



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	iii
PRAKATA.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
Daftar Tabel .....	vii
Daftar Gambar .....	vii
Daftar Lampiran.....	viii
INTISARI .....	ix
ABSTRACT.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Keaslian Penelitian.....	3
1.3 Rumusan Masalah .....	10
1.4 Tujuan Penelitian .....	10
1.6 Manfaat Penelitian .....	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	11
BAB III LANDASAN TEORI .....	14
3.1 Uranium dan Peluruhan Radiasinya.....	14
3.2 Uranium Dalam Daur Bahan Nuklir Beserta Sifat Fisik dan Kimianya .....	16
3.3 Spektrometri Gamma .....	19
3.4 Atenuasi Radiasi Gamma.....	24
3.5 Detektor Sintilasi.....	26
3.6 Spektrum Gamma uranium .....	28
3.7 Uji Merusak untuk Penentuan Kadar uranium.....	29
3.8 Penggunaan Data Bahan Nuklir pada Forensik Nuklir dan Seifgard Nuklir .....	30
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN .....	33
4.1 Alat & Bahan.....	33
4.1.2. Spesifikasi Instrumen MCA Gamma Spectrometer dengan Detektor HPGe	34
4.1.3. Spesifikasi Instrumen Metler Tolloedo Titrator T-90 untuk analisis potensiometer. ....	35
4.2 Prosedur Penggunaan Alat dan Metode Penelitian .....	35
4.2.1. Prosedur Pengukuran Spektrometri Gamma <i>Portable</i> Detektor NaI(Tl).....	35
4.2.2. Prosedur Pengukuran uranium dengan Spektrometer Gamma HPGe.....	37
4.2.3. Prosedur Pengukuran Konsentrasi uranium dengan Titrasi Potensiometri ...	37
4.2.4. Metode Penelitian.....	38
4.3.1. Analisis Hasil Tahap 1 : Pengujian Performa PMCA .....	41
4.3.2. Analisis Hasil Tahap 2 : Pengembangan Metode Identifikasi uranium .....	42
4.3.3. Analisis Hasil Tahap 3 : Pengujian Metode Identifikasi uranium.....	43



<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	44
5.1 Pengujian Performa PMCA Pengaruh Waktu Akuisisi dan Massa uranium .....	44
5.1.1 Hasil Bahan Standar Uranium Alam dan Deplesi .....	44
5.1.2 Pengujian Kemampuan Pengukuran Kuantitatif uranium Dengan PMCA ...	47
5.2 Analisis Pengaruh Tingkat Pengayaan uranium ( $^{235}\text{U}$ ).....	49
5.2.1. Pembahasan Hasil Pengukuran PMCA .....	50
5.2.2 Pembahasan Hasil Pengukuran HPGe.....	55
5.3. Pengembangan Metode Baku Identifikasi uranium .....	56
5.3.1 Penambahan Titik Kurva Kalibrasi dengan Pengukuran CRM.....	59
5.3.2 Koreksi Konstanta Atenuasi dengan Optimasi Numeris .....	60
5.4 Pengujian Metode Identifikasi uranium .....	62
5.3.1. Pengujian Pengukuran Massa Uranium dengan PMCA dan HPGe .....	62
5.3.2. Pengujian Pengukuran Massa dengan Detektor HPGe .....	63
5.3.3. Pengujian Pengukuran Pengayaan dengan Detektor HPGe .....	66
5.3.4. Pengujian Perbandingan Penentuan $^{235}\text{U}$ antara NaI(Tl) dan HPGe.....	71
5.4 Prosedur Identifikasi uranium dan Rekomendasi Penelitian Lanjutan .....	73
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	75
6.1. Kesimpulan .....	75
6.2. Saran.....	75
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	76
Lampiran.....	83



## Daftar Tabel

Tabel 1. 1 Penelitian Terkait Spektrometri Gamma <i>Portable</i> atau Detektor NaI(Tl) .....	3
Tabel 1. 2 Penelitian Terkait Penggunaan Spektrometri Gamma untuk Pengukuran Bahan Nuklir .....	5
Tabel 3. 1 Atenuasi Massa ( $\mu/\rho$ ) Radiasi $\gamma$ 186 keV dan 1001 keV di Berbagai Bahan ( <a href="http://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients.">www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients.</a> ).....	29
Tabel 4. 1 Daftar Sampel untuk Pengujian Metode dengan Massa uranium yang Tidak Diketahui .....	40
Tabel 5. 1 Standar Tersier uranium Pemeriksaan Performa PMCA .....	44
Tabel 5. 2 Nilai Karakteristik Model Kalibrasi Laju Cacah terhadap Massa uranium... ..	49
Tabel 5. 3a Data Kelompok Sampel Serbuk dengan $^{235}\text{U}$ 0,3% - 2% .....	49
Tabel 5. 4 Hasil Analisis Statistik Data Pengukuran Serbuk $\text{UO}_2$ .....	52
Tabel 5. 5 Hasil Perhitungan $R_0$ dan Nilai K .....	58
Tabel 5. 6 Data CRM dan Hasil Pengukurannya .....	59
Tabel 5. 7 Niali $R_0$ Hasil Perhitungan Persamaan (13) dan Pengukuran CRM .....	60
Tabel 5. 8 Hasil Pengukuran Sampel dan Perhitungan Massa Detektor NaI(Tl), HPGe, dan Titrasi Potensiometri .....	62
Tabel 5. 9 Hasil Perhitungan Massa dengan Pengukuran Spektrometri Gamma HPGe .....	65
Tabel 5. 10 Nilai Massa Uranium Sampel <i>Pellet</i> $\text{UO}_2$ dan Larutan UN Setelah Koreksi Geometri .....	66
Tabel 5. 11 Hasil Perhitungan %U Menggunakan Rumus Atenuasi dan Kurva Kalibrasi Rasio laju cacah pada energi 186/1001 keV .....	66
Tabel 5. 12 Hasil Perhitungan Ulang Tingkat Pengayaan <i>Pellet</i> $\text{UO}_2$ .....	68

## Daftar Gambar

Gambar 3. 1 Struktur Atom $^{238}\text{U}$ dan $^{235}\text{U}$ [43] .....	14
Gambar 3. 2 Skema Peluruhan $^{238}\text{U}$ (kiri) dan $^{235}\text{U}$ (kanan) [44] .....	15
Gambar 3. 3 Proses Konversi uranium [49] .....	17
Gambar 3. 4 Siklus Daur Bahan Nuklir [49] .....	19
Gambar 3. 5 Efek Fotolistrik .....	20
Gambar 3. 6 Efek Compton .....	21
Gambar 3. 7 Efek Produksi Pasangan .....	22
Gambar 3. 8 Karakteristik Spektrum Efek Photolistrik, Compton, dan Produksi Pasangan [57] .....	22
Gambar 3. 9 Grafik Probabilitas Interaksi Gamma dengan Materi Seiring Peningkatan Energi Radiasi Gamma [58] .....	23
Gambar 3. 10 Spektrum Gamma $^{60}\text{Co}$ dengan Detektor NaI dan HPGe [59] .....	24
Gambar 3. 11 Pristiwa Atenuasi pada Materi [57] .....	25
Gambar 3. 12 Skema Detektor Sintilasi [61] .....	26
Gambar 3. 13 Spektrum Radiasi Gamma uranium Alam dengan Detektor NaI(Tl) PMCA .....	28
Gambar 4. 1 Sekma Penempatan Detektor dan <i>Shielding</i> pada Peralatan Spektrometri Gamma .....	33
Gambar 4. 2 Skema Pengukuran dengan PMCA .....	34
Gambar 4. 3 Instrumen Spektrometer Gamma dengan Detektor HPGe .....	34
Gambar 4. 4 Instrumen Titrator T-90 .....	35
Gambar 4. 5 Tampilan Layar Quantum NAID dan ROI Spektrum PMCA .....	36



