

Skripsi Fisika

**KARAKTERISITIK UNSUR RADIONUKLIDA ALAM DALAM
PARTIKULAT UDARA DI KAWASAN INDUSTRI DAN PERKOTAAN
SULAWESI SELATAN DENGAN MENGGUNAKAN SPEKTROMETER
GAMMA**

OLEH:

YULIANTI DJUDIUS

H211 13 019



PROGRAM STUDI FISIKA

DEPARTEMENT FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2017

**KARAKTERISTIK UNSUR RADIONUKLIDA ALAM DALAM
PARTIKULAT UDARA DI KAWASAN INDUSTRI DAN PERKOTAAN
SULAWESI SELATAN DENGAN MENGGUNAKAN SPEKTROMETER
GAMMA**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Tugas Akhir Untuk Memenuhi Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)

Pada Program Studi Fisika Departemen Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH :

YULIANTI DJUDIUS

H211 13 019

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPARTEMEN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2017

LEMBAR PENGESAHAN

**Karakteristik Unsur Radionuklida Alam Dalam Partikulat Udara Di
Kawasan Industri dan Perkotaan Sulawesi Selatan Dengan Menggunakan
Spektrometer Gamma**

OLEH

**YULIANTI DJUDIUS
H 211 13 019**

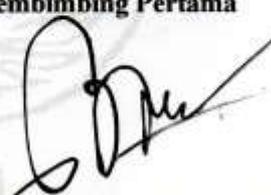
Makassar, 23 November 2017

Disetujui Oleh:

Pembimbing Utama


Dr. Bualkar Abdullah, M.Eng, Sc
NIP. 195501051978021001

Pembimbing Pertama


Bannu Abdul Samad, S.Si, M.Si
NIP. 19730521 199802 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya bertanda tangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dalam batas tertentu dibantu oleh pihak pembimbing, dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk telah saya nyatakan dengan benar. Bila dikemudian hari ternyata pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi yang telah ditetapkan oleh FMIPA UNHAS Makassar.

Yang membuat pernyataan

Yulianti Djudius

ABSTRAK

Telah dilakukan pengukuran konsentrasi radionuklida alam dalam partikulat udara di kawasan industri dan perkotaan Sulawesi Selatan, Sampling dilakukan dengan menggunakan High Volume Air Sampler (HVAS). Pengambilan sampel di lima lokasi yang berbeda, setiap lokasi waktu sampling selama 24 jam, Sampel udara ukuran TSP (debu udara yang melekat dalam kertas filter), lalu didiamkan selama 30 hari, kemudian sampel dicacah dengan menggunakan spektrometer gamma. Hasil perhitungan konsentrasi diperoleh nilai konsentrasi yang tertinggi dari semua lokasi yaitu pada unsur pada unsur ^{40}K pada lokasi PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima dengan nilai konsentrasi $0,60 \pm 0,07 \text{ mBq/m}^3$. sedangkan Nilai konsentrasi yang tertinggi pada unsur ^{232}Th dan ^{40}K terdapat pada titik sampel Jl, Dr.Ratulangi, BMKG Maros dan PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima dengan nilai konsentrasi berturut-turut $0,21 \pm 0,02 \text{ mBq/m}^3$ dan $0,60 \pm 0,07 \text{ mBq/m}^3$. Dari hasil perhitungan dosis efektif di peroleh nilai tertinggi yaitu $0,068 \text{ msv/tahun}$, Berdasarkan United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) Nilai yang diperoleh masih berada di bawah ambang batas yaitu $\leq 1 \text{ msv/tahun}$.

Kata Kunci: Radionuklida Alam, Partikulat udara, Dosis Efektif, High Volume Air Sampler (HVAS), Spektrometer Gamma

ABSTRACT

There have been measurements of the concentration of natural radionuclides in airborne particulates in industrial and urban areas of South Sulawesi, Sampling is done using High Volume Air Sampler (HVAS). The samples taken at five different locations, each sampling time location takes 24 hours, TSP size air samples (air dust adhered to filter paper), then let it for 30 days, then samples were enumerated using a gamma spectrometer. From the result of concentration calculation we obtained the highest concentration value from all location is at element ^{40}K at location of PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima with concentration value of $0.60 \pm 0.07 \text{ mBq / m}^3$. while the highest concentration value is on element ^{232}Th and ^{40}K is at sample point Jl, Dr.Ratulangi, BMKG Maros and PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima with concentration values of $0.21 \pm 0.02 \text{ mBq / m}^3$ and $0.60 \pm 0.07 \text{ mBq / m}^3$, respectively. From the results of the effective dose calculation we obtained the highest value which is of 0.068 msv/year, Based on United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) The value that were obtained is still under the threshold which is $\leq 1 \text{ msv/year}$.

Keywords: Natural Radionuclides, Air Particulate, Effective Dose, Haigh Volume Air Sampler (HVAS), Gamma Spectrometer

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yesus Kristus atas kasih dan penyertaanNya sehingga dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **Karakteristik Unsur Radionuklida Alam dalam Partikulat Udara Di Kawasan Industri dan Perkotaan Sulawesi Selatan dengan Menggunakan Spektrometer Gamma** yang merupakan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana Sains Fisika.

Penulisan Skripsi ini merupakan salah satu wujud dari pengalaman selama menimba ilmu di Universitas Hasanuddin selama ini. Dalam proses penyelesaian skripsi tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, baik bantuan moril maupun materi. Untuk itulah melalui kesempatan ini penulis ucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ayahanda **Djudius** dan Ibunda **Emma Parinya** yang tercinta atas segala didikan dan nasehatnya serta selalu mendukung dalam doa dan materi.
2. Bapak **Dr. Bualkar Abdullah, M.Eng. Sc** selaku pembimbing utama dan Bapak **Dr. Bannu Samad M.Si** sebagai pembimbing pertama serta bapak **Dr.Syarbaeni** selaku pembimbing kedua atas segala bimbingan dan petunjuk yang telah diberikan kepada penulis selama penyusunan skripsi ini
3. **Prof.Dr. Syamsir Dewang, M.Eng.Sc, Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si, Drs. Bangsawan B.J M.Si** selaku tim penguji, atas segala saran dan masukan yang telah diberikan kepada penulis.

4. **Tim batan (Pak Wahyudi, Pak Gatot, Pak Muji, Pak Maksun)** atas kerjasama dan bantuan selama penelitian.
5. **Semua pihak yang membantu selama penelitian (Pak Camat Kec.Bungoro, Pak taufik, Pak Misbah)** atas segala bantuan sehingga penelitian boleh berjalan dengan lancar.
6. Ibu **Dra. Hj. Bidayatul Armynah, MT** selaku pembimbing akademik yang telah membimbing penulis selama mengikuti masa perkuliahan.
7. **Bapak dan Ibu Dosen serta staf Jurusan Fisika** atas segala bantuan, bimbingan, petunjuk dan ilmu pengetahuan yang telah penulis terima selama perkuliahan.
8. **Pak latif, Pak Aji, dan Pak Ali** atas segala bantuannya dalam pengurusan Administrasi di Jurusan Fisika.
9. **Angker 2013** atas bantuannya selama perkuliahan dan cerita yang tidak akan pernah dikenang saat masa-masa pengkaderan mulai dari makan bersama, posisi bersama, ketawa bersama, terima kasih atas kenangan itu, semoga kita dapat berhasil menggapai cita-cita kita masing-masing.
10. **Teman-temanku Fisika 2013** tanpa terkecuali yang tidak bisa kusebutkan namanya satu persatu atas bantuannya, nasihat dan dorongannya sehingga penulis tetap semangat mengerjakan skripsi ini.
11. **KKN Tematik Enrekang Kec. Anggeraja Desa Batu Noni** secara khusus posko mama anti Ka' arif, Inzani, Nunu, Kitty, Widya, Yuni, Ilo, Resky, Try terima Kasih atas kenangannya selama kurang lebih satu bulan.

12. **Ka' Ariel. B** yang selalu memberi semangat dan selalu mendengar keluh kesah saya.
13. **Sahabat-sahabat saya Monika Pakabu, Yunita, Yuni Atmy, Arnold, Faais dan Dini** terima kasih kalian selalu memberi motivasi kepada penulis dan tempat curhat saya ketika ada masalah.
14. **Teman partner Skripsi dan PKL Marhana, Desi Nirmalasari, Meirisa Ambalinggi** terima kasih atas dukungan dan bantuannya selama ini terima kasih atas kebersamaanya selama di Jakarta dengan kerasnya Ibu kota.
15. **Anak-anak GMKI Komisariat Fmipa Unhas** terima kasih atas perhatiannya selama ini, kita boleh bertumbuh bersama sebagai saudara seiman. UT OMNEST UNUM SINT
16. **Pengurus GMKI Komisariat Fmipa Unhas** masa bhakti 2015-2016 dan 2016-2017 terima kasih atas dukungan dan doa kalian, Tertawa, peccu, marah-marah di grup semua terjadi disini.
17. **Saldi Rantasa, Ka' Fadly bureng, Ka' ita alay** yang selalu ku repoti selama pengurusan penelitian yang selalu antar sana sini.
18. **Ka' Yosia Djudius dan Ka' indri Sari Djudius** yang mendukung dalam doa dan materi.
19. **Adik PA Nermianti Pali, Febriany Datte Taruk Lobo, dan Yulianti Parung** yang selalu memberi semangat kepada penulis.
20. **Nurya Apartement (Fira, Aul, Desiong, Bulan)** terima kasih atas keseruan dan kebersamaan nya selama ini.

Dengan penuh kesadaran hati, penulis merasakan adanya ketidak sempurnaan dalam skripsi ini, namun demikian semoga bahasan ini dapat menjadi tambahan ilmu untuk kita, terkhusus bagi penulis sendiri, untuk itu penulis senantiasa membuka hati bagi kritikan yang membangun. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Makassar, 25 November 2017

Yulianti Djudius

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	x
SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
I.3 Tujuan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 Radioaktifitas	6
II.2 Konsep udara dan pencemaran udara.....	9
II.3 Partikel udara.....	11
II.4 Debu	12
II.5 HVAS (Haigh Volume Air Sampler)	14
II.6 Spektrometer gamma.....	15
II.7 Kalibrasi Spektrometer gamma.....	17
BAB III METODE PENELITIAN	25

III.1 Waktu dan Tempat Penelitian	25
III.2 Alat dan Bahan	25
III.3 Prosedur Penelitian.....	25
III.3.1 Sampling.....	26
III.3.2 Preparasi	26
III.3.3 Kalibrasi spectrometer gamma	26
III.3.4 Pengukuran laju cacah sampel.....	27
III.3.5 Perhitungan Dosis efektif	27
III.4 Bagan Alir Penelitian	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
IV.1 Hasil pengukuran partikulat udara	29
IV.2 Hasil perhitungan konsentrasi	30
IV.3 Hasil perhitungan Dosi Efektif.....	33
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	35
V.1 Kesimpulan	35
V.2 Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
4.1 Hasil Pengukuran Partikulat udara.....	31
4.2 Hasil perhitungan Konsentrasi Radionuklida dalam Partikulat udara	32
4.3 Hasil perhitungan dosis	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. HVAS (Haigh Volume Air Sampler)	20
2.2. Skema system spectrometer gamma dengan detector HPGe.....	28
2.3. Histogram konsentrasi ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K dalam partikulat udara.....	32
2.4. Histogram Dosis efektif perorangan.....	34

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

1. Tabel laju cacah sampel dan Background GEM 60-437
2. Perhitungan konsentrasi sampel
3. Hasil perhitungan MDC
4. Perhitungan nilai dosis serap
5. Peta Lokasi Penelitian
6. Foto-foto penelitian

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Manusia dengan segala macam aktifitasnya, tidak dapat menghindarkan diri dari penerimaan paparan radiasi alami yang berasal dari radionuklida primordial dan kosmogenik. Radionuklida alami ini terdapat dalam berbagai komponen lingkungan hidup dan mempunyai potensi memberikan paparan radiasi secara eksternal dan internal. Radioaktivitas alam yang sudah ada sejak terbentuknya bumi dan alam semesta disebut primordial dapat berasal dari deret uranium, thorium, K-40, serta dari luar bumi yang disebut kosmogenik merupakan radionuklida yang terbentuk sebagai hasil interaksi antara sinar kosmik dengan atom-atom unsur di atmosfer^[1].

Menurut United Nations Scientific Committee on Effect of Radiation (UNSCEAR), radiasi yang diterima penduduk dunia sekitar 87% berasal dari radionuklida alam, yang terdiri atas radiasi interna radon dan toron (63%), radiasi eksternal gamma (14%), radiasi sinar kosmik (10%) dan 13% berasal dari radiasi buatan. Total dosis radiasi yang diterima penduduk dunia yang berasal dari sumber radiasi alam sekitar 2,4 mSv/tahun yang terdiri atas 0,48 mSv/tahun dari kulit bumi, 1,24 mSv/tahun dari gas radioaktif radon dan toron, 0,39 mSv/tahun dari sinar kosmik dan 0,29 dari^[2].

Radioaktivitas alam di udara sebagian besar ditimbulkan oleh adanya kandungan uranium dan thorium di dalam tanah karena uranium dan thorium merupakan gas, maka cenderung mendifusi ke atas melalui permukaan bumi ke

udara. Selanjutnya hasil-hasil peluruhan kedua gas ini terikat terperangkap pada debu udara serta sebagian kecil bersifat bebas pada debu udara^[3].

Kualitas udara di Indonesia mulai mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor yang berpengaruh dominan, diantaranya adalah peningkatan transportasi akibat pertumbuhan penduduk dan tingkat urbanisasi yang tinggi, ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar minyak, serta masih rendahnya tingkat kesadaran pemerintah dan masyarakat. Pencemaran udara yang semakin memburuk ini berdampak pada kesehatan masyarakat dan beban finansial^[4].

Salah satu bahan pencemar udara adalah debu yang mempunyai diameter 0,1 sampai 100 μm dan menjadi perhatian bersama khususnya debu yang dihasilkan 220 oleh pengolahan bahan padat dari industri. Partikel udara dalam wujud padat yang berdiameter kurang dari 10 μm yang biasanya disebut dengan PM_{10} (particulate matter) dan kurang dari 2,5 μm di dalam rumah ($\text{PM}_{2,5}$) diyakini oleh para pakar lingkungan dan kesehatan masyarakat sebagai pemicu timbulnya infeksi saluran pernafasan, karena partikel padat PM_{10} dan $\text{PM}_{2,5}$ dapat mengendap pada saluran pernafasan daerah bronki dan alveoli. Partikel debu yang berdiameter kurang dari 10 μm (PM_{10}) sangat memprihatinkan, karena memiliki kemampuan yang lebih besar untuk menembus ke dalam paru. Rambut di dalam hidung dapat menyaring debu yang berukuran lebih besar dari 10 μm ^[5].

Sulawesi Selatan memiliki perkembangan industri yang cukup pesat, beragam industri dengan teknologi modern telah tersebar luas di beberapa kabupaten salah satunya adalah industri Kima yang terletak di jalan Perintis

Kemerdekaan Km 15, Makassar. PT Kima sebagai kawasan industri pemerintah, merupakan industri yang berkembang pesat dan mendapat pengakuan internasional berupa sertifikat ISO 9001. PT. Kima juga menjadi perusahaan BUMN terbaik serta mendapat peringkat pertama di kawasan industri kementerian BUMN versi infobank 2013, Hal ini menjadikan PT. Kima sebagai pengelola kawasan industri di bagian Timur Indonesia yang terdepan.

Selain meningkatnya perkembangan industri, transportasi, pembangunan sarana prasana juga berkembang pesat serta jumlah penduduknya juga terus bertambah, yang akan mempengaruhi potensi dalam menghasilkan polusi udara melalui sumber antropogenik, misalnya emisi kendaraan bermotor, kegiatan industri dan kegiatan rumah tangga. wilayah yang dikhususkan sebagai pengembangan kawasan industri namun keberadaannya berdekatan dengan permukiman penduduk, masyarakat yang bermukim berpeluang terpapar polutan yang dihasilkan dari kegiatan industri. *Total Suspended Particulate (TSP)* adalah salah satu emisi yang dihasilkan dalam kegiatan industri, berada di udara dalam waktu yang lama dan tidak mudah mengendap serta dapat membahayakan kesehatan masyarakat, berupa penurunan fungsi paru^[1]. Berdasarkan besarnya dampak akibat paparan TSP maka diperlukan pembuktian kandungan radionuklida dalam partikulat udara sebagai data untuk menghitung potensi bahaya radiasi yang ditimbulkan.

Penelitian tentang kandungan debu di kota Makassar telah dilakukan oleh Ruman (2017), penelitian ini dilakukan di lima titik tempat yang berbeda di kota Makassar kemudian, sampel dianalisis dengan menggunakan XRF (X-Ray

Fluorescence). Hasil penelitian ini adalah senyawa SiO_2 yang paling tertinggi di setiap lokasi penelitian sedangkan yang rendah adalah K_2O . Penelitian selanjutnya juga dilakukan oleh Tri Rusmanto (2013) penelitian ini dilakukan di sekitar PLTU Pacitan, Jawa Timur dengan menganalisis kandungan radionuklida alam dalam sampel udara ambien (TSP). Radionuklida yang terdeteksi yaitu Ra-226, Pb-212, Pb-214, Bi-214, Ac-228 dan K-40. Dimana radionuklida pada setiap lokasi besar radioaktivitasnya tidak ada perbedaan yang signifikan.

Pada penelitian ini sama halnya yang dilakukan oleh Tri Rusmanto hanya perbedaan lokasi, penelitian ini dilakukan di berbagai titik yakni di perkotaan dan kawasan industri, Sulawesi Selatan. Sampling udara menggunakan High Volume Air Sampler (HVAS) kemudian menganalisis sampel dengan menggunakan Spektrometer gamma, metode ini digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur radionuklida alam dalam sampel.

I.2 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini adalah mengetahui unsur radionuklida alam dalam partikulat udara di perkotaan dan kawasan industri Sulawesi Selatan dengan menggunakan spektrometer gamma. Lokasi penelitian ini dibatasi di lima tempat berbeda dengan satu tempat mewakili satu sampel yaitu:

1. Jln. Racing Centre, BMKG Panaikang Makassar.
2. Jln. DR. Ratulangi, BMKG Maros.
3. Fakultas matematika dan ilmu pengetahuan Alam, Unhas.
4. PT. Bogatama Marinusa, Kima.
5. Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep.

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini :

1. Menghitung kandungan radionuklida alam ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , dalam partikulat udara di kawasan industri dan perkotaan Sulawesi Selatan.
2. Menghitung Nilai laju dosis efektif perorangan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah besaran kekuatan yang menyatakan kekuatan sumber radioaktif yaitu banyaknya atau jumlah inti radioaktif yang mengalami proses peluruhan per satuan waktu. Jenis radiasinya berupa sinar Alfa, sinar Beta, sinar Gamma, sinar X dan radiasi neutron^[6].

II.1.1 Radioaktivitas alam

Radioaktivitas alam sudah ada sejak terbentuknya bumi dan alam semesta. Yang termasuk radiasi alam adalah^[7] :

a. Radiasi Sinar Kosmik

Radiasi kosmik yang sampai di bumi berasal dari ruang angkasa dan dari matahari. Radiasi ini terdiri dari radiasi penembus yang mempunyai jangkauan yang sangat lebar, yang mengalami banyak reaksi dengan elemen-elemen di dalam Atmosfer. Atmosfer merupakan perisai dan sangat besar mengurangi jumlah radiasi kosmik yang mencapai permukaan bumi, Contoh radioaktivitas sinar kosmik Carbon-14, H-3, Be-7, B-10, Na-22, Al-26, Si-32, P-32, S-35, Ar-37, Ar-39.

b. Radiasi Primordial (teristerial)

Radiasi primordial adalah radiasi alam yang berasal dari dalam bumi. Radiasi ini berasal dari mineral-mineral yang ada dalam batuan dan dari dalam tanah. Radiasi primordial sudah ada sejak terbentuknya bumi ini. Contohnya

adalah unsur ${}^6\text{C}^{12}$, ${}^{14}\text{Si}^{28}$, ${}^{20}\text{Ca}^{40}$ yang terdapat dalam jumlah banyak di alam dan mudah diperoleh. Radionuklida Primordial yang tergolong tua karena waktu paruh induknya diatas 100 juta tahun yaitu : Radionuklida deret Uranium, atau deret $4n+2$, Radionuklida deret Aktinium, atau deret $4n+3$, Radionuklida deret Thorium, atau deret $4n$. Ketiga deret radionuklida Primordial tersebut di atas merupakan pemancar alfa dan pemancar beta. Tiap deret memiliki satu anggota seri yang berupa gas mulia Radon (Rn) dan berakhir dengan isotop stabil Timbal (Pb).

Di antara radionuklida yang berasal dari batuan bumi tersebut yang merupakan gas mulia adalah Rn-222 dari deret Uranium, Rn-220 dari deret Thorium dan Rn-219 dari deret Aktinium. Radionuklida berupa gas mulia ini memiliki mobilitas yang besar, juga karena sifat kimianya yang inert, ia mudah sekali bermigrasi dari tempat asal dan berdifusi ke udara dan meluruh menjadi anak turunya berupa partikel yang memberi kontribusi radioaktivitas udara. Rn-219 dari induk U-238 yang kelimpahannya di bumi sangat sedikit, maka sumbangan Rn-219 terhadap radioaktivitas udara sangat kecil.

c. Radiasi Dalam Tubuh Manusia

Radiasi dalam tubuh manusia mengandung unsur radioaktif yang berasal dari lingkungannya. Radiasi alam masuk ke dalam tubuh manusia melalui pernapasan karena menghirup gas hasil peluruhan dari salah satu deret radionuklida Primordial. Contoh radiasi yang terdapat dalam tubuh manusia yaitu gas Radon dan Thoron. Radiasi alam juga dapat masuk ke dalam tubuh manusia

melalui makanan dan minuman. Makanan dan minuman yang berasal dari tanaman dan hewan pada umumnya mengandung Karbon-14 dan Kalium-40.

II.1.2 Unsur-Unsur Radioaktif alam

Unsur-unsur radioaktif alam dapat dikelompokkan ke dalam empat deret peluruhan, yaitu deret Thorium (deret dengan nomor massa $A=4n$, dengan n =bilangan bulat), deret Neptunium ($A=4n+1$), deret Uranium ($A=4n+2$) dan deret Aktinium ($A=4n+3$). Deret Thorium bermula dari isotop ^{232}Th yang memiliki waktu paro $1,4 \times 10^{10}$ tahun dan berakhir pada isotop Thorium (^{208}Pb). Deret Neptunium bermula dari isotop Plutonium-241 dengan waktu paro 13,2 tahun dan berakhir pada isotop Bismuth-209 (^{209}Bi). Deret Uranium bermula dari isotop ^{238}U dengan waktu paruh $4,5 \times 10^9$ tahun dan berakhir pada isotop Radium (^{206}Pb). Deret Aktinium bermula dari isotop ^{235}U dengan waktu paro 9×10^8 tahun dan berakhir pada isotop Aktinium (^{207}Pb). Keempat deret peluruhan diatas yang masih terdapat di alam hanya tinggal tiga deret peluruhan, yaitu deret Uranium, deret Thorium dan deret Aktinium, sedangkan deret Neptunium telah habis mengalami peluruhan karena waktu paro induknya relatif sangat pendek jika dibandingkan umur bumi yang sangat panjang^[8].

Penelitian kandungan Uranium di bumi menunjukkan bahwa bijih Uranium mengandung 99,28% ^{238}U , 0,71% ^{235}U dan 0,0058% ^{234}U . Mengingat waktu paro radioisotop Uranium dan Thorium dalam orde ribuan juta tahun, maka radioisotop hasil peluruhannya yang merupakan anggota dari masing-masing ketiga deret peluruhan radioaktif termasuk dalam kesetimbangan radioaktif. Hal

tersebut berarti bahwa banyaknya peluruhan persatuan waktu persatuan volume atau yang biasa disebut konsentrasi aktivitas (λn) adalah sama untuk masing-masing radioisotop hasil peluruhan dalam setiap deret peluruhan berurutan. Keempat deret radioaktif yakni deret Uranium, Aktinium, Thorium, dan Neptunium^[8].

II.1.3 Radioaktivitas Alam di Udara

Radioaktivitas alam di udara sebagian besar ditimbulkan oleh adanya kandungan uranium dan thorium di dalam tanah, karena nuklida tersebut ada dalam jumlah tertentu di seluruh kerak bumi, maka hasil-hasil peluruhannya selalu terbentuk setiap saat^[3]. Anak turun Radon dan Thoron merupakan partikel di udara, merupakan debu atmosferik berukuran antara (0,005 - 0,04) μi , dapat ditangkap oleh filter dan aktivitasnya dapat diketahui bila dicacah sesegera mungkin setelah pengambilan cuplikan udara. Bila pencacahan dilakukan dengan waktu tunda beberapa saat setelah pengambilan cuplikan udara, radioaktivitas terukur akan jauh lebih rendah, karena umur paruh anak turun Radon dan Thoron yang relatif^[7].

II.2 Konsep Udara dan pencemaran udara

Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstan. Kualitas dari udara yang telah berubah komposisinya dari komposisi udara alamiahnya adalah udara yang sudah tercemar sehingga tidak dapat menyangga

kehidupan. Komposisi udara di atmosfer yang menopang kehidupan manusia terdiri dari Nitrogen (N₂) sebesar 78,8 % dari volume udara kering , oksigen (O₂) sebesar 20,94 %, Argon (Ar) sebesar 0,02 % dan gas-gas lainnya serta berbagai gas dan partikel yang dihasilkan oleh aktivitas manusia dan alam^[7].

Menurut Peraturan pemerintah 41 Tahun 1999 Pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi dari komponen pencemar lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi^[8].

Sumber pencemar di udara dapat digolongkan menjadi dua kegiatan yaitu kegiatan yang bersifat alami (natural) dan kegiatan antropogenik. Pembangunan yang berkembang pesat dewasa ini, khususnya dalam industri dan teknologi, serta meningkatnya jumlah kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar fosil (minyak) menyebabkan udara yang kita hirup di sekitar kita menjadi tercemar oleh gas-gas buangan hasil pembakaran^[7].

Secara umum penyebab pencemaran udara ada 2 macam, yaitu.

1. Faktor internal (secara alamiah) contoh:

- a. Debu yang beterbangan akibat tiupan angin yang dikeluarkan dari letusan gunung berapi berikut gas-gas vulkanik.
- b. Proses pembusukan sampah organik, dll.

2. Faktor eksternal (karena ulah manusia), contoh:

- a. Hasil pembakaran bahan bakar fosil.
- b. Pemakaian zat-zat kimia yang disemprotkan ke udara.

