



**SIMULASI NUMERIK MASSA PELURUHAN INTI ZAT
RADIOAKTIF UNSUR URANIUM-238 DENGAN METODE
ALJABAR MATRIKS**

SKRIPSI

Oleh :

JATU RIDWAN P

NIM. 080210192027

PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA

JURUSAN PENDIDIKAN MIPA

FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN

UNIVERSITAS JEMBER

2015



**SIMULASI NUMERIK MASSA PELURUHAN INTI ZAT
RADIOAKTIF UNSUR URANIUM-238 DENGAN METODE
ALJABAR MATRIKS**

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Pendidikan Fisika (S1) dan mencapai gelar Sarjana Pendidikan

Oleh :

JATU RIDWAN P

NIM. 080210192027

PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA

JURUSAN PENDIDIKAN MIPA

FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN

UNIVERSITAS JEMBER

2015



**SIMULASI NUMERIK MASSA PELURUHAN INTI ZAT
RADIOAKTIF UNSUR URANIUM-238 DENGAN METODE
ALJABAR MATRIKS**

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Pendidikan Fisika (S1) dan mencapai gelar Sarjana Pendidikan

Oleh :

JATU RIDWAN P

NIM. 080210192027

PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA

JURUSAN PENDIDIKAN MIPA

FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN

UNIVERSITAS JEMBER

2015

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Ayahanda Wahyono dan Ibunda Eni Choiriah, terima kasih atas do'a dan semangat yang telah mengiringi langkahku selama menuntut ilmu, dukungan, kegigihan, kesabaran, pengorbanan serta curahan kasih sayang yang telah diberikan selama ini.
2. Guru-guruku sejak sekolah dasar sampai perguruan tinggi, yang telah membimbing dengan penuh kesabaran.
3. Almameter Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.

MOTTO

Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan lain).

(terjemahan Surat Al-Insyirah ayat 6-7))*

*⁾ Departemen Agama Republik Indonesia. 2008. *Al Qur'an dan Terjemahnya*. Bandung: CV Penerbit Dipenogoro.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Jatu Ridwan P.

NIM : 080210192027

menyatakan dengan sungguh bahwa karya ilmiah yang berjudul : “Simulasi Numerik Massa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Unsur Uranium-238 Dengan Metode Aljabar Matriks” adalah benar – benar karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada instansi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Maret 2015

Yang Menyatakan,

Jatu Ridwan P.

NIM 080210192027

SKRIPSI

**SIMULASI NUMERIK MASSA PELURUHAN INTI ZAT
RADIOAKTIF UNSUR URANIUM-238 DENGAN METODE
ALJABAR MATRIKS**

Oleh :

JATU RIDWAN P

NIM. 080210192027

Pembimbing

Dosen Pembimbing I : Rif'ati Dina Handayani, S.Pd, M.Si

Dosen Pembimbing II : Drs. Bambang Supriadi, M.Sc

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Simulasi Numerik Massa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Unsur Uranium-238 Dengan Metode Aljabar Matriks” telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember pada :

hari, tanggal : Senin, 6 April 2015

tempat : Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember

Ketua, Tim Penguji
Sekretaris,

Drs. Trapsilo Prihandono, M.Si
NIP. 196204011987021001

Drs. Bambang Supriadi, M.Sc
NIP. 196807101993021001

Anggota I,

Anggota II,

Rif’ati Dina H, S.Pd., M.Si
NIP. 198102052006042001

Alex Harijanto, M.Si
NIP. 196411171991031001

Mengesahkan,
Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Jember,

Prof. Dr. Sunardi, M.Pd.
NIP. 195405011983031005

RINGKASAN

Simulasi Numerik Massa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Unsur Uranium-238 Dengan Metode Aljabar Matriks; Jatu Ridwan P; 080210192027; 2015; 37 Halaman; Jurusan Pendidikan MIPA Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.