Gambar 4. 6 Tampilan Hasil Pengukurak Spektrometer Gamma dengan HPGe dan ROI Spektrum.....	37
Gambar 4. 7 Serbuk uranium dan Wadah Sampel 4.5 cm.....	39
Gambar 4. 8 Serbuk uranium dan Wadah Sampel 5 cm. ....	40
Gambar 4. 9 Sampel Pengujian Metode Identifikasi uranium.....	41
Gambar 5. 1 Variasi RSD pengukuran pada radiasi gamma energi 100 (atas) dan radiasi gamma energi 1001 (bawah).....	45
Gambar 5. 2 Variasi RSD pada pengukuran uranium Alam (kiri) dan uranium Depleksi (kanan) pada energi 1001 keV .....	45
Gambar 5. 3 Sebaran Standar Deviasi Pengukuran (RSD) Variasi Massa uranium.....	46
Gambar 5. 4 Aktivitas Jenis uranium Alam (atas) dan Depleksi (bawah) pada variasi waktu pengukuran dan massa uranium.....	46
Gambar 5. 5 Laju Cacah Energi 100 keV dan 1001 keV Seiring Pertambah Massa uranium Alam (a) dan Depleksi (b) .....	47
Gambar 5. 6 Pengujian Berbagai Model Terhadap Kurva Netcount Vs Massa .....	48
Gambar 5. 7 Perbandingan Aktivitas Jenis Berdasarkan Diameter Wadah.....	50
Gambar 5. 8 Perbandingan Perubahan Aktivitas Jenis Radiasi Gamma Energi 1001 keV (a) dan Energi 186 keV (b) terhadap Perubahan Massa dan %U .....	51
Gambar 5. 9 Peningkatan Laju Cacah Radiasi Gamma Energi 1001 keV (a) dan Energi 186 keV (b) terhadap perubahan massa dan %U dengan detektor NaI(Tl) .....	52
Gambar 5. 10 . Nilai Perbandingan Laju Cacah pada energi 186/1001 untuk Menghitung %U pada Berbagai Massa uranium dengan detektor NaI(Tl).....	54
Gambar 5. 11 Grafik 3D Hubungan Intensitas Radiasi Gamma Energi 186 keV dengan Pertambahan %U dan Massa uranium dengan Detektor NaI(Tl) .....	55
Gambar 5. 12 Peningkatan Laju Cacah Radiasi Gamma Energi 1001 keV (a) dan Energi 186 keV (b) terhadap perubahan massa dan %U dengan detektor HPGe .....	56
Gambar 5. 13 Nilai Perbandingan Laju Cacah 186/1001 ( $R_{(m)}$ ) untuk Menghitung %U pada Berbagai Massa uranium dengan detektor HPGe .....	56
Gambar 5.14 Kurva Kalibrasi %U Vs Rasio laju cacah pada energi 186/1001 keV.....	58
Gambar 5. 15 Kurva Kalibrasi dengan CRM .....	60
Gambar 5. 16 Hasil Perhitungan Optimasi Nilai K dari Model PINO .....	61
Gambar 5. 17 Kurva Kalibrasi $^{235}\text{U}$ Vs Rasio laju cacah pada energi 186/1001 dan Nilainya.....	62
Gambar 5. 18 Grafik Perbandingan Nilai $R_2$ .....	64
Gambar 5. 19 Kurva Kalibrasi Tunggal Laju Cacah 1001 keV Vs Massa uranium.....	64
Gambar 5. 20 Grafik Pertambahan Nilai Laju Cacah Energi 186 Setiap Penambahan Densitas dan Tinggi Bahan tanpa koreksi atenuasi (kiri) dan dengan koreksi atenuasi (kanan) .....	69
Gambar 5. 21 Efek Atenuasi pada Berbagai Densitas Sampel .....	70
Gambar 5. 22 Nilai Efek Atenuasi Terkoreksi pada Setiap Sampel.....	71
Gambar 5. 23 Grafik Fungsi Transfer Hasil Pengukuran PMCA dan HPGe .....	72
Gambar 5. 24 Grafik Penentuan $^{235}\text{U}$ Data PMCA dan HPGe.....	72

### Daftar Lampiran

Lampiran 1 Kode Pengolahan Data Tesis.....	83
Lampiran 2 Kode Physics-Informed Number Optimization (PINO).....	92
Lampiran 3 Kode Perhitungan Massa uranium dan $^{235}\text{U}$ .....	93