



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS CESIUM-137 DALAM SAMPEL
CAIR LINGKUNGAN DENGAN SPEKTROMETRI GAMMA;
PERBANDINGAN METODE PREPARASI
PENGENDAPAN DAN PENGUAPAN**

SKRIPSI

**DESI WULANDARI
0606029012**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS CESIUM-137 DALAM SAMPEL
CAIR LINGKUNGAN DENGAN SPEKTROMETRI GAMMA;
PERBANDINGAN METODE PREPARASI
PENGENDAPAN DAN PENGUAPAN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains

**DESI WULANDARI
0606029012**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

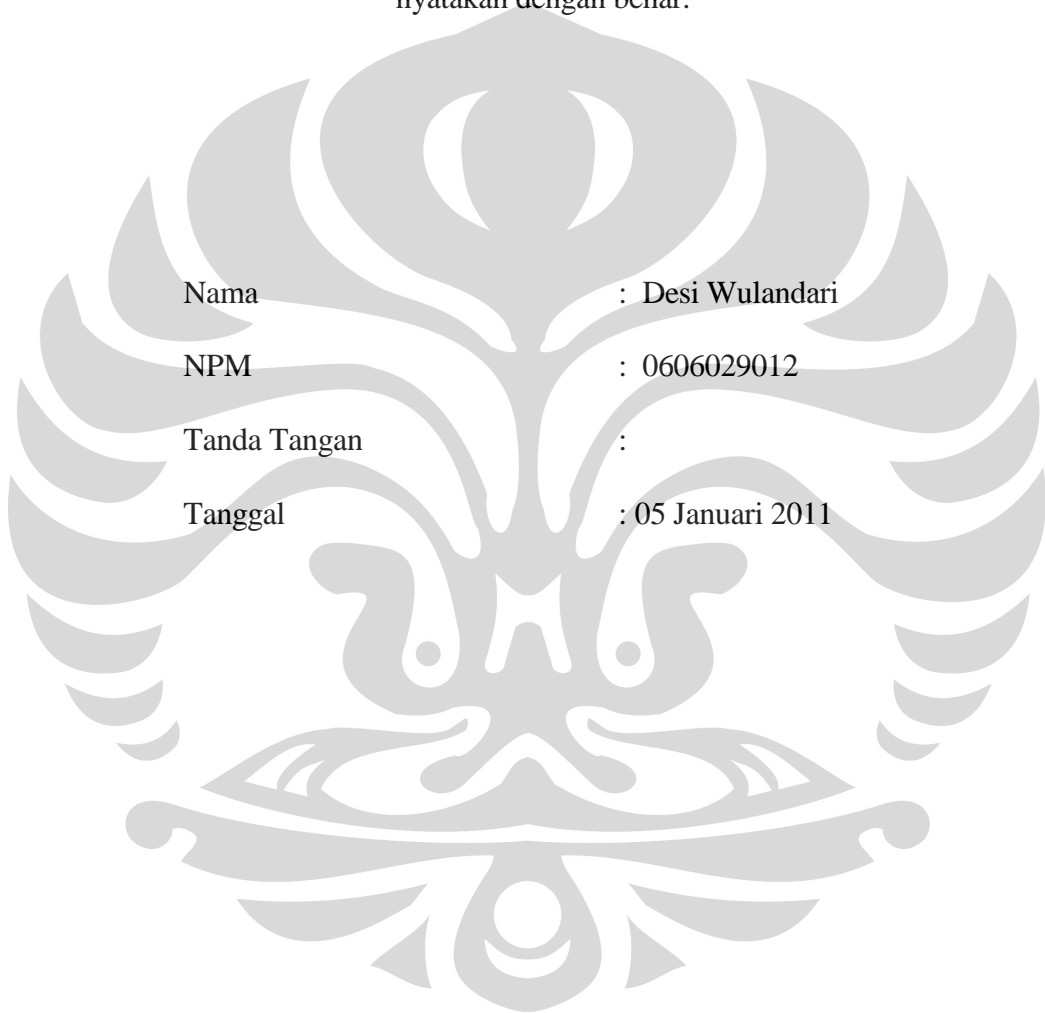
Skripsi ini adalah hasil karya penulis sendiri dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah penulis nyatakan dengan benar.

Nama : Desi Wulandari

NPM : 0606029012

Tanda Tangan :

Tanggal : 05 Januari 2011



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Desi Wulandari
NPM : 0606029012
Program Studi : Kimia
Judul Skripsi : Analisis Cesium-137 dalam Sampel Cair Lingkungan dengan Spektrometri Gamma; Perbandingan Metode Preparasi Penguapan dan Pengendapan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi **Kimia**, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ridla Bakri, M.Phil ()
Pembimbing II : Ir. Yustina Tri H ()
Penguji : Prof. Dr. Endang Asijati ()
Penguji : Drs. Ismunaryo, M.Phil ()
Penguji : Dr. Ivandini T ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 5 Januari 2011

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

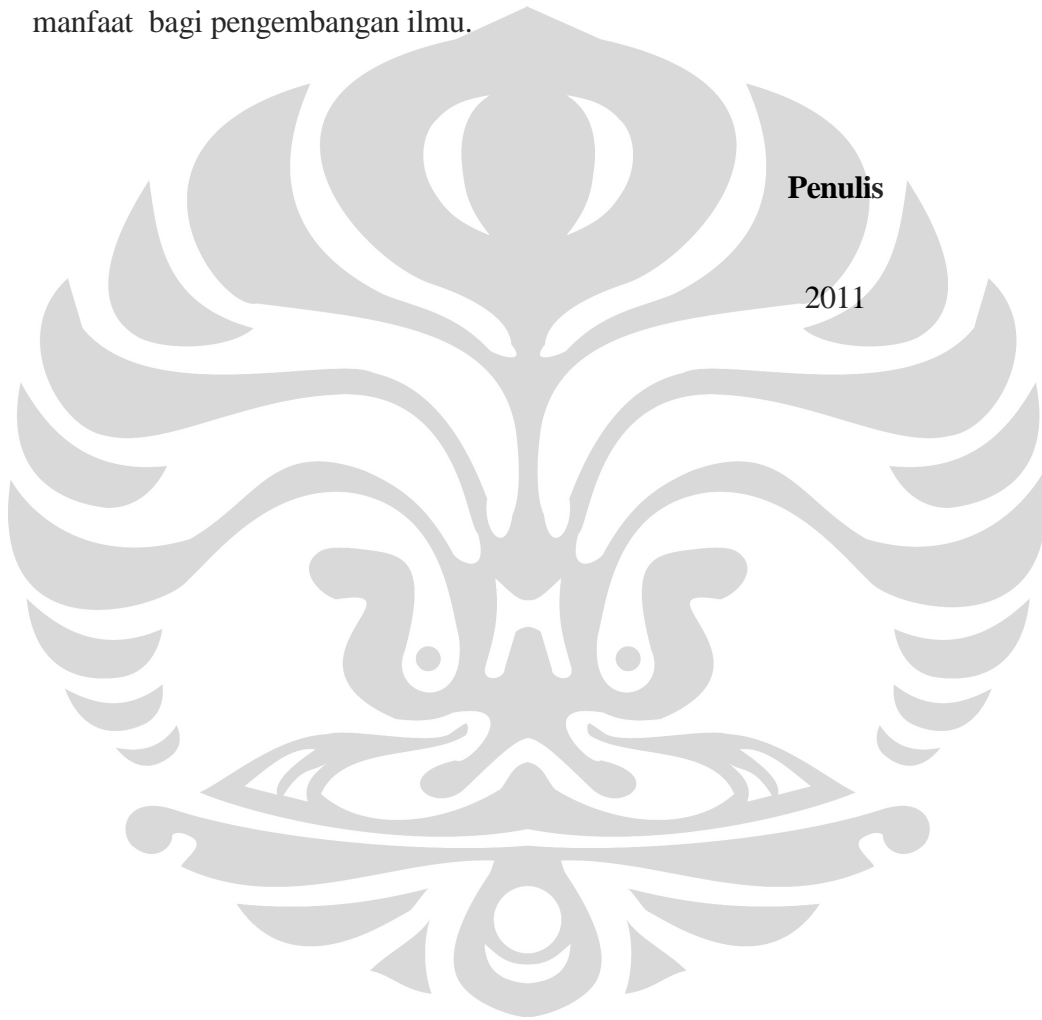
Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Kimia pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Allah SWT, yang telah memberikan saya kesempatan untuk menimba ilmu di Universitas Indonesia
- (2) Ir. Yustina Tri Handayani, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (3) Dr. Ridla Bakri, MPhil, selaku dosen pembimbing yang telah mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (4) Dr. Widajanti Wibowo, selaku pembimbing akademik yang telah membimbing saya selama saya berkuliah di Departemen Kimia Universitas Indonesia;
- (5) Pihak BATAN, yang telah mengizinkan saya untuk melakukan penelitian disana dan banyak membantu dalam penyusunan skripsi ini;
- (6) Pak Sugino, Ibu Leli, Bu Yuni, Ibu Rina, Pak Anda, yang telah membantu saya selama melakukan penelitian di BATAN;
- (7) Orang tua dan keluarga saya yang selalu mendukung dan memberikan motivasi untuk menyelesaikan skripsi ini;
- (8) Wiwit, Diana, Sopi, Vania, Britsanti, Kharisma, Hogantoro, Linda, Nany, yang telah banyak mengingatkan saya dan membantu dalam menyelesaikan skripsi ini;

- (9) Seluruh teman Kimia angkatan 2006 yang telah bersama-sama menghadapi kehidupan di Departemen kimia;
- (10) Seluruh teman dan saudara yang telah memberikan dorongan dan doa dalam menyelesaikan studi saya.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.



Penulis

2011

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, penulis yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Desi Wulandari
NPM : 06060029012
Program Studi : Sarjana
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah penulis yang berjudul :

**Analisis Cesium-137 dalam Sampel Cair Lingkungan
dengan Spektrometri Gamma;
Perbandingan Metode Preparasi Pengendapan Dan Penguapan**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir penulis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini penulis buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 05 Januari 2011
Yang menyatakan

(Desi Wulandari)

ABSTRAK

Nama : Desi Wulandari
Program Studi : Kimia
Judul : Analisis Cesium-137 dalam Sampel Cair Lingkungan dengan Spektrometri Gamma; Perbandingan Metode Preparasi Pengendapan dan Penguapan

Adanya pemboman Hiroshima dan Nagasaki, percobaan nuklir di udara pada tahun 1955-1965, serta kecelakaan reaktor, menimbulkan pencemaran zat radioaktif di lingkungan. Cs-137 digunakan sebagai indikator pencemaran radionuklida yang berasal dari reaksi fisi. Analisis Cs-137 dalam sampel lingkungan diperlukan dalam pemantauan rutin dan dalam kondisi kecelakaan. Pengukuran Cs-137 menggunakan spektrometer gamma detektor HPGe dan NaI(Tl). Sampel yang dianalisis berupa air laut dan susu sapi. Metode preparasi yang digunakan dalam analisis Cs-137 adalah metode pengendapan dengan AMP (ammonium fosfomolibdat) dan metode penguapan.

Pada analisis Cs-137 dalam air laut, kedapatulangan metode pengendapan dan metode penguapan sebesar $100 \pm 12\%$ dan $77 \pm 5\%$. Konsentrasi terendah yang dapat diukur untuk sampel sebanyak 20 liter dengan pengukuran menggunakan spektrometer gamma HPGe selama 40 jam untuk metode pengendapan dan penguapan sebesar 0,022 Bq dan 0,215 Bq. Waktu yang dibutuhkan untuk analisis dengan metode pengendapan lebih pendek daripada dengan metode penguapan. Penggunaan metode disesuaikan dengan konsentrasi dalam sampel dan waktu yang tersedia. Konsentrasi Cs-137 dalam air laut Pantai Ancol sebesar $2,2 \pm 0,3$ Bq/m³ diperoleh dari analisis dengan metode pengendapan, sedangkan dengan metode penguapan tidak terdeteksi. Nilai kedapatulangan dari pengukuran sampel susu sapi dengan metode penguapan sebesar $75 \pm 15\%$. Konsentrasi Cs-137 dalam sampel susu sapi murni dari Bogor sebesar $0,079 \pm 0,019$ Bq/liter diperoleh dari analisis dengan metode penguapan. Pengukuran susu sapi dengan metode pengendapan tidak berhasil dilakukan

Kata Kunci : Cesium-137, pengendapan AMP, penguapan, MDA, kedapatulangan
xiii+65 halaman ; 17 gambar; 9 tabel
Daftar Pustaka : 22 (1965-2009)

ABSTRACT

Name : Desi Wulandari
Program Study : Chemistry
Title : Analysis of Cesium-137 in Environmental Liquid Sample by Gamma Spectrometry; Comparison on Preparation Methods of Precipitation and Evaporation.

The bombing of Hiroshima and Nagasaki, and experiments of nuclear bomb in the atmosphere in 1955-1965, and some reactor accidents, cause the radioactive contamination in environment. Cs-137 is used as indicator of radioactive pollution from fission reaction. Analysis of Cs-137 is important related to routine monitoring and in accident condition. Cs-137 was measured using gamma spectrometer with HPGe and NaI(Tl) detectors. The analyzed samples were sea water and cow milk. The preparation methods in analyzing of Cs-137 were precipitation with AMP (ammonium molybdophosphate) and evaporation method. For sea water sample, the recovery of precipitation method and evaporation method were $100 \pm 12 \%$ and $77 \pm 5 \%$. The minimum concentration could be measured for 20 liters sample with HPGe spectrometer for 40 hours by the precipitation method and evaporation method were 0,022 Bq and 0,215 Bq. The analysis by precipitation method took shorter duration compare with evaporation method. The choice of method depend on the sample concentration and the duration. The Cs-137 concentration in sea water sample collected from Ancol beach was $2,2 \pm 0,3 \text{ Bq/m}^3$ obtained from the analysis by precipitation method. In evaporation method, it was not detected. The recovery of cow milk measurement with evaporation method was $75 \pm 15 \%$. The concentration of Cs-137 from fresh cow milk collected from Bogor was $0,079 \pm 0,019 \text{ Bq/liter}$ obtained by an analysis of evaporation method. The analysis with precipitation method for cow milk sample was not successful.

Key Words : Cesium-137, AMP precipitation, evaporation, MDA, recovery.
xiii+65 pages ; 17 pictures; 9 tables
Bibliography : 22 (1965-2009)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	1
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Hipotesis	2
2. TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Peluruhan Radioaktif	3
2.2. Reaksi Fisi Uranium	5
2.3. Jatuhnya Radionuklida.....	7
2.4. Cesium (Cs)	8
2.5. Metode Pengendapan.....	10
2.6. Metode Penguapan.....	12
2.7. Air Laut.....	12
2.8. Susu Sapi.....	12
2.9. Spektrometer Gamma	14
2.9.1. Detektor HPGe.....	15
2.9.2. Detektor NaI(Tl).....	16
2.10. Pengukuran Aktivitas.....	18
2.11. Perangkat Lunak <i>Disk Efficiency</i>	19
2.12. Kedapatulangan.....	20
2.13. <i>Minimum Detectable Activity</i> (MDA).....	20
2.14. Propagasi Error.....	21
3. METODE PENELITIAN	23
3.1. Bahan dan Alat Penelitian.....	23
3.1.1. Bahan.....	23
3.1.2. Alat.....	23
3.2. Prosedur Kerja	24
3.2.1. Pengukuran Aktivitas Standar.....	25
3.2.2. Analisis Cs-137 dalam Sampel Air Laut dengan Metode Pengendapan	25
3.2.2.1. Pembuatan Standar.....	26

3.2.2.2. Penentuan Kedapatulangan Metode Pengendapan	26
3.2.2.3. Analisis Sampel	27
3.2.3. Analisis Cs-137 dalam Sampel Air Laut dengan Metode Penguapan	27
3.2.3.1. Penentuan Nilai Kedapatulangan Metode Penguapan	28
3.2.3.2. Analisis Sampel	28
3.2.4. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Penguapan	28
3.2.4.1. Penentuan Kedapatulangan	29
3.2.4.2. Analisis Sampel	29
3.2.5. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Pengendapan	29
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1. Pengukuran Aktivitas Standar.....	30
4.2. Analisis Cs-137 dalam Air Laut dengan Metode Pengendapan ..	31
4.2.1. Pembuatan Standar.....	31
4.2.2. Penentuan Kedapatulangan Metode Pengendapan.....	33
4.2.3. Analisis Sampel.....	35
4.3. Analisis Cs-137 dalam Air Laut dengan Metode Penguapan	36
4.3.1. Pembuatan Standar.....	36
4.3.2. Penentuan Kedapatulangan Metode Penguapan	36
4.3.3. Analisis Sampel.....	36
4.4. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Penguapan	37
4.4.1. Penentuan Kedapatulangan	37
4.4.2. Analisis Sampel.....	38
4.5. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Pengendapan	39
4.6. Perbandingan Metode Pengendapan dan Penguapan.....	39
5. KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	43
DAFTAR REFERENSI	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Hasil pembelahan U-235	6
Gambar 2.2	Skema terjadinya jatuhnya	7
Gambar 2.3	Contoh penyebaran Cesium-137 setelah kecelakaan Chernobyl.	8
Gambar 2.4	Skema peluruhan Cs-137.....	9
Gambar 2.5	Struktur molekul ammonium fosfomolibdat.....	11
Gambar 2.6	Skema Sederhana Spektroskopi Gamma	14
Gambar 2.7	Pengukuran pada Spektroskopi Gamma Detektor HPGe	16
Gambar 2.8	Pengukuran pada Spektroskopi Gamma Detektor NaI(Tl)	18
Gambar 2.9	Integrasi dari efisiensi sumber berbentuk disk menjadi efisiensi volum	20
Gambar 2.10	Skema pengukuran Cacahan pada Spektrum.....	21
Gambar 3.1	Alur Penelitian	24
Gambar 3.2	Skema kerja metode pengendapan	26
Gambar 3.3	Skema Kerja Analisis Cs-137 dalam Air Laut dengan Metode Penguapan.....	28
Gambar 3.4	Skema Kerja Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Pengendapan	29
Gambar 4.1	<i>Securitainer</i> Wadah Sampel.....	30
Gambar 4.2	Endapan dalam Planset untuk pengukuran	35
Gambar 4.3	Merineli ukuran 1 liter.....	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Koefisien Distribusi (K_d) Kation Logam dalam AMP.....	11
Tabel 4.1	Perbandingan Pengukuran Standar dengan Spektrometer HPGe dan NaI (Tl), Aktivitas Standar 0,98 Bq	32
Tabel 4.2	Perbandingan Pengukuran Standar dengan Spektrometer HPGe dan NaI (Tl), Aktivitas Standar 0,098 Bq	32
Tabel 4.3	Hasil Kedapatulangan Metode Pengendapan.....	34
Tabel 4.4	Hasil Pengukuran Sampel Air Laut.....	35
Tabel 4.5	Parameter Perbandingan Metode	39
Tabel 4.6	Waktu Pengukuran terhadap Konsentrasi Sampel (MDA).....	41
Tabel 4.7	Waktu Preparasi.....	41
Tabel 4.8	Waktu Analisis	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan.....	46
Lampiran 2	Spektrum Pengukuran Larutan Standar Cs-137	54
Lampiran 3	Spektrum Pengukuran KCl untuk Validasi	55
Lampiran 4	Spektrum Pengukuran Standar dengan Spektrometer Gamma Detektor HPGe	56
Lampiran 5	Spektrum Pengukuran Standar dengan Spektrometer Gamma Detektor NaI (Tl)	57
Lampiran 6	Spektrum Pengukuran Standar 0,098 Bq, Spektrometer Gamma HPGe dan NaI (Tl)	58
Lampiran 7	Spektrum Pengukuran Garam untuk Air Laut Buatan	59
Lampiran 8	Spektrum Pengukuran Kedapatulangan Metode Pengendapan	60
Lampiran 9	Spektrum Pengukuran Cs-MnO ₂	62
Lampiran 10	Spektrum Pengukuran Standar Air Laut.....	63
Lampiran 11	Spektrum Pengukuran Sampel Air Laut Metode Penguapan ...	64
Lampiran 12	Spektrum Pengukuran Kedapatulangan Susu Sapi.....	65

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Selain radionuklida yang ada sejak terciptanya alam, terdapat juga radionuklida buatan manusia yang terlepas ke lingkungan. Radioaktivitas buatan di lingkungan saat ini sebagian besar bersumber dari percobaan nuklir di udara yang terjadi pada tahun 1950-1960. Percobaan tersebut menimbulkan jatuhnya radionuklida yang terdiri dari hampir 100 radionuklida dengan waktu paro yang berbeda (BAPETEN, n.d.).

Radionuklida yang berbahaya terhadap lingkungan merupakan hasil belah (*fission product*) seperti Cs-137. Radionuklida tersebut dapat masuk ke dalam tubuh dan menimbulkan dampak radiologi. Untuk mengetahui pencemaran radionuklida yang lepas dari reaktor, Cs-137 dan Sr-90 digunakan sebagai indikator karena hasilnya relatif tinggi sekitar 6 % dari hasil pembelahan U-235 dan mempunyai waktu paro panjang (Cerdas, 2000).

Metode yang telah banyak dilakukan dalam analisis Cs-137 adalah metode pengendapan dengan ammonium fosfomolibdat. Metode ini merupakan metode dari *Japan Chemical Analysis Center* (JCAC) dan sudah banyak dilakukan pada analisis Cs-137 dalam air laut dan susu. Metode penguapan merupakan metode sederhana yang digunakan oleh BATAN, yang lebih mudah dan lebih murah. Keunggulan dan keterbatasan dari kedua metode tersebut perlu dikaji, supaya penggunaannya bisa disesuaikan dengan kondisi yang ada.

