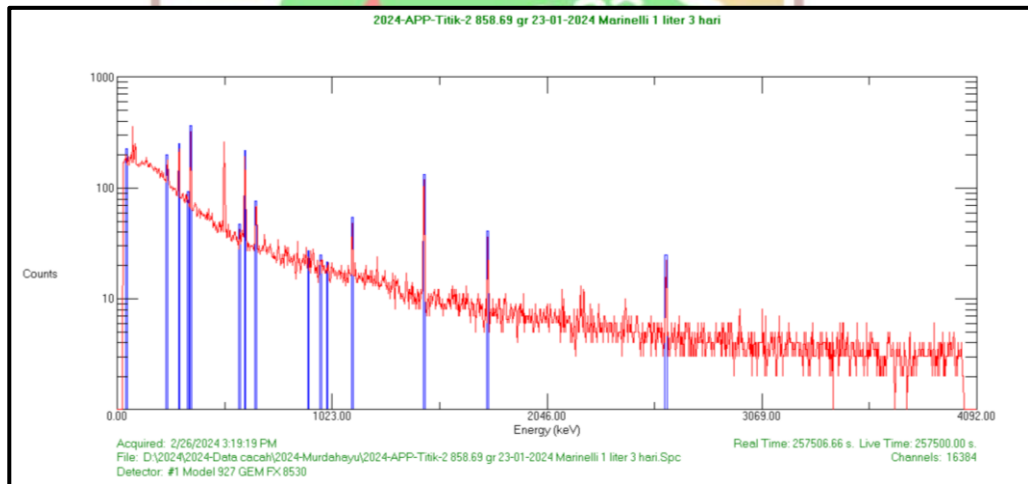


### B3 Spektrum Sampel

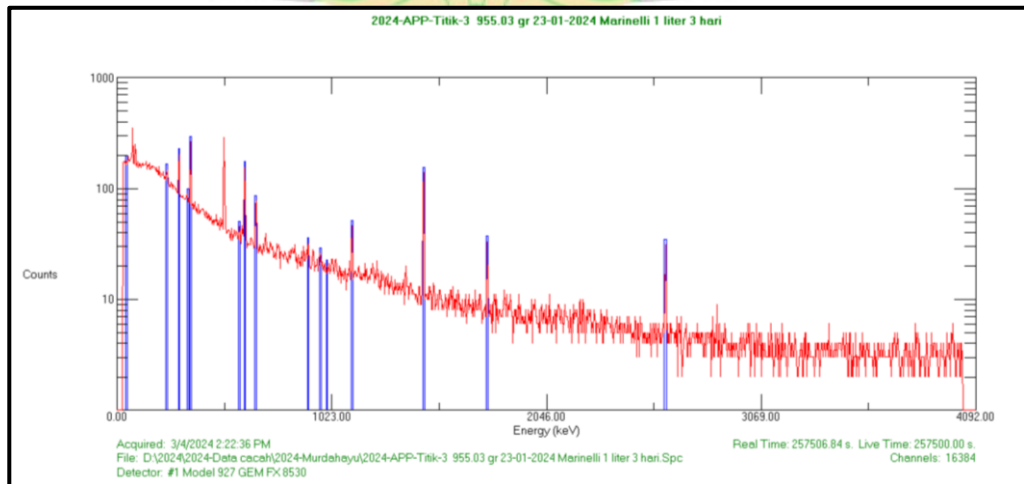
#### 1. BG1



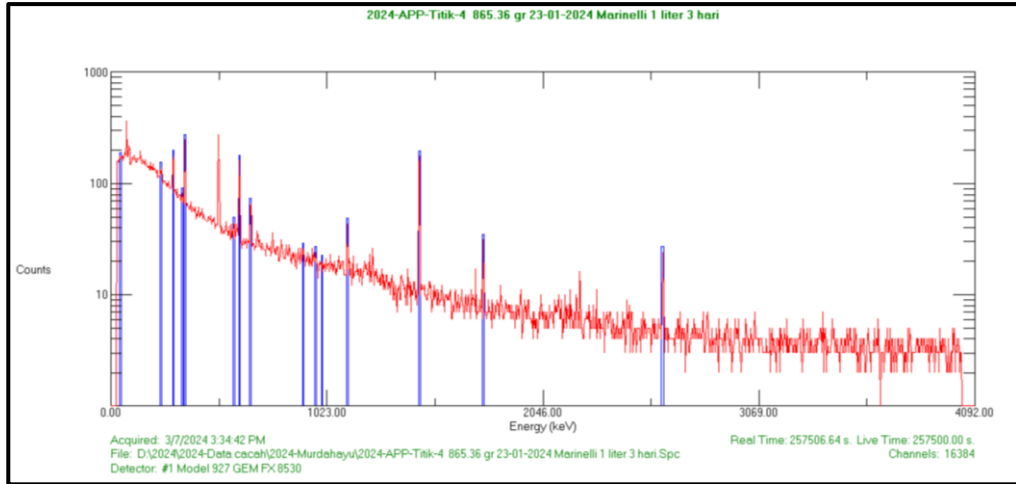
#### 2. BG2



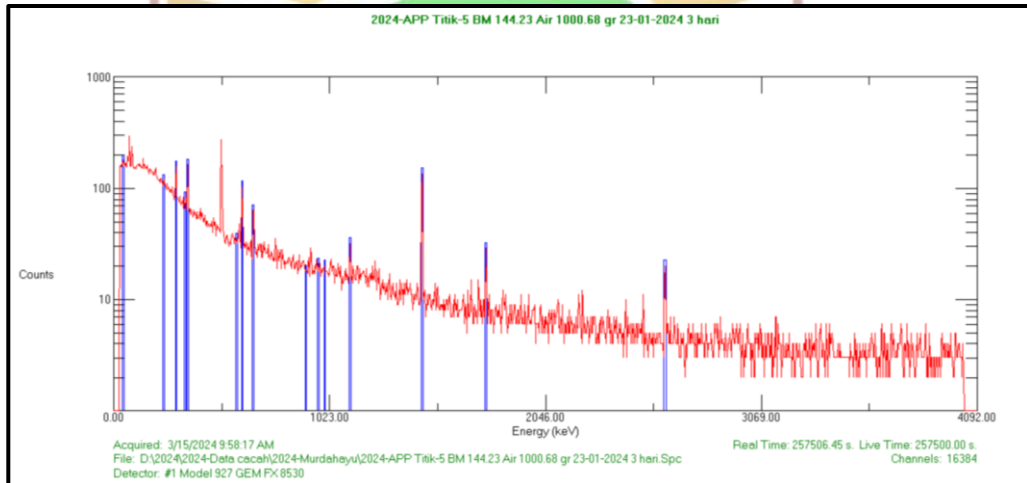
#### 3. BG3



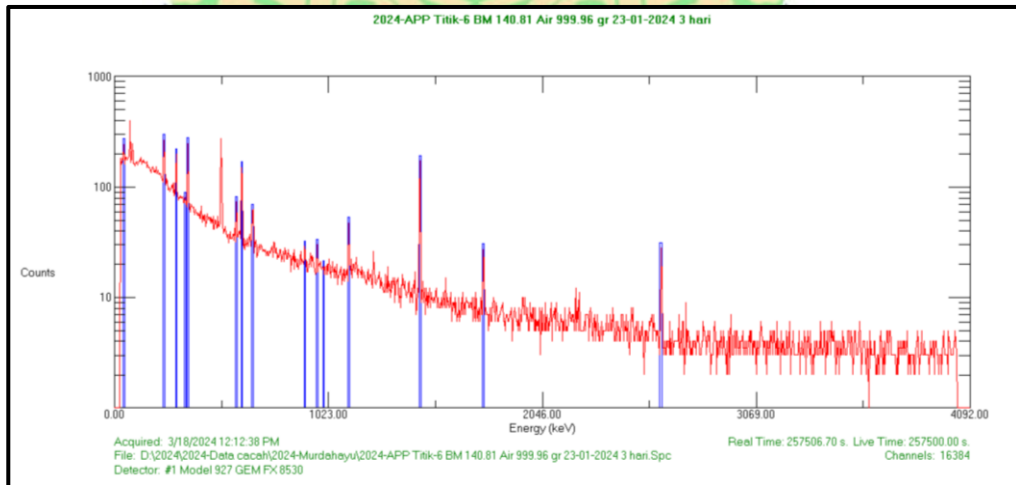
4. BG4



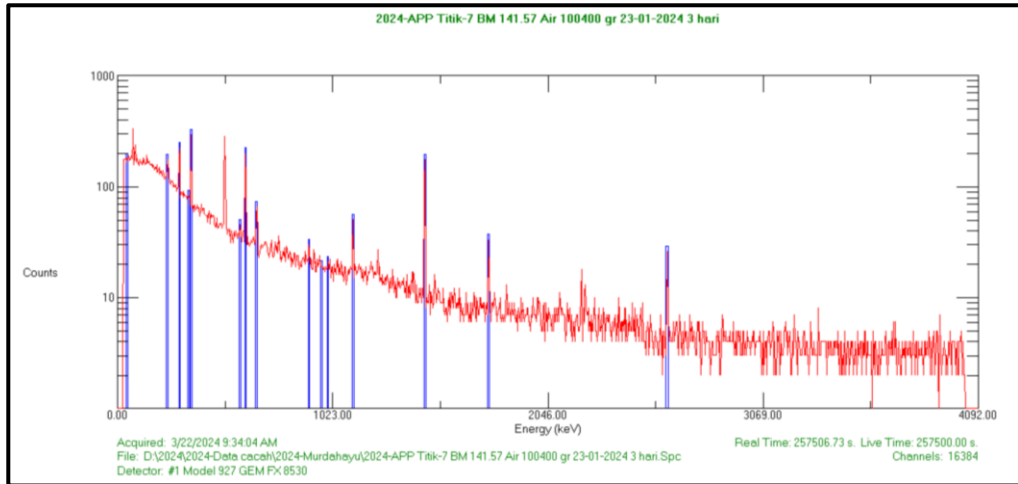
5. BG5



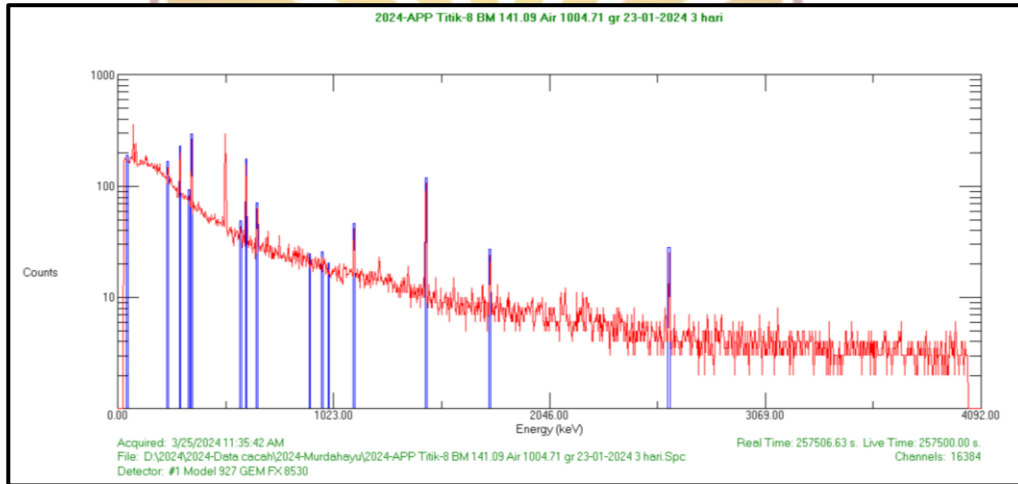
6. BB1



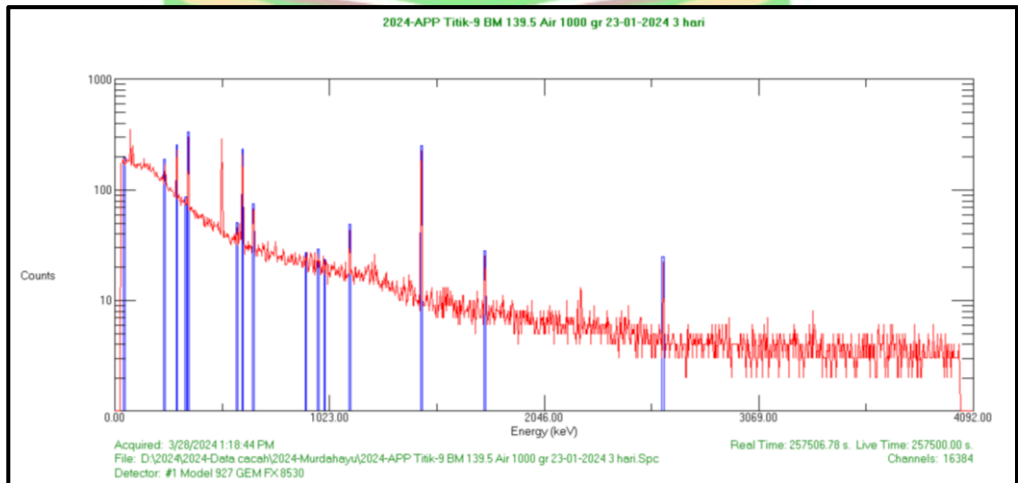
7. BB2



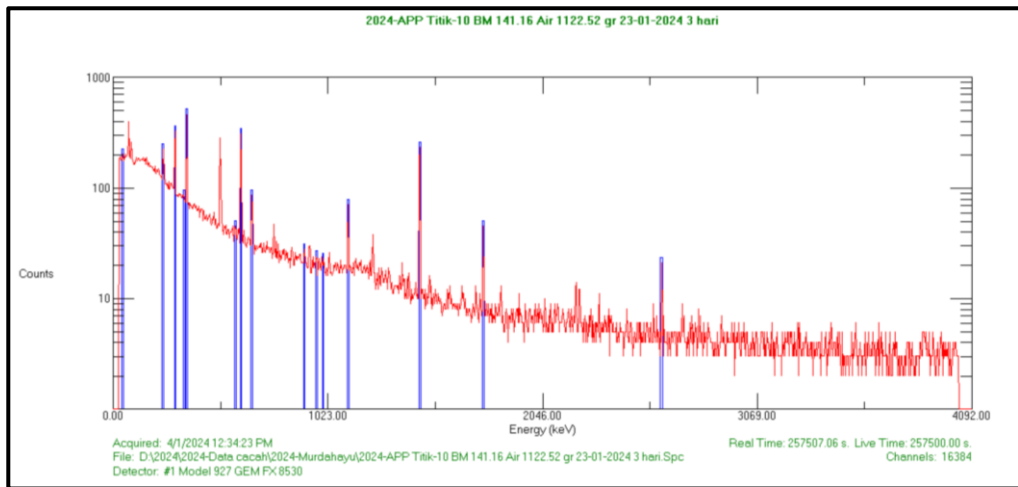
8. BB3



9. BK1



10. BK2

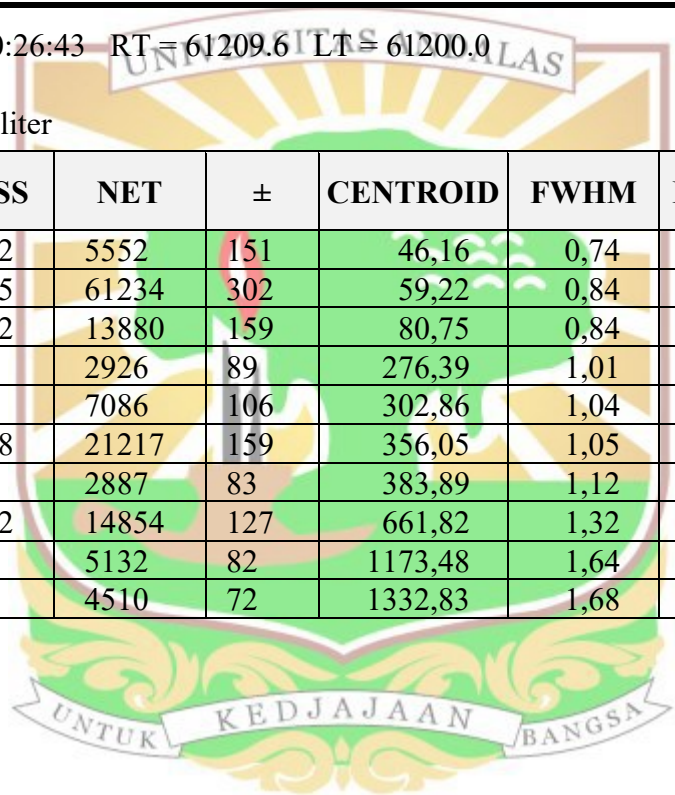


**Lampiran C Hasil Pembacaan ROI (Range of interest)**

**C1 Standar Kalibrasi**

Detector #1 ACQ 13-Mar-2024 at 10:26:43 RT = 61209.6 LT = 61200.0  
 Model 927 GEM FX 8530  
 2024-03-13 STD GM-014 Mr 1 liter

ROI#	RANGE(keV)		GROSS	NET	±	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY	(keV)
1	44,34	47,84	17172	5552	151	46,16	0,74	1,16	Pb-210	46,25
2	57,08	61,58	75205	61234	302	59,22	0,84	1,25	Am-241	59,72
3	78,81	82,81	20272	13880	159	80,75	0,84	1,28	Ba-133	81,07