Uranium-238 merupakan salah satu unsur radioaktif alam yang ada sejak pembentukan Bumi dan inti atomnya tidak stabil sehingga mengalami peluruhan berantai alami. Dalam sains dan teknik penyelesaian peluruhan berantai tidak dapat diatasi dengan hanya menggunakan metode analitik. Metode numerik merupakan teknik yang digunakan untuk memformulasikan masalah-masalah matematis agar dapat dipecahkan dengan operasi perhitungan.

Salah satu metode numerik untuk peluruhan berantai yakni menggunakan metode aljabar matriks dengan pendekatan persamaan Bate. Metode aljabar matriks dapat menggantikan penyelesaian peluruhan berantai secara sederhana yang umumnya penyelesaian peluruhan berantai menggunakan persamaan diferensial dan integral yang membutuhkan kecakapan dan ketelitian yang memadai.

Uranium-238 terbentuk sejak pembentukan awal bumi yang mengalami 15 peluruhan untuk menjadi nuklida stabil. Oleh karena itu, metode aljabar matriks diperlukan dalam menyelesaikan peluruhan berantai alami uranium yang dimulai dari pembentukan awal bumi. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah: menghitung besar massa sisa peluruhan zat radioaktif unsur uranium-238.

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium komputer Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Jember pada semester genap tahun ajaran 2013-2014. Langkah penelitian antara lain: (1) Mempersiapkan literatur buku serta jurnal tentang simulasi numerik massa peluruhan inti zat radioaktif unsur uranium-238 dengan metode aljabar matriks. (2) Menerapkan teori yang sudah ada mengenai peluruhan zat radioaktif menggunakan aljabar matriks terhadap peluruhan berantai uranium-238. (3) Melakukan perhitungan untuk mendapatkan

massa unsur uranium-238 setelah interval waktu tertentu menggunakan matlab 6.1. (4) Melakukan pembahasan secara runtun mengenai hasil analisa peluruhan zat radioaktif unsur uranium-238. (5) Hasil analisis dan pembahasan kemudian disimpulkan untuk menjawab rumusan masalah dalam penelitian.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peluruhan berantai alami yang terjadi pada uranium-238 yang bermassa 7 g selama $4,3 \times 10^9$ tahun yang lalu menunjukkan nuklida induk memiliki massa sisa terbanyak dibandingkan dengan massa sisa nuklida turunannya karena waktu paruh yang dimiliki nuklida-nuklida turunannya sangat singkat. Massa peluruhan nuklida bergantung pada waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida dan lamanya peluruhan. Semakin lama waktu peluruhan yang dimiliki nuklida maka massa sisa semakin besar dan sebaliknya. Jumlah atom uranium-238 yang meluruh selama selang waktu bergantung pada jumlah atom awal dan tetapan disintegrasi () yang bergantung pada lamanya waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida. Kesetimbangan sekuler terjadi pada waktu 1,43 juta tahun setelah pembentukan awal bumi. Dalam keadaan ini besar aktivitas setiap nuklida sama, sehingga saat nuklida induk U-238 meluruh maka pada saat yang sama sebuah nuklida anak Pb-206 akan terbentuk.

Kesimpulan dari penelitian ini adalah : (1) Besarnya massa sisa dalam peluruhan unsur uranium-238 dengan syarat batas telah ditentukan ditentukan secara numerik menunjukkan nuklida induk memiliki massa sisa sebesar 3,6148 gram sedangkan massa sisa nuklida turunannya mendekati nol selama $4,3 \times 10^9$ tahun yang lalu. (2) Massa peluruhan nuklida bergantung pada waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida dan lamanya peluruhan. Semakin lama waktu peluruhan yang dimiliki nuklida maka massa sisa semakin besar dan sebaliknya. (3) Jumlah atom uranium-238 yang meluruh selama selang waktu bergantung pada jumlah atom awal dan tetapan disintegrasi () yang bergantung pada lamanya waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida.

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi Numerik Massa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Unsur Uranium-238 dengan Metode Aljabar Matriks”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.