1.2 Perumusan Masalah

Analisis Cs-137 dalam sampel cair lingkungan dilakukan baik pada pemantauan rutin, maupun pada kondisi kecelakaan. Dalam analisis Cs-137 pada sampel cair lingkungan, ada dua metode preparasi yang biasa digunakan dan dua spektrometer gamma yang dapat digunakan, masing-masing memiliki keterbatasan dan kelebihan. Perlu dikaji kelebihan dan keterbatasan dari metode dan alat ukur yang digunakan yang sesuai untuk pengukuran aktivitas Cs-137 dalam sampel cair lingkungan berdasarkan konsentrasinya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan metode dan alat ukur pada analisis Cs-137 dalam sampel cair lingkungan berupa air laut dan susu sapi terhadap :

1. dua metode preparasi yang berbeda yaitu metode pengendapan menggunakan ammonium fosfomolibdat dan metode penguapan (evaporasi) dengan indicator pembanding nilai kedapatulangan, limit deteksi/*minimum detectable activity* (MDA),
2. dua sistem pengukuran yaitu spektrometer gamma dengan detektor HPGe dan detektor sintilasi NaI(Tl).

1.4 Hipotesis

Metode pengendapan dengan ammonium fosfomolibdat memiliki limit deteksi/MDA lebih baik dibandingkan metode penguapan pada analisis Cs-137, karena nilai efisiensi dan nilai kedapatulangan lebih besar sehingga dapat digunakan untuk analisis Cs-137 dalam sampel lingkungan pada pemantauan rutin.

Spektrometer gamma dengan detektor HPGe memiliki efisiensi yang lebih kecil, namun memiliki limit deteksi/MDA yang lebih baik, karena cacah latar belakang lebih kecil dibandingkan spektrometer gamma dengan detektor NaI(Tl).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Peluruhan radionuklida

Radionuklida meluruh dengan memancarkan radiasi. Pancaran radiasi memiliki sifat sama dengan pancaran cahaya, yaitu menyebar ke segala arah. Banyaknya peluruhan persatuan waktu dari radionuklida merupakan aktivitas radionuklida. Aktivitas radionuklida berkurang terus dengan perubahan waktu yang khas untuk tiap radionuklida.. Satuan dari aktivitas dinyatakan dalam Becquerel (Bq), yaitu sebesar satu peluruhan per detik.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ peluruhan per detik}$$

Satuan lama yang juga masih digunakan adalah Currie, disingkat Ci, dimana $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Setiap radionuklida memiliki waktu paro tertentu yang didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh radionuklida untuk meluruh sampai aktivitas mencapai setengahnya (Achmad, 2005). Persamaan peluruhan untuk radionuklida sebagai berikut:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

A = Aktivitas

A₀ = Aktivitas awal

λ = Konstanta peluruhan

t = Waktu

Hubungan antara konstanta peluruhan dengan waktu paro ($T_{1/2}$) dapat dilihat dari persamaan:

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda \quad (2.2)$$

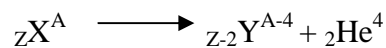
Hubungan antara aktivitas dengan jumlah nuklida (N) dapat dilihat dari persamaan:

$$A = \lambda \cdot N \quad (2.3)$$

Dalam peluruhan radionuklida, inti atom memancarkan radiasi yang dapat berupa radiasi alfa, radiasi beta dan radiasi gamma. Karakteristik dari radiasi sebagai berikut :

1. Radiasi alfa

Peluruhan radiasi alfa merupakan suatu pemancaran inti Helium (${}^4_2\text{He}$). Suatu inti atom yang memancarkan radiasi alfa akan mengalami pengurangan 4 nomor massa dan 2 nomor atom. Peluruhan yang terjadi akan dinyatakan dengan reaksi inti sebagai berikut:

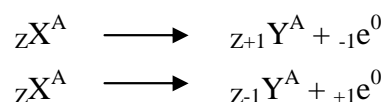


Radiasi alfa mempunyai sifat sebagai berikut:

- Partikel alfa berupa inti atom helium dan bermuatan listrik positif sebesar dua kali muatan elektron
- Daya ionisasi partikel alfa sangat besar, kurang lebih 100 kali daya ionisasi radiasi beta dan 10.000 kali daya ionisasi radiasi gamma.
- Karena daya ionisasinya yang besar, maka jarak jangkanya di udara berkisar antara 3,4 hingga 8,6 cm bergantung pada energi radiasi alfa.
- Karena bermuatan listrik, maka berkas partikel alfa akan dibelokkan jika melewati medan magnet atau medan listrik.
- Partikel alfa dipancarkan dari nuklida radionuklida dengan kecepatan yang bervariasi antara 1/100 hingga 1/10 kecepatan cahaya.

2. Radiasi beta

Radiasi beta dibedakan menjadi dua macam, yaitu radiasi β^- dan β^+ . Radiasi β^- memiliki sifat yang mirip elektron sedangkan radiasi β^+ memiliki massa yang sama dengan massa elektron tetapi bermuatan listrik positif sebesar muatan elektron dan sering disebut sebagai positron. Partikel β^- secara simbolik dinyatakan sebagai ${}_{-1}e^0$ dan partikel β^+ dinyatakan sebagai ${}_{+1}e^0$. Peluruhan yang terjadi dinyatakan dengan reaksi inti sebagai berikut:



Sifat radiasi beta sebagai berikut:

- Dapat dibedakan dua macam radiasi beta, yaitu β^- yang terdiri dari elektron dan β^+ yang terdiri dari positron
- Daya ionisasinya di udara 1/100 kali daya ionisasi partikel alfa.

- Kecepatan partikel beta yang dipancarkan oleh berbagai nuklida terletak antara 1/100 hingga 99/100 kecepatan cahaya.
- Karena sangat ringan, maka partikel beta mudah sekali dihamburkan jika melewati medium.
- Partikel beta akan di belokkan jika melewati medan magnet dan medan listrik.

3. Radiasi gamma

Radiasi gamma merupakan radiasi elektromagnetik. Peluruhan terjadi pada nuklida yang berada pada keadaan tereksitasi, yaitu nuklida yang memiliki energi yang lebih tinggi dari keadaan dasarnya. Tingkat energi keadaan dasar adalah energi ikat total dari nuklida yang stabil. Nuklida yang tereksitasi biasanya terjadi dari nuklida yang melakukan peluruhan alfa atau beta, dan untuk mencapai tingkat energi keadaan dasar dilakukan pelepasan energi melalui peluruhan gamma. Reaksi inti yang terjadi dituliskan sebagai berikut:

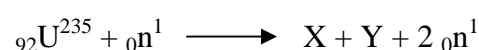


Sifat radiasi gamma, sebagai berikut:

- Radiasi gamma adalah radiasi elektromagnetik, terdiri dari foton yang energinya besar. Radiasi gamma dipancarkan dari nuklida tereksitasi dengan panjang gelombang antara 0,005 hingga 0,5 Å°
- Daya ionisasinya di dalam medium sangat kecil sehingga daya tembusnya sangat besar dibandingkan dengan daya tembus partikel alfa atau beta.
- Kemampuannya untuk menghasilkan fluoresensi dan menghitamkan pelat potret lebih besar dibandingkan dengan partikel alfa atau beta.

2.2 Reaksi Fisi Uranium

Uranium merupakan bahan fisil, bila ditembaki dengan neutron akan terjadi pembelahan inti menghasilkan inti yang lebih ringan. Secara umum reaksi fisi ditulis sebagai berikut:

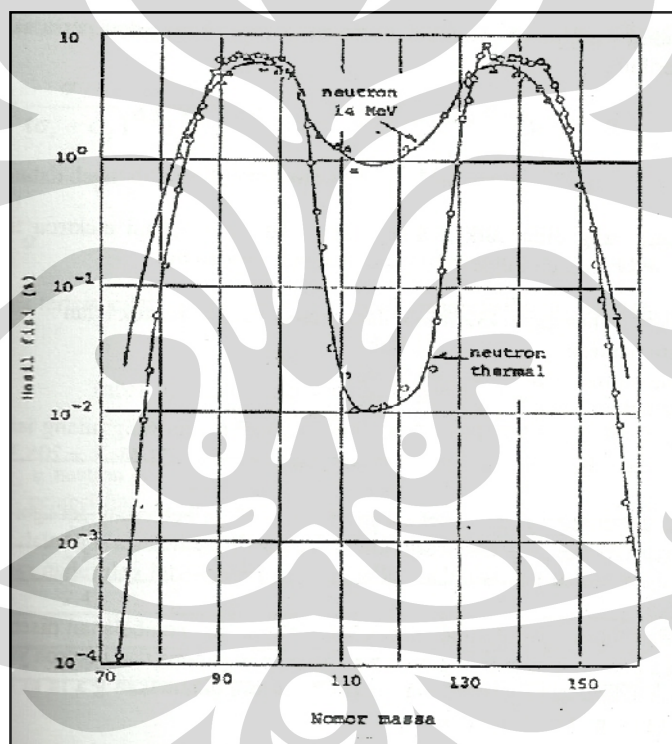


Ternyata bahwa pada fisi inti selain inti produk fisi juga dipancarkan dua atau lebih neutron dan sejumlah besar energi. Secara teori jumlah energi yang

terbebaskan ini dapat dihitung dari perbedaan energi pengikat rata-rata nukleon dalam inti Uranium dan energi pengikat dalam inti unsur medium.

Kelimpahan U-235 di alam hanya sekitar 0,7%. U-238 yang terdapat di alam dengan kelimpahan lebih besar tidak dapat membelah. Adapun U-233 dapat belah tetapi karena tidak ada di alam, maka diperlukan pembuatan U-233 di reaktor nuklir dari Th-232.

Pembelahan bahan fisil dapat terjadi menurut banyak jalan yang semuanya menghasilkan neutron dan dua buah inti. Untuk uranium pembelahan menghasilkan radionuklida dengan nomor massa sekitar 72 sampai 161. Distribusi massa produk fisi bergantung pada energi neutron yang menyebabkan reaksi fisi dan jenis inti sasaran, seperti ditunjukkan pada gambar 2.1.

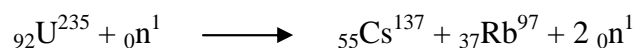


[Sumber: kimia inti dan radiokimia]

Gambar 2.1 Hasil Pembelahan U-235

Ternyata pembelahan cenderung berlangsung tidak simetrik. Sebagai hasil fisi adalah sejumlah besar radionuklida dalam produk fisi Uranium yang waktu paronya berkisar antara satu detik sampai jutaan tahun.

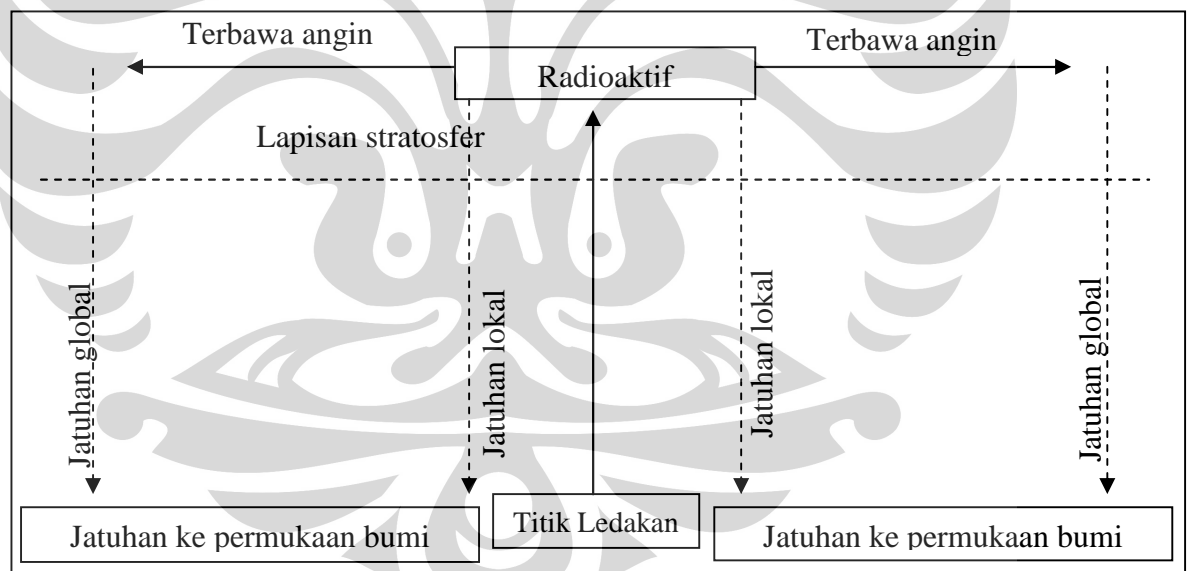
Reaksi fisi uranium yang menghasilkan Cs-137:



2.3 Jatuhan radionuklida

Jatuhan radionuklida terjadi karena adanya percobaan nuklir di udara yang dilakukan pada tahun 1950 sampai pertengahan 1960 serta adanya kecelakaan reaktor nuklir. Jatuhan tersebut pada awalnya diperkirakan hanya memberikan efek lokal, tetapi pada tahun 1954 terjadi insiden luka bakar yang dialami oleh para awak kapal Jepang akibat polusi radiasi ketika berada di Shanghai selatan akibat percobaan bom hidrogen di pulau Bikini. Sehingga pada sidang umum PBB ke-10 pada bulan Desember 1955 didirikan UNSCEAR untuk mendiskusikan pengaruh jatuhan radionuklida pada manusia di seluruh dunia (BAPETEN, n.d.).

Radionuklida yang dilepaskan ke udara akibat percobaan nuklir atau dari fasilitas nuklir akan terdispersi ke udara, dan sebagian turun secara perlahan ke permukaan bumi. Sebagian radionuklida turun ke bumi bersama embun dan sebagian lain turun secara langsung ke permukaan bumi.



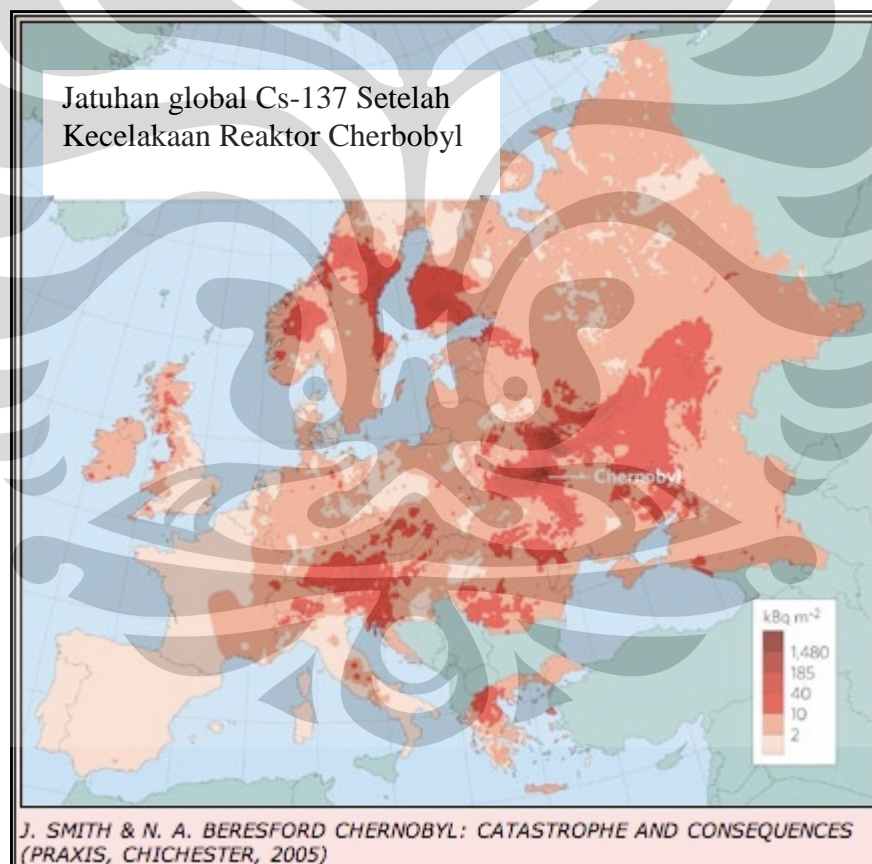
Gambar 2.2 Skema terjadinya jatuhan

Proses terjadinya jatuhan radioaktif akibat percobaan nuklir di udara adalah sebagai berikut:

- Dalam waktu satu hari sesudah ledakan nuklir, ada yang turun di daerah sekitar lokasi ledakan, dan ini disebut jatuhan lokal.

- Radionuklida yang jatuh ke permukaan bumi setelah terbawa oleh tiupan angin sampai jauh dan radionuklida yang mencapai stratosfer berpindah secara perlahan ke lapisan konvektif dan kemudian turun ke permukaan bumi disebut jatuhnya global.

Jatuhnya radionuklida yang turun ke permukaan bumi sesudah percobaan nuklir berjumlah besar. Kondisi radioaktivitas lingkungan sangat berbeda sebelum dan sesudah percobaan. Beberapa contoh sebagai akibat percobaan nuklir di udara adalah terdeteksinya Zr-95 (Zirkonium-95, waktu paro 65,5 hari), radionuklida yang memiliki waktu paro relatif panjang seperti Sr-90 (Strontium-90: waktu paro 28,8 tahun), Cs-137 (Cesium-137: waktu paro 30,17 tahun), Pu-239 (Plutonium-239: waktu paro 24100 tahun) yang akan terus terdeteksi dalam jangka waktu yang panjang.



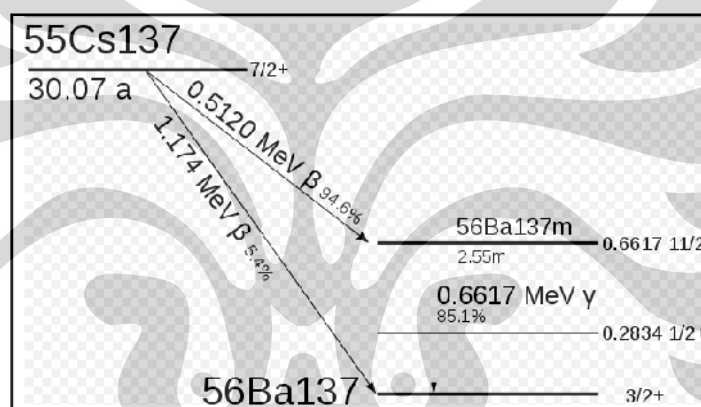
Gambar 2.3 Contoh penyebaran Cs-137 setelah kecelakaan Chernobyl

2.4 Cesium (Cs)

Cesium (Cs) adalah logam berwarna putih perak yang lunak. Di alam Cs ditemukan dalam mineral *pollucite* dalam bentuk oksidanya. Cs memiliki titik

leleh pada suhu 28 °C dan titik didih sebesar 671 °C. Seperti golongan 1A lainnya, Cs sangat eksplosif ketika bertemu dengan air. Cs stabil memiliki nomor massa 133.

Cs-137 dengan waktu paro 30,17 tahun adalah isotop radionuklida dari Cs, yang terbentuk dari reaksi fisi Uranium. Cs-137 akan memancarkan radiasi β -menjadi Ba-137 metastabil (Ba-137m) dengan waktu paro 2,56 menit yang memancarkan radiasi gamma pada energi 662 KeV menjadi Ba-137. Karena waktu paro Ba-137m jauh lebih pendek dari waktu paro Cs-137 sebagai induknya, maka dalam beberapa menit sudah akan terjadi keseimbangan sekular yang mengakibatkan aktivitas Ba-137m sama dengan aktivitas Cs-137. Sebanyak 1 gram Cs-137 memiliki aktivitas sebesar 3,4 terabecquerel (TBq).



[sumber:<http://en.wikipedia.org/wiki/Caesium-137>]

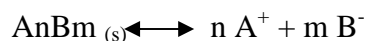
Gambar 2.4 Skema Peluruhan Cs-137

Cs-137 bisa masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi atau melalui jalur rantai makanan. Karena Cs memiliki sifat kimia yang relatif sama dengan kalium, bila masuk ke dalam tubuh sangat cepat terserap ke dalam sel tubuh (Cerdas, 2000). Masuknya Cs dari jalur inhalasi dapat terjadi jika ada Cs di udara, kondisi tersebut ada pada kecelakaan reaktor.

Radiasi memiliki kemampuan ionisasi, yang dapat menyebabkan perubahan susunan atom atau molekul pada sel. Kerusakan tersebut akan menyebabkan sel berkembang tidak sempurna, jika perkembangan menjadi tidak terkendali maka sel tersebut menjadi sel kanker.

2.5 Metode pengendapan

Metode pengendapan merupakan salah satu metode pemisahan yang banyak dilakukan dalam analisis. Larutan jenuh suatu garam merupakan suatu sistem kesetimbangan dari ion-ion terlarut di dalamnya. Jika suatu endapan ada dalam kesetimbangan dengan larutan jenuhnya reaksi yang terjadi adalah



maka kesetimbangan yang terjadi adalah

$$K = \frac{[\text{A}^+]^n [\text{B}^-]^m}{[\text{AnBm}]} \quad (2.4)$$

Dengan konsentrasi endapan tidak berubah, maka nilai hasil kali kelarutan K_{sp} adalah

$$K_{sp} = [\text{A}^+]^n [\text{B}^-]^m \quad (2.5)$$

Dalam larutan jenuh suatu elektrolit yang sangat sedikit larut, nilai K_{sp} konstan.