4	274,15	278,65	5288	2926	89	276,39	1,01	1,60	Ba-133	276,40
5	300,63	305,13	9015	7086	106	302,86	1,04	1,64	Ba-133	302,85
6	353,59	358,58	22918	21217	159	356,05	1,05	1,68	Ba-133	356,16
7	381,32	386,31	4543	2887	83	383,89	1,12	1,69	Ba-133	383,85
8	659,34	664,33	15442	14854	127	661,82	1,32	2,02	Cs-137	661,66
9	1170,42	1176,41	5657	5132	82	1173,48	1,64	2,57	Co-60	1173,24
10	1329,79	1335,78	4768	4510	72	1332,83	1,68	2,63	Co-60	1332,50



C2 Latar

Detector #1 ACQ 24-Nov-2023 at 12:37:19 RT = 257506.3 LT = 257500.0  
 Model 927 GEM FX 8530  
 2024-11-10 Latar 257500 detik

ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2246	30	61	46,02	0,34	0,58	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	1736	16	61	238,48	0,35	0,90	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	1768	451	57	295,20	1,05	1,40	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1194	19	53	337,08	3,02	3,18	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	1807	795	57	351,92	1,13	1,62	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	601	45	40	584,11	0,29	0,51	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1192	684	44	609,39	1,29	1,87	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	650	273	33	661,92	0,66	1,59	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	362	26	35	911,88	1,50	1,65	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	320	51	30	969,39	0,37	1,07	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	261	27	28	999,81	0,25	0,40	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	350	92	30	1120,44	1,43	1,78	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	394	194	28	1461,06	1,02	2,48	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	259	134	25	1765,11	0,75	2,51	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	222	118	26	2614,46	1,34	2,77	Tl-208	2614,53



C3 Sampel

1. BG1

ROI#		RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
Detector #1 ACQ 23-Feb-2024 at 13:40:53 RT = 257506.8 LT = 257500.0 Model 927 GEM FX 8530 2024-APP-Titik-1 864,73 gr 23-01-2024 Marinelli 1 liter											