II.3 Partikel udara

Perubahan lingkungan hidup pada umumnya disebabkan oleh pencemaran udara dimana masuknya zat pencemar (berbentuk gas dan partikel kecil yang dinamakan aerosol) ke dalam udara. Aerosol didefinisikan sebagai partikel cair maupun padat yang tersuspensi di dalam gas. Ukuran partikel aerosol antara 0,001 dan 100 μm . Karakteristik partikulat debu termasuk diantaranya ukuran, distribusi ukuran, bentuk kepadatan, kelengketan, sifat korosif, reaktivitas dan toksisitas. Salah satu karakteristik yang paling penting dari suspensi partikel debu adalah distribusi ukuran partikel aerosol. Ukuran partikel merupakan parameter terpenting untuk memberi ciri perilaku aerosol. Semua sifat aerosol sangat bergantung pada ukuran partikel. Partikel yang berdiameter kurang dari 2,5 μm umumnya dianggap halus dan yang lebih besar dari 2,5 μm dianggap kasar. Aerosol dapat digolongkan menjadi aerosol primer dan sekunder. Aerosol primer adalah aerosol yang dipancarkan langsung dari berbagai sumber, seperti debu yang terbawa oleh udara sebagai akibat adanya angin atau partikel asap yang dipancarkan dari cerobong. Aerosol sekunder merujuk pada partikel yang dihasilkan di dalam atmosfer yang mengalami reaksi kimia dari komponen gas^[5]. Partikel – partikel yang masuk ke dalam paru-paru dapat membahayakan manusia karena:

- a. Sifat kimia dan fisik dari partikel tersebut mungkin beracun.
- b. Partikel yang masuk tersebut bersifat inert (tidak bereaksi tetapi dapat menghambat pembersihan bahan-bahan lain yang berbahaya yang masuk ke paru-paru).

c. Partikel tersebut membawa molekul-molekul gas berbahaya dengan cara mengabsorpsi maupun mengadsorpsi yang menyebabkan molekul-molekul gas tersebut dapat mencapai dan tertinggal dalam paru-paru sensitif.

Efek menghirup *particulate matter* (PM) diantaranya asma, kanker paru-paru, penyakit kardiovaskular, dan kematian prematur. Ukuran partikel adalah faktor utama yang menentukan sejauh mana partikel masuk ke dalam saluran pernafasan, partikel biasanya disaring hidung dan tenggorokan sehingga tidak menimbulkan masalah, akan tetapi partikel dengan ukuran kecil dari 10 μm atau PM_{10} dapat mencapai dan mendiami bronchi dan paru-paru sehingga dapat menimbulkan masalah kesehatan. Di dalam paru-paru partikel dapat menimbulkan efek fisik langsung dan atau absorpsi ke dalam darah ^[10]

II.4 Debu

Debu adalah zat kimia padat yang tercipta sebagai akibat dari kekuatan-kekuatan alami atau mekanis seperti pengolahan, penghancuran, pelembutan, pengepakan yang cepat, peledakan, dan lain-lain baik organik maupun anorganik. Jadi, pada dasarnya pengertian debu adalah partikel yang berukuran kecil sebagai hasil dari proses alami maupun mekanik ^[11].

II.4.1 Sifat- sifat Debu

Partikel- partikel debu di udara mempunyai sifat: ^[12]

1. Sifat Pengendapan

Sifat pengendapan adalah sifat debu yang cenderung selalu mengendap karena gaya gravitasi bumi. Namun, karena kecilnya ukuran debu, sehingga relatif tetap berada di udara.

2. Sifat permukaan basah

Sifat permukaan debu akan cenderung selalu basah, dilapisi oleh lapisan air yang sangat tipis, sifat ini penting dalam pengendalian debu dalam tempat kerja.

3. Sifat penggumpalan

Permukaan debu selalu basah, sehingga dapat menempel satu sama lain dan dapat menggumpal. Turbulensi udara meningkatkan pembentukan penggumpalan debu. Oleh karena itu partikel debu bias merupakan inti daripada air yang berkonsentrasi sehingga menjadi besar.

4. Sifat listrik statis

Debu mempunyai sifat listrik statis yang dapat menarik partikel lain yang berlawanan. Dengan demikian, partikel dalam larutan debu mempercepat terjadinya proses pengumplan.

5. Sifat optis

Debu atau partikel basah atau lembab lainnya dapat memancarkan sinar yang dapat terlihat dalam kamar gelap, partikel debu yang berdiameter lebih besar dari 10 mikron dihasilkan dari proses-proses mekanis seperti erosi angin, penghancuran dan penyemprotan dan pelindasan benda-benda oleh kendaraan atau pejalan kaki.

II.5 HVAS (High Volume Air Sampler)

HVAS merupakan salah satu alat sampling udara, metode High Volume Sampling Metode ini digunakan untuk pengukuran total suspended partikulat matter (TSP, SPM), yaitu partikulat dengan diameter $\leq 100 \mu\text{m}$ ^[13].



Gambar 2.1: HVAS (High Volume Air Sampler)^[14]

Prinsip kerja alat HVAS yaitu udara dihisap melalui filter di dalam shelter menggunakan pompa vakum dengan laju alir tinggi sehingga partikel terkumpul di permukaan filter. Jumlah partikel yang terakumulasi dalam filter selama periode waktu tertentu dianalisa secara gravimetri. Laju alir dipantau saat periode pengujian 1200 L/min, selama 24 jam ^[15].

II.6 Spektrometer gamma

Spektrometer Gamma merupakan alat analisis yang digunakan untuk identifikasi radionuklida dengan cara mengamati spektrum karakteristik yang ditimbulkan oleh interaksi radiasi dengan materi detector ^[16].

Setiap radionuklida mempunyai tenaga yang berbeda dan tertentu dan bersifat spesifik. Hal ini digunakan sebagai dasar dalam analisis secara kualitatif. Analisis secara kuantitatif dilakukan berdasarkan nilai cacahan dari spektrum yang dipancarkan. Untuk keperluan analisis kualitatif maupun kuantitatif diperlukan CRM yang merupakan bahan acuan bersertifikat sehingga hasil pengujian tertelusur ke standar nasional maupun internasional. Sebelum digunakan dalam pengukuran, terlebih dahulu sistem spektrometer gamma dikalibrasi dengan sumber standar untuk menentukan hubungan antara nomor salur dan energi gamma (keV), secara umum hubungan antara nomor salur dengan energi gamma merupakan hubungan yang linier dan dapat ditentukan dengan :

$$Y = a + bx \qquad \text{pers 2.1}$$

dengan : Y adalah energi gamma (keV), a dan b adalah bilangan konstanta linier, dan X adalah nomor salur (channel) Efisiensi tiap-tiap energi gamma mempunyai nilai tertentu dan untuk menghitung efisiensi tiap-tiap energi digunakan.

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{N_s - N_{BG}}{A_t \cdot P_{\gamma}} \quad \text{Pers 2.2}$$

dengan: ε_{γ} adalah efisiensi pada energi gamma teramati (%), N_s adalah laju cacah standar (cacah per waktu), N_{BG} adalah laju cacah latar (cacah per waktu), A_t adalah aktivitas pada saat pengukuran (Bq), dan P_{γ} adalah yield energi gamma tertentu (%). Faktor geometri yang mempengaruhi pengukuran sampel lingkungan pada sistem spektrometer gamma di antaranya adalah faktor bentuk sumber. Hal ini terkait dengan wadah sumber, jarak antara detektor dengan sumber, komposisi matriks, dan rapat jenis sumber. Untuk memperoleh hasil yang baik pada pengukuran zat radioaktif dengan volume sampel yang besar memerlukan bentuk geometri sampel mendekati geometri standar. Untuk memperoleh sumber standar dengan bentuk geometri mendekati sampel relatif sulit dan mahal. Karena itu pada pemilihan wadah dan pengaturan jarak antara standar dengan detektor pada setiap pengukuran, diusahakan sama. Sinar gamma bila melewati suatu materi akan mengalami pengurangan intensitas yang disebabkan oleh penyerapan bahan. Besarnya penyerapan bahan disebut koefisien serapan diri (self absorption coefficient). Konsentrasi zat radioaktif dalam sampel pada pengukuran dengan sistem spektrometer gamma ditentukan dengan Persamaan (2.3) dan ditampilkan seperti pada Persamaan (2.4).

$$C_{Avg} = \frac{N_s/t_s - N_{BG}/t_s}{\varepsilon_{\gamma} \cdot P_{\gamma} \cdot W_{sp}} \quad \text{pers 2.3}$$

$$C_{SP} = C_{avg} \pm U_T \quad \text{pers 2.4}$$

dengan : NSp adalah laju cacah sampel (cacah per detik), NBG adalah laju cacah latar (cacah per detik), ϵ_γ adalah efisiensi pada energi gamma teramati (%), p_γ adalah yield dari energi gamma teramati (%), dan wSp adalah berat sampel (kg), CSp adalah konsentrasi zat radioaktif dalam sampel terkoreksi (Bq/kg), Cavg adalah konsentrasi zat radioaktif dalam sampel rata-rata (Bq/kg), dan UT adalah ketidakpastian pengukuran yang diperluas (Bq/kg). UT atau ketidakpastian pengukuran konsentrasi yang diperluas dapat dilihat pada Persamaan (2.5)

$$UT = C_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{U_s^2 + U_B^2}{N_S - N_B}\right)^2 + \left(\frac{u_E}{\epsilon_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u_p}{p_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u_w}{w_{sp}}\right)^2} \quad \text{pers 2.5}$$

dengan : U_s adalah ketidakpastian pencacahan sampel (%), U_B adalah ketidakpastian pencacahan latar (%), u_E adalah ketidakpastian dari efisiensi pada energi teramati (%), u_p adalah ketidakpastian dari yield (%), dan u_w adalah ketidakpastian dari berat sampel (%)^[17].

Kemampuan suatu alat untuk melakukan pengukuran berbeda-beda tergantung pada spesifikasi dan kinerja alat tersebut. Besarnya konsentrasi minimum yang dapat dideteksi (MDC, Minimum Detectable Concentration) untuk suatu system spectrometer gamma di pengaruhi oleh efisiensi pencacahan, cacah latar dan berat sampel. Untuk menghitung MDC dengan tingkat kepercayaan 95% di tentukan dengan persamaan^[17]:

$$MDC = 4,66 \cdot \frac{\sqrt{\frac{NBG}{T_{BG}^2}}}{\epsilon_\gamma \cdot P_\gamma \cdot Fk \cdot w} \quad \text{Pers 2.6}$$

Dengan N_B adalah laju cacah latar (cps), T_B adalah waktu cacah latar (detik), ϵ_γ Efisiensi pencacahan (%), P_γ adalah kelimpahan energy gamma (%), F_k adalah factor koreksi serapan diri dan w adalah volume atau berat sampel (lt/Kg).

Penerimaan dosis efektif dari radiasi alami oleh manusia telah diestimasikan oleh United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), yaitu antara 1,0 - 5,0 mSv per tahun, dengan rerata sebesar 2,4 mSv per tahun. Jika dosis efektif yang diterima oleh manusia melebihi dari batas ambang yang telah ditentukan maka dapat mengakibatkan atau memberikan efek bagi kesehatan manusia baik efek somatik maupun efek genetic, untuk menghitung dosis efektif dapat dilihat pada persamaan 2.7 :

$$ED_a = C \times IR \times DCF \quad \text{Pers 2.7}$$

Dengan ED_a adalah dosis yang diterima masyarakat per tahun (mSv/lt), C_s adalah konsentrasi radionuklida dalam partikulat udara (mBq/m³), IR adalah jumlah rata-rata tingkat standar pernapasan, dan DCF adalah factor konversi dosis radionuklida (mSv/Bq) masing-masing nilainya untuk ²²⁶Ra yaitu $3,2 \times 10^{-6}$, ²³²Th yaitu $4,2 \times 10^{-5}$ dan ⁴⁰K yaitu $2,1 \times 10^{-9}$.

Rangkaian utama dari susunan spektrometer gamma yaitu^[18]:

II.6.1 Detektor

Detektor yang digunakan adalah detektor germanium kemurnian tinggi. Germanium dianggap sebagai kristal murni ideal atau kristal yang sama sekali tidak mengandung zat pengotor (impurity). Daya hantar listriknya disebabkan oleh gerakan elektron dari pita valensi yang dikenai medan luar sehingga cukup energi untuk melompat naik ke pita konduksi dan mengakibatkan putusya ikatan

kovalen. Dengan putusanya ikatan kovalen ini elektron akan bebas bergerak membawa muatannya. Tiap elektron yang pindah dari pita valensi menuju pita konduksi akan meninggalkan sebuah lubang. Elektron lain dari atom di sebelahnya akan masuk ke dalam lubang tersebut dengan meninggalkan lubang yang baru dan seterusnya. Dalam pengaruh medan listrik luar, elektron akan bergerak ke arah potensial yang tinggi sedangkan lubang akan bergerak ke arah potensial yang rendah, demikian hal ini berlangsung terus-menerus. Beda potensial inilah yang akan menimbulkan pulsa. Tinggi pulsa yang dihasilkan akan sebanding dengan energi foton gamma yang berinteraksi dengan detektor. Karena kesenjangan tenaga dalam kristal germanium sangat kecil ($\Delta E = 0,7 \text{ eV}$), maka untuk mengatasi arus bocor balik, detektor harus dioperasikan pada suhu yang rendah. Apabila hal ini tidak dilakukan arus bocor akan merusak kemampuan detektor untuk memisahkan dua puncak energi gamma yang berdekatan. Medium pendingin yang sesuai untuk itu adalah Hidrogen cair yang mempunyai suhu 77° K .

Ada dua macam bentuk detektor germanium kemurnian tinggi, yaitu bentuk planar dan coaxial. Namun dalam penelitian ini digunakan bentuk coaxial, karena bentuk ini mempunyai dua keunggulan dibandingkan detektor bentuk planar, yaitu, Detektor coaxial dapat dibuat dalam volume yang relatif besar, dengan demikian akan mempunyai efisiensi tinggi kemudian Detektor coaxial juga mempunyai kapasitas yang tidak berbanding lurus terhadap luas detektor seperti yang berlaku pada detektor planar. Karena derau penguat awal merupakan

fungsi kapasitas detektor, maka detektor coaxial akan menghasilkan derau elektronik yang rendah.

II.6.2 Elektronik

Yang termasuk elektronik adalah amplifier (penguat), sumber tegangan, ADC (Analog to Digital Converter/Pengubah analog ke digital) dan penyimpanan data ^[18].

II.6.2.1 Sumber Tegangan

Sumber tegangan (sumber daya) dalam alat elektronik spektrometer gamma dibagi dalam dua bagian, yaitu: sumber tegangan yang diperlukan untuk alat-alat elektronik dan sumber tegangan untuk detektor. Sumber tegangan untuk alat-alat elektronik disebut power supply (sumber daya), sedangkan sumber tegangan untuk detektor disebut High Voltage Bias Supply (Sumber Tegangan Tinggi). Stabilitas regulasi harus stabil dalam batas listrik jaringan. Kerangka untuk menempatkan modul-modul alat elektronik tersebut disebut BIN.

II.6.2.2 Penguat

Pulsa listrik yang dihasilkan detektor adalah lemah, karena impedansinya tinggi untuk voltase yang dipakai. Akibat batasan tempat, penguat harus ditempatkan jauh dari detektor. Untuk meminimalkan kapasitansi akibat kabel penghubung, perlu menempatkan penguat awal, sedekat-dekatnya dengan detektor. Oleh sebab itu memerlukan kabel penghubung. Sifat khas yang penting dari penguat adalah linearitas, bentuk pulsa yang keluar, dan stabilitas penguatan dan tingkat derau. Untuk sistem yang modern, besar maksimum pulsa keluaran adalah 7 sampai 10 volt. Biasanya penguat mempunyai pengeluaran unipolar

(bagian puncak dari sinyal adalah semua positif atau semua negatif. Pengaturan yang harus hati-hati dalam penguat adalah pemilihan konstanta waktu pembentukan pulsa yang akan menentukan lebar pulsa. Stabilitas penguatan (gain) dari penguat sangat penting. Untuk penguat modern yang dirancang untuk detektor semikonduktor, tingkat derau cukup rendah sehingga tidak berpengaruh pada resolusi detektor. Resolusi ini ditentukan terutama oleh karakteristik detektor dan penguat awal.

II.6.2.3 Pengubah Analog ke Digital dan Penyimpan Data

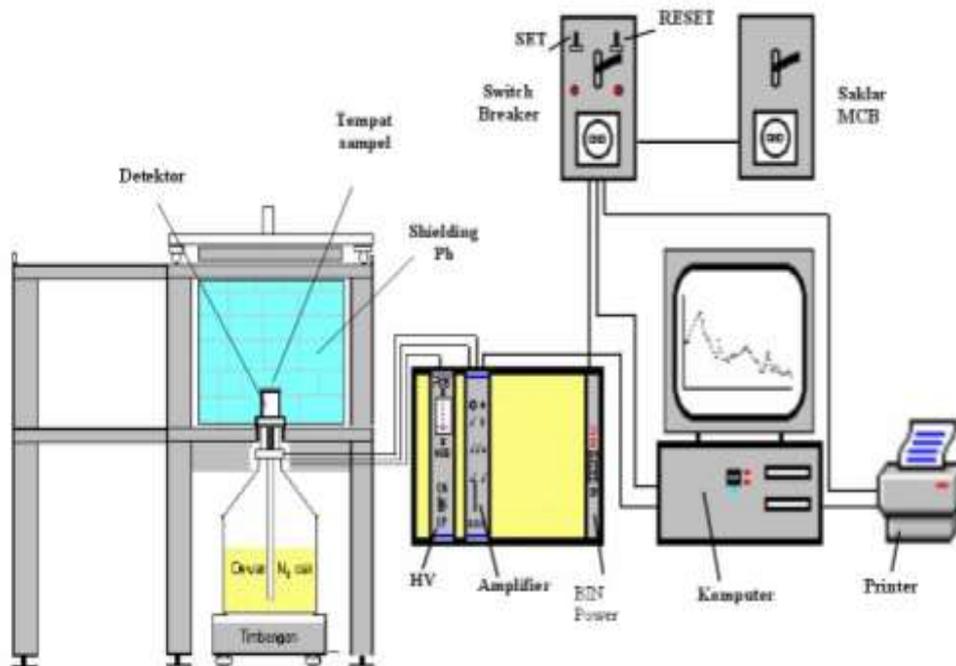
Tugas utama spektrometer gamma adalah mengukur penyebaran pulsa tinggi dari keluaran penguat. Ini dilakukan oleh pengubah analog ke digital (Analog to Digital Converter) yang mengubah informasi keluaran analog dari penguat ke dalam besaran digital. Informasi dari ADC perlu disimpan dalam sebuah susunan alat yang akan memberikan jumlah cacah kumulatif dalam masing-masing channel. Secara sederhana, ini dilakukan dengan suatu alat yang akan mengisi suatu channel bergantung pada tinggi pulsa yang akan diukur. Untuk spektrum pulsa tinggi, sistem biasanya menyimpan lama pencacahan dalam salah satu channel dari channel pertama spektrum tersebut. Pada akhir pencacahan, data dari lokasi memori ini dapat dibaca dalam sebuah bahan penyimpanan, misalnya pita magnetik. Untuk sistem yang modern, biasanya melibatkan komputer serba guna yang diprogram untuk menerima keluaran ADC, mengatur waktu pencacahan, menampilkan data, melakukan pemrosesan data, dan mengubah data yang diperlukan ke alat lain.

II.6.3 Sumber Foton

Ada dua macam sumber foton, yaitu ^[18]:

- a. Sumber yang berisi bahan radioaktif, sehingga memancarkan radiasi terus- menerus.
- b. Sumber yang memancarkan foton hanya ketika diiradiasi oleh partikel atau foton dari luar.

Sumber radioaktif biasanya mengandung atom-atom radioaktif di dalam bahan pembawa yang stabil dari unsur yang sama atau dalam matrik dari unsur atau senyawa lain. Sumber jenis kedua, atom-atom atau inti bahan tidak aktif dieksitasi dengan radiasi eksternal dan dengan segera memancarkan radiasi gamma. Misalnya, aluminium yang ditembaki proton akan memancarkan sinar gamma dari reaksi $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{28}\text{Si}$.



Gambar 2.2 Skema sistem spektrometer gamma dengan detektor HPGe^[19].

II.7 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Pada hakekatnya spektrometer gamma adalah suatu metode pengukuran pemancar gamma yang bersifat relatif, sehingga sebelum perangkat spektrometer gamma dapat dipakai untuk pengukuran suatu sampel yang belum diketahui jenis radionuklidanya yang terkandung dalam sampel tersebut, peralatan ini perlu dikalibrasi lebih dahulu dengan sumber standar pemancar gamma yang telah diketahui tenaga dan aktivitasnya. Kalibrasi ini meliputi ^[20]:

II.7.1 Kalibrasi Energi

Dengan menggunakan peralatan penganalisa salur ganda, maka akan diperoleh bentuk spektrum energi dari suatu sumber radioaktif dan setiap energi pemancar radiasi gamma akan memberikan puncaknya sesuai dengan besar radiasi energi gamma yang dipancarkan dari sumbernya. Pulsa-pulsa yang dihasilkan oleh detektor dipertinggi dengan menggunakan amplifier atau penguat. Tinggi pulsa yang dihasilkan tersebut setara dengan sinar gamma yang mengenai detektor. Cacah- cacah pulsa yang mempunyai tinggi sama dicatat dalam suatu salur dengan nomor tertentu. Dengan demikian, nomor salur penganalisa salur ganda juga sebanding dengan energi sinar gamma. Pengukuran dapat dilakukan dengan jalan mencacah beberapa sumber radioaktif standar yaitu sumber yang sudah diketahui tenaganya dengan tepat. Dari sini didapatkan hubungan yang linier antara energi sinar gamma dari standar terhadap nomor salur, yang biasanya disebut dengan kurva kalibrasi energi.

II.7.2 Kalibrasi Efisiensi

Suatu sumber radioaktif selalu memancarkan sinar radioaktif ke segala arah. Puncak spektrum yang dihasilkan detektor akibat radiasi, tidak peka terhadap radiasi hambur dan latar belakang. Dalam spektrometer gamma, laju cacah dinyatakan dalam satuan cpd (cacah per detik). Harga cacah ini tidak mencerminkan aktivitas sesungguhnya dari sumber dan bergantung pada efisiensi deteksi dan intensitas mutlak energi radiasi gamma yang diukur. Harga laju cacah ini didapatkan dengan jalan menentukan luas puncak serapan total suatu puncak gamma dan membaginya dengan waktu pencacahan..

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Waktu dan Tempat penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan April – Juni 2017, di Laboratorium Lingkungan dan Laboratorium Spektrometer gamma, Pusat Teknologi dan Keselamatan Radiasi-BATAN, Jakarta Selatan.

III.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Neraca berfungsi untuk menimbang kertas filter sebelum dan sesudah pengambilan sampel.
2. Desikator berfungsi untuk mengurangi kadar air pada sampel.
3. GPS berfungsi untuk menentukan titik pengambilan sampel.
4. HVAS berfungsi sebagai alat untuk mengambil sampel udara.
5. Spektrometer gamma berfungsi alat untuk mencacah sampel.
6. Plastik sampel berfungsi untuk tempat menyimpan sampel.
7. Label berfungsi memberi kode pada sampel.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Kertas filter yang berfungsi untuk menyaring udara.
2. Sampel udara di lima tempat yang berbeda.

III.3 Prosedur Kerja

Adapun prosedur penelitian ini adalah:

III.3.1 Sampling

Pengambilan sampel di lima titik lokasi bagian perkotaan dan kawasan industri dengan satu tempat mewakili satu sampel, sebelum dan setelah pengambilan sampel kertas filter di timbang terlebih dahulu, Pengambilan sampel udara dengan ukuran TSP (Total Suspended Particulat) dilakukan dengan menggunakan HVAS (High Volume Air Sampler) yang beroperasi selama 24 jam.

III.3.2 Preparasi

Sampel udara ukuran TSP (debu udara yang melekat dalam kertas filter) dikeluarkan dari HVAS catat volume totalnya lalu dilipat, dan dimasukkan ke dalam plastik klip setelah itu disimpan di dalam desikator selama 30 hari.

III.3.3 Kalibrasi spektrometer gamma

Sebelum dilakukan pengukuran terlebih dahulu dilakukan kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi. Kalibrasi energi dilakukan untuk menentukan hubungan antara nomor salur dengan energi radiasi gamma pada kondisi kerja yang sama serta mencacah sumber radioaktif standar yang sudah diketahui energinya dengan tepat. Sedangkan, Kalibrasi efisiensi digunakan untuk analisa kuantitatif. Analisa kuantitatif dilakukan untuk menentukan aktivitas (kadar) radionuklida yang terkandung dalam sampel.

III.3.4 Pengukuran Laju Cacah Sampel

Setelah disimpan selama 30 hari, kemudian dilakukan pengukuran laju cacah pada masing-masing sampel, pengukuran laju cacah pada sampel menggunakan spektrometer gamma dengan detector kemurnian tinggi (HPGe) yang dihubungkan ke penganalisis saluran ganda (MCA) untuk menganalisis data.

III.3.5 Perhitungan Konsentrasi Pada Sampel

Setelah dilakukan pengukuran dan analisis kandungan radionuklida alam maka dilakukan perhitungan konsentrasi ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , pada masing- masing sampel sebagai data untuk menghitung indeks bahayanya. Perhitungan konsentrasi dalam sampel dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$C_{Avg} = \frac{\frac{N_s}{t_s} - \frac{N_{BG}}{t_s}}{\varepsilon_\gamma \cdot P_\gamma \cdot W_{sp}}$$

kemudian melakukan evaluasi dari hasil perhitungan konsentrasi radioaktif dengan metode statistik, Adapun persamaan yang digunakan yaitu:

$$UT = C_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{U_S^2 + U_B^2}{N_S - N_B}\right)^2 + \left(\frac{u_E}{\varepsilon_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u_p}{p_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u_w}{W_{sp}}\right)^2}$$

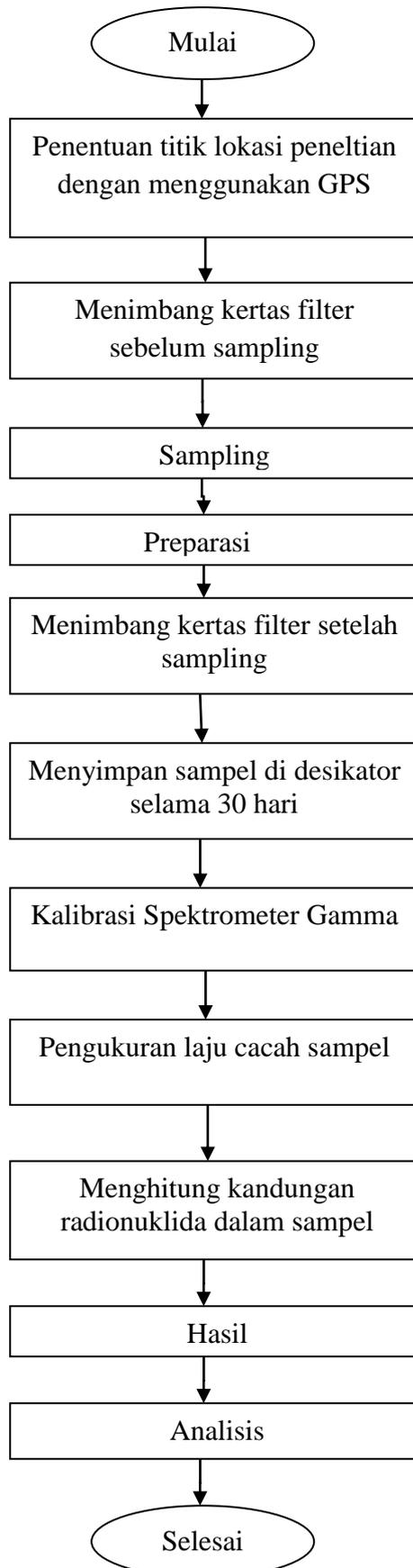
Dimana c adalah konsentrasi ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , dalam sampel, u_{Sp} adalah ketidakpastian pencacahan sampel (%), u_B adalah ketidakpastian pencacahan latar (%), U_E adalah ketidakpastian dari efisiensi pada energi teramati (%), U_p adalah ketidakpastian dari yield (%), dan U_w adalah ketidakpastian dari berat sampel (%).

III.3.4 Perhitungan Dosis Efektif

Setelah mendapatkan nilai konsentrasi radionuklida alam pada sampel maka dapat dihitung nilai dosis efektif. Perhitungan dosis efektif dengan menggunakan persamaan:

$$ED_a = C \times IR \times DCF$$

III.4 Bagan Alir penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.I Hasil Pengukuran Partikulat Udara

Pada penelitian ini dilakukan sampling pada partikulat udara di lima lokasi yang berbeda dengan menggunakan Haigh Volume Air Sampler (HVAS) dengan waktu sampling selama 24 Jam untuk mengetahui volume dan massa debu. Adapun Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Partikulat udara

Titik Sampel	Lokasi Penelitian	Titik Koordinat	Volume Sampel (m ³)	Massa Sampel (mg)
A	Jln. Racing Centre, BMKG Panaikang Makassar	S ⁰ 8' 34.89" S 119 ⁰ 27' 8.09" E	1439,8	50,35
B	Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Unhas	S ⁰ 7,54.16" S 119 ⁰ 29' 10.00" E	1440,9	120,11
C	Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep	4 ⁰ 46' 10.38" S 119 ⁰ 39' 36. 63 ⁰ E	1439,8	86,97
D	PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima	S ⁰ 6'13.20 ⁰ S 119 ⁰ 30' 38. 10" E	1439,8	314,31
E	Jl, Dr.Ratulangi, BMKG Maros	4 ⁰ 59'52. 14" S 119 ⁰ 34' 20. 10" E	1439,8	80,11

Berdasarkan tabel diatas menunjukkan berat sampel memiliki perbedaan pada titik lokasi dengan titik lokasi lainnya, hal tersebut disebabkan karena beberapa factor

pada saat pengambilan sampel seperti kondisi cuaca, arah angin, dan lain-lain. Berat sampel tertinggi terdapat lokasi titik sampel D dengan nilai 314,31 mg, hal ini kemungkinan disebabkan karena ramainya kendaraan bermotor serta tingginya aktivitas penduduk di lokasi tersebut dan titik lokasi sampling berada dalam kawasan industri, untuk berat sampel terendah yaitu pada titik sampel A dengan nilai 50,35 mg, hal ini disebabkan karena cuaca yang kurang baik pada saat sampling.

IV.2 Hasil Perhitungan Konsentrasi

Setelah pengambilan sampel maka dilakukan pengukuran laju cacah sampel dengan mengukur menggunakan spektrometer gamma dengan detector germanium kemurnian tinggi (HPGe). Hasil pengukuran laju cacah sampel pada spektrometer gamma berupa spectrum dapat dilihat di lampiran 1, kemudian laju cacah sampel menunjukkan besarnya aktivitas suatu radionuklida per satuan massa (mBq/m^3). Nilai konsentrasi Radionuklida alam dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 dan untuk ketidakpastian pengukuran dihitung dengan menggunakan persamaan 2.5. Hasil pengukuran menunjukkan berbagai macam radionuklida terdeteksi dalam sampel tetapi pada penelitian hanya menganalisis unsur radionuklida antar lain ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K . Adapun hasil perhitungan konsentrasi dalam sampel serta ketidakpastian pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan Konsentrasi Radionuklida dalam Partikulat udara.

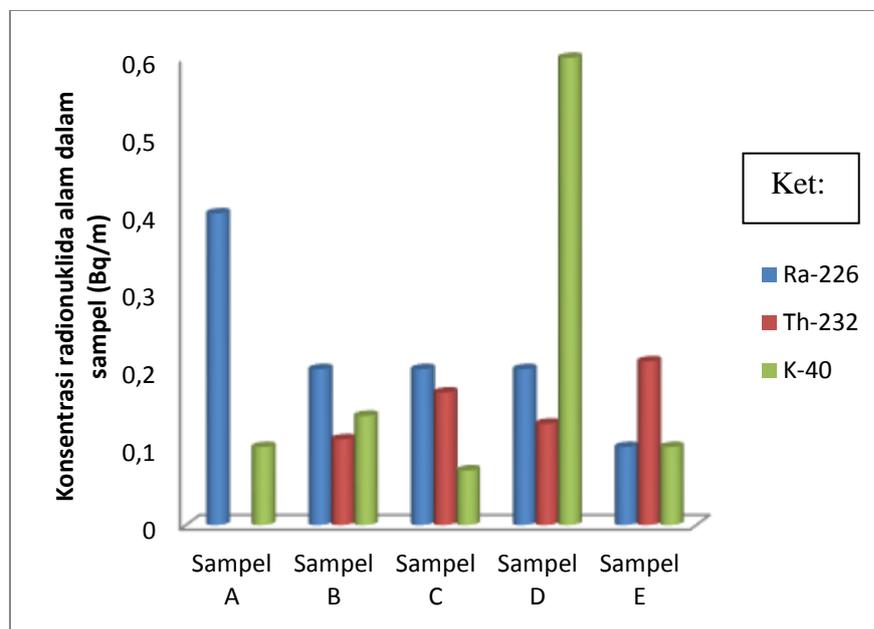
Kode Sampel	Lokasi	Hasil Konsentrasi (mBq/m ³)		
		²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
A	Jln.Racing Centre, BMKG Panaikang Makassar	0,40 ± 0,05	≤ 0,07	0,10 ± 0,01
B	Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Unhas	0,20 ± 0,02	0,11 ± 0,01	0,14 ± 0,01
C	Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep	0,20 ± 0,02	0,17 ± 0,01	0,07 ± 0,008
D	PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima	0,20 ± 0,02	0,13 ± 0,01	0,60 ± 0,07
E	Jl, Dr.Ratulangi, BMKG Maros	0,10 ± 0,01	0,21 ± 0,02	0,10 ± 0,01

Keterangan: ≤ MDC berarti tidak terdeteksi

Berdasarkan tabel 4.2, Nilai konsentrasi radionuklida alam yang diperoleh pada setiap lokasi memiliki nilai yang bervariasi tetapi tidak ada perbedaan yang signifikan. Nilai konsentrasi radionuklida alam yang tertinggi pada unsur ²²⁶Ra pada titik sampel A yaitu 0,40 ± 0,05 mBq/m³, sedangkan Nilai konsentrasi yang tertinggi pada unsur ²³²Th dan ⁴⁰K terdapat pada titik sampel E dan D dengan nilai konsentrasi berturut-turut 0,21 ± 0,02 mBq/m³ dan 0,60 ± 0,07 mBq/m³. kemudian dari semua lokasi, titik sampel yang terendah yaitu pada unsur ⁴⁰K pada titik sampel C dengan nilai konsentrasi 0,07 ± 0,008 mBq/m³. Pada titik sampel A pada unsur ²³²Th sampel tidak terdeteksi karena nilai konsentrasi lebih kecil dibandingkan nilai Minimum detectable concentration (MDC) sebaliknya

jika nilai konsentrasi lebih besar dari nilai MDC maka sampel akan terdeteksi, untuk hasil perhitungan dapat dilihat di lampiran 4. Adapun perhitungan MDC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.6.

Berikut ini histogram yang menunjukkan nilai konsentrasi yang terbesar hingga terkecil yang terkandung pada masing-masing sampel.



Gambar 4.1 Histogram Konsentrasi ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K dalam partikulat udara

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa pada setiap lokasi, unsur yang dominan tertinggi sangat bervariasi. Meningkatnya radioaktivitas di lingkungan udara yang disebabkan oleh thorium dan anak luruhnya yang melekat di debu udara lingkungan pabrik dan kawasan pemukiman penduduk akan menimbulkan potensi bahaya radiasi interna bila debu radioaktif tersebut terhisap oleh pekerja dan penduduk, kemudian terbawa masuk ke paru-paru, tingkat bahaya radiasi ini dapat

diindikasikan dari besaran tingkat kerja dan dosis ekuivalen efektif yang diterima pekerja dan penduduk.

IV.3 Hasil perhitungan Dosis efektif

Setelah mendapatkan nilai konsentrasi radionuklida alam pada sampel maka dapat dihitung nilai dosis efektif perorangan dengan mengestimasi bahwa tingkat standar pernapasan menurut *Internasional comitte of Radiation protection (ICRP)* adalah 8.130 m^3 per tahun^[21], untuk perhitungan dosis efektif dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7. Adapun hasil nilai dosis efektif dapat dilihat pada tabel 4.3.

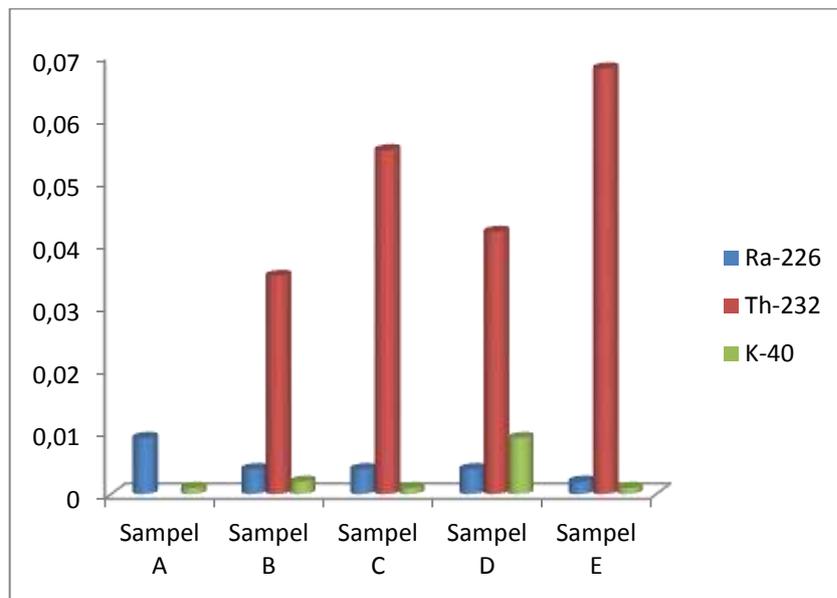
Tabel 4.3 Dosis efektif perorangan

Kode Sampel	Lokasi	Dosis Efektif (mSv/Thn)		
		²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
A	Jln.Racing Centre, BMKG Panaikang Makassar	0,009	TTD	0,001
B	Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Unhas	0,004	0,035	0,002
C	Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep	0,004	0,055	0,001
D	PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima	0,004	0,042	0,009
E	Jl, Dr.Ratulangi, BMKG Maros	0,002	0,068	0,001

Berdasarkan Tabel di atas unsur radionuklida alam ²³² Th yang memiliki dosis efektif yang tertinggi yaitu pada sampel E dengan nilai 0,068 mSv, sedangkan

pada unsur ^{226}Ra dan ^{40}K terdapat pada sampel A dan D dengan nilai berturut-turut 0,009 mSv dan 0,009 mSv.

Berikut ini histogram yang menunjukkan nilai dosis efektif yang tertinggi hingga terkecil yang terkandung pada masing-masing sampel



Gambar 4.2 Histogram nilai dosis Efektif

Berdasarkan histogram diatas nilai dosis efektif rata-rata dari semua unsur yang diperoleh semuanya masih berada di bawah ambang batas yang telah ditentukan oleh United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) yaitu sekitar 1 mSv/th.

BAB V

PENUTUP

V.1 Kesimpulan

1. Hasil perhitungan konsentrasi radionuklida alam dalam partikulat udara diperoleh Nilai konsentrasi yang tertinggi dari semua lokasi yaitu pada unsur ^{40}K pada lokasi PT. Bogatama Marinusa (BOMAR), Kima dengan nilai konsentrasi $0,60 \pm 0,07 \text{ mBq/m}^3$. Adapun nilai konsentrasi yang terendah pada unsur ^{226}Ra terdapat pada lokasi Jl, Dr.Ratulangi, BMKG Maros yaitu $0,10 \pm 0,01 \text{ mBq/m}^3$ sedangkan untuk unsur ^{232}Th dan ^{40}K terdapat pada lokasi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Unhas dan Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep berturut-turut dengan nilai konsentrasi yaitu $0,11 \pm 0,01 \text{ mBq/m}^3$ dan $0,07 \pm 0,008 \text{ mBq/m}^3$.

2. Dari hasil perhitungan dosis efektif diperoleh nilai tertinggi dari semua lokasi yaitu pada unsur ^{232}Th dengan nilai $0,068 \text{ mSv}$. Menurut United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) batasan dosis per tahun yaitu 1 mSv . Berdasarkan data yang diperoleh interpretasi indeks bahaya masih di bawah ambang batas, karena diperoleh dosis efektif ≤ 1 . Jadi, sampai sekarang dapat dikatakan bahwa lokasi tersebut masih aman,.

V.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian selanjutnya dengan titik pengambilan sampel lokasi yang berbeda karena masih banyak tempat yang berpotensi sebagai sumber

pencemaran udara, dan juga sebagai bahan perbandingan dengan penelitian sebelumnya.

2. Pengukuran dilakukan secara berkala dengan rentang waktu tertentu agar dapat diketahui lokasi tersebut aman dari segi radioaktifitasnya.

Daftar Pustaka

- [1] Lubis, Erwansyah. 2003. *Keselamatan Radiasi Lingkungan dalam Pengelolaan Limbah Radioaktif di Indonesia*. Teknologi Pengelolaan Limbah.
- [2] United Nations Scientific Committee on Effect of Radiation (UNSCEAR). 1993. *Sources and Effect of Ionizing Radiation*. UNSCEAR Report to the General Assembly. UN, New York.
- [3] Rina.1999. *Pemantauan sumber paparan radiasi di PPTA Serpong*.
- [4] Iswantoro. 2013. *Sampling dan Preparasi Sampel Polutan Udara di Lingkungan PLTU Paiton Probolinggo*. Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan - BATAN
- [5] Agus Gindo, dkk. 2007. *Pengukuran partikel udara ambien (TSP, PM10,PM2 disekitar calon lokas PLTN semenanjung Lemehabang*.Pusat Teknologi Limbah Radioaktif. BATAN. Jakarta.
- [6] BAPETEN. 1999. Keputusan kepala badan pengawas tenaga nuklir No. 02/Ka-BAPETEN/V-99 *Tentang Radioaktivitas*.Diakses pada tanggal 19 April 2017.
- [7] Khanifatun. 2007. *Pemantauan Radioaktivitas Udara di Ruang Reaktor Kartini*.Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.

- [8] Lamada, M. Dewang, S. 2011, *Analisis konsentrasi Gas Radon dan Thoron Di Kota Makassar*.
- [9] Peraturan Pemerintah No 41 Tahun 1999. *Tentang Pencemaran Udara*. Diakses pada tanggal 17 April 2017.
- [10] Dewi Aprianti. 2011. *Analisis pengaruh tingkat volume lalu lintas kendaraan di pintu tol terhadap konsentrasi total suspended particulate (TSP) dan pengukuran konsentrasi timbal di udara ambien*. Fakultas teknik lingkungan Universitas Indonesia.
- [11] Ruman. 2017. *Analisis kandungan Debu di kota Makassar XRF (X-ray Fluoresence)*. Departemen Fisika Fakultas Matematika dan ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.
- [12] Siti nihayatul, dkk. 2010. *Studi kandungan Pb dan kadar debu pada daun angkana dan rumput gajah mini di pusat kota Tangerang*.
- [13] Muhammad Arief. 2010. *Metode sampling*. Mata kuliah Hygiene IKK354 Peminatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja. Universitas Esa Unggul diakses pada tanggal 17 April 2017.
- [14] Sibata. 2017. "High Volume Air Sampler, Model HV-700R, HV-1000R". http://sibata.co.jp/english/Product/img/environmental/20121002HV-700R,1000R__en.pdf
- [15] Isa, Muctar. R, Hamonangan, E. 2014. *Measurement Comparison Of Particulate Concentration In Ambien Air Using HVAS and Gent Stacked Filter unit Sampler*.
- [16] Noviarthy, dkk. 2011. *Pengaruh waktu pengambilan sampling pada analisis unsur radioaktif di udara dengan menggunakan*

spektrometergamma. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang

- [17] Wahyudi, dkk. 2007. *Pengaruh matriks terhadap pencacahan sampel menggunakan spectrometer gamma*. Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-BATAN.
- [18] Tarpiah.2006. *Perkiraan Paparan Radiasi Eksternal dari Pemakaian Beton Ringan Aerasi Hebel Untuk Bahan Bangunan*. Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan ilmu Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor
- [19] Hermawan.2010. *Pengaruh efek geometri pada kalibrasi efisiensi detector semikonduktor HPGe menggunakan spectrometer gamma*.Pusat teknologi keselamatan dan meterologi radiasi – BATAN.
- [20] Retno TK. 1992. *Pengukuran Radionuklida Alam Pada Bahan Bangunan Menggunakan Spektrometer Gamma*. Universitas Brawijaya Fakultas Matematika dan Ilmu Pangetahuan alam.
- [21] *Internasional comitte of Radiation protection (ICRP) publication 71 (1995b)*

Lampiran 1.1 Tabel laju cacah Sampel A dan Background GEM 60-4

Detector #1 ACQ 18-Mei-2017 at 16:08:10 RT = 61217.1 LT = 61200.0										
GEM 60-4										
Filter udara PANAİKANG, seal 18-4-2017 w=0,05035										
ROI #	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	235.61	239.06	819	150	38	237.47	1.17	1.66	Pb-212	238.63
2	292.24	296.10	837	340	38	294.26	0.95	2.00	Pb-214	295.22
3	335.47	339.33	396	49	29	337.93	0.43	0.95	Pb-212	338.63
4	348.66	353.33	958	558	41	351.00	1.38	2.01	Pb-214	351.99
5	580.17	585.44	299	78	29	583.20	0.60	1.83	Tl-208	583.19
6	606.33	611.61	677	497	33	609.04	1.40	1.94	Bi-214	609.32
7	658.66	664.14	189	-12	26	660.89	0.20	0.32	Cs-137	661.66
8	907.86	913.74	165	-30	27	909.69	0.24	0.41	Ac-228	911.16
9	965.83	971.71	144	19	22	968.67	0.20	0.32	Ac-228	968.97
10	#REF!	997.45	137	21	22	1001.10	0.24	0.38	U-238	1001.00
11	1117.22	1122.89	221	129	21	1120.12	1.28	2.66	Bi-214	1120.28
12	1456.29	1464.39	558	483	30	1460.70	1.81	2.61	K-40	1460.75
13	1759.72	1768.63	210	97	28	1764.08	0.63	3.01	Bi-214	1764.51
14	2606.86	2618.17	227	170	25	2613.14	1.81	3.69	Tl-208	2614.53

Detector #4 ACQ 25-Jan-16 at 16:23:45 RT = 63137.5 LT = 61200.0										
GEM 60-4										
Latar										
Detector #1 ACQ 04-Mar-2011 at 16:39:42 RT = 61226.2 LT = 61200.0										
ROI #	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	45.57	48.82	586	23	33	47.37	0.25	0.47	Pb-210	46.539
2	60.60	63.44	549	24	28	61.41	0.20	0.32	Th-234	63.29
3	65.47	68.32	541	44	28	66.29	0.20	0.32	Th-230	67.672
4	91.06	93.29	670	38	25	92.38	0.32	0.50	Th-234	92.8
5	238.29	241.54	784	115	36	239.85	0.98	1.31	Pb-212	238.63
6	294.47	297.92	801	318	35	296.27	1.11	1.46	Pb-214	295.22
7	337.67	341.73	415	30	31	341.08	0.24	0.64	Pb-212	338.63
8	351.06	355.52	981	494	43	352.86	1.15	1.53	Pb-214	351.99
9	581.60	586.47	276	88	26	584.00	0.25	0.99	Tl-208	583.19
10	607.58	611.64	664	489	30	609.85	1.40	2.23	Bi-214	609.32
11	659.57	665.46	229	14	29	660.62	0.25	0.46	Cs-137	661.66
12	908.04	913.73	130	14	21	911.93	0.26	0.77	Ac-228	911.16
13	965.98	971.67	148	22	22	967.20	0.23	0.37	Ac-228	968.97
14	995.87	1001.56	113	21	19	996.93	0.52	0.70	U-238	1001.00
15	1116.46	1122.97	238	139	24	1120.10	1.12	2.22	Bi-214	1120.28
16	1456.37	1463.70	276	202	24	1460.56	1.86	2.99	K-40	1460.75
17	1760.59	1767.93	186	100	23	1764.00	1.65	2.95	Bi-214	1764.51
18	2612.27	2621.27	244	229	18	2617.03	3.07	5.36	Tl-208	2614.53

Lampiran 1.2 Tabel laju cacah Sampel B dan Backgroun GEM 60-4

Detector #1 ACQ 25-Agust-2017 at 16:26:34 RT = 230450.5 LT = 230400.0										
GEM 60-4										
Filter Makassar-2_ulang w=120,11 mg V=1440,9 m3										
ROI #	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	235.95	240.01	3613	837	88	237.96	0.85	1.31	Pb-212	238,63
2	292.51	296.37	4373	2156	85	294.57	1.18	1.66	Pb-214	295,22
3	335.29	339.95	1996	36	76	336.71	0.20	0.32	Pb-212	338,63
4	348.88	353.94	5835	3915	101	351.37	1.19	1.78	Pb-214	351,99
5	580.39	585.46	1121	285	55	582.92	1.09	1.79	Tl-208	583,19
6	606.14	612.02	4111	3071	85	609.19	1.37	2.18	Bi-214	609,32
7	659.45	664.52	712	-42	49	660.16	1.80	1.94	Cs-137	661,66
8	908.39	913.86	585	81	43	911.12	0.91	1.14	Ac-228	911,16
9	966.16	971.63	516	3	43	968.37	0.29	0.86	Ac-228	968,97
10	#REF!	999.40	524	-8	45	1002.02	0.23	0.38	U-238	1001,00
11	1116.77	1124.07	1273	675	61	1120.25	1.54	2.64	Bi-214	1120,28
12	1456.89	1465.00	2340	1916	66	1460.87	2.04	2.92	K-40	1460,75
13	1760.91	1769.01	948	702	46	1765.01	2.20	3.36	Bi-214	1764,51
14	2610.64	2619.75	814	668	40	2615.73	2.10	3.62	Tl-208	2614,53

BACKGROUND										
Detector #4 ACQ ##### at 16:23:45 RT = 63137.5 LT =										
DISPEC PRO GEM 60										
Latar										
Detector #1 ACQ 04-Mar-2011 at 16:39:42 RT = 61226.2 LT = 61200.0										
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	238.43	242.91	984	75	51	240.83	0.54	0.72	Pb-212	238,63
2	295.20	299.27	847	346	39	296.93	1.11	1.78	Pb-214	295,22
3	337.75	341.82	449	88	31	338.74	2.32	2.75	Pb-212	338,63
4	351.39	355.46	916	531	38	353.45	1.22	1.70	Pb-214	351,99
5	581.24	586.34	240	54	25	584.28	0.31	1.97	Tl-208	583,19
6	607.75	612.24	620	421	31	609.93	1.51	2.00	Bi-214	609,32
7	658.55	664.87	213	16	29	660.38	0.20	0.33	Cs-137	661,66
8	908.51	914.64	158	34	23	909.80	1.06	1.24	Ac-228	911,16
9	965.75	971.88	156	27	23	971.04	0.25	0.45	Ac-228	968,97
10	997.65	1003.17	103	24	17	1000.31	0.22	0.36	U-238	1001,00
11	1116.93	1122.87	212	107	22	1120.63	0.28	2.33	Bi-214	1120,28
12	1458.14	1463.68	254	207	19	1461.15	1.82	2.70	K-40	1460,75
13	1762.71	1769.29	167	123	17	1766.38	1.76	2.56	Bi-214	1764,51
14	2618.21	2626.68	241	234	16	2623.16	1.79	3.52	Tl-208	2614,53

Lampiran 1.3 Tabel laju cacah Sampel C dan Background GEM 60-4

Detector #1 ACQ 18-Agust-2017 at 16:34:42 RT = 230448.7 LT = 230400.0										
GEM 60-4										
Filter Makassar-1 Bungaro-Pangkep m=86,97 mg										
ROI #	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	235.95	240.01	3654	759	89	237.95	1.11	1.59	Pb-212	238,63
2	292.51	296.37	3953	1886	81	294.56	1.12	1.69	Pb-214	295,22
3	335.29	339.95	1975	-21	77	338.15	0.33	0.97	Pb-212	338,63
4	348.88	353.94	5069	3271	96	351.38	1.16	1.76	Pb-214	351,99
5	580.39	585.46	1100	285	54	583.24	1.42	2.24	Tl-208	583,19
6	606.14	612.02	3741	2781	81	609.17	1.43	2.08	Bi-214	609,32
7	659.45	664.52	726	24	48	660.97	0.35	0.50	Cs-137	661,66
8	908.39	913.86	603	108	43	911.05	0.61	1.17	Ac-228	911,16
9	966.16	971.63	528	38	42	968.72	0.45	0.69	Ac-228	968,97
10	#REF!	999.40	484	5	42	1002.97	0.90	1.09	U-238	1001,00
11	1116.77	1124.07	1194	540	62	1120.61	0.83	2.11	Bi-214	1120,28
12	1456.89	1465.00	2231	1903	61	1460.93	1.93	2.97	K-40	1460,75
13	1760.91	1769.01	920	640	47	1765.04	2.43	3.51	Bi-214	1764,51
14	2610.64	2619.75	802	679	38	2615.79	2.50	3.77	Tl-208	2614,53

BACKGROUND										
Detector	#4	ACQ	#####	at	16:23:45	RT	=	63137.5	LT	=
DISPEC PRO GEM 60										
Latar										
Detector #1 ACQ 04-Mar-2011 at 16:39:42 RT = 61226.2 LT = 61200.0										
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	238.43	242.91	984	75	51	240.83	0.54	0.72	Pb-212	238,63
2	295.20	299.27	847	346	39	296.93	1.11	1.78	Pb-214	295,22
3	337.75	341.82	449	88	31	338.74	2.32	2.75	Pb-212	338,63
4	351.39	355.46	916	531	38	353.45	1.22	1.70	Pb-214	351,99
5	581.24	586.34	240	54	25	584.28	0.31	1.97	Tl-208	583,19
6	607.75	612.24	620	421	31	609.93	1.51	2.00	Bi-214	609,32
7	658.55	664.87	213	16	29	660.38	0.20	0.33	Cs-137	661,66
8	908.51	914.64	158	34	23	909.80	1.06	1.24	Ac-228	911,16
9	965.75	971.88	156	27	23	971.04	0.25	0.45	Ac-228	968,97
10	997.65	1003.17	103	24	17	1000.31	0.22	0.36	U-238	1001,00
11	1116.93	1122.87	212	107	22	1120.63	0.28	2.33	Bi-214	1120,28
12	1458.14	1463.68	254	207	19	1461.15	1.82	2.70	K-40	1460,75
13	1762.71	1769.29	167	123	17	1766.38	1.76	2.56	Bi-214	1764,51
14	2618.21	2626.68	241	234	16	2623.16	1.79	3.52	Tl-208	2614,53

Lampiran 1.4 Tabel laju cacah Sampel D dan Background GEM 60-4

GEM 60-5										
Filter Makassar-3 PT Bomar Kimia m=314,31 gr										
ROI #	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	236.16	240.08	4120	833	95	238.35	1.16	2.11	Pb-212	238.63
2	292.86	297.18	4439	2032	94	295.00	1.29	2.45	Pb-214	295.22
3	336.03	340.15	1899	124	69	338.59	0.24	2.09	Pb-212	338.63
4	349.56	353.88	5120	3472	90	351.81	1.35	2.47	Pb-214	351.99
5	580.81	585.71	1182	385	55	583.38	1.45	3.11	Tl-208	583.19
6	606.49	612.18	3731	2566	85	609.41	1.51	2.71	Bi-214	609.32
7	658.85	664.34	809	-51	56	662.77	1.18	1.33	Cs-137	661.66
8	908.57	914.06	667	82	48	910.98	0.46	1.68	Ac-228	911.16
9	966.38	971.87	602	36	46	969.76	0.41	1.44	Ac-228	968.97
10	#REF!	998.91	583	76	47	1002.99	0.22	1.26	U-238	1001.00
11	1117.83	1122.73	1046	483	48	1120.18	1.98	2.98	Bi-214	1120.28
12	1455.83	1464.05	2504	2002	71	1460.42	1.83	3.97	K-40	1460.75
13	1760.16	1767.20	846	587	43	1763.55	2.08	3.31	Bi-214	1764.51
14	2606.85	2616.23	1000	828	45	2611.48	2.24	4.95	Tl-208	2614.53

BACKGROUND										
Detector #1 ACQ 09-Apr-2015 at 14:38:13 RT = 61218.0 LT = 61200.0										
GEM 60-5										
Lata Latar										
Detector #1 ACQ 04-Mar-2011 at 16:39:42 RT = 61226.2 LT = 61200.0										
ROI #	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	235.99	241.11	1107	50	62	238.35	0.45	0.72	Pb-212	238.63
2	292.44	297.55	1001	344	51	294.97	1.26	1.91	Pb-214	295.22
3	335.71	340.82	564	25	44	337.97	0.34	0.93	Pb-212	338.63
4	349.28	354.39	1104	510	50	351.75	1.21	2.41	Pb-214	351.99
5	580.35	586.25	324	76	33	582.78	1.19	2.29	Tl-208	583.19
6	606.51	612.41	710	452	39	609.43	1.79	2.60	Bi-214	609.32
7	658.81	664.71	228	30	31	662.35	0.20	0.35	Cs-137	661.66
8	908.12	914.41	182	33	26	912.47	0.26	0.61	Ac-228	911.16
9	965.92	972.60	167	21	26	968.08	0.20	0.35	Ac-228	968.97
10	998.16	1004.84	168	25	29	1004.25	0.20	0.35	U-238	1001.00
11	1117.09	1123.77	250	81	29	1120.15	1.49	2.37	Bi-214	1120.28
12	1456.92	1464.39	289	185	27	1460.53	1.40	3.24	K-40	1460.75
13	1760.52	1768.38	198	102	25	1763.92	0.61	3.29	Bi-214	1764.51
14	2609.46	2618.49	248	232	18	2613.20	2.19	4.57	Tl-208	2614.53

Lampiran 1.5 Tabel laju cacah Sampel E dan Background GEM 60-4

Detector #1 ACQ 28-Agust-2017 at 11:28:24 RT = 230480.5 LT = 230400.0										
GEM 60-4										
Filter Makassar-4 m=80,11 mg BMKG Maros										
ROI #	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	235.95	240.01	3648	603	90	237.82	1.06	1.77	Pb-212	238.63
2	292.51	296.37	3450	1463	78	294.57	0.98	1.68	Pb-214	295.22
3	335.29	339.95	1885	-3	75	338.69	0.22	0.48	Pb-212	338.63
4	348.88	353.94	4451	2544	94	351.39	1.10	1.82	Pb-214	351.99
5	580.39	585.46	1077	228	55	583.08	1.28	1.85	Tl-208	583.19
6	606.14	612.02	3150	2225	76	609.17	1.38	2.32	Bi-214	609.32
7	659.45	664.52	671	60	45	661.73	0.59	0.76	Cs-137	661.66
8	908.39	913.86	553	124	41	911.22	1.03	1.48	Ac-228	911.16
9	966.16	971.63	525	26	43	970.19	0.23	0.66	Ac-228	968.97
10	#REF!	999.40	524	16	44	1000.27	0.28	0.82	U-238	1001.00
11	1116.77	1124.07	1097	573	57	1120.30	1.36	2.92	Bi-214	1120.28
12	1456.89	1465.00	2337	2064	60	1460.94	2.03	3.14	K-40	1460.75
13	1760.91	1769.01	763	599	39	1764.99	2.28	3.70	Bi-214	1764.51
14	2610.64	2619.75	852	737	38	2615.65	2.90	3.82	Tl-208	2614.53

BACKGROUND										
Detector #4 ACQ ##### at 16:23:45 RT = 63137.5 LT = 61200										
DISPEC PRO GEM 60										
Latar										
Detector #1 ACQ 04-Mar-2011 at 16:39:42 RT = 61226.2 LT = 61200.0										
ROI#	RANGE (keV)		GROSS	NET	+/-	CENTROID	FWHM	FW(1/3)	LIBRARY	(keV)
1	238.43	242.91	984	75	51	240.83	0.54	0.72	Pb-212	238.63
2	295.20	299.27	847	346	39	296.93	1.11	1.78	Pb-214	295.22
3	337.75	341.82	449	88	31	338.74	2.32	2.75	Pb-212	338.63
4	351.39	355.46	916	531	38	353.45	1.22	1.70	Pb-214	351.99
5	581.24	586.34	240	54	25	584.28	0.31	1.97	Tl-208	583.19
6	607.75	612.24	620	421	31	609.93	1.51	2.00	Bi-214	609.32
7	658.55	664.87	213	16	29	660.38	0.20	0.33	Cs-137	661.66
8	908.51	914.64	158	34	23	909.80	1.06	1.24	Ac-228	911.16
9	965.75	971.88	156	27	23	971.04	0.25	0.45	Ac-228	968.97
10	997.65	1003.17	103	24	17	1000.31	0.22	0.36	U-238	1001.00
11	1116.93	1122.87	212	107	22	1120.63	0.28	2.33	Bi-214	1120.28
12	1458.14	1463.68	254	207	19	1461.15	1.82	2.70	K-40	1460.75
13	1762.71	1769.29	167	123	17	1766.38	1.76	2.56	Bi-214	1764.51
14	2618.21	2626.68	241	234	16	2623.16	1.79	3.52	Tl-208	2614.53

Lampiran 2.1 Perhitungan Konsentrasi Sampel A

Sampel	Radionuklida (Bq/mg)					
	^{226}Ra		^{232}Th		^{40}K	
	NET	\pm	NET	\pm	NET	\pm
Filter A $V = 1439,8 \text{ m}^3$	497	33	-30	27	483	30

Perhitungan Konsentrasi (C)

$$\begin{aligned}
 {}^{226}\text{Ra} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{497}{61200} - \frac{489}{61200}}{0,042551 \cdot 0,446 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,008120915 - 0,007990196}{27,3241587}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,40 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 {}^{232}\text{Th} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{-30}{61200} - \frac{14}{61200}}{0,034657 \cdot 0,266 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{-0,000490196 - 0,000228759}{13,2731735}
 \end{aligned}$$

$$= -0,05 \text{ mBq/m}^3 \text{ (TTD)}$$

$$\begin{aligned}
 {}^{40}\text{K} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{483}{61200} - \frac{202}{61200}}{0,027242 \cdot 0,1067 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,008315972 - 0,0008984375}{4,96301103}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,10 \text{ mBq/ m}^3$$

Ketidakpastian Pengukuran

$$\begin{aligned}
 UT &= {}^{226}\text{Ra} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
 &= 0,40 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{33^2}{61200} + \frac{30^2}{61200}}{\frac{497}{61200} - \frac{489}{61200}}\right)^2 + \left(\frac{0,0003}{0,042551}\right)^2 + \left(\frac{0,000446}{0,446}\right)^2 + \left(\frac{14,398}{1439,8}\right)^2} \\
 &= 0,40 \times \sqrt{0,0000165039 + 0,000049707619 + 0,000001 + 0,0001}
 \end{aligned}$$

$$= 0,05$$

$$\begin{aligned}
 UT &= 232\text{Th} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
 &= -0,05 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{27^2}{61200} + \frac{21^2}{61200}}{\frac{-80}{61200} - \frac{14}{61200}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,034657}\right)^2 + \left(\frac{0,000266}{0,266}\right)^2 + \left(\frac{14,398}{1439,8}\right)^2} \\
 &= -0,05 \times \sqrt{0,000000188783 + 0,00003330259 + 0,000001 + 0,0001} \\
 &= -0,57 \text{ (Tidak terdeteksi)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 UT &= 40\text{K} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
 &= 0,10 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{30^2}{61200} + \frac{24^2}{61200}}{\frac{483}{61200} - \frac{202}{61200}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,027242}\right)^2 + \left(\frac{0,0001067}{0,1067}\right)^2 + \left(\frac{14,398}{1439,8}\right)^2} \\
 &= 0,10 \times \sqrt{0,000000007366434 + 0,0000538992 + 0,000001 + 0,0001} \\
 &= 0,01
 \end{aligned}$$

Lampiran 2.2 Perhitungan konsentrasi sampel B

Sampel	Radionuklida (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
	NET	±	NET	±	NET	±
Filter B M = 1440,9 m ³	3071	85	81	43	1916	66

Perhitungan Konsentrasi (C)

$$\begin{aligned}
 {}^{226}\text{Ra} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{3071}{230400} - \frac{421}{230400}}{0.064972 \cdot 0,446 \cdot 1440,9} \\
 &= \frac{0,01332899 - 0,001827257}{41,753697}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,20 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 {}^{232}\text{Th} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{81}{230400} - \frac{34}{230400}}{0.04709 \cdot 0,266 \cdot 1440,9} \\
 &= \frac{0,0003515625 - 0,0001475694}{18,0486269}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,011 \text{ mBq/ m}^3$$

$$\begin{aligned}
 {}^{40}\text{K} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{1916}{230400} - \frac{207}{230400}}{0.032281 \cdot 0,1067 \cdot 1440,9} \\
 &= \frac{0,008315972 - 0,0008984375}{4,96301103}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,14 \text{ mBq/ m}^3$$

Ketidakpastian Pengukuran

$$\begin{aligned}
 UT &= {}^{226}\text{Ra} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
 &= 0,20 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{85^2}{230400} + \frac{31^2}{230400}}{\frac{3071}{230400} - \frac{421}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0003}{0,064972}\right)^2 + \left(\frac{0,000446}{0,446}\right)^2 + \left(\frac{14,409}{1440,9}\right)^2} \\
 &= 0,20 \times \sqrt{0,00001340737 + 0,00002132014 + 0,000001 + 0,0001} \\
 &= 0,02
 \end{aligned}$$

$$UT = {}^{232}\text{Th} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2}$$

$$\begin{aligned}
&= 0,11 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{43^2}{230400} + \frac{23^2}{230400}}{\frac{81}{230400} - \frac{34}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,04709}\right)^2 + \left(\frac{0,000266}{0,266}\right)^2 + \left(\frac{14,409}{1440,9}\right)^2} \\
&= 0,11 \times \sqrt{0,000000048224 + 0,00001803859 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,01
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
UT &= 40K \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,14 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{66^2}{230400} + \frac{19^2}{230400}}{\frac{1916}{230400} - \frac{207}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,027242}\right)^2 + \left(\frac{0,0001067}{0,1067}\right)^2 + \left(\frac{14,409}{1440,9}\right)^2} \\
&= 0,14 \times \sqrt{0,00000000014351 + 0,000053899162 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,01
\end{aligned}$$

Lampiran 2.3 Perhitungan konsentrasi Sampel C

Sampel	Radionuklida (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
	NET	±	NET	±	NET	±
Filter C V = 1439,8 m ³	2781	81	108	43	1093	61