Penulis skripsi ini tidak lepas bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Sunardi, M.Pd., selaku Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember;
2. Dr. Dwi Wahyuni, M. Kes, selaku Ketua Jurusan Pendidikan MIPA;
3. Dr. Yushardi, S.Si, M. Si, selaku ketua Program Studi Pendidikan Fisika;
4. Drs. Trapsilo Prihandono, M.Si, selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
5. Rif’ati Dina H, S. Pd., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I dan Drs. Bambang Supriadi, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan pikiran dalam membimbing penulis;
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, April 2015

Penulis,

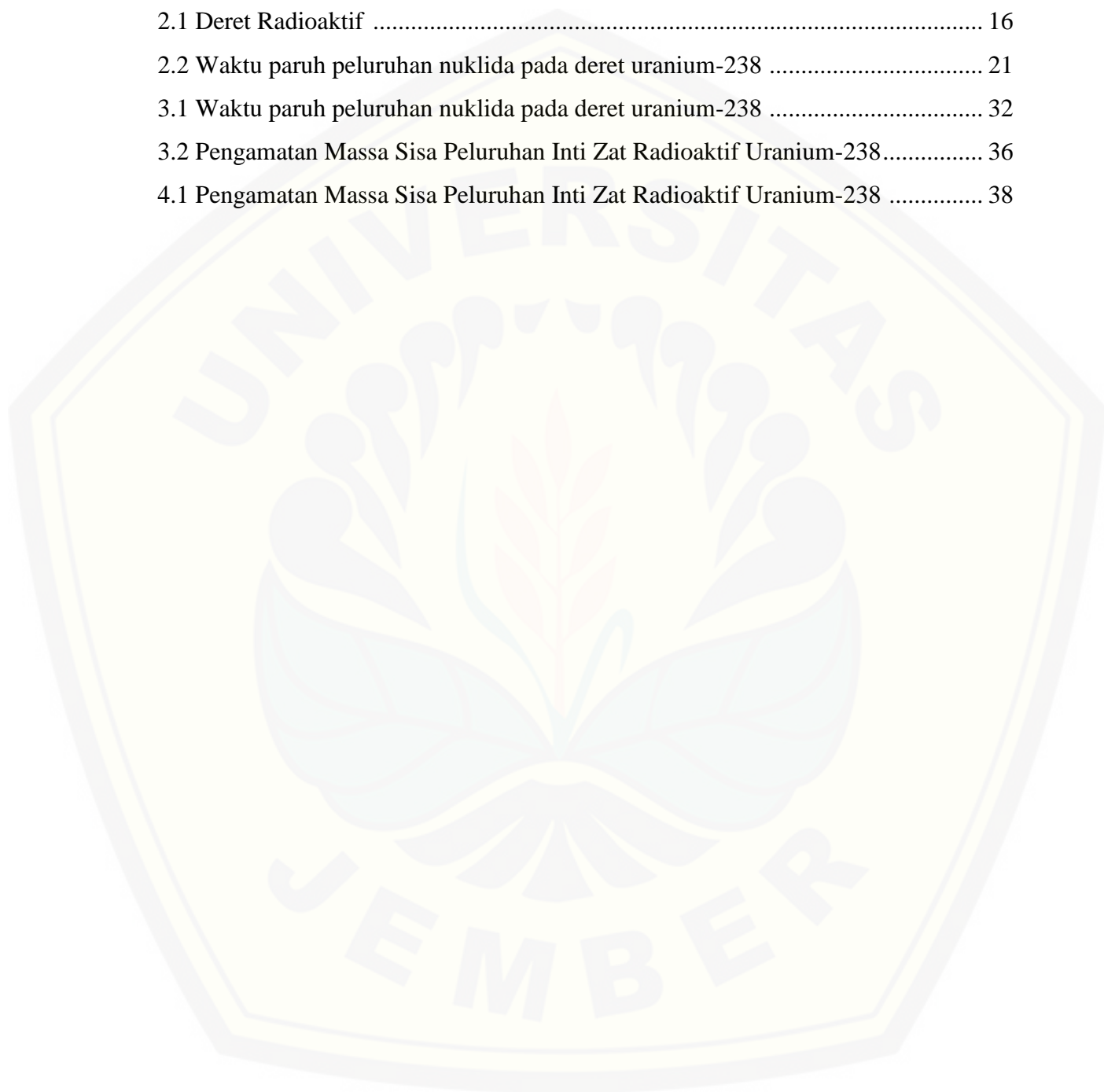
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Unsur	5
2.2 Kestabilan Inti Atom	6
2.3 Unsur Radioaktif	7
2.3.1 Uranium-235	8
2.3.2 Uranium-238	8
2.4 Radioaktivitas	8
2.4.1 Peluruhan Radioaktif	9
2.4.2 Aktivitas Radiasi	11
2.4.3 Waktu Paruh	12