									Seal	23-Jan-24	
									Cacah	23-Feb-24	
									V (liter)	20,00	
1	44,34	48,09	2471	79	63	47,30	0,28	0,44	Pb-210	46,54	
2	236,18	240,68	2216	294	66	238,79	0,55	1,70	Pb-212	238,63	
3	292,89	297,38	2242	902	61	295,17	1,05	1,68	Pb-214	295,22	
4	335,85	340,60	1282	-1	54	338,86	0,99	1,29	Pb-212	338,63	
5	349,34	354,34	2622	1456	66	351,94	0,96	1,71	Pb-214	351,99	
6	580,40	585,90	694	77	42	583,42	0,92	1,90	Tl-208	583,19	
7	606,88	611,88	1747	1190	50	609,46	1,30	1,91	Bi-214	609,32	
8	658,59	664,83	834	227	47	661,72	1,30	1,81	Cs-137	661,66	
9	908,13	914,88	432	-7	40	910,81	0,53	1,07	Ac-228	911,16	
10	966,34	972,58	357	-20	35	968,83	0,25	0,40	Ac-228	968,97	
11	998,31	1003,80	277	55	26	999,06	0,25	0,40	U-238	1001,00	
12	1117,46	1123,46	545	262	34	1120,49	1,98	2,30	Bi-214	1120,28	
13	1457,93	1463,93	1107	961	37	1461,07	1,65	2,65	K-40	1460,75	
14	1760,93	1768,18	368	253	26	1764,84	1,97	3,22	Bi-214	1764,51	
15	2609,99	2619,48	221	169	21	2614,71	0,73	3,74	Tl-208	2614,53	

2. BG2

Detector #1 ACQ 26-Feb-2024 at 15:19:19 RT = 257506.7 LT = 257500.0									Seal	23-Jan-24
Model 927 GEM FX 8530									Cacah	26-Feb-24
2024-APP-Titik-2 858.69 gr 23-01-2024 Marinelli 1 liter									V (liter)	20,00
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2483	72	63	46,91	0,33	0,57	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	1968	195	63	238,53	0,66	1,74	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	2091	641	61	295,24	1,06	1,57	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1301	-19	55	336,62	0,27	0,43	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	2362	1147	64	351,95	1,07	1,63	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	706	116	42	583,64	1,07	2,17	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1490	996	47	609,50	1,37	2,04	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	814	251	46	661,74	1,19	1,63	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	403	34	37	911,25	0,89	1,13	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	362	72	32	970,03	0,32	1,19	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	287	-20	29	1001,06	0,25	0,40	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	488	225	32	1120,51	1,59	2,18	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	922	751	35	1461,18	1,58	2,61	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	328	198	26	1764,93	1,19	2,58	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	229	209	17	2615,46	0,94	2,85	Tl-208	2614,53

3. BG3

Detector #1 ACQ 04-Mar-2024 at 14:22:36 RT = 257506.8 LT = 257500.0								Seal	23-Jan-24	
Model 927 GEM FX 8530								Cacah	04-Mar-24	
2024-APP-Titik-3 955.03 gr 23-01-2024 Marinelli 1 liter								V (liter)	20,00	
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2469	141	63	46,32	0,87	1,78	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	2020	50	65	238,61	0,65	1,33	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	1897	402	60	295,15	0,70	1,38	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1293	43	54	337,87	1,83	2,07	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	2118	851	63	351,95	0,91	1,73	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	728	115	43	582,92	1,93	2,61	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1287	720	46	609,49	1,34	1,83	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	856	254	47	661,89	1,04	1,80	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	514	61	41	912,84	0,29	0,51	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	381	65	33	969,09	1,18	1,39	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	305	48	27	1000,96	2,29	2,49	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	496	221	33	1120,54	1,13	2,15	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	1177	973	40	1461,21	1,75	2,79	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	314	184	26	1764,95	0,94	2,97	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	378	248	31	2615,05	2,41	3,14	Tl-208	2614,53

4. BG4

Detector #1 ACQ 07-Mar-2024 at 15:34:42 RT = 257506.6 LT = 257500.0								Seal	23-Jan-24	
Model 927 GEM FX 8530								Cacah	07-Mar-24	
2024-APP-Titik-4 865.36 gr 23-01-2024 Marinelli 1 liter 3 hari								V (liter)	20,00	
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2310	67	61	46,33	0,35	1,77	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	1840	120	62	238,69	1,20	1,47	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	1842	480	58	295,25	1,06	1,48	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1223	10	53	337,89	0,28	0,45	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	2063	894	61	352,02	1,09	1,73	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	670	-28	44	583,17	0,27	0,44	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1306	798	45	609,45	1,30	2,27	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	813	336	43	661,91	1,56	2,33	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	466	32	40	911,66	0,43	1,45	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	363	25	33	969,58	0,26	0,42	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	269	70	25	999,78	1,07	1,57	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	425	133	32	1120,53	1,01	2,12	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	1394	1211	42	1461,22	1,57	2,85	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	317	187	26	1764,80	1,49	3,08	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	245	180	23	2615,10	1,14	3,51	Tl-208	2614,53

5. BG5

Detector #1 ACQ 15-Mar-2024 at 9:58:17 RT = 257506.5 LT = 257500.0								Seal	23-Jan-24	
Model 927 GEM FX 8530								Cacah	15-Mar-24	
2024-APP Titik-5 BM 144.23 Air 1000.68 gr 23-01-2024								V (liter)	20,00	
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2290	146	60	46,27	0,65	1,37	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	1789	171	60	238,39	0,98	2,12	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	1631	352	55	295,21	0,76	1,69	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1143	-40	52	339,10	0,25	0,40	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	1621	480	57	351,96	1,13	1,61	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	540	-12	39	583,65	0,25	0,40	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	992	442	42	609,41	1,48	2,02	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	758	281	43	661,76	1,43	2,15	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	391	55	35	909,35	4,06	4,29	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	350	-1	34	969,58	0,25	0,40	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	271	-1	27	999,37	0,55	0,82	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	361	136	29	1120,74	1,38	2,35	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	1083	895	38	1461,14	1,70	2,61	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	263	78	28	1765,07	0,75	2,00	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	272	220	22	2614,91	2,10	4,01	Tl-208	2614,53

6. BB1

Detector #1 ACQ 18-Mar-2024 at 12:12:38 RT = 257506.7 LT = 257500.0									Seal	23-Jan-24
Model 927 GEM FX 8530									Cacah	18-Mar-24
2024-APP Titik-6 BM 140.81 Air 999.96 gr 23-01-2024									V (liter)	20,00
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2656	365	64	46,23	0,72	1,82	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	2577	721	68	238,7	0,98	1,45	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	2026	591	60	295,39	0,95	1,63	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1256	79	53	338,24	0,73	1,14	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	2120	884	63	352,16	1,14	1,60	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	829	173	45	583,62	1,03	1,55	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1254	704	45	609,64	1,30	2,01	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	814	190	47	662,00	1,15	1,84	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	452	116	36	911,98	0,75	1,56	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	364	39	33	970,02	0,33	0,58	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	277	32	26	1002,06	0,25	0,40	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	438	146	32	1121,07	0,65	1,90	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	1463	1209	44	1461,66	1,68	2,75	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	296	186	25	1765,63	1,60	3,72	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	270	224	21	2616,31	1,26	3,46	Tl-208	2614,53

7. BB2

Detector #1 ACQ 22-Mar-2024 at 9:34:04 RT = 257506.7 LT = 257500.0								Seal	23-Jan-24	
Model 927 GEM FX 8530								Cacah	22-Mar-24	
2024-APP Titik-7 BM 141.57 Air 100400 gr 23-01-2024								V (liter)	20,00	
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2474	74	63	46,11	0,39	1,49	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	1996	254	63	238,56	0,88	1,78	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	2045	585	61	295,23	0,97	1,54	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1277	-16	54	339,06	0,29	0,49	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	2253	1091	63	352,02	1,02	1,65	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	673	17	43	582,74	0,56	0,84	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1469	905	48	609,58	1,15	2,14	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	826	172	48	662,27	0,82	1,81	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	455	30	39	911,04	0,39	0,69	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	333	-5	33	968,33	0,25	0,40	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	300	-53	30	1000,93	0,47	0,64	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	521	258	33	1120,84	1,38	2,36	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	1387	1258	40	1461,30	1,56	2,69	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	313	183	26	1765,14	1,37	2,93	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	279	162	28	2615,68	1,19	3,02	Tl-208	2614,53

8. BB3

Detector #1 ACQ 25-Mar-2024 at 11:35:42 RT = 257506.6 LT = 257500.0								Seal	23-Jan-24	
Model 927 GEM FX 8530								Cacah	25-Mar-24	
2024-APP Titik-8 BM 141.09 Air 1004.71 gr 23-01-2024								V (liter)	20,00	
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2312	-24	62	46,34	0,25	0,40	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	1932	190	62	238,23	0,49	0,76	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	1930	549	59	295,27	0,92	1,56	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1282	-11	54	339,35	0,25	0,40	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	2098	943	61	352,00	1,02	1,66	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	644	88	40	582,87	0,42	1,79	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1293	855	44	609,50	1,39	2,32	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	801	220	46	661,88	1,32	2,12	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	388	19	37	911,36	1,02	1,96	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	339	-34	34	970,58	0,25	0,40	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	254	-7	27	1000,56	0,25	0,40	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	435	160	32	1120,41	1,51	1,87	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	914	764	35	1461,27	1,79	2,82	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	279	169	24	1764,98	1,67	2,77	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	260	169	25	2615,37	0,82	3,31	Tl-208	2614,53



9. BK1

Detector #1 ACQ 28-Mar-2024 at 13:18:44 RT = 257506.8 LT = 257500.0								Seal	23-Jan-24	
Model 927 GEM FX 8530								Cacah	28-Mar-24	
2024-APP Titik-9 BM 139.5 Air 1000 gr 23-01-2024								V (liter)	20,00	
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2425	86	63	46,29	0,99	1,18	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	2015	181	64	238,75	1,88	2,21	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	2052	678	60	295,28	0,97	1,70	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1282	-45	55	337,35	0,25	0,40	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	2288	1077	64	352,04	1,05	1,64	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	667	38	42	583,35	0,57	0,99	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	1459	916	47	609,55	1,22	1,84	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	806	243	46	661,85	1,26	2,02	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	438	27	39	910,65	3,50	3,65	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	365	66	32	970,60	0,46	2,12	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	292	-22	29	1001,31	0,25	0,40	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	492	279	30	1120,79	1,64	3,04	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	1769	1598	46	1461,41	1,88	2,66	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	289	159	26	1765,10	1,51	2,54	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	226	154	23	2615,58	0,97	2,87	Tl-208	2614,53

10. BK2

Detector #1 ACQ 01-Apr-2024 at 12:34:23 RT = 257507.1 LT = 257500.0								Seal	23-Jan-24	
Model 927 GEM FX 8530								Cacah	01-Apr-24	
2024-APP Titik-10 BM 141.16 Air 1122.52 gr 23-01-2024								V (liter)	20,00	
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	± (SD)	CENTROID	FWHM	FW(1/5)M	LIBRARY (keV)	
1	44,34	48,09	2665	-95	67	46,34	0,25	0,40	Pb-210	46,54
2	236,18	240,68	2100	61	66	238,30	0,63	1,23	Pb-212	238,63
3	292,89	297,38	2494	1021	64	295,26	0,94	1,56	Pb-214	295,22
4	335,85	340,60	1279	-108	55	337,60	0,25	0,40	Pb-212	338,63
5	349,34	354,34	3211	1933	71	352,01	1,15	1,71	Pb-214	351,99
6	580,40	585,90	711	113	42	583,05	1,15	2,24	Tl-208	583,19
7	606,88	611,88	2090	1537	54	609,49	1,20	1,93	Bi-214	609,32
8	658,59	664,83	887	341	46	661,89	1,35	1,92	Cs-137	661,66
9	908,13	914,88	467	42	39	913,88	0,25	0,40	Ac-228	911,16
10	966,34	972,58	432	25	37	971,83	0,26	0,42	Ac-228	968,97
11	998,31	1003,80	342	-53	32	999,81	0,25	0,40	U-238	1001,00
12	1117,46	1123,46	646	358	35	1120,67	1,29	2,28	Bi-214	1120,28
13	1457,93	1463,93	2000	1796	49	1461,31	1,91	2,95	K-40	1460,75
14	1760,93	1768,18	412	302	27	1765,09	1,42	2,83	Bi-214	1764,51
15	2609,99	2619,48	223	138	24	2615,35	1,80	2,19	Tl-208	2614,53

**Lampiran D** Perhitungan Kalibrasi Efisiensi dan MDC Spektrometer Gamma

**D1** Perhitungan Kalibrasi Efisiensi

Nuklida	Energi (keV)	Net. Area	± (SD)	Life Time (sec)	A <sub>0</sub> (Bq)	T <sub>0</sub> (d-m-y)	Yield	T <sub>1</sub> (d-m-y)	T <sup>1/2</sup> (tahun)	T <sup>1/2</sup> (hari)	T tunda (hari)	A <sub>1</sub> (Bq)	Efisiensi
Ba-133	81,01	13880	159	61200	49,8	20-Jan-22	0,366100	13-Mar-24	10,51	3838,778	783	43,24	0,014328
Ba-133	276,29	2926	89	61200	49,8	20-Jan-22	0,071000	13-Mar-24	10,51	3838,778	783	43,24	0,015575
Ba-133	302,71	7086	106	61200	49,8	20-Jan-22	0,183300	13-Mar-24	10,51	3838,778	783	43,24	0,014610
Ba-133	355,86	21217	159	61200	49,8	20-Jan-22	0,623000	13-Mar-24	10,51	3838,778	783	43,24	0,012871
Ba-133	383,70	2887	83	61200	49,8	20-Jan-22	0,089200	13-Mar-24	10,51	3838,778	783	43,24	0,012232
Cs-137	661,62	14854	127	61200	36,49	20-Jan-22	0,850000	13-Mar-24	30,07	10983,070	783	34,73	0,008222
Co-60	1173,23	5132	82	61200	18,4	20-Jan-22	0,999000	13-Mar-24	5,27	1924,868	783	13,88	0,006048
Co-60	1332,23	4510	72	61200	18,4	20-Jan-22	0,999824	13-Mar-24	5,27	1924,868	783	13,88	0,005310

**D2** Perhitungan MDC

Nuklida	Waktu Paro (hari)	Energi gamma (keV)	Yield Gmma (Pγ)	σPγ (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	SD	Net. Latar	V <sub>sp</sub> (lt)	U <sub>w</sub> (%)	MDC 95% (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	54	19	20	0,2	0,00
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	40	26	20	0,2	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	35	51	20	0,2	0,01
Rata-rata											<b>0,00</b>	
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	37	194	20	0,2	<b>0,02</b>
U-238	4,47E+09	1001,0	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	26	27	20	0,2	<b>0,12</b>

**Lampiran E** Perhitungan Konsentrasi Aktivitas Radionuklida

1. BG1

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	-1	54	19	20	0,2	0,00	-0,14
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	-7	40	26	20	0,2	0,00	-0,02
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	-20	35	51	20	0,2	-0,01	-0,02
Rata-rata													<b>-0,003962</b>	<b>-0,04</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	961	37	194	20	0,2	<b>0,28</b>	<b>0,01</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	55	26	27	20	0,2	<b>0,14</b>	<b>0,07</b>

2. BG2

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	-19	55	19	20	0,2	0,00	-0,01
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	34	37	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	72	32	51	20	0,2	0,00	0,00
Rata-rata													<b>-0,01</b>	<b>-0,30</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	751	35	194	20	0,2	<b>0,20</b>	<b>0,01</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	-20	29	27	20	0,2	<b>-0,24</b>	<b>-0,35</b>

3. BG3

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	43	54	19	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	61	41	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	65	33	51	20	0,2	0,00	0,00
Rata-rata													<b>0,003199</b>	<b>0,00</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	973	40	194	20	0,2	<b>0,28</b>	<b>0,01</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	48	27	27	20	0,2	<b>0,11</b>	<b>0,06</b>

4. BG4

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	10	53	19	20	0,2	0,00	-0,01
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	32	40	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	25	33	51	20	0,2	0,00	-0,01
Rata-rata													<b>-0,003183</b>	<b>-0,01</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	1211	42	194	20	0,2	<b>0,37</b>	<b>0,01</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	70	25	27	20	0,2	<b>0,22</b>	<b>0,08</b>

5. BG5

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	40	52	19	20	0,2	-0,01	-0,01
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	55	35	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	-1	34	51	20	0,2	-0,01	-0,32
Rata-rata													<b>-0,01</b>	<b>-0,22</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	895	38	194	20	0,2	<b>0,25</b>	<b>0,01</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	-1	27	27	20	0,2	<b>-0,14</b>	<b>-3,84</b>

6. BB1

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	79	53	19	20	0,2	0,01	0,01
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	116	36	26	20	0,2	0,01	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	39	33	51	20	0,2	0,00	0,00
Rata-rata													<b>0,011447</b>	<b>0,00</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	1209	44	194	20	0,2	<b>0,37</b>	<b>0,02</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	32	26	27	20	0,2	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>

7. BB2

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	-16	54	19	20	0,2	0,00	-0,02
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	30	39	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	-5	33	51	20	0,2	-0,01	-0,07
Rata-rata													<b>-0,01</b>	<b>-0,05</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	1258	40	194	20	0,2	<b>0,38</b>	<b>0,01</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	-53	30	27	20	0,2	<b>-0,41</b>	<b>-0,23</b>

8. BB3

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	-11	54	19	20	0,2	0,00	-0,02
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	19	37	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	-34	34	51	20	0,2	-0,02	-0,02
Rata-rata													<b>-0,01</b>	<b>-0,02</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	764	35	194	20	0,2	<b>0,21</b>	<b>0,01</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	-7	27	27	20	0,2	<b>-0,17</b>	<b>-0,67</b>

9. BK1

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	45	55	19	20	0,2	-0,01	-0,01
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	27	39	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	66	32	51	20	0,2	0,00	0,00
Rata-rata													<b>-0,01</b>	<b>-0,02</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	1598	46	194	20	0,2	<b>0,51</b>	<b>0,02</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	-22	29	27	20	0,2	<b>-0,25</b>	<b>-0,33</b>

10. BK2

Nuklida	T(1/2) (hari)	Energi gamma (keV)	Yield gamma P <sub>γ</sub>	σP <sub>γ</sub> (SD)	Efisiensi	σ <sub>ε</sub>	Live Time (sec)	Net. Area	SD	Net. Latar	Vsp (lt)	U <sub>w</sub> (%)	Kons (Bq/lt)	U <sub>T</sub> (Bq/lt)
Th-232	5,13E+12	338,42	0,113	0,002	0,013	0,0002	257500	-108	55	19	20	0,2	-0,02	-0,01
	5,13E+12	911,16	0,266	0,003	0,007	0,0001	257500	42	39	26	20	0,2	0,00	0,00
	5,13E+12	968,97	0,162	0,002	0,007	0,0001	257500	25	37	51	20	0,2	0,00	-0,01
Rata-rata													<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>
K-40	1260000000	1460,82	0,107	0,001	0,005	0,0001	257500	1796	49	194	20	0,2	<b>0,58</b>	<b>0,02</b>
U-238	4,47E+09	<b>1001,0</b>	0,0059	0,000	0,006	0,00009	257500	-53	32	27	20	0,2	<b>-0,41</b>	<b>-0,25</b>



## Lampiran F Perhitungan Manual Aktivitas Radionuklida

Contoh perhitungan manual pada salah satu sampel, Sampel BG1 ( $^{238}\text{U}$ ):

1. Konsentrasi zat radioaktif sampel rata-rata

$$C_{avg} = \frac{N_{sp} - N_{bg}}{\varepsilon_{\gamma} P_{\gamma} m}$$

$$C_{avg} = \frac{\left( \frac{\text{Net Area} - \text{Net Latar}}{\text{Live time}} \right)}{(\varepsilon_{\gamma})(P_{\gamma})(m)}$$

$$C_{avg} = \frac{\left( \frac{55 - 27}{257500} \right)}{(0,006)(0,0059)(20)}$$

$$C_{avg} = 0,14 \text{ Bq/l}$$

2. Ketidakpastian pengukuran

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

$$U_T = C_{avg} \times \sqrt{\left( \frac{SD}{\text{Net Area}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon_{\gamma}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma P_{\gamma} (SD)}{P_{\gamma}} \right)^2 + \left( \frac{U_w (\%)}{m} \right)^2}$$

$$U_T \approx 0,14 \times \sqrt{\left( \frac{26}{55} \right)^2 + \left( \frac{0,00009}{0,006} \right)^2 + \left( \frac{0,0001}{0,0059} \right)^2 + \left( \frac{0,2}{20} \right)^2}$$

$$U_T = 0,07 \text{ Bq/l}$$

3. Konsentrasi zat radioaktif sampel terkoreksi

$$C_{sp} = C_{avg} \pm U_T$$

$$C_{sp} = 0,14 \pm 0,07 \text{ Bq/l}$$

4. *Minimum Detecable Concentration (MDC)*

$$MDC = 4,66 \frac{\sqrt{\frac{N_{bg}}{(t_{bg})^2}}}{\varepsilon_Y P_Y m}$$

$$MDC = 4,66 \frac{\sqrt{\frac{\text{Net Latar}}{(\text{Live Time})^2}}}{\varepsilon_Y P_Y m}$$

$$MDC = 4,66 \frac{\sqrt{\frac{27}{(55)^2}}}{(0,006)(0,0059)(20)}$$

$$MDC = 0,12 \text{ Bq/l}$$



## Lampiran G Dokumentasi Penelitian

### 1. Lokasi Pengambilan Sampel



### 2. Pengambilan Sampel



### 3. Preparasi Sampel