Perhitungan Konsentrasi (C)

$$\begin{aligned}
^{226}\text{Ra} &= \frac{(Ns - Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
&= \frac{\frac{2781}{230400} - \frac{421}{230400}}{0,064972 \cdot 0,446 \cdot 1439,8} \\
&= \frac{0,01207031 - 0,001827257}{41,753697}
\end{aligned}$$

$$C = 0,20 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
^{232}\text{Th} &= \frac{(Ns - Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
&= \frac{\frac{108}{230400} - \frac{34}{230400}}{0,04709 \cdot 0,266 \cdot 1439,8} \\
&= \frac{0,00046875 - 0,0001475694}{18,0348484}
\end{aligned}$$

$$C = 0,17 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
{}^{40}\text{K} &= \frac{(N_s - N_b)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
&= \frac{\frac{1093}{230400} - \frac{207}{230400}}{0.032281 \cdot 0.1067 \cdot 1439,8} \\
&= \frac{0,004743924 - 0,0008984375}{4,95922221}
\end{aligned}$$

$$C = 0,07 \text{ mBq/m}^3$$

Ketidakpastian Pengukuran

$$\begin{aligned}
UT &= 226\text{Ra} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,20 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{81^2}{230400} + \frac{31^2}{230400}}{\frac{2781}{230400} - \frac{421}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0003}{0,064972}\right)^2 + \left(\frac{0,000446}{0,446}\right)^2 + \left(\frac{14,398}{1439,8}\right)^2} \\
&= 0,20 \times \sqrt{0,000000000191372 + 0,00002132014 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,02
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
UT &= 232\text{Th} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,17 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{43^2}{230400} + \frac{23^2}{230400}}{\frac{108}{230400} - \frac{34}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,04709}\right)^2 + \left(\frac{0,000266}{0,266}\right)^2 + \left(\frac{0,8697}{86,97}\right)^2} \\
&= 0,17 \times \sqrt{0,0000000194534 + 0,0000803859 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,01
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
UT &= 40\text{K} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,07 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{61^2}{230400} + \frac{19^2}{230400}}{\frac{1093}{230400} - \frac{207}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,027242}\right)^2 + \left(\frac{0,0001067}{0,1067}\right)^2 + \left(\frac{0,8697}{86,97}\right)^2} \\
&= 0,07 \times \sqrt{0,0000000399865 + 0,000053899162 + 0,000001 + 0,0001}
\end{aligned}$$

$$= 0,008$$

Lampiran 2.4 Perhitungan konsentrasi Sampel D

Sampel	Radionuklida (Bq/kg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
	NET	±	NET	±	NET	±
Filter C v = 1439,8 m ³	2566	85	82	48	2002	71

Perhitungan Konsentrasi (C)

$$\begin{aligned}
 {}^{226}\text{Ra} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{2566}{230400} - \frac{452}{230400}}{0,05677 \cdot 0,446 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,01113715 - 0,001961806}{36,4549009}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,20 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 {}^{232}\text{Th} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{82}{230400} - \frac{33}{230400}}{0,04156 \cdot 0,266 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,0003559028 - 0,0001432292}{15,9169314}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,13 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 {}^{40}\text{K} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{1093}{230400} - \frac{207}{230400}}{0,02883 \cdot 0,1067 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,004743924 - 0,0008984375}{4,42905661}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,60 \text{ mBq/m}^3$$

Ketidakpastian Pengukuran

$$UT = {}^{226}\text{Ra} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2}$$

$$\begin{aligned}
&= 0,20 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{85^2}{230400} + \frac{39^2}{230400}}{\frac{2566}{230400} - \frac{452}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0003}{0,05677}\right)^2 + \left(\frac{0,000446}{0,446}\right)^2 + \left(\frac{14,398}{1439,8}\right)^2} \\
&= 0,20 \times \sqrt{0,0000000322436 + 0,0000279257 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,02
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
UT &= 232Th \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,13 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{48^2}{230400} + \frac{26^2}{230400}}{\frac{82}{230400} - \frac{33}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,04156}\right)^2 + \left(\frac{0,000266}{0,266}\right)^2 + \left(\frac{14,398}{1439,8}\right)^2} \\
&= 0,13 \times \sqrt{0,0000000491602 + 0,0000231584 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,01
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
UT &= 40K \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,60 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{71^2}{230400} + \frac{27^2}{230400}}{\frac{1093}{230400} - \frac{207}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,02883}\right)^2 + \left(\frac{0,0001067}{0,1067}\right)^2 + \left(\frac{14,398}{1439,8}\right)^2} \\
&= 0,60 \times \sqrt{0,0000000798949 + 0,000048125 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,07
\end{aligned}$$

Lampiran 2.5 Perhitungan Konsentrasi Sampel E

Sampel	Radionuklida (Bq/mg)					
	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
	NET	±	NET	±	NET	±
Filter E v = 1439,8 m ³	2225	76	124	41	2064	60

--	--	--	--	--	--	--

Perhitungan Konsentrasi (C)

$$\begin{aligned}
 {}^{226}\text{Ra} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{2225}{230400} - \frac{421}{230400}}{0.064972 \cdot 0.446 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,000000041914 - 0,001827257}{41,7218218}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,10 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 {}^{232}\text{Th} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{124}{230400} - \frac{34}{230400}}{0.04709 \cdot 0.266 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,0005381944 - 0,0001475694}{18,0348485}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,21 \text{ mBq/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 {}^{40}\text{K} &= \frac{(Ns-Nb)}{\varepsilon \cdot p\gamma \cdot w} \\
 &= \frac{\frac{2064}{230400} - \frac{207}{230400}}{0.032281 \cdot 0.1067 \cdot 1439,8} \\
 &= \frac{0,008958333 - 0,0008984375}{49,5922221}
 \end{aligned}$$

$$C = 0,10 \text{ mBq/m}^3$$

Ketidakpastian Pengukuran

$$\begin{aligned}
 UT &= 226\text{Ra} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
 &= 0,10 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{76}{230400}^2 + \frac{31}{230400}^2}{\frac{2225}{230400} - \frac{421}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0003}{0.064972}\right)^2 + \left(\frac{0,000446}{0,446}\right)^2 + \left(\frac{0,8011}{80,11}\right)^2} \\
 &= 0,10 \times \sqrt{0,000000000262721 + 0,00000213201 + 0,000001 + 0,0001} \\
 &= 0,01
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
UT &= 232\text{Th} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,21 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{41^2}{230400} + \frac{23^2}{230400}}{\frac{124}{230400} - \frac{34}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,04709}\right)^2 + \left(\frac{0,000266}{0,266}\right)^2 + \left(\frac{0,8011}{80,11}\right)^2} \\
&= 0,21 \times \sqrt{0,0000000113589 + 0,0000180386 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,02
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
UT &= 40\text{K} \times \sqrt{\left(\frac{Us^2 + Ub^2}{Ns - Nb}\right)^2 + \left(\frac{U\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Up\gamma}{p\gamma}\right)^2 + \left(\frac{Uw}{w}\right)^2} \\
&= 0,10 \times \sqrt{\left(\frac{\frac{60^2}{230400} + \frac{19^2}{230400}}{\frac{2064}{230400} - \frac{207}{230400}}\right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,032281}\right)^2 + \left(\frac{0,0001067}{0,1067}\right)^2 + \left(\frac{0,8011}{80,11}\right)^2} \\
&= 0,10 \times \sqrt{0,00000000179076 + 0,0000383854 + 0,000001 + 0,0001} \\
&= 0,01
\end{aligned}$$

Lampiran 3. Hasil perhitungan Nilai Minimum Detectable Concentration (MDC)

Sampel	Konsentrasi	MDC
A	0,40	0,30
	-0,05	0,07
	0,10	0,05
B	0,20	0,06
	0,11	0,02
	0,14	0,10
C	0,20	0,06
	0,17	0,02
	0,07	0,01
D	0,20	0,06
	0,13	0,02
	0,60	0,10
E	0,10	0,07
	0,21	0,02
	0,10	0,01

Lampiran 4. Perhitungan nilai dosis serap

Sampel A

$$\begin{array}{lll} ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF \\ = 0,40 \cdot 8130 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} & = -0,05 \cdot 8130 \cdot 4,2 \cdot 10^{-5} & = 0,10 \cdot 8130 \cdot 2,1 \cdot 10^{-9} \\ = 0,009 \text{ mSv} & = \text{TTD} & = 0,001 \text{ mSv} \end{array}$$

Sampel B

$$\begin{array}{lll} ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF \\ = 0,20 \cdot 8130 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} & = 0,11 \cdot 8130 \cdot 4,2 \cdot 10^{-5} & = 0,14 \cdot 8130 \cdot 2,1 \cdot 10^{-9} \\ = 0,004 \text{ mSv} & = 0,035 \text{ mSv} & = 0,002 \text{ mSv} \end{array}$$

Sampel C

$$\begin{array}{lll} ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF \\ = 0,20 \cdot 8130 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} & = 0,17 \cdot 8130 \cdot 4,2 \cdot 10^{-5} & = 0,07 \cdot 8130 \cdot 2,1 \cdot 10^{-9} \\ = 0,004 \text{ mSv} & = 0,055 \text{ mSv} & = 0,001 \text{ mSv} \end{array}$$

Sampel D

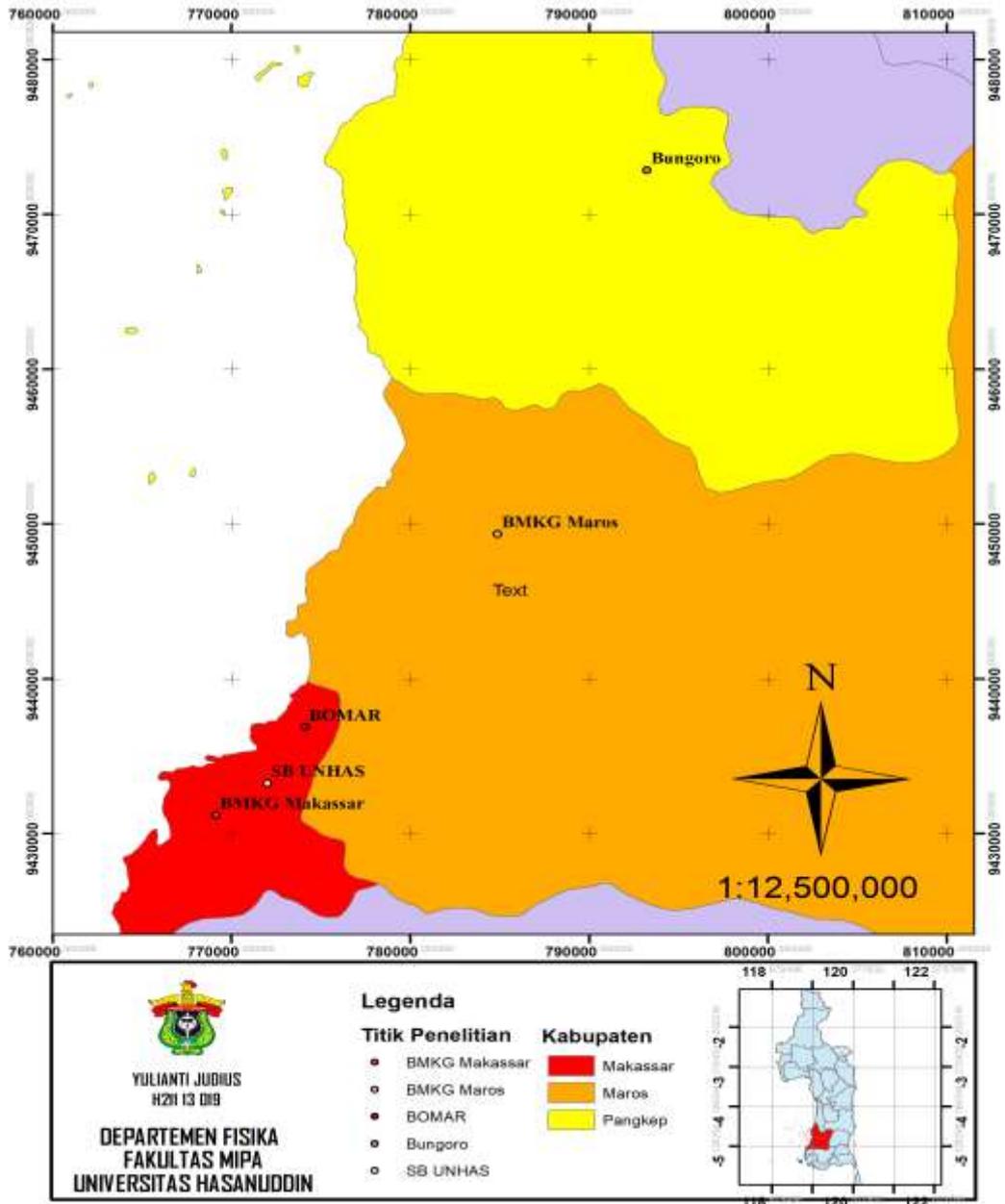
$$\begin{array}{lll} ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF \\ = 0,20 \cdot 8130 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} & = 0,13 \cdot 8130 \cdot 4,2 \cdot 10^{-5} & = 0,60 \cdot 8130 \cdot 2,1 \cdot 10^{-9} \\ = 0,004 \text{ mSv} & = 0,042 \text{ mSv} & = 0,009 \text{ mSv} \end{array}$$

Sampel E

$$\begin{array}{lll} ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF & ED_a = C.IR.DCF \\ = 0,10 \cdot 8130 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} & = 0,21 \cdot 8130 \cdot 4,2 \cdot 10^{-5} & = 0,10 \cdot 8130 \cdot 2,1 \cdot 10^{-9} \\ = 0,002 \text{ mSv} & = 0,068 \text{ mSv} & = 0,001 \text{ mSv} \end{array}$$

Lampiran 5. Peta Lokasi Penelitian

PETA LOKASI PENELITIAN MAKASSAR-MAROS-PANGKEP



Lampiran 6. Foto-Foto Penelitian

Sampling



Menimbang Kertas filte



Sampel didiamkan selama 30 hari



Mencacah Sampel