2.5. Peluruhan Berantai	12
2.5.1 Proses Peluruhan Berantai	12
2.5.2 Deret Radioaktif	16
2.5.3 Deret Torium	16
2.5.4 Deret Neptunium	18
2.5.5 Deret Uranium	19
2.5.6 Deret Aktinium	21
2.6 Hubungan Jumlah Atom dengan Massa Atom	23
2.7 Solusi Aljabar Matriks	24
2.7.1 Nilai Eigen Untuk Mencari Solusi Sistem Persamaan Diferensial Homogen Peluruhan Berantai	26
BAB 3. METODE PENELITIAN	30
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	30
3.2 Defisi Operasional Variabel	30
3.3 Langkah Penelitian	31
3.4 Alat Penelitian	34
3.5 Teknik Penyajian Data	36
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Data Pengamatan Hasil Simulasi	38
4.2 Pembahasan	38
BAB 5. PENUTUP	44
5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran	45
DAFTAR BACAAN	46
LAMPIRAN – LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Deret Radioaktif	16
2.2 Waktu paruh peluruhan nuklida pada deret uranium-238	21
3.1 Waktu paruh peluruhan nuklida pada deret uranium-238	32
3.2 Pengamatan Massa Sisa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Uranium-238.....	36
4.1 Pengamatan Massa Sisa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Uranium-238	38