Dalam pengendapan, koefisien distribusi merupakan perbandingan konsentrasi spesi dalam endapannya dan dalam larutan, dinyatakan sebagai berikut :

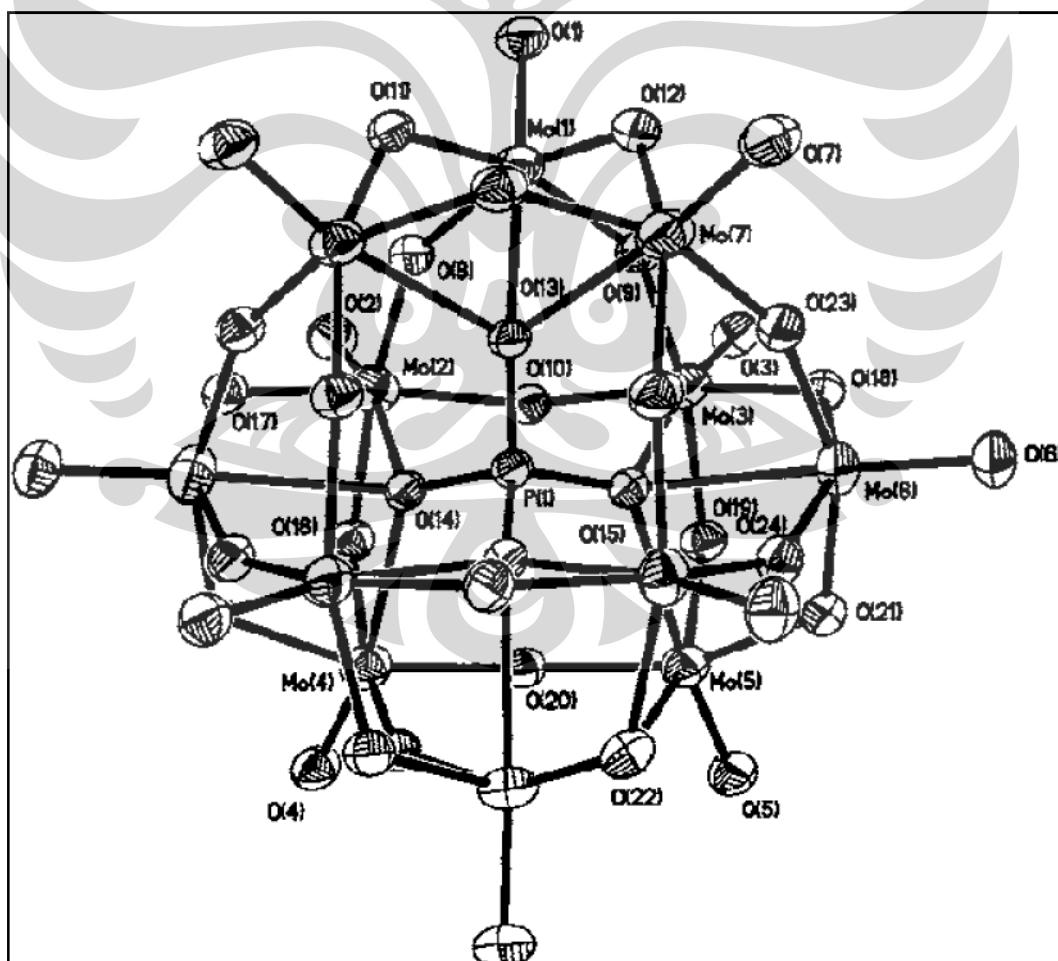
$$K_d = \frac{[\text{Cs}^+]_{\text{endapan}}}{[\text{Cs}^+]_{\text{air}}} \quad (2.6)$$

Metode pengendapan dengan ammonium fosfomolibdat diperkenalkan oleh *Japan Chemical Analysis Center* (JCAC) sebagai metode pemantauan Cs-137 dalam lingkungan. Pada metode pengendapan dengan ammonium fosfomolibdat, Cs memiliki nilai koefisien distribusi yang sangat besar dalam AMP, seperti ditunjukkan pada tabel 4.4

Tabel 2.1 Koefisien Distribusi (K_d) Kation Logam dalam AMP

Logam	K_D	Logam	K_D
Cs	4024	Ni	1,77
Tl	3939	Ca	1,48
Rb	266	Sr	1,34
Ag	54	Mn	1,34
K	4,7	Co	1,33
Zn	4,28	Mg	0,81
Ba	3,68	Na	0,73
Cd	2,21	Li	0,57
Cu	1,92		

Ammonium fosfomolibdat memiliki rumus molekul $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{MoO}_3$ dengan formula sebagai berikut:



Gambar 2.5 Struktur molekul ammonium fosfomolibdat

AMP memiliki struktur yang unik, yaitu struktur kegin. Struktur ini dibangun oleh Mo oktahedral yang berikatan dengan enam O, dan P tetrahedral yang berikatan dengan empat O, dengan O sebagai jembatan. Struktur ini hanya bisa dibentuk oleh dua logam saja yaitu Mo dan W.

2.6 Metode Penguapan

Metode penguapan adalah salah satu cara pemekatan yang paling mudah untuk dilakukan. Metode ini dapat digunakan untuk analisis Cs karena Cs memiliki titik didih di atas 600 °C, sedangkan penguapan dilakukan dengan suhu 80-100 °C. Metode ini biasanya diterapkan untuk sampel cair yang memiliki karakteristik tertentu (Ayi, 2002), diantaranya:

- Aktivitas jenis tidak melebihi 200 Ci/m³
- Tidak terdapat senyawa organik yang mudah meledak.

2.7 Air Laut

Air laut mengandung 3,5 % garam, gas terlarut, bahan organik dan partikel tak terlarut. Garam utama yang terdapat dalam air laut adalah klorida (55%), natrium (31%), sulfat (8%), magnesium (4%), kalsium (1%), potasium (1%) dan sisanya (kurang dari 1%) terdiri dari bikarbonat, bromida, asam borak, strontium dan florida. Tiga sumber utama garam di laut adalah pelapukan batuan di darat, gas vulkanik dan sirkulasi lubang hidrotermal (*hydrothermal vents*) di laut dalam (Agus, 2005).

Konsentrasi Cs-137 di air laut sangat kecil yaitu sekitar 2,9 – 6,6 x 10⁻⁹ M. Konsentrasi rata-rata Cs-137 di laut dunia yang dihasilkan dari *fallout* sekitar 2 Bq/M³, konsentrasi Cs-137 di air laut permukaan di Asia-Pasifik rata-rata sekitar 3 Bq/m³, di Laut Pasifik selatan sekitar 0,07 – 1,7 Bq/m³, dan di Samudra Hindia berkisar antara 0,7 – 2,23 Bq/m³ (Murdahayu, n.d.).

2.8 Susu Sapi

Air susu termasuk jenis bahan pangan hewani, berupa cairan putih yang dihasilkan oleh hewan ternak mamalia dan diperoleh dengan cara pemerahan. Sebagai bahan makanan/minuman air susu sapi mempunyai nilai gizi yang tinggi,

karena mengandung unsur kimia yang dibutuhkan oleh tubuh seperti kalsium, fosfor, vitamin A, vitamin B dan riboflavin yang tinggi. Komposisinya yang mudah dicerna dengan kandungan protein, mineral dan vitamin yang tinggi.

Komponen air susu sebagai berikut:

1. Air

Air susu mengandung air 87.90%, yang berfungsi sebagai bahan pelarut bahan kering. Air di dalam air susu sebagian besar dihasilkan dari air yang diminum ternak sapi.

2. Lemak

Air susu merupakan suspensi alam antara air dan bahan terlarut didalamnya, salah satu diantaranya adalah lemak. Kadar lemak didalam air susu sekitar 3.45%. Asam lemak yang terdapat di dalam air susu terdiri dari 2 golongan yaitu asam lemak yang dapat larut (butyric, caproic, caprilic dan capric) serta asam lemak yang tak dapat larut (leauric, myristic, palmitic dan oleic).

3. Protein

Kadar protein di dalam air susu rata-rata 3.20% yang terdiri dari 2.70% kasein (bahan keju), dan 0.50% albumin. Berarti 26.50% dari bahan kering air susu adalah protein. Di dalam air susu juga terdapat globulin dalam jumlah sedikit. Protein didalam air susu juga merupakan penentu kualitas air susu sebagai bahan konsumsi.

3. Laktosa

Laktosa adalah bentuk karbohidrat yang terdapat di dalam air susu. Bentuk ini tidak terdapat dalam bahan-bahan makanan yang lain. Kadar laktosa di dalam air susu sekitar 4,60 % dan ditemukan dalam keadaan larut. Laktosa terbentuk dari dua komponen gula yaitu glukosa dan galaktosa. Sifat air susu yang sedikit manis ditentukan oleh laktosa.

4. Vitamin dan enzim

Kadar vitamin di dalam air susu bergantung dari jenis makanan yang diperoleh ternak sapi dan waktu laktasinya (Eniza, 2004).

Cs-137 diperkirakan akan ada di air susu karena dalam tubuh sifatnya mirip dengan kalium. Pada penelitian yang dilakukan oleh Gerald dkk, didapatkan nilai koefisien transfer sebesar 0,15 – 0,55. Koefisien transfer ini dihitung dari

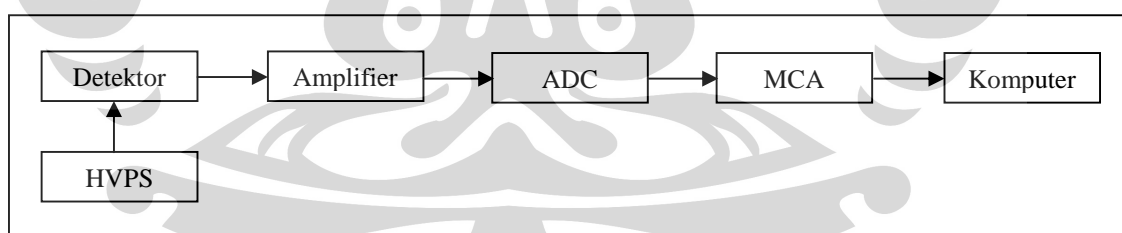
banyaknya asupan Cs-137 yang diberikan dibandingkan dengan Cs-137 yang ditemukan dalam air susu.

2.9 Spektrometer Gamma

Sistem spektroskopi melakukan pencacahan dengan selang energi yang sangat sempit sehingga dapat dikatakan melakukan pencacahan (jumlah radiasi) pada setiap tingkat energi. Hasil pencacahan tersebut ditampilkan sebagai suatu grafik antara jumlah radiasi terhadap energi radiasi yang sering disebut sebagai spektrum radiasi (Achmad, 2005).

Setelah ditemukan teknologi ADC (*analog to digital converter*) sistem spektroskopi menggunakan peralatan MCA (*multi channel analyzer*) atau penganalisis multi kanal. Jumlah kanal yang disediakan sistem spektroskopi resolusi tinggi bisa mencapai 16.000 kanal.

ADC berfungsi untuk menentukan tinggi pulsa dari setiap pulsa listrik yang memasukinya dan mengubahnya menjadi bilangan biner. Bilangan biner tersebut akan diteruskan ke bagian memori yang akan menyimpan jumlah dari masing-masing bilangan biner yang dihasilkan ADC. Isi memori akan ditampilkan pada layar berupa spektrum radiasi.



Gambar 2.6 Skema Sederhana Spektroskopi Gamma

Spektrometer gamma dilengkapi dengan detektor yang dapat membedakan energi, yaitu detektor semikonduktor, seperti HPGe dan detektor sintilasi, misalnya NaI(Tl). Sistem spektroskopi digunakan untuk pengukuran yang bersifat analisis unsur baik kualitatif maupun kuantitatif.

2.9.1. Detektor HPGe

Detektor HPGe adalah detektor semikonduktor dengan bahan dasar Germanium murni. Proses pendeteksian pada detektor jenis ini adalah proses ionisasi yaitu pembentukan ion positif dan ion negatif (sepasang ion) dari sebuah atom netral. Proses ini berlangsung di suatu bahan yang disebut semikonduktor. Bahan semikonduktor murni dibuat dari unsur golongan IV A dimana pada elektron terluar terdapat empat buah elektron dari delapan tempat yang tersedia. Sebelum digunakan bahan ini harus didoping terlebih dahulu dengan bahan atau unsur lain. Berdasarkan bahan pengotornya (*impurities*) bahan semikonduktor dapat dibedakan menjadi semikonduktor jenis P dan jenis N.

Semikonduktor jenis P merupakan semikonduktor murni yang didoping dengan unsur golongan III A. Semikonduktor jenis ini mempunyai banyak *hole* yaitu pembawa muatan positif. Sebaliknya semikonduktor jenis N merupakan semikonduktor murni yang didoping dengan unsur golongan V A, pada semikonduktor jenis ini mengandung banyak elektron sebagai pembawa muatan negatif.

Sambungan antara semikonduktor jenis P dan jenis N mempunyai sifat elektronik yang dapat digunakan untuk pengukuran radiasi. Pada keadaan *forward* bias sambungan ini bersifat konduksi (meneruskan arus listrik) dan sebaliknya pada keadaan *reverse* bias akan bersifat isolasi (menahan arus listrik) hal ini disebabkan pada keadaan *forward* bias, *hole* dari semikonduktor jenis P akan terdorong menjauhi sambungan dan demikian pula dengan elektron-elektron dari semikonduktor jenis N, sehingga pada sambungan akan kehabisan pembawa muatan dan daerah ini disebut *depletion layer* (lapisan kosong muatan) karena tidak ada pertukaran muatan maka pada rangkaian ini tidak terjadi arus listrik.

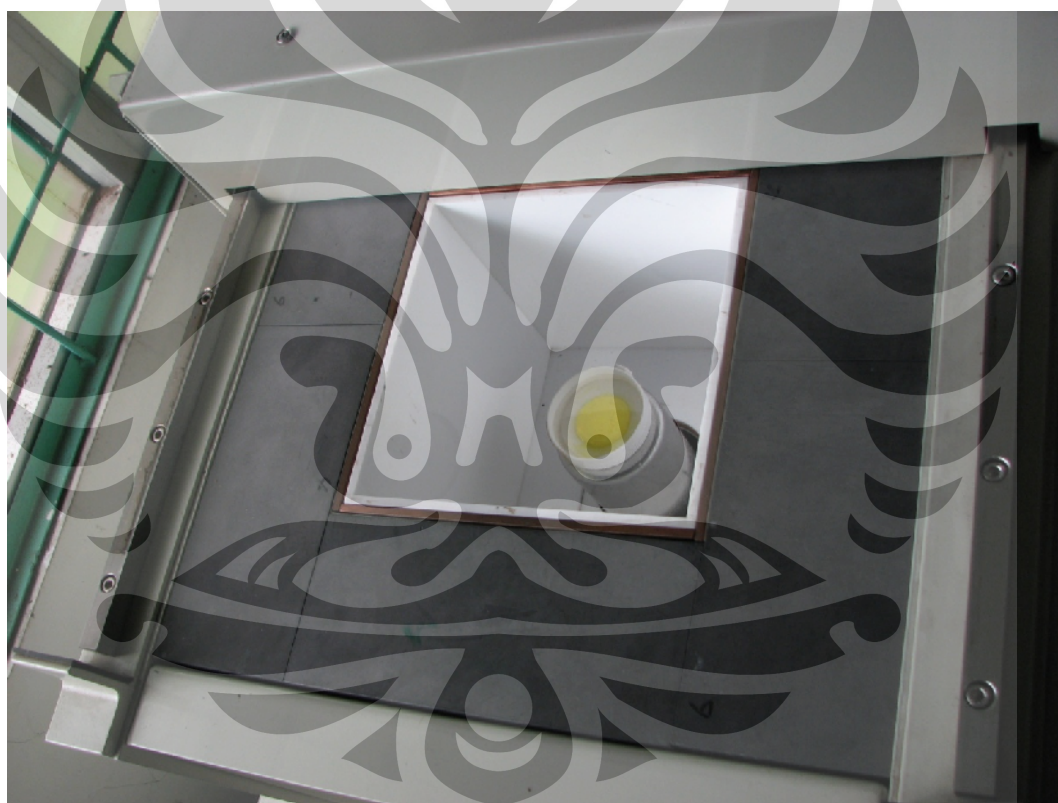
Daerah *depletion* ini ternyata sangat peka terhadap radiasi. Bila dikenai radiasi, daerah ini akan terionisasi yang menyebabkan elektron akan menuju kutub positif. *Hole*-elektron yang terbentuk ini akan bergerak menuju kutub-kutub listriknya dan akan menghasilkan tegangan antara kedua kutub listrik.

Detektor semikonduktor ini juga bersifat sebagai kapasitor, maka radiasi yang mengenainya akan diubah menjadi pulsa listrik. Tinggi pulsa listrik yang dihasilkan detektor ini dapat menunjukkan besarnya energi radiasi yang memasuki

daerah *depletion*. Hal ini karena semakin besar energi radiasi yang datang semakin banyak hole-elektron yang terbentuk sehingga perubahan tegangan diantara kedua kutub listriknya semakin besar.

Selain dapat mengukur energi radiasi yang mengenainya, detektor ini sangat peka dan mempunyai waktu tanggap yang sangat cepat bila dibandingkan dengan detektor lain, sehingga detektor semikonduktor ini dapat dikategorikan sebagai detektor dengan resolusi tinggi.

Detektor semikonduktor yang digunakan dalam analisis ini adalah detektor HPGe (*High Purity Germanium*) yang terbuat dari Germanium murni tanpa pengotor (*impurities*) dan merupakan semikonduktor jenis P.



Gambar 2.7 Pengukuran pada Spektroskopi Gamma Detektor HPGe

2.9.2. Detektor NaI(Tl)

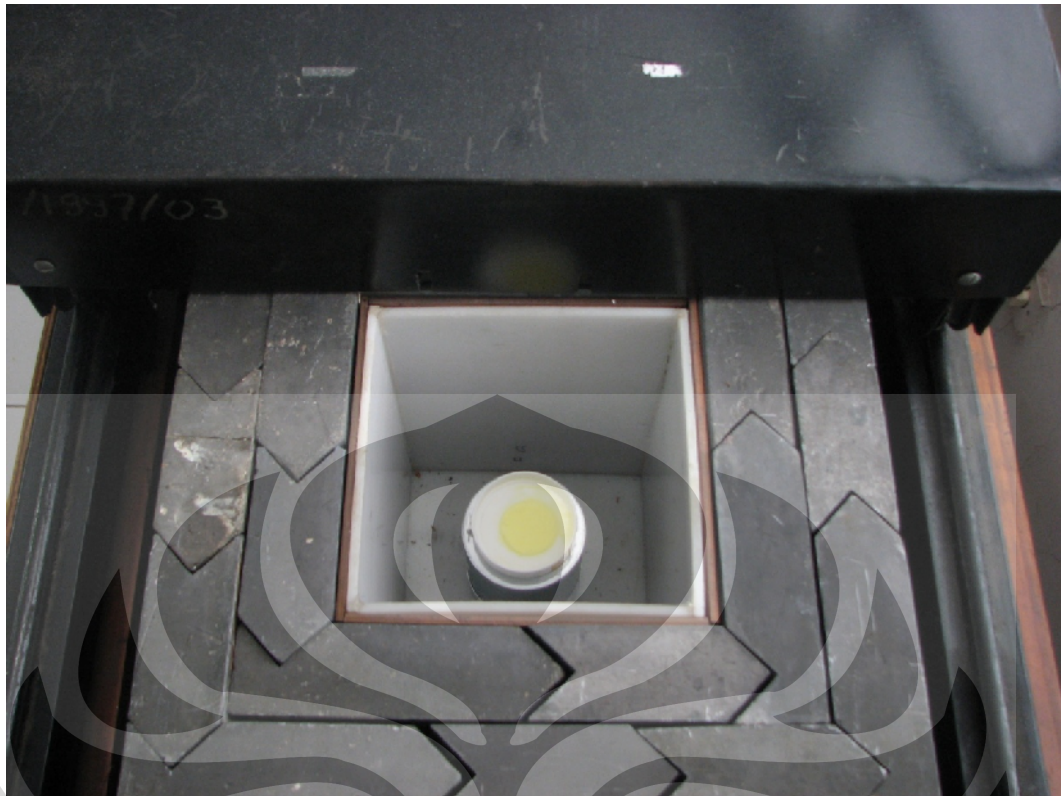
Detektor NaI(Tl) merupakan detektor sintilasi padat. Detektor ini terdiri dari dua bagian yaitu bahan sintilator dan *photomultiplier*. Bahan sintilator merupakan suatu bahan yang akan menghasilkan percikan cahaya bila dikenai radiasi pengion. *Photomultiplier* digunakan untuk mengubah percikan cahaya yang

dihasilkan bahan sintilator menjadi pulsa listrik. Mekanisme pendeteksian radiasi pada detektor sintilasi dapat dibagi menjadi dua tahap, yaitu proses perubahan radiasi yang mengenai detektor menjadi percikan cahaya di dalam bahan sintilator dan proses perubahan percikan cahaya menjadi pulsa listrik di dalam tabung *photomultiplier*.

Di dalam kristal bahan sintilator terdapat daerah yang dinamakan pita valensi dan pita konduksi yang dipisahkan dengan tingkat energi tertentu. Pada keadaan dasar, seluruh elektron berada di pita valensi sedangkan di pita konduksi kosong. Ketika ada radiasi yang memasuki kristal, ada kemungkinan energinya akan terserap oleh elektron di pita valensi sehingga elektron dapat berpindah ke pita konduksi. Beberapa saat kemudian elektron tersebut kembali ke pita valensi sambil memancarkan percikan cahaya. Percikan cahaya ini kemudian ditangkap oleh *photomultiplier*.

Tabung *photomultiplier* terbuat dari tabung hampa yang kedap cahaya dengan photokatoda yang berfungsi sebagai masukan pada salah satu ujungnya dan ada beberapa dinode untuk menggandakan elektron. Photokatoda yang ditempelkan pada bahan sintilator, akan memancarkan elektron bila dikenai cahaya dengan panjang gelombang yang sesuai. Elektron yang dihasilkan akan diarahkan menuju dinode pertama. Dinode tersebut akan memancarkan beberapa elektron sekunder bila dikenai elektron.

Elektron-elektron sekunder yang dihasilkan dinode pertama akan menuju dinode kedua dan dilipatgandakan, kemudian ke dinode ketiga dan seterusnya sehingga elektron yang terkumpul pada dinode terakhir sangat banyak. Dengan sebuah kapasitor kumpulan elektron tersebut diubah menjadi pulsa listrik.



Gambar 2.8 Pengukuran pada Spektroskopi Gamma Detektor NaI(Tl)

2.10 Pengukuran Aktivitas

Untuk menghitung nilai aktivitas dari cacahan diperlukan nilai efisiensi yang didapatkan dari pengukuran sumber standar sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{R}{A_{st} \cdot p} \quad (2.7)$$

Selanjutnya aktivitas dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = \frac{R}{\varepsilon \cdot p} \quad (2.8)$$

- A = Aktivitas
- R = Laju cacah (Cacahan per detik)
- ε = Efisiensi
- P = Probabilitas pemancaran radiasi

2.11 Perangkat Lunak *Disk Efficiency*

Perangkat lunak disk efficiency dibuat oleh Masayasu Noguchi. Perangkat lunak ini berfungsi untuk menghitung nilai efisiensi dari sampel berbentuk volum pada energi tertentu, dengan tahapan sebagai berikut :

1. Mengukur aktivitas beberapa radionuklida sumber standar berupa disk dengan variasi jarak.
2. Menghitung nilai efisiensi pada setiap energi energy $\eta_{h,E}$
3. Memformulasikan persamaan nilai efisiensi sebagai fungsi energi $\eta_h(E)$ pada setiap variasi jarak h.

$$\ln \eta_h(E) = a + b \cdot \ln(E) + c \cdot \ln(E)^2 \quad (2.9)$$

4. Memformulasikan persamaan nilai efisiensi sebagai fungsi jarak $\eta_E(h)$ pada setiap variasi energi E.

$$\eta_E(h) = (a + b \cdot h + c \cdot h^2 + d \cdot h^3)^{-1} \quad (2.10)$$

5. Menghitung nilai efisiensi dari suatu radionuklida dalam suatu bentuk volum dengan $H (= H_2 - H_1)$ dengan proses ntegrasi

$$\varepsilon_v(H, \mu) = \int_{H_1}^{H_2} \eta_E(h) \cdot e^{-\mu d} dh/H \quad (2.11)$$

Dimana,

H_1 dan H_2 = batas atas dan batas bawah jarak matrik ke permukaan detektor

H = ketebalan matrik ($H = H_2 - H_1$)

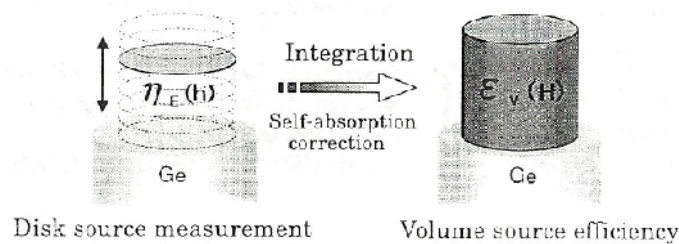
μ = koefisien atenuasi linear ($\mu = \rho \cdot \mu_m$)

d = sinar gamma efektif dalam matrik, dengan $r = R/v^2$

$$d = \{h/(C_{EC} + h)\} \cdot \{r^2 + (C_{EC} + h)^2\}^{1/2}$$

C_{EC} = jarak efektif dari Ge kristal

Efisiensi yang didapatkan dari persamaan tersebut digunakan untuk menghitung aktivitas dari sumber yang diukur.



Gambar 2.9 Integrasi dari efisiensi sumber berbentuk disk menjadi efisiensi volum

2.12 Kedapatulangan

Nilai kedapatulangan menunjukkan bagian radionuklida yang sampai ke akhir proses, dihitung sebagai berikut:

$$\text{Kedapatulangan } (\varepsilon_r) = \frac{A_p}{A_{st}} \times 100\% \quad (2.12)$$

A_p = Aktivitas radionuklida dalam sampel setelah proses

A_{st} = Aktivitas radionuklida yang ditambahkan

Dengan adanya nilai kedapatulangan, maka perhitungan nilai aktivitas menjadi:

$$A = \frac{R}{\varepsilon_p \cdot \varepsilon_r} \quad (2.13)$$

2.13 Minimum Detectable Activity (MDA)

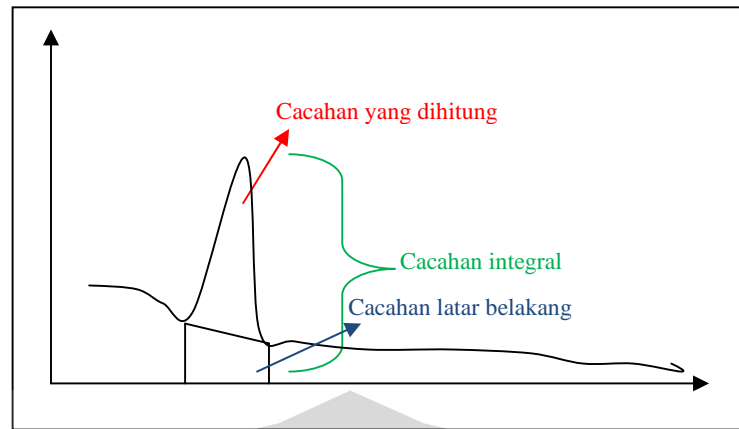
Limit deteksi adalah suatu batas nilai yang digunakan untuk menentukan kelayakan suatu nilai cacahan untuk dianalisis. Nilai limit deteksi ditentukan berdasarkan deviasi standar cacah latar belakang dengan tingkat kepercayaan 95 % (BATAN, n.d.).

$$LD = 6,15 \cdot \sqrt{B_{lb}} \quad (2.14)$$

LD = Limit Deteksi

B_{lb} = Cacahan latar belakang

Limit deteksi pada pengukuran dengan spektrometer gamma dilakukan dengan menghitung cacahan latar belakang, yaitu cacahan integral dikurangi dengan luas area/cacahan sebenarnya.



Gambar 2.10 Skema Pengukuran Cacahan pada Spektrum

Untuk mendapatkan Limit Deteksi dalam nilai aktivitas, maka dihitung sebagai berikut:

$$MDA = \frac{LDR}{\varepsilon \cdot p} \quad (2.15)$$

MDA = *Minimum Detectable Activity*

ε = efisiensi untuk puncak radiasi gamma

p = probabilitas pemancaran radiasi gamma

LDR = Laju cacah (Limit deteksi) per satuan waktu

2.14. Propagasi Error

Propagasi error adalah metode untuk menghitung simpangan suatu nilai yang berasal dari beberapa faktor, misalnya beberapa hasil pengukuran dan data pendukung lainnya. Rumusan dasar propagasi error untuk suatu nilai F yang merupakan fungsi dari faktor X , Y dan Z adalah sebagai berikut.

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial X}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial Z}\right)^2 \sigma_z^2} \quad (2.16)$$

σ_f adalah simpangan baku nilai F yang merupakan kalkulasi dari faktor nilai X , Y , dan Z . σ_x , σ_y , dan σ_z adalah simpangan baku nilai X , Y dan Z .

Berdasarkan perhitungan di atas, perhitungan propagasi error, untuk relasi matematik dengan operasi perkalian dan pembagian diturunkan sebagai berikut :

$$\frac{\sigma_f}{F} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2} \quad (2.17)$$

Contoh penentuan simpangan baku dari aktivitas dengan mengabaikan simpangan baku dari probabilitas pemancaran radiasi :

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2} \quad (2.18)$$



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Bahan dan Alat Penelitian

3.1.1. Bahan

- | | |
|-------------------------------------|--|
| - air laut | - NaCl (Merck) |
| - susu sapi | - CaCl ₂ (Merck) |
| - Ammonium | - HNO ₃ (Merck) |
| fosfomolibdat (AMP) | - MgCl ₂ (Merck) |
| - aquades | - K ₂ SO ₄ (Merck) |
| - HCl 12 M (25 %) | - KCl (Merck) |
| (Merck) | - Kertas saring |
| - Larutan pengemban Cs ⁺ | - Kertas stiker |
| (Cs-137) | |

3.1.2. Alat

- Spektrometer gamma detektor HPGe dan detektor NaI(Tl) dengan software Genie 2000
- Perangkat lunak *disk efficiency*
- Lemari asam
- Oven
- *Hot Plate*
- *Furnace*
- Timbangan Sartorius
- Pompa vakum
- Pipet mikro
- Pipet volum
- Beaker glass 5 L, 2 L, 1 L, 500 mL, 250 mL, 100 mL, 50 mL
- Labu ukur 100 mL, 50 mL, 25 mL
- Peralatan gelas lain
- *Magnetic stirrer*

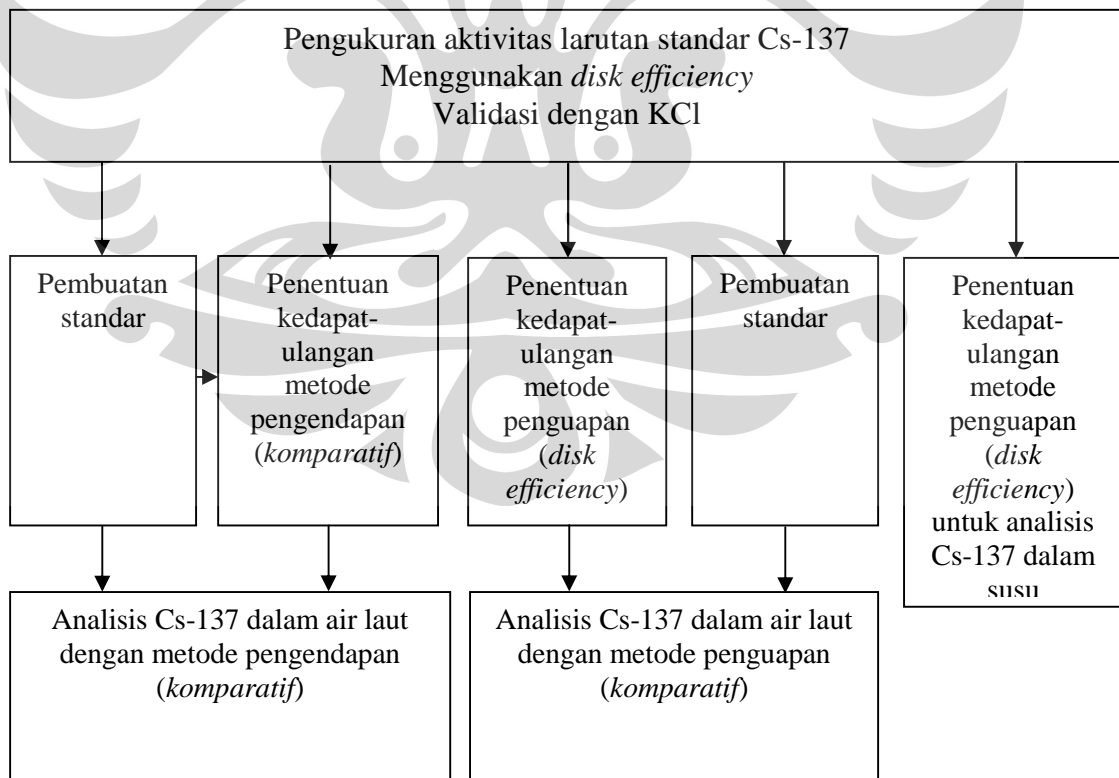
3.2 Prosedur Kerja

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap. Secara garis besar alur penelitian dilakukan seperti pada gambar 3.1.

Tahap pertama adalah pengukuran aktivitas larutan standar Cs-137 menggunakan *disk efficiency*, dimana larutan standar tersebut akan digunakan dalam semua tahap penelitian.

Tahap selanjutnya dilakukan pembuatan standar untuk penentuan nilai efisiensi yang diperlukan dalam penentuan kedadapatulangan metode pengendapan dan penentuan aktivitas dalam sampel. Kemudian dilakukan penentuan kedadapatulangan metode pengendapan dan analisis sampel menggunakan nilai efisiensi yang sudah diperoleh.

Penentuan aktivitas pada kedadapatulangan untuk metode penguapan air laut dan susu dilakukan dengan perangkat lunak *disk efficiency*. Pembuatan standar dalam merinerli digunakan untuk menentukan efisiensi yang digunakan pada analisis sampel air laut. Sedangkan penentuan efisiensi dalam sampel susu dilakukan menggunakan perangkat lunak *disk efficiency*.



Gambar 3.1 Alur penelitian

3.2.1. Pengukuran Aktivitas Standar

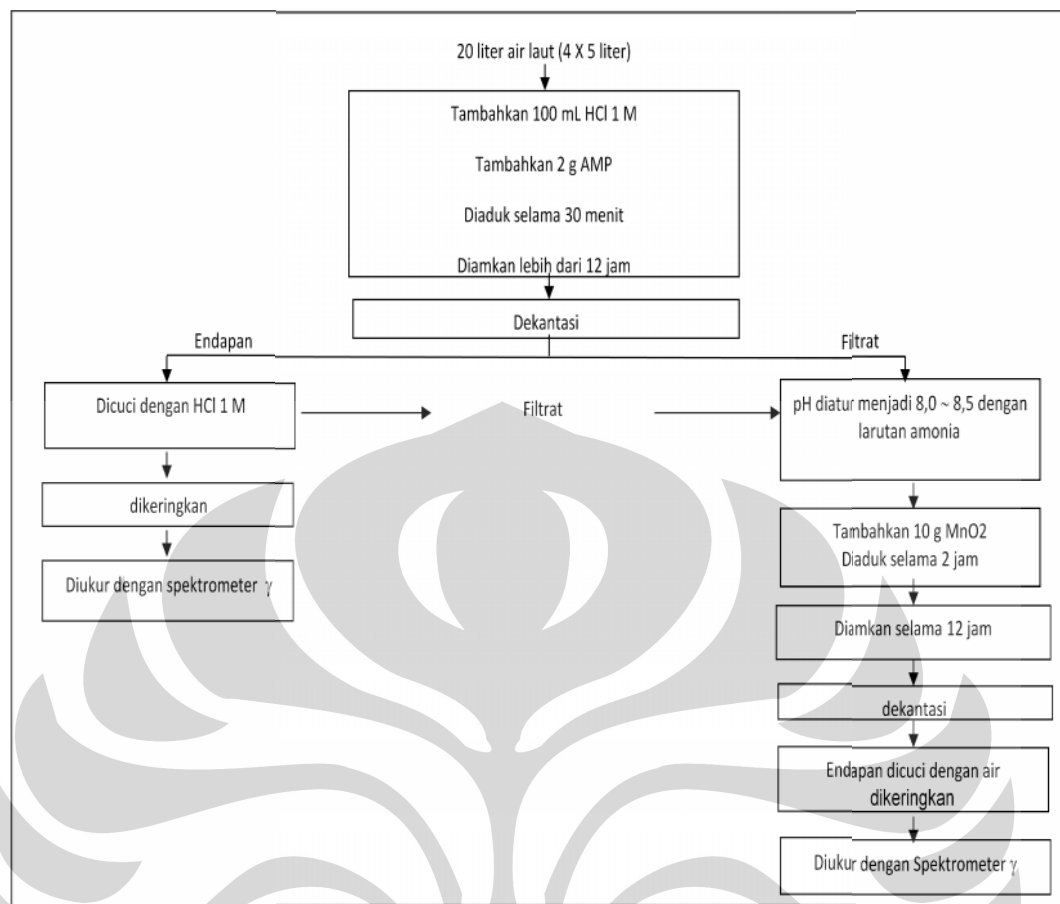
Larutan standar Cs-137 diperlukan untuk pembuatan standar dalam pengukuran secara komparatif dan untuk penentuan kedapatulangan proses. Larutan standar Cs-137 sebanyak 150 mL diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe selama 1 jam. Aktivitas ditentukan berdasarkan nilai efisiensi yang didapat dengan perangkat lunak *disk efficiency*.

Perhitungan dengan perangkat lunak *disk efficiency* divalidasi dengan membandingkan aktivitas K-40 dalam serbuk KCl sebanyak 150 g secara perhitungan dan pengukuran selama 1 jam.

3.2.2. Analisis Cs-137 dalam Air Laut dengan Metode Pengendapan

Analisis Cs-137 dalam sampel air laut yang diperkenalkan oleh JCAC. Tahap pertama adalah pengendapan dengan AMP. Tahap ini dimulai dengan mengasamkan air laut dengan HCl, untuk 5 liter air laut ditambahkan 100 mL HCl 1 M supaya diperoleh pH 2. Lalu ditambahkan AMP dan diaduk selama 30 menit. Setelah itu didiamkan selama 12 jam. Endapan yang terbentuk (endapan 1) dan filtratnya dipisahkan.

Tahap selanjutnya adalah pengendapan dengan MnO₂. Endapan 1 dicuci dengan HCl, dan hasil cucian disatukan dengan filtrat. Filtrat dibasakan dengan larutan ammonia pH 8,0-8,5. Lalu ditambahkan 10 gram bubuk MnO₂, diaduk selama 2 jam dan didiamkan selama 12 jam. Endapan yang terbentuk (endapan 2) dipisahkan dari filtrat. Endapan 2 dicuci dengan air. Endapan 2 dan endapan 1 disatukan dan diaduk, diukur menggunakan spektrometer gamma. Secara skematik, langkah kerja tersebut ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema kerja metode pengendapan

3.2.2.1. Pembuatan Standar

AMP dengan massa tertentu ditambah 50 mL larutan HCl pH 2 dan dilakukan penyaringan untuk mendapatkan geometri yang sama dengan sampel. Endapan dikeringkan menggunakan lampu pemanas. Dalam kondisi endapan setengah kering, ditambah larutan Cs-137. Endapan diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe dan NaI(Tl).

3.2.2.2. Penentuan Kedapatulangan Metode Pengendapan

Dalam penentuan nilai kedapatulangan, sampel yang digunakan berupa air laut buatan dengan komposisi garam sebanyak 3,5 % dari masa keseluruhan, dan densitas sebesar 1,025 Kg/L. Untuk 20 liter air laut buatan dibutuhkan 565 g NaCl, 104 g K₂SO₄, 71 g MgCl₂ dan 19 g CaCl₂.

Kandungan Cs-137 dalam air laut buatan sebagai blanko diuji untuk memastikan tidak terdeteksi adanya Cs-137, karena garam berasal dari air laut.

Sampel air laut buatan sebanyak 20 L diproses dengan metode pengendapan. Endapan diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe.

Sampel air laut buatan sebanyak 2 liter ditambah larutan standar Cs-137, selanjutnya diproses dengan metode pengendapan. Endapan diukur dengan spektrometer gamma HPGe dan spektrometer gamma NaI(Tl), untuk membandingkan nilai efisiensi dari sistem pencacah dan mendapatkan nilai kedapatulangan.

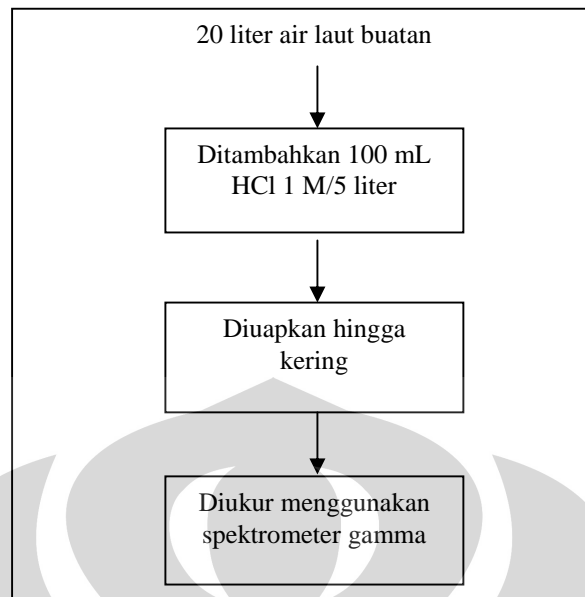
Sampel air laut buatan dengan volume 5 L ditambah larutan standar Cs-137 dan diproses dengan metode pengendapan, tetapi tanpa penambahan carrier. Sampel air laut buatan dengan volume 5 L ditambah larutan standar Cs-137 dan diproses dengan langkah kerja untuk analisis Cs-137. Endapan diukur menggunakan spektrometer HPGe selama 1 jam. Aktivitas dihitung secara komparatif dengan sumber standar.

3.2.2.3. Analisis Sampel

Sampel Air laut dari Pantai Ancol sebanyak 20 L diproses sesuai langkah kerja analisis Cs-137. Endapan diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe dan NaI(Tl) . Aktivitas dihitung secara komparatif dengan sumber standar.

3.2.3. Analisis Cs-137 dalam Sampel Air Laut dengan Metode Penguapan

Sebanyak 20 liter air laut diasamkan supaya diperoleh pH 2, lalu di tempatkan dalam gelas beaker 5 liter. Masing-masing diuapkan menggunakan pemanas hingga hampir kering. Endapan dipindahkan ke tabung Merineli ukuran 1 liter. Ke dalam sampel ditambah air untuk mendapatkan volume 1 L. Sampel diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe.



Gambar 3.3 Skema Kerja Analisis Cs-137 dalam Air Laut dengan Metode Penguapan

3.2.3.1. Penentuan Nilai Kedapatulangan Metode Penguapan

Sampel air laut dengan volume tertentu ditambah Cs-137. Selanjutnya diproses sesuai langkah analisis Cs-137. Residu diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Nilai efisiensi pengukuran ditentukan menggunakan perangkat lunak *disk efficiency*.

3.2.3.2. Analisis Sampel

Sampel air laut sebanyak 20 L diproses sesuai langkah kerja metode penguapan. Residu dipindahkan ke tabung merineli ukuran 1 liter dan diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Aktivitas ditentukan berdasarkan nilai efisiensi yang diperoleh dari perangkat lunak *disk efficiency*.

3.2.4. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Penguapan

Susu sapi diasamkan, lalu dipanaskan dengan suhu 100 °C sampai kering. Residu diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Aktivitas ditentukan berdasarkan nilai efisiensi yang diperoleh dari perangkat lunak *disk efficiency*.

3.2.4.1. Penentuan Kedapatulangan

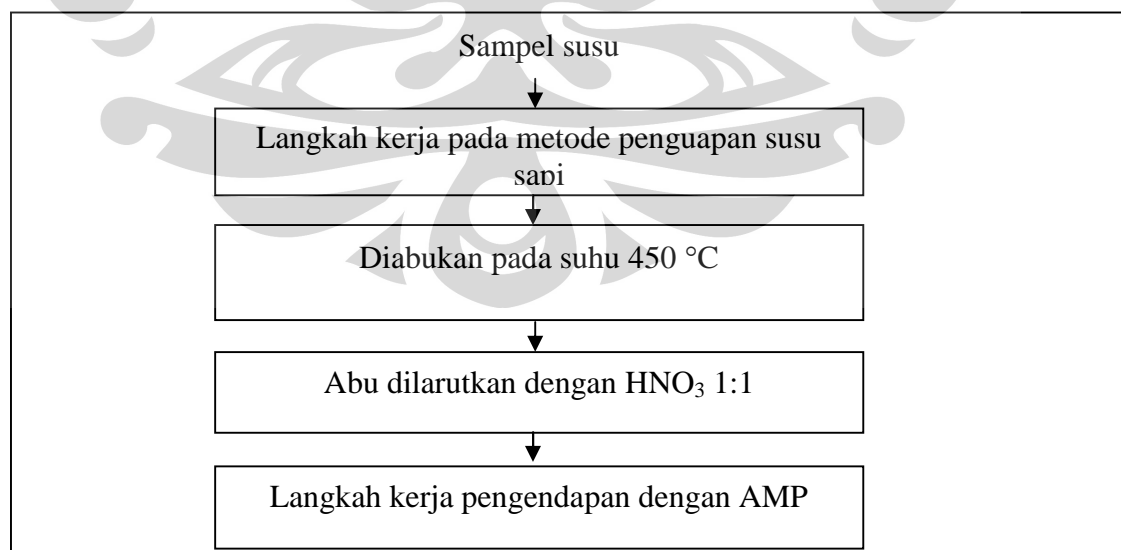
Susu sapi ditambah larutan standar Cs-137. Selanjutnya diproses dengan metode penguapan. Residu diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Aktivitas ditentukan berdasarkan nilai efisiensi yang diperoleh dari perangkat lunak *disk efficiency*.

3.2.4.2. Analisis Sampel

Sampel susu sapi diperoleh dari daerah Bogor. Volume susu sapi yang diproses sebanyak 4 L. Setelah diproses, residu diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Aktivitas ditentukan berdasarkan nilai efisiensi yang diperoleh dari perangkat lunak *disk efficiency*.

3.2.5. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Pengendapan

Pada metode pengendapan, sampel diproses seperti pada metode penguapan dan dilanjutkan dengan pengabuan susu kering pada suhu 450 °C selama 8 jam. Abu dibasahi dengan air, diberi HNO₃ (1:1) lalu dipanaskan, didinginkan dan disaring, perlakuan ini diulang sebanyak 2 kali. Filtrat disatukan, dan dilanjutkan dengan langkah seperti pada metode pengendapan. Penentuan aktivitas dilakukan secara komparatif dengan sumber standar. Skema proses seperti pada gambar 3.4



Gambar 3.4 Skema Kerja Analisis Cs-137 Dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Pengendapan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengukuran Aktivitas Standar

Perangkat lunak *disk efficiency* digunakan untuk menentukan nilai efisiensi pada energi tertentu dari suatu sampel yang mengandung radionuklida dalam bentuk volum yang ditempatkan dalam wadah *securitainer* (tabung dengan diameter $60 \pm 0,5$ mm) dan diukur menggunakan spektrometer HPGe. Pada penggunaan perangkat lunak *disk efficiency* ini, terlebih dahulu dilakukan pengukuran sumber standar campuran Cr-51, Mn-54, Co-57, Co-60, Sr-85, Y-88, Cs-137, Cd-109, Ce-139 yang berbentuk *disk* (piringan) berdiameter sama dengan diameter *securitainer*. Pengukuran sumber standar dilakukan dengan variasi jarak pengukuran sumber dan detektor. Penggunaan campuran radionuklida bertujuan mendapatkan nilai efisiensi untuk berbagai energi, mulai dari energi rendah hingga energi relatif tinggi. Sumber standar dicacah selama 3600 detik dengan jarak 0,1 cm, 0,5 cm, 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Cacahan yang didapatkan dari pengukuran tersebut diolah dengan perangkat lunak *disk efficiency* dan diperoleh persamaan efisiensi sebagai fungsi dari energi. Persamaan tersebut disimpan untuk penentuan nilai efisiensi lebih lanjut.



Gambar 4.1 *Securitainer* Wadah Sampel

Larutan standar Cs-137 yang digunakan sebanyak $100 \mu\text{L} \pm 1 \%$ ditambahkan ke dalam $(150 \pm 0,27)$ mL air yang sudah ditempatkan dalam *securitainer*. Aktivasinya diukur menggunakan spektrometer gamma selama 1800 detik. Area atau cacahan puncak Cs-137 sebesar 5698 cacah $\pm 1,33 \%$, seperti ditunjukkan pada spektrum gamma (lampiran 2). Efisiensi pengukuran diperoleh menggunakan perangkat lunak *disk efficiency* dengan kondisi massa jenis air $1 \text{ gram/cm}^3 \pm 1 \%$ dan tinggi larutan $5,30 \text{ mm} \pm 2 \%$. Berdasarkan nilai efisiensi sebesar $(1,26 \pm 0,045) \%$, maka didapatkan aktivitas sebesar (296 ± 11) Bq, dan aktivitas jenis sebesar $(1,97 \pm 0,07)$ Bq /mL. Standar tersebut digunakan untuk pembuatan standar pada pengukuran cara komparatif dan untuk penentuan kedapatulangan.

Validasi pengukuran dilakukan dengan mengukur aktivitas K-40 yang memiliki energi gamma 1460 keV dari 150 gram KCl selama 1800 detik. Cacahan yang didapatkan sebanyak 3749 cacahan $\pm 1,64 \%$ (lampiran 3) dengan nilai efisiensi yang diolah dengan perangkat lunak *disk efficiency* sebesar $(0,79 \pm 0,03) \%$. Dari pengukuran dapat diperoleh aktivitas sebesar (2466 ± 96) Bq sedangkan secara teoritis nilai aktivitasnya sebesar 2448 Bq, dengan perbedaan 0,73 %. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penentuan nilai efisiensi menggunakan perangkat lunak *disk efficiency* valid dan dapat diterima.

4.2. Analisis Cs-137 dalam Air Laut dengan Metode Pengendapan

4.2.1. Pembuatan Standar

Standar yang dibuat digunakan untuk mendapatkan nilai efisiensi pengukuran dengan geometri tertentu, yaitu Cs-137 dalam AMP hasil penyaringan. Nilai efisiensi yang diperoleh, digunakan untuk menghitung nilai aktivitas pada penentuan kedapatulangan metode pengendapan dan pada penentuan aktivitas sampel. Standar untuk penentuan kedapatulangan memiliki aktivitas sebesar $(0,98 \pm 0,04)$ Bq. Pada pengukuran standar menggunakan spektrometer gamma HPGe (lampiran 4) dan NaI(Tl) (lampiran 5) diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 4.1 Perbandingan Pengukuran Standar dengan Spektrometer HPGe dan NaI(Tl), Aktivitas Standar 0,98 Bq

	Spektrometer Gamma dengan detektor	
	HPGe	NaI(Tl)
Waktu pengukuran (detik)	3600	64.800
Cacahan	171 ± 7,96 %	7808 ± 3,46%
Integral	179	35209
Latar Belakang (B)	8	27401
Limit deteksi (cacah)	17	1018
Efisiensi (%)	5,6 ± 0,45	14,36 ± 0,49

Sedangkan standar untuk analisis sampel memiliki aktivitas sebesar (0,098 ± 0,004) Bq, dengan spektrum pada lampiran 6 dan hasil pengukuran pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan Pengukuran Standar dengan Spektrometer HPGe dan NaI(Tl), Aktivitas Standar 0,098 Bq

	Spektrometer Gamma dengan detektor	
	HPGe	NaI(Tl)
Waktu pengukuran (detik)	144.000	144.000
Cacahan	513 ± 5,87 %	50 ± 155,39%
Integral	765	4652
Latar Belakang (B)	252	4602
Limit deteksi (cacah)	97	417
Efisiensi (%)	4,27 ± 0,25	Tidak dapat ditentukan

Dalam pengukuran standar dengan aktivitas 0,098 Bq, pada detektor NaI (Tl) tidak dapat ditentukan nilai efisiensinya. Hal ini disebabkan oleh nilai cacahan yang didapat di bawah limit deteksinya. Cacahan latar belakang yang terukur sebanyak 4602 cacahan, maka limit deteksinya sebesar 417 cacahan. Cacahan yang didapat hanya 50 cacahan.

Sistem spektroskopi dengan detektor NaI(Tl) memiliki efisiensi yang relatif besar dan nilai limit deteksi lebih besar. Walaupun sistem pencacah jenis ini

dapat membedakan energi, tetapi karena resolusinya tidak terlalu baik, maka sistem pencacah ini tidak bisa memisahkan dua puncak dari radionuklida yang memancarkan radiasi dengan energi berdekatan.

Sistem spektroskopi dengan detektor HPGe memiliki resolusi yang baik, sehingga bisa memisahkan dua puncak yang memiliki perbedaan energi 2 KeV. Sistem ini memiliki nilai efisiensi yang kecil dan karena dilengkapi dengan penahan radiasi yang cukup tebal, maka memberikan nilai cacah latar belakang yang relatif sangat kecil dengan nilai MDA yang jauh lebih baik.

4.2.2. Penentuan Kedapatulangan Metode Pengendapan

Konsentrasi rata-rata Cs-137 dalam air laut sangat rendah, yaitu sekitar 2 Bq/m³ atau sekitar 2 mBq/L. Oleh karena itu diperlukan metode khusus untuk mengambil Cs yang jumlahnya sangat sedikit dari volume sampel yang relatif besar.

Pada penentuan kedapatulangan digunakan air laut buatan, oleh karena itu perlu dilakukan uji kandungan Cs-137 dalam garam dapur yang digunakan untuk membuat air laut buatan. Preparasi terhadap air laut buatan dilakukan sesuai dengan preparasi pada analisis sampel. Pengukuran endapan dilakukan menggunakan spektrometer gamma HPGe selama 40 jam dan diperoleh nilai area sebesar 0 cacahan \pm 0,0% (lampiran 7), yang menunjukkan tidak terdeteksi adanya Cs-137 dalam garam dapur.

Pada penentuan kedapatulangan metode pengendapan untuk pengendapan tahap I dilakukan 2 kali tanpa pengemban Cs dan 1 kali dengan penambahan pengemban Cs. Endapan diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe diperoleh spektrum (lampiran 8) dan hasil ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Kedapatulangan Metode Pengendapan

	Kedapatulangan		
	Tanpa Pengemban		Dengan Pengemban
	I	II	
T _{bg}	3600	3600	3600
C _{bg}	3	5	5
T _s	3600	3600	3600
C _s	132 ± 8,86 %	136 ± 8,83%	180 ± 7,60 %
A _s	0,769 ± 0,09	0,792 ± 0,09	1,01 ± 0,11
A _{st}	0,98 ± 0,04	0,98 ± 0,04	0,98 ± 0,04
Kedapatulangan (%)	(78 ± 10) %	(80 ± 10) %	(100 ± 12) %

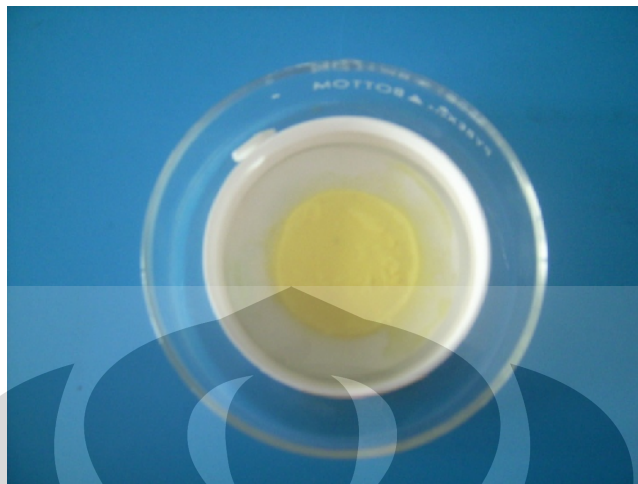
Penambahan pengemban Cs meningkatkan nilai kedapatulangan menjadi 100 %. Hal tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut, metode pengendapan yang dilakukan merupakan pertukaran ion, Cs⁺ akan menggantikan ion ammonium pada AMP. Kesetimbangan Cs-MP dapat dituliskan sebagai berikut:



Sebelum ditambah pengemban Cs, konsentrasi Cs dalam skala kecil, yaitu sekitar $6 \cdot 10^{-16}$ g/L. Untuk mengendapkan Cs-137 dalam air laut dengan konsentrasi sangat rendah, maka penambahan AMP dilakukan berlebih agar terjadi pengendapan. Sebagian Cs tetap berada dalam larutan. Penambahan pengemban Cs non-radioaktif yang membuat konsentrasi Cs dalam sampel menjadi sebesar $2,3 \times 10^{-5}$ M, akan mengurangi jumlah Cs-137 dalam larutan. Penjelasan berdasarkan nilai K_{sp} tidak dapat dilakukan, karena dalam penelusuran acuan nilai tersebut tidak dapat ditemukan. Berdasarkan nilai kedapatulangan tersebut, maka untuk preparasi selanjutnya dilakukan dengan menambahkan pengemban Cs.

Pada pengendapan tahap kedua atau pengendapan dengan MnO₂, hanya didapatkan cacahan sebesar 4 cacahan ± 59,45% pada pengukuran selama 1800 detik (spektrum pada lampiran 9). Cacahan latar belakang sebesar 2, sehingga limit deteksinya sebesar 8 cacahan, maka pengendapan dengan MnO₂ atau

pengendapan tahap 2 dapat diabaikan. Pada preparasi selanjutnya hanya dilakukan pengendapan AMP, tanpa dilanjutkan dengan pengendapan MnO_2 .



Gambar 4.2 Endapan dalam Planset untuk Pengukuran

4.2.3. Analisis Sampel

Pada analisis sampel air laut, pengukuran endapan dilakukan menggunakan spektrometer gamma HPGe dan NaI(Tl) (spektrum pada lampiran 10) dengan hasil ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Sampel Air Laut

	HPGe	NaI(Tl)
Waktu pengukuran	40 jam	40 jam
Cacah latar belakang (B)	363	3617
Cacah sampel	$213 \pm 13,67 \%$	$3 \pm 2395 \%$
Efisiensi (%)	$4,27 \pm 0,25$	Tidak dapat ditentukan
Aktivitas (Bq)	$0,044 \pm 0,006$	Tidak terdeteksi
Konsentrasi Cs-137 (Bq/m^3)	$2,2 \pm 0,3$	Tidak terdeteksi

Walaupun efisiensi spektrometer gamma NaI(Tl) cukup besar, tetapi ternyata tidak mampu mengukur Cs-137 dengan aktivitas 0,044 Bq, karena cacah latar belakang jauh lebih besar daripada cacah latar belakang pada spektrometer gamma HPGe.

Konsentrasi Cs-137 dalam sampel air yang diambil dari Pantai Ancol sebesar $(2,2 \pm 0,3) \text{ Bq/m}^3$. Berdasarkan acuan, konsentrasi Cs-137 di lautan Asia-Pacific sebesar 3 Bq/m^3 . Hasil pengukuran sesuai dengan acuan yang ada.

4.3. Analisis Cs-137 dalam Air Laut dengan Metode Penguapan

4.3.1. Pembuatan Standar

Standar untuk pengukuran sampel air laut yang dibuat digunakan untuk mendapatkan nilai efisiensi pengukuran dengan geometri tertentu. Sampel air laut sebanyak 20 liter yang diuapkan menghasilkan garam sekitar 800 gram, volum dijadikan 1 liter dengan penambahan air. Untuk mendapatkan geometri yang sama dengan sampel, standar dibuat dari garam sebanyak 800 gram lalu volum dibuat satu liter dengan penambahan air, ditambahkan Cs-137 dengan aktivitas sebesar $(0,592 \pm 0,06) \text{ Bq}$.

4.3.2. Penentuan Kedapatulangan Metode Penguapan

Pada penentuan kedapatulangan metode penguapan digunakan air laut buatan yang dibuat dari garam yang sudah diuji tidak terdeteksi adanya Cs-137. Ke dalam air laut buatan tersebut ditambahkan Cs-137 dengan aktivitas sebesar $38 \pm 1,7 \text{ Bq}$. Residu hasil penguapan diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe. Efisiensi pengukuran ditentukan menggunakan perangkat lunak *disk efficiency*. Dengan waktu pengukuran 1800 detik, diperoleh cacahan $934 \pm 3,32\%$ dan efisiensi sebesar $2,07 \%$, diperoleh aktivitas sebesar $29 \pm 1,4 \text{ Bq}$. Nilai kedapatulangan untuk metode penguapan sebesar $77 \pm 5\%$.

4.3.3. Analisis Sampel

Dalam analisis sampel dengan metode penguapan, residu berupa garam yang dihasilkan cukup banyak, sehingga tidak bisa dimasukkan dalam *securitainer*. Oleh karena itu residu dimasukkan dalam tabung merineli 1 liter. Dalam kondisi kering, residu sulit diambil semua, residu masih bercampur dengan sedikit air dan volume dibuat 1 liter dengan menambah air. Residu diukur menggunakan spektrometer gamma HPGe selama 40 jam.



Gambar 4.3 Merineli ukuran 1 liter

Dari pengukuran diperoleh cacahan sebesar $76 \pm 38,8 \%$ (spektrum pada lampiran 11). Cacah latar belakang yang didapatkan sebesar 413 cacahan, diperoleh nilai limit deteksi sebesar 125, sehingga cacahan dari sampel tidak layak untuk dianalisis. Aktivitas Cs-137 dari sampel dengan volume 20 liter dengan metode penguapan tidak dapat dideteksi, karena efisiensi pengukuran residunya lebih kecil dibandingkan dalam bentuk endapan AMP.

4.4. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Penguapan

4.4.1. Penentuan Kedapatulangan

Pada penentuan kedapatulangan metode penguapan digunakan susu perah, oleh karena itu perlu dilakukan uji kandungan Cs-137 dalam susu perah yang digunakan untuk penentuan kedapatulangan. Pada sampel susu sapi, berbeda dengan air laut yang banyak mengandung garam, susu sapi lebih banyak mengandung zat-zat organik seperti lemak, protein dan gula. Endapan yang dihasilkan dari 4 liter air susu sapi sebanyak 734,9 gram. Endapan seperti karamel dan tidak terlalu kering, karena banyak mengandung minyak. Pengukuran endapan dilakukan dalam *securitainer* dan nilai efisiensinya ditentukan

menggunakan perangkat lunak *disk efficiency*. Dengan pengukuran selama 60 jam diperoleh cacahan sebesar $203 \pm 13,87 \%$ (spektrum pada lampiran 12). Aktivitas yang didapatkan sebesar $0,240 \pm 0,034$ Bq. Nilai aktivitas tersebut belum merupakan aktivitas dari sampel, karena belum memperhitungkan nilai kedapatulangan.

Proses yang sama dilakukan terhadap susu sapi yang ditambah Cs-137 dengan aktivitas $0,986 \pm 0,040$ Bq. Dari hasil pengukuran diperoleh aktivitas sebesar $0,983 \pm 0,132$ Bq. Nilai aktivitas yang terukur tersebut merupakan gabungan dari nilai aktivitas dalam susu sapi dan aktivitas yang ditambahkan. Nilai dari kedapatulangan dapat diperoleh dengan cara perumusan sebagai berikut:

$$A_{\text{terukur}} = (A_{\text{standar}} + A_{\text{sampel}}) \times \epsilon_r \quad (4.1)$$

$$A_{\text{terukur}} = A_{\text{standar}} \times \epsilon_r + A_{\text{sampel}} \times \epsilon_r \quad (4.2)$$

$$A_{\text{standar}} \times \epsilon_r = A_{\text{terukur}} - \frac{R_{\text{sampel}}}{\epsilon.p.\epsilon_r} \times \epsilon_r \quad (4.3)$$

$$A_{\text{standar}} \times \epsilon_r = A_{\text{terukur}} - \frac{R_{\text{sampel}}}{\epsilon.p} \quad (4.4)$$

$$A_{\text{standar}} \times \epsilon_r = A_{\text{terukur}} - A'_{\text{sampel}} \quad (4.5)$$

$$\epsilon_r = \frac{A_{\text{terukur}} - A'_{\text{sampel}}}{A_{\text{standar}}} \quad (4.6)$$

Berdasarkan perhitungan tersebut di atas, diperoleh kedapatulangan metode penguapan sebesar $75 \pm 15 \%$

4.4.2. Analisis Sampel

Analisis sampel dilakukan dengan *securitainer* sebanyak 140 gram dari keseluruhan 734,9 gram endapan. Cacahan yang didapatkan sebesar 203 cacahan untuk waktu pengukuran 60 jam, dengan efisiensi sebesar $1,827 \pm 0,065 \%$, dan kedapatulangan $75 \pm 15 \%$, maka nilai aktivitas yang didapatkan sebesar $0,318 \pm 0,078$ Bq untuk pengukuran sebanyak 4 liter atau $0,0795 \pm 0,019$ Bq/L.

4.5. Analisis Cs-137 dalam Sampel Susu Sapi dengan Metode Pengendapan

Pada metode pengendapan, perlu dilakukan preparasi khusus sebelum diberi AMP, yaitu dengan mengabukan susu kering dengan memanaskan pada suhu 450 °C selama 8 jam. Selesai tahap ini, seharusnya diperoleh abu yang akan dilarutkan lagi dengan larutan asam. Dalam percobaan, yang diperoleh bukan abu, melainkan arang, sehingga tidak dapat larut dalam asam. Hal ini bisa disebabkan waktu pemanasan tidak memadai, karena sumber lain menyebutkan pemanasan pada suhu 450 °C dilakukan selama 48 jam. Uji coba terhadap pemanasan lebih dari 8 jam tidak bisa dilakukan berkaitan dengan ijin pengoperation alat pemanas melewati waktu di luar jam kerja. Oleh karena itu, langkah selanjutnya tidak bisa dilakukan.

4.6. Perbandingan Metode Pengendapan dan Penguapan

Perbandingan metode dilakukan untuk sampel air laut, karena metode pengendapan untuk sampel susu tidak berhasil dilakukan. Parameter perbandingan dengan nilai MDA. Nilai MDA dipengaruhi oleh kedapatulangan proses preparasi, cacah latar belakang dan efisiensi pengukuran.

Tabel 4.5 Parameter Perbandingan Metode

	Pengendapan		Penguapan
	HPGe	NaI(Tl)	
Kedapatulangan	100 %	100 %	77 %
Cacah latar belakang (B)	363	78242	864
Efisiensi pengukuran (%)	4,27 ± 0,30	14,36 ± 0,49	0,48 ± 0,048
MDC, kondisi 20 L sampel dan pengukuran 40 jam	1,1 mBq/L	4,85 mBq/L	10,75 mBq/L

Nilai cacah latar belakang mempengaruhi nilai limit deteksi. Semakin besar cacah latar belakang, sensitivitas alat semakin rendah. Selain dipengaruhi oleh radiasi alam, cacah latar belakang juga dipengaruhi oleh radionuklida lain dalam

sampel, yang akan meningkatkan *compton continue* pada spektrum, sehingga mengurangi sensitivitas alat. Selain perbedaan jenis detektor, perbedaan geometri pengukuran juga mempengaruhi efisiensi pengukuran, seperti ditunjukkan pada pengukuran hasil metode pengendapan dan penguapan yang dilakukan dengan spektrometer HPGe. Kedua pengukuran dilakukan dengan posisi sumber menempel pada detektor. Bentuk sampel yang kecil, yaitu Cs-137 dalam AMP, memberikan nilai efisiensi yang lebih besar dibandingkan bentuk merineli yang menyebabkan sebagian besar radiasi tidak sampai ke detektor.

Dengan nilai MDA yang lebih besar, pengukuran sampel pada metode penguapan membutuhkan waktu lebih panjang daripada pengukuran sampel pada metode pengendapan. Perhitungan waktu berdasarkan nilai cacah latar belakang dapat dijelaskan sebagai berikut

$$MDA = \frac{6,15 \times \sqrt{B}}{\epsilon \times P \times t \times \epsilon_r} \quad (4.7)$$

$$MDA_1 = \frac{6,15 \times \sqrt{B_1}}{\epsilon \times P \times t_1 \times \epsilon_r}; \quad MDA_2 = \frac{6,15 \times \sqrt{B_2}}{\epsilon \times P \times t_2 \times \epsilon_r} \quad (4.8)$$

$$\frac{B_2}{t_2} = \frac{B_1}{t_1} \rightarrow B_2 = \frac{B_1}{t_1} t_2 \quad (4.9)$$

$$MDA_2 = \frac{6,15 \sqrt{\frac{B_1}{t_1} t_2}}{\epsilon \times P \times t_2 \times \epsilon_r} \quad (4.10)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, waktu pengukuran yang diperlukan bergantung pada konsentrasi Cs-137 yang ada dalam sampel lingkungan, seperti ditunjukkan pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Waktu Pengukuran terhadap Konsentrasi Sampel (MDA)

Waktu (jam)	Konsentrasi Sampel / MDA (mBq/L)		
	Pengendapan		Penguapan
	HPGe	NaI(Tl)	
4	3,50	15,25	34,05
16	1,75	7,90	17,00
20	1,60	6,70	15,25
40	1,10	4,85	10,75
60	0,90	3,95	8,80

Berdasarkan perhitungan tersebut, pengukuran Cs-137 dapat dilakukan menggunakan spektrometer NaI(Tl) bila konsentrasi sampel relatif tinggi, yaitu 4,85 mBq/L untuk 40 jam pengukuran atau pada kondisi kecelakaan. Pada kondisi tersebut, diperlukan pengukuran di sekitar lokasi kecelakaan. Karena tidak memerlukan pendinginan pada detektornya, spektrometer NaI(Tl) bisa bersifat portabel, dan memungkinkan untuk dibawa ke lokasi kecelakaan.

Waktu yang diperlukan untuk analisis Cs-137 meliputi waktu untuk preparasi dan waktu pengukuran. Waktu preparasi dari kedua metode ditunjukkan pada tabel 4.7

Tabel 4.7 Waktu Preparasi

Pengendapan	Penguapan	
Waktu Preparasi	Fasilitas	Waktu Preparasi
18 jam = 1,5 hari kerja	4 pemanas	4 x 8 jam = 4 hari kerja
	2 pemanas	2 x 4 x 8 jam = 8 hari kerja

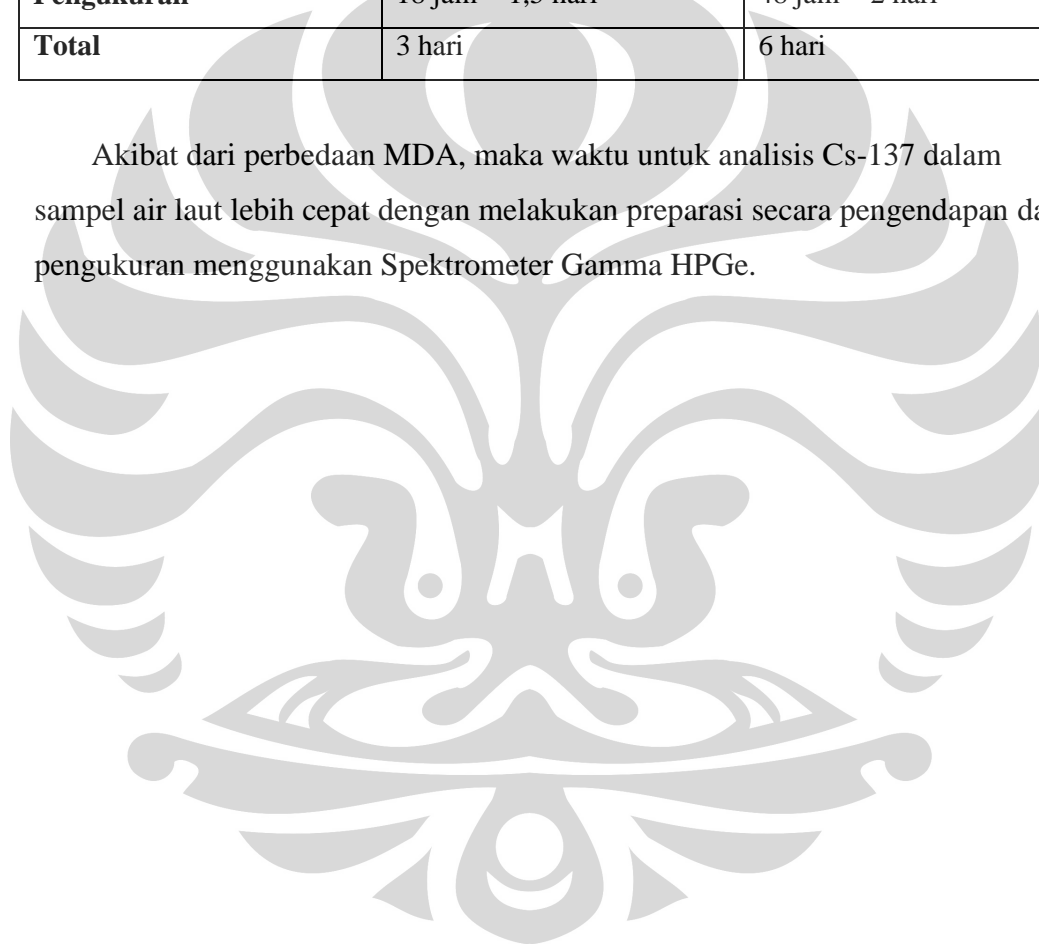
Pada preparasi dengan pengendapan, walaupun diperlukan waktu 18 jam, tetapi pendiaman endapan selama 12 jam dapat dilakukan malam hari, sehingga hanya dibutuhkan waktu 1,5 hari kerja. Sedangkan pada penguapan, tidak bisa dilakukan penguapan tanpa pengawasan dari pekerja, sehingga untuk 32 jam penguapan diperlukan waktu 4 hari kerja.

Total waktu yang diperlukan untuk analisis Cs-137 dalam sampel air laut dengan konsentrasi rata-rata 2 Bq/m³ atau dalam pemantauan rutin, ditunjukkan pada tabel 4.8

Tabel 4.8 Waktu Analisis

	Waktu Proses	
	Pengendapan	Penguapan
Preparasi	1,5 hari kerja	4 hari kerja
Pengukuran	18 jam = 1,5 hari	48 jam = 2 hari
Total	3 hari	6 hari

Akibat dari perbedaan MDA, maka waktu untuk analisis Cs-137 dalam sampel air laut lebih cepat dengan melakukan preparasi secara pengendapan dan pengukuran menggunakan Spektrometer Gamma HPGe.



DAFTAR REFERENSI

- Amiruddin, Achmad. (2005) *Kimia Inti dan Radiokimia*. Jakarta: BATAN.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. *Fallout*.
<http://ansn.bapeten.go.id/download.php?fid=465&filename=FALLOUT.pdf&down=1> : 01 Juni 2010. Pk. 11.52 WIB.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. *Radiasi Buatan*.
<http://ansn.bapeten.go.id/download.php?fid=463&filename=RADIASI-BUATAN.pdf&down=1> : 01 Juni 2010. Pk. 11.54 WIB.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. *Radionuklida yang ada di Bumi*.
<http://ansn.bapeten.go.id/download.php?fid=466&filename=RADIONUKLIDA-YANG-ADA-DI-BUMI.pdf&down=1> : 01 Juni 2010. Pk. 11.52 WIB.
- Badan Tenaga Nuklir Nasional. (2002) *Validasi Metode dalam Analisis Aktivasi Neutron*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional. 2002.
- Badan Tenaga Nuklir Nasional. *Statistik Pencacahan Radiasi*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Caesium-137*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Caesium-137>. : 21 Mei 2010. Pk. 11.52 WIB.
- Emlinarti. (1993). *Analisis Cs-137 dan Sr-90 dalam Air dan Makanan*. Diktat Latihan Keahlian Penentuan Konsentrasi Cemar Sr-90 dan Cs-137 dalam Air dan Makanan. Pusat Standarisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi, BATAN.
- Lisyana, Silvia. (2001). *Analisa plutonium dalam sampel tanah; perbandingan metode pemisahan : ekstraksi pelarut dan penukar ion*. Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.
- Makmur, Murdahayu. *Pembuatan Matrik Penukar Ion Heksasianoferat Untuk Pemekatan ¹³⁷Cs dari Air Laut*. Prosiding Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah V, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif BATAN.
- Masayasu Noguchi dan Widodo S. (2004). *Environmental Radioactivity Measurement by γ -ray spectrometry*. BATAN/JAERI Joint Training Course “Application of nuclear technique in Industry and Environment available for safety of nuclear facility”. Jakarta.

- Muziyawati, Ayi. dkk. (2002). *Analisis Limbah Radioaktif Cair dan Semi Cair*. Pusat Pengembangan Pengelolaan Limbah Radioaktif. Hasil penelitian P2PLR.
- Noviarty, et all. (2009). *Optimasi Pengukuran Keaktifan Radioisotop Cs-137 Menggunakan Spektrometer Gamma*. Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta, 5 November 2009.
- Saleh, Eniza. (2004). *Dasar Pengolahan Susu dan Hasil Ikutan Ternak*. Program studi produksi ternak, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara. USU Digital Library.
- Setiawan, Agus. (2005). *Salinitas Air Laut*.
<http://oseanografi.blogspot.com/2005/07/salinitas-air-laut.html> : 04 Agustus 2010. Pk. 11.56 WIB.
- Suhartini, Nita. (2006). *Perbandingan Profil Distribusi Vertikal ¹³⁷Cs di Lapisan Tanah Hasil Pengukuran Terhadap Simulasi*. MAKARA, SAINS, VOL. 10, NO. 2. Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, BATAN.
- Tajuddin, Rizqi. (2004). *Analisis ²²⁶Ra dan Anak Luruhnya dalam Sampel Air Dengan Metode Pencacahan Sintilasi Cair dan Spektroskopi Alfa*. Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.
- Tarigan, Cerdas. et all. (2000). *Perbandingan Kandungan Cs-137 Dan Sr-90 Dalam Air Kali Cisalak Dan Cipelang*.
<http://digilib.batan.go.id/sipulitbang/fulltext/2611.pdf> : 02 Juni 2010. Pk. 11.37 WIB.
- Vogel. (1990). *Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro*. Cetakan kedua. Jakarta: PT. Kalman Media Pustaka.
- Wahyudi, dkk. (2007). *Pengaruh Matriks Terhadap Sistem Pencacahan Sampel Menggunakan Spektrometer Gamma*. Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN.
- Ward, Gerald M. J E Johnson and L B Sasser (1965). *Transfer Coefficients of Fallout Cesium-137 to Milk of Dairy Cattle Fed Pasture, Green-Cut Alfalfa, or Stored Feed*. Journal Dairy Science VOL. 50, NO. 7. Department of Animal Science. Colorado State University, Fort Collins
- Yoshihiro Ikeuchi. *Temporal Variation and Behavior of 90-Sr and 137-Cs in the Environment of Japan*. Japan Chemical Analysis Center.

Lampiran 1 Perhitungan

Aktivitas terukur

$$A = \frac{R}{\varepsilon \cdot p}$$

A = aktivitas

R = cacahan per detik

ε = efisiensi

P = Probabilitas pemancaran radiasi

Aktivitas Perhitungan

$$A = \lambda \cdot N$$

A = aktivitas

λ = konstanta peluruhan

N = Jumlah radionuklida

Limit Deteksi

$$LD = 6,15 \cdot \sqrt{R_{lb}}$$

LD = Limit Deteksi

R_{lb} = Cacahan latar belakang

Minimum Detectable Activity

$$MDA = \frac{LD}{\varepsilon \cdot \alpha_{\gamma} t}$$

MDA = *Minimum Detectable Activity*

ε = efisiensi untuk puncak radiasi gamma

α_{γ} = probabilitas pemancaran radiasi gamma 1

t = waktu pengukuran

(Lanjutan)

Nilai kedapatulangan

$$\text{Kedapatulangan (\%)} = \frac{A_p}{A_{st}} \times 100\%$$

Validasi efisiensi dengan KCl

Cacahan selama 1800 detik = $3749 \pm 1,64 \%$

Efisiensi (dari *disk efficiency*) = $0,7895 \%$

Probabilitas pemancaran radiasi = $10,7 \%$

Aktivitas terukur

$$A = \frac{3749 \text{ cacahan} : 1800 \text{ detik}}{\frac{0,7895}{100} \times \frac{10,7}{100}} = 2465,77 \text{ Bq}$$

Aktivitas perhitungan

Massa KCl = 150 g

$T_{1/2} \text{ K}_{40} = 1,27 \cdot 10^9 \text{ tahun} = 4,005072 \cdot 10^{16} \text{ sekon}$

Massa K = $\frac{39,094}{74,547} \times 150 \text{ g} = 78,663 \text{ g}$

$\text{mol K} = \frac{78,663}{39,094} = 2,012 \text{ mol}$

$\text{mol K}_{40} = \frac{0,0117}{100} \times 2,012 \text{ mol} = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$

$N = n \cdot \text{bilangan Avogadro} = 2,35 \cdot 10^{-4} \times 6,02 \cdot 10^{23} = 1,4147 \cdot 10^{20} \text{ nuklida}$

$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{4,005072 \cdot 10^{16}} = 0,173 \cdot 10^{-16} \text{ per detik}$

$A = \lambda \cdot N = 0,173 \cdot 10^{-16} \cdot 1,4147 \cdot 10^{20} = 2447,9 \text{ Bq}$

$\% \text{ kesalahan relatif} = \left| \frac{2447,9 - 2465,77}{2447,9} \right| \times 100\% = 0,73 \%$

(Lanjutan)

Pengukuran Standar

Nilai efisiensi dari disk efficiency = 1,255 %

$$\text{Simpangan} = 1,225 \times \sqrt{\left(\frac{1,5}{150}\right)^2 + \left(\frac{0,106}{5,3}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2} = 0,045$$

Cacahan = 5698 cacahan \pm 1,33 %

Waktu pengukuran 1800 sekon

$$A = \frac{5698 \text{ cacahan} : 1800 \text{ detik}}{\frac{1,255}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 296 \text{ Bq}$$

$$\text{Simpangan} = 296 \times \sqrt{\left(\frac{1,33}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,045}{1,255}\right)^2} = 11$$

Pengukuran Recovery metode pengendapan.

Standar

Aktivitas = 0,986 \pm 0,04 Bq

Cacahan = 171 cacahan \pm 7,96 %

$$\text{Efisiensi} = \frac{171 : 3600}{0,986 \times \frac{85,1}{100}} = 0,056 = 5,6 \%$$

$$\text{Simpangan} = 5,6 \times \sqrt{\left(\frac{0,04}{0,986}\right)^2 + \left(\frac{7,96}{100}\right)^2} = 0,50$$

Sampel 1

Cacahan = 132 cacahan \pm 8,86 %

$$A = \frac{132 : 3600}{\frac{5,6}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 0,769 \text{ Bq}$$

$$\text{Simpangan} = 0,769 \times \sqrt{\left(\frac{8,86}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,50}{5,6}\right)^2} = 0,096$$

(Lanjutan)

$$\text{Kedapatulangan} = \frac{0,769}{0,986} \times 100\% = 78\%$$

$$\text{Simpangan} = 78 \times \sqrt{\left(\frac{0,04}{0,986}\right)^2 + \left(\frac{0,096}{0,769}\right)^2} = 10$$

Sampel 2

$$\text{Cacahan} = 136 \text{ cacahan} \pm 8,83 \%$$

$$A = \frac{136 : 57600}{\frac{5,6}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 0,792 \text{ Bq}$$

$$\text{Simpangan} = 0,792 \times \sqrt{\left(\frac{8,83}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,50}{5,6}\right)^2} = 0,099$$

$$\text{Kedapatulangan} = \frac{0,792}{0,986} \times 100\% = 80\%$$

$$\text{Simpangan} = 80 \times \sqrt{\left(\frac{0,04}{0,986}\right)^2 + \left(\frac{0,099}{0,792}\right)^2} = 10$$

Sampel 3

$$\text{Cacahan} = 180 \text{ cacahan} \pm 7,60 \%$$

$$A = \frac{180 : 3600}{\frac{5,6}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 1,01 \text{ Bq}$$

$$\text{Simpangan} = 1,01 \times \sqrt{\left(\frac{7,60}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,50}{5,6}\right)^2} = 0,118$$

$$\text{Kedapatulangan} = \frac{1,01}{0,986} \times 100\% = 100\%$$

$$\text{Simpangan} = 100 \times \sqrt{\left(\frac{0,04}{0,986}\right)^2 + \left(\frac{0,118}{1,01}\right)^2} = 12$$

(Lanjutan)

Pengukuran Sampel Air Laut

Standar

$$\text{Aktivitas} = 0,098 \text{ Bq} \pm 0,004$$

$$\text{Cacahan} = 513 \pm 5,87 \%$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{513 : 144000}{0,098 \times \frac{85,1}{100}} = 0,0427 = 4,27 \%$$

$$\text{Simpangan} = 4,27 \times \sqrt{\left(\frac{0,004}{0,098}\right)^2 + \left(\frac{5,87}{100}\right)^2} = 0,30$$

Sampel 1

$$\text{Cacahan} = 213 \pm 13,67 \%$$

$$A = \frac{213 : 144000}{\frac{4,27}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 0,044 \text{ Bq}$$

$$\text{Simpangan} = 0,044 \times \sqrt{\left(\frac{13,67}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,30}{4,27}\right)^2} = 0,006$$

Sampel 2

$$\text{Cacahan} = 200 \pm 14,32 \%$$

$$A = \frac{200 : 144000}{\frac{4,27}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 0,044 \text{ Bq}$$

$$\text{Simpangan} = 0,044 \times \sqrt{\left(\frac{14,32}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,30}{4,27}\right)^2} = 0,007$$

(Lanjutan)

Metode penguapan

Cacahan selama 1800 detik = $934 \pm 3,32 \%$

Efisiensi (dari disk efficiency) = $2,07 \%$

$$\text{Simpangan} = 2,07 \times \sqrt{\left(\frac{1,5}{150}\right)^2 + \left(\frac{0,106}{5,3}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2} = 0,075$$

Probabilitas pemancaran radiasi = $85,1 \%$

$$A = \frac{934 \text{ cacahan} : 1800 \text{ detik}}{\frac{2,07}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 29 \text{ Bq}$$

$$\text{Simpangan} = 29 \times \sqrt{\left(\frac{3,32}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,075}{2,07}\right)^2} = 1,42$$

$$\text{Recovery (\%)} = \frac{29}{38} \times 100 \% = 77 \%$$

Standar Air Laut dalam Merineli

Cacahan = $210 \text{ cacahan} \pm 12,20 \%$

Waktu pengukuran = 86438

Aktivitas = $0,592 \pm 0,06 \text{ Bq}$

$$\text{Efisiensi} = \frac{210 : 86438}{0,592 \times \frac{85,1}{100}} = 0,0048 = 0,48 \%$$

$$\text{Simpangan} = 0,48 \times \sqrt{\left(\frac{12,20}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,06}{0,592}\right)^2} = 0,08$$

Pengukuran susu sapi

Penentuan kedapatulangan

Sampel 200 gram endapan dari 734,9 gram

Cacahan = $164 \pm 12,99 \%$

Cacahan latar belakang = 170

(Lanjutan)

Waktu = 54000 detik

Efisiensi (dari perangkat lunak *disk efficiency*) = 1,331%

$$\text{Simpangan} = 1.331 \times \sqrt{\left(\frac{1,5}{150}\right)^2 + \left(\frac{0,106}{5,3}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2} = 0,048$$

$$A = \frac{164 : 54000}{\frac{1,331}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 0,268 Bq$$

$$\text{aktivitas keseluruhan} = \frac{734,9}{200} \times 0,268 Bq = 0,983 Bq$$

$$\text{Simpangan} = 0,983 \times \sqrt{\left(\frac{12,99}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,048}{1,331}\right)^2} = 0,132$$

Pengukuran Sampel

Sampel 140 gram endapan dari 795,9 gram

Cacahan = $203 \pm 13,87 \%$

Waktu = 216000 detik

Efisiensi (dari perangkat lunak *disk efficiency*) = 1,827 %

$$\text{Simpangan} = 1.827 \times \sqrt{\left(\frac{1,5}{150}\right)^2 + \left(\frac{0,106}{5,3}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2 + \left(\frac{2}{100}\right)^2} = 0,065$$

$$A = \frac{203 : 216000}{\frac{1,827}{100} \times \frac{85,1}{100}} = 0,060 Bq$$

$$\text{aktivitas keseluruhan} = \frac{795,9}{200} \times 0,060 Bq = 0,240 Bq$$

$$\text{Simpangan} = 0,240 \times \sqrt{\left(\frac{13,87}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,065}{1,827}\right)^2} = 0,034$$

(Lanjutan)

Nilai kedapatulangan

$$\varepsilon_r = \frac{0,983 - 0,240}{0,986} \times 100\% = 75 \%$$

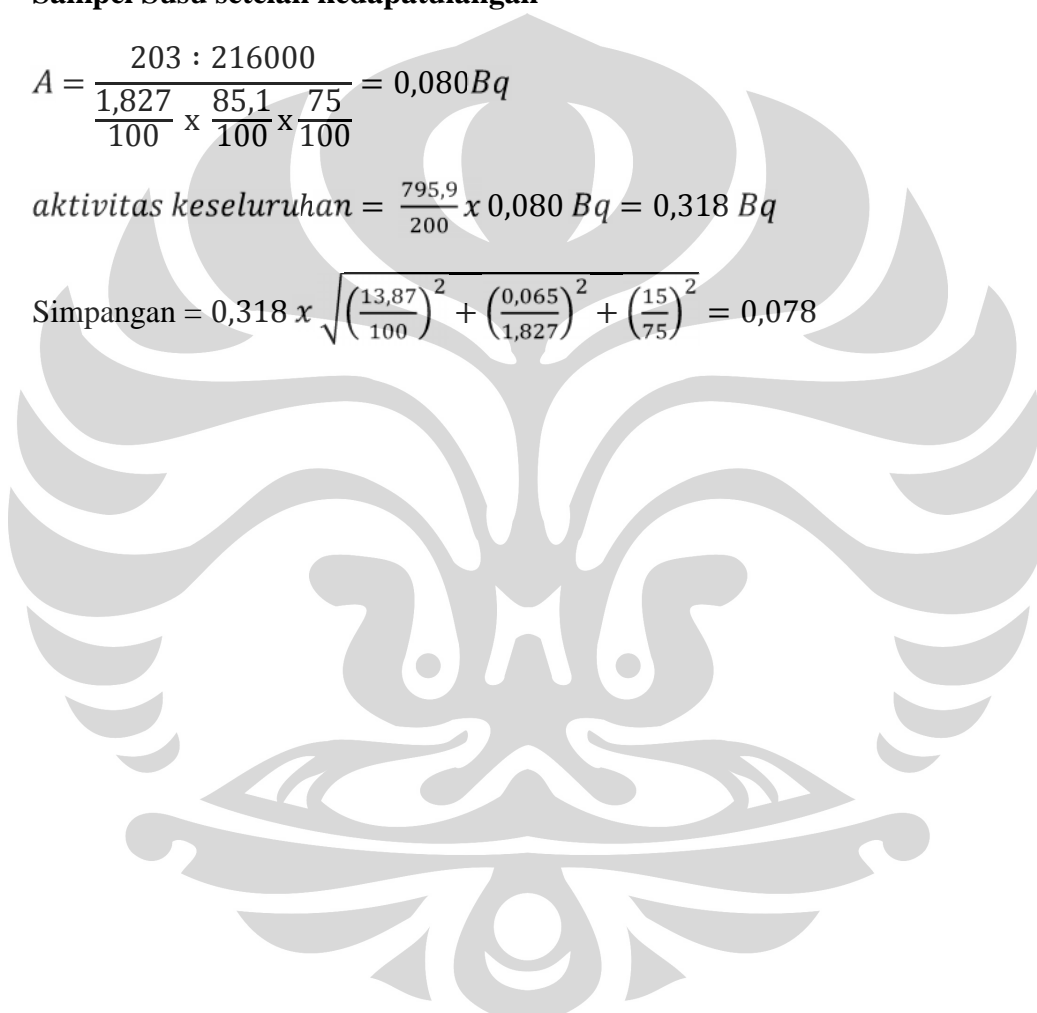
$$\text{Simpangan} = 75 \times \sqrt{\left(\frac{0,040}{0,986}\right)^2 + \left(\frac{0,132}{0,983}\right)^2 + \left(\frac{0,034}{0,240}\right)^2} = 15$$

Sampel Susu setelah kedapatulangan

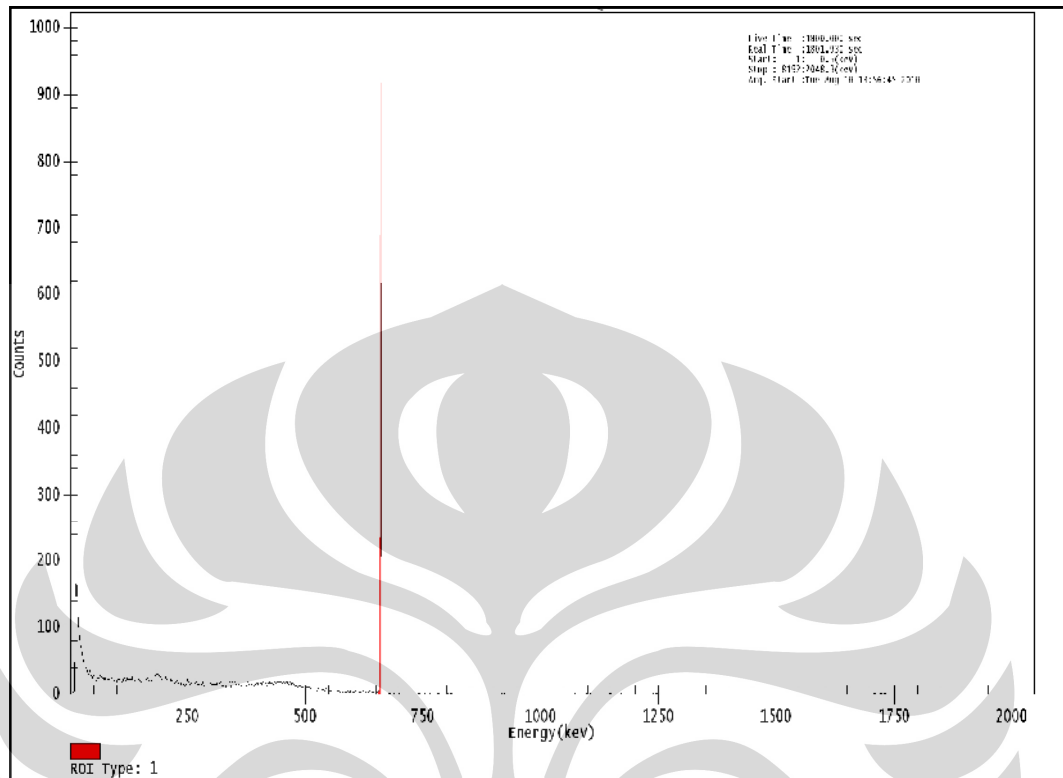
$$A = \frac{203 : 216000}{\frac{1,827}{100} \times \frac{85,1}{100} \times \frac{75}{100}} = 0,080 Bq$$

$$\text{aktivitas keseluruhan} = \frac{795,9}{200} \times 0,080 Bq = 0,318 Bq$$

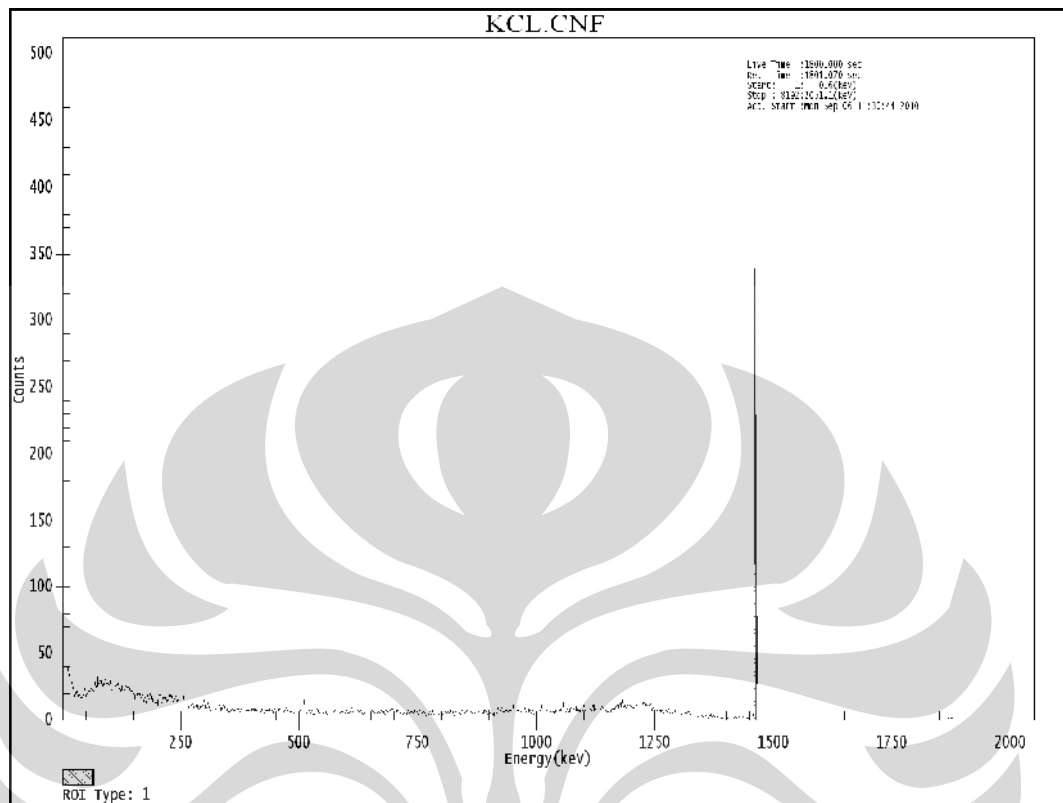
$$\text{Simpangan} = 0,318 \times \sqrt{\left(\frac{13,87}{100}\right)^2 + \left(\frac{0,065}{1,827}\right)^2 + \left(\frac{15}{75}\right)^2} = 0,078$$



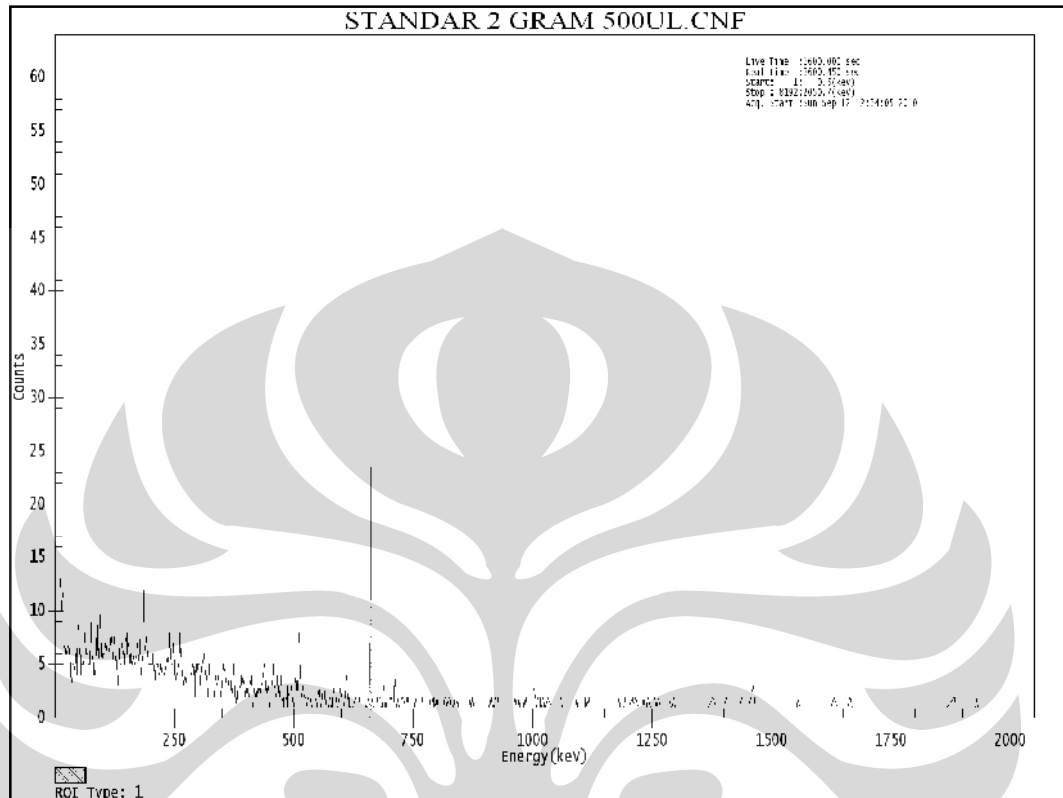
Lampiran 2 Spektrum Pengukuran Larutan Standar Cs-137



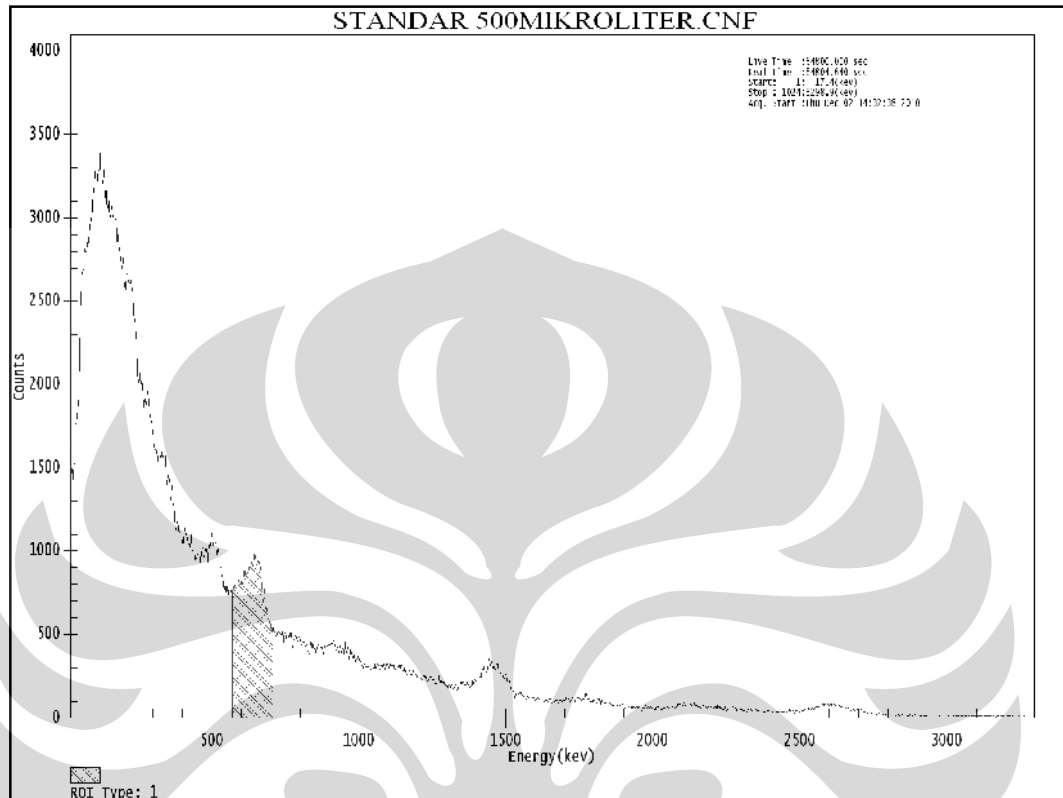
Lampiran 3 Spektrum Pengukuran KCl untuk Validasi



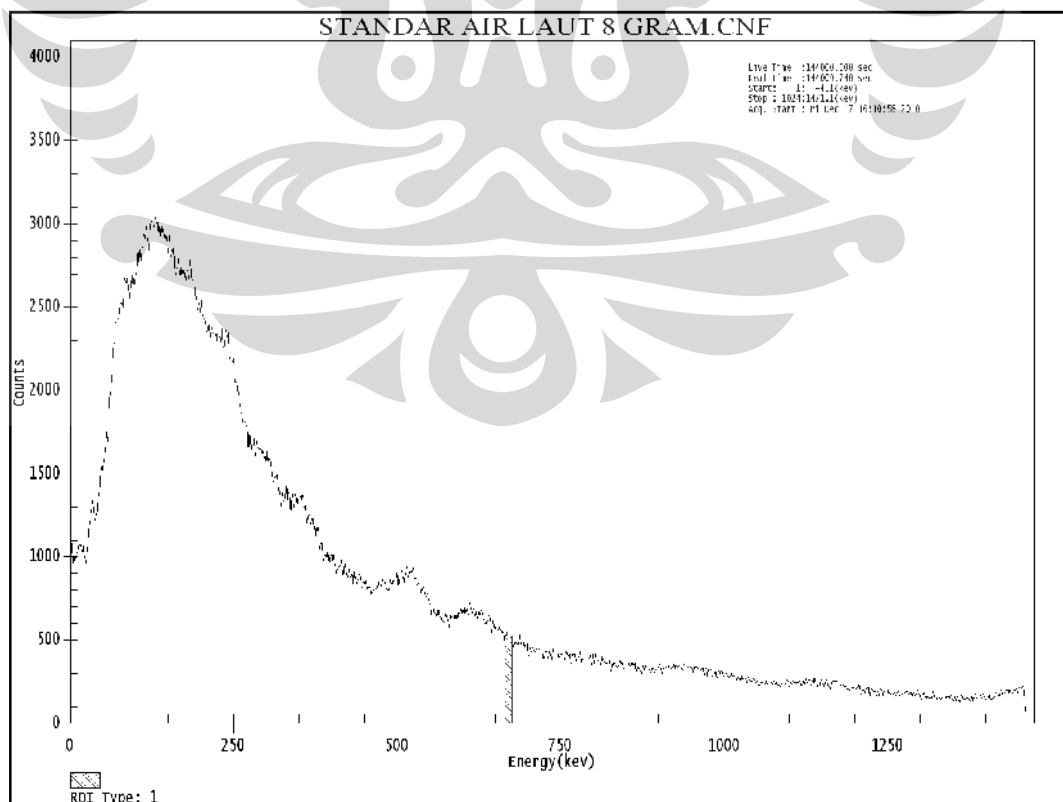
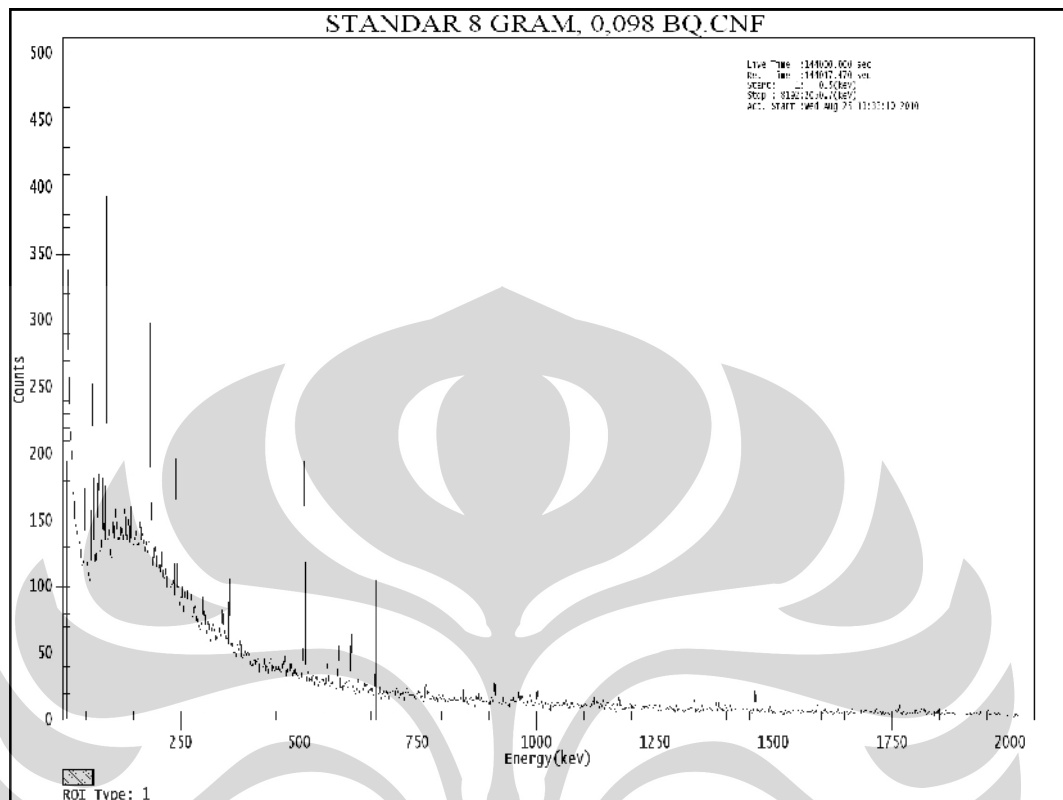
Lampiran 4 Spektrum Pengukuran Standar dengan Spektrometer Gamma Detektor HPGe



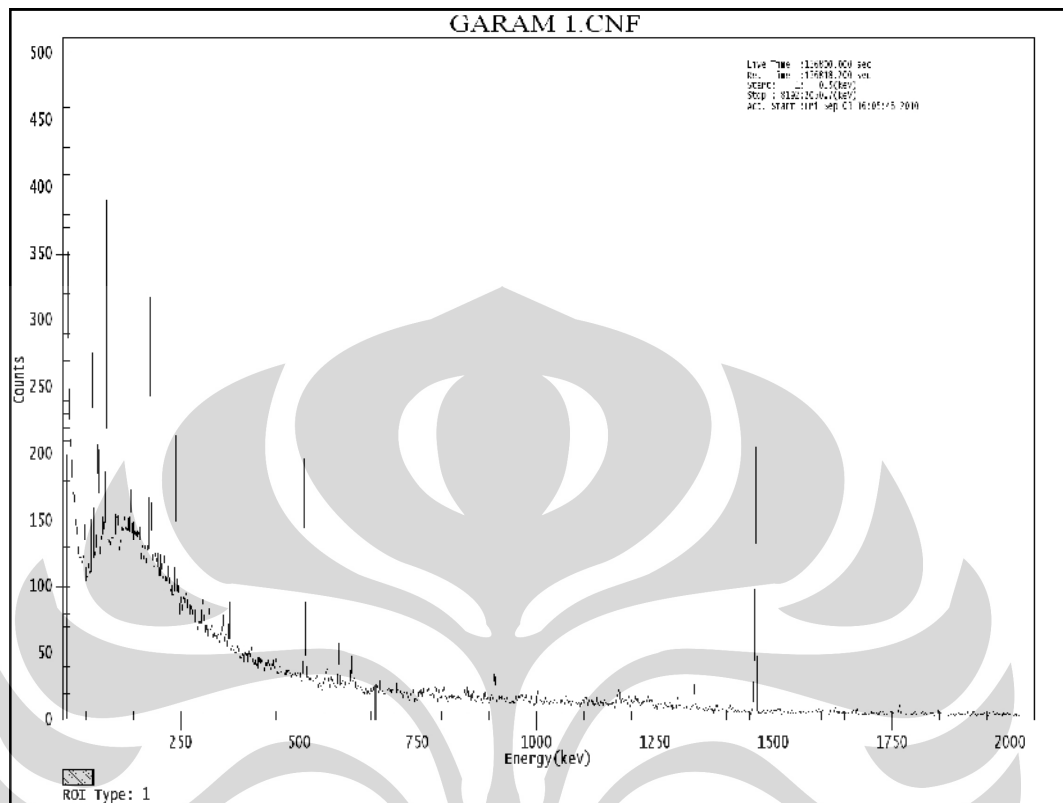
Lampiran 5 Spektrum Pengukuran Standar dengan Spektrometer Gamma Detektor NaI(Tl)



Lampiran 6 Spektrum Pengukuran Standar 0,098 Bq Spektrometer HPGe dan NaI(Tl)

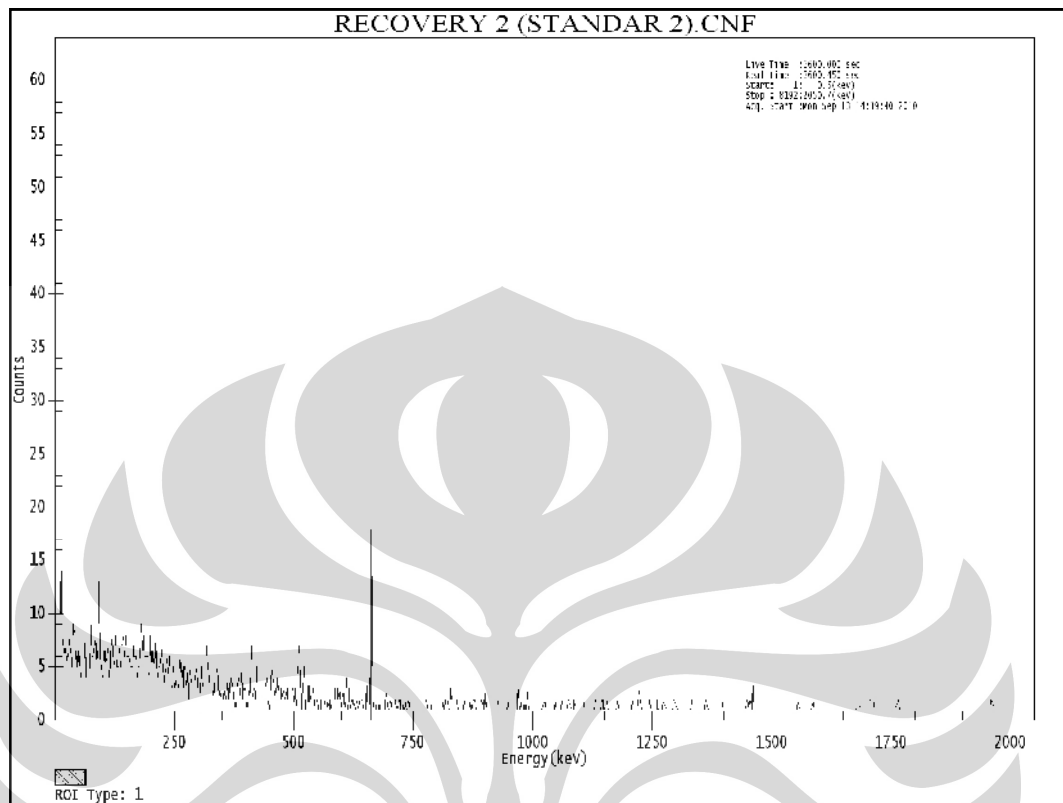


Lampiran 7 Spektrum Pengukuran Garam untuk Air Laut Buatan

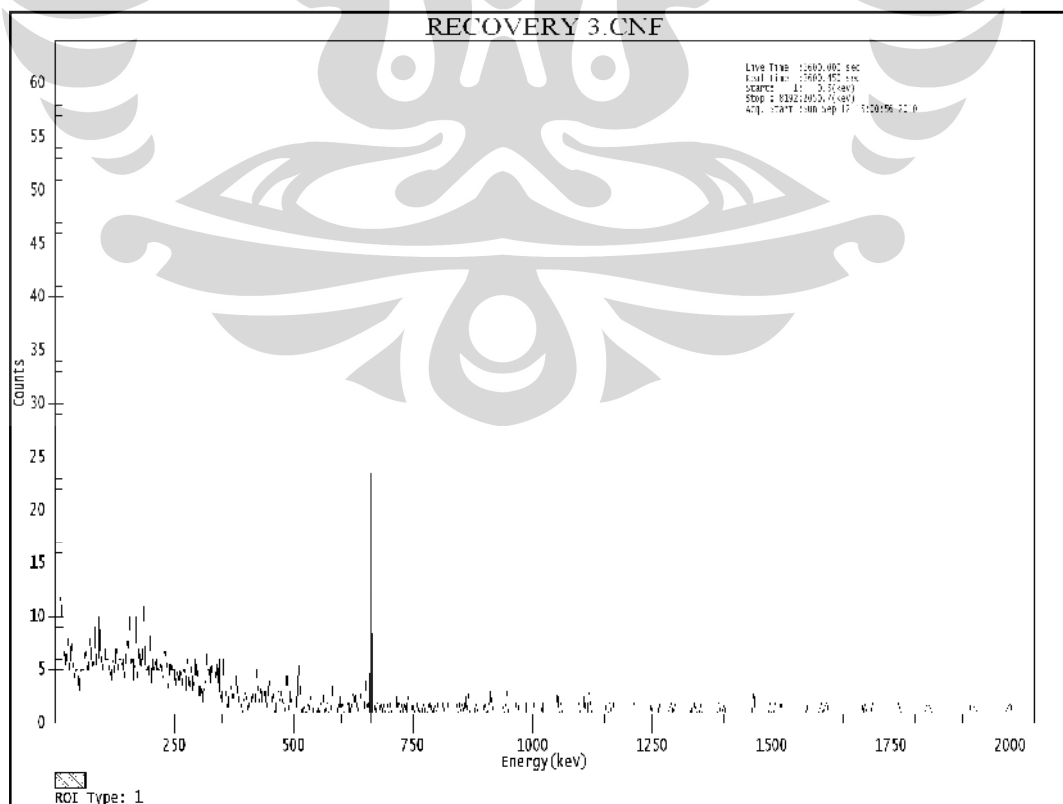


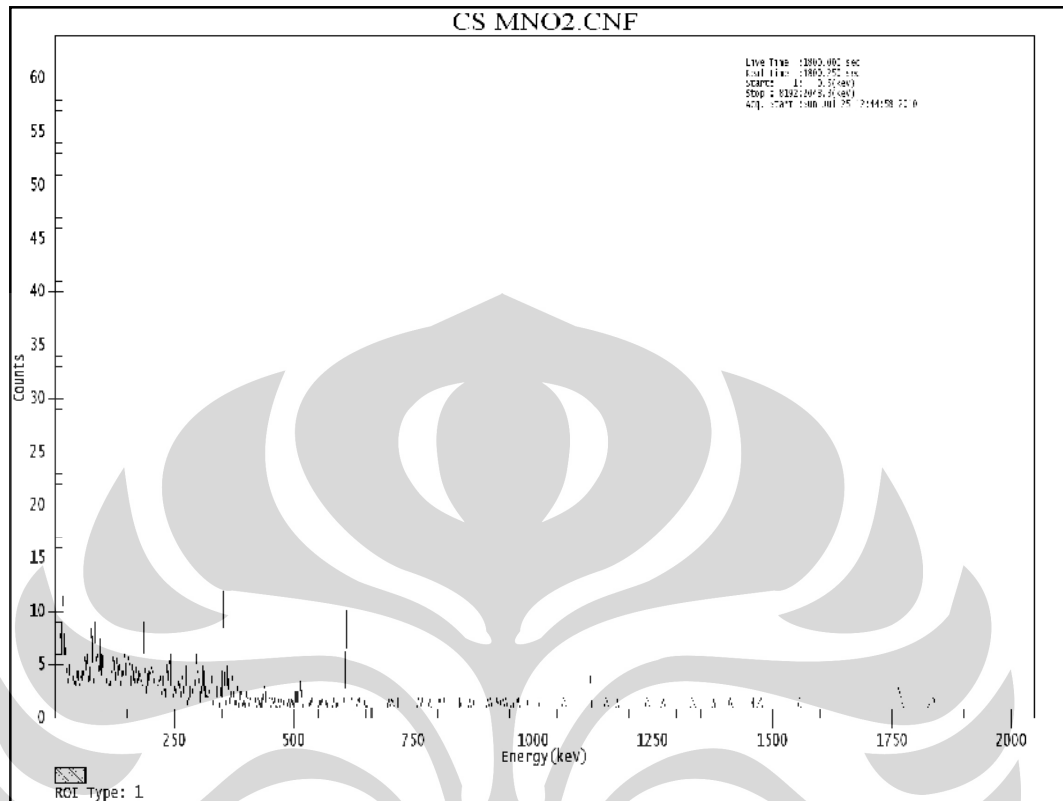
(Lanjutan)

Tanpa Pengemban 2



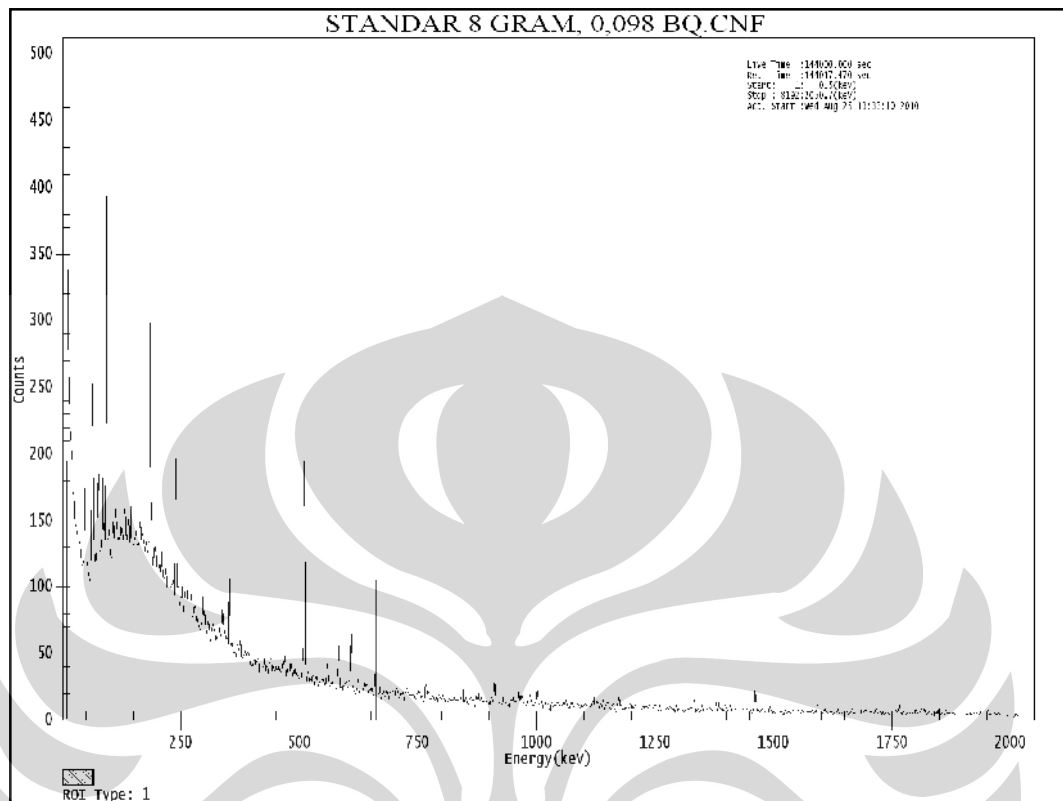
Dengan Pengemban



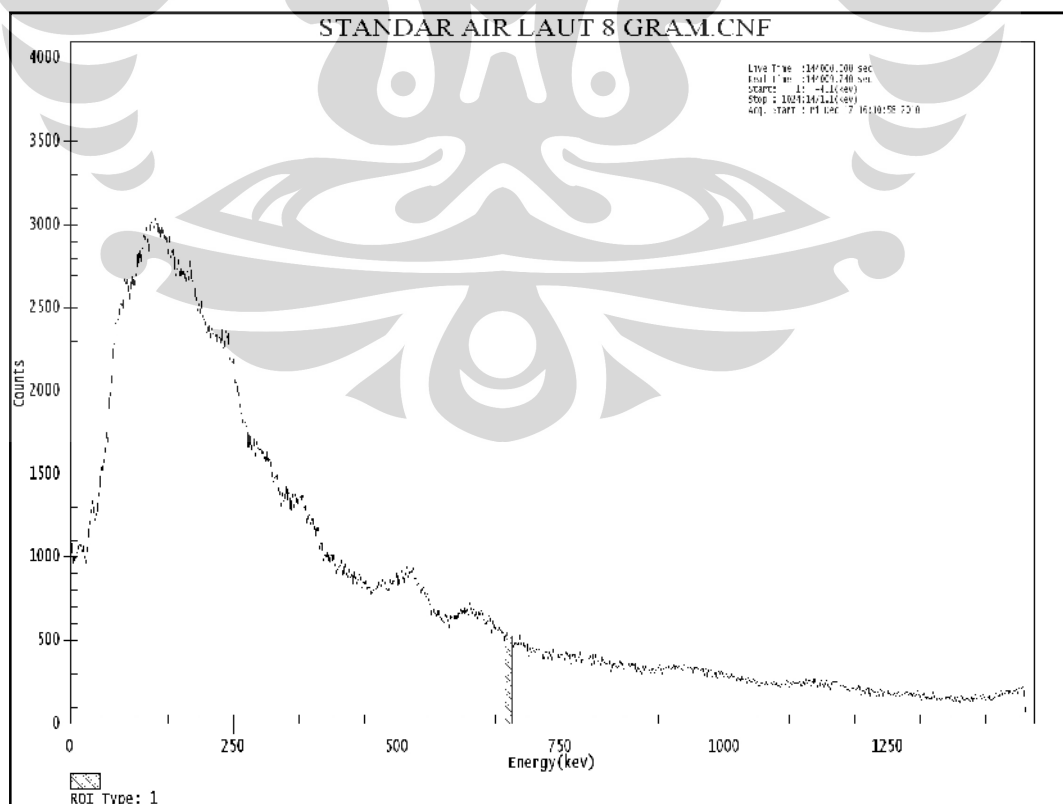
Lampiran 9 Spektrum Pengukuran Cs-MnO₂

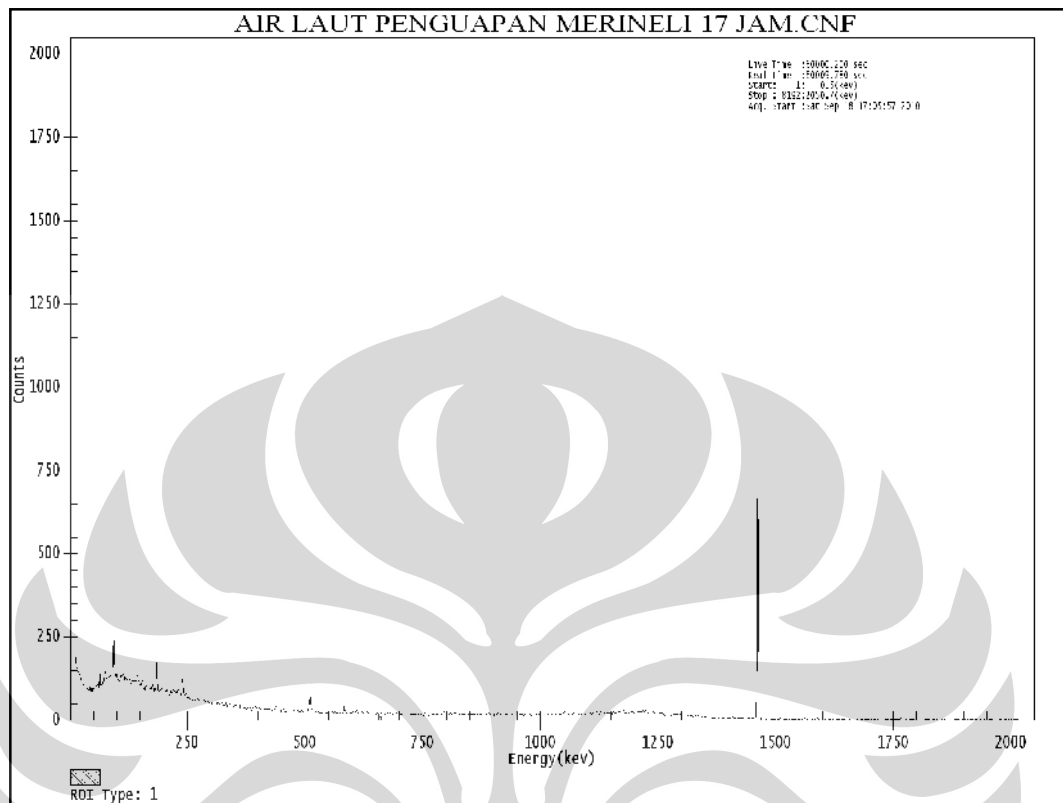
Lampiran 10 Spektrum Pengukuran Standar Air Laut

Detektor HPGe



Detektor NaI(Tl)



Lampiran 11 Spektrum Pengukuran Sampel Air Laut Metode Penguapan

Lampiran 12 Spektrum Pengukuran Kedapatulangan Susu Sapi