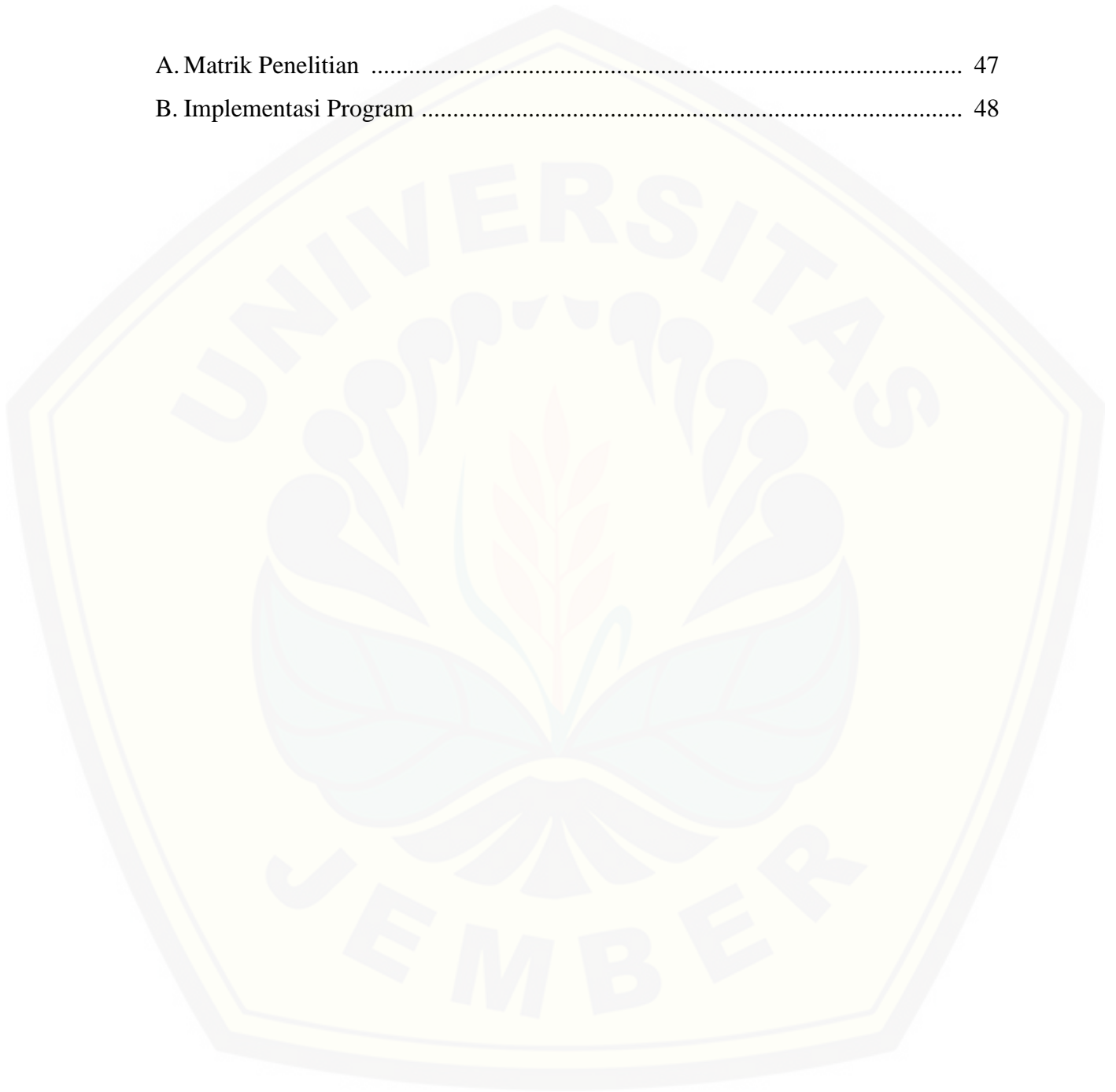


DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Tabel Periodik	6
2.2 Grafik Kestabilan Inti Atom	7
2.3 Lintasan Sinar Alfa, Beta, dan Gamma Dalam Medan Magnet B	9
2.4 Skema Peluruhan Berantai	13
2.5 Skema Peluruhan U-238 Menjadi Pa-234	13
2.6 Deret Torium	17
2.7 Deret Neptunium	18
2.8 Deret Uranium	20
2.9 Deret Aktinium	22
3.1 Langkah Penelitian	30
3.2 Grafik Hubungan Jumlah Atom Yang Meluruh Dan Waktu	36
3.3 Keseimbangan Sekuler Peluruhan Berantai Uranium-238	37
3.4 Grafik Hubungan Massa dan Waktu	37
4.1 Grafik Hubungan Massa dan Waktu	39
4.2 Grafik Hubungan Jumlah Atom Yang Meluruh dan Waktu	40
4.3 Keseimbangan Sekuler Peluruhan Berantai Uranium-238	42

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Matrik Penelitian	47
B. Implementasi Program	48



BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini dijelaskan tentang latar belakang diadakan penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan manfaat penelitian, yang masing-masing diuraikan sebagai berikut:

1.1 Latar Belakang

Semua materi yang ada di alam terdiri dari partikel yang sangat kecil dan tidak bisa dibagi lagi yang dinamakan atom. Atom terdiri dari inti atom dan elektron yang mengelilingi inti atom dengan lintasan-lintasan kulit tertentu. Kestabilan inti atom dipengaruhi oleh rasio proton-neutron dan ukuran inti atom. Inti atom yang tidak stabil secara spontan akan mengalami perubahan dari inti tidak stabil menjadi inti stabil. Proses perubahan ini disebut peluruhan dan inti atom yang tidak stabil itu disebut radionuklida, sedangkan zat yang mengandung radionuklida disebut zat radioaktif (Karyono, 2009).

Uranium adalah salah satu unsur radioaktif yang paling umum ditemukan dan merupakan logam yang paling berat di alam. Uranium mempunyai 5 buah isotop yaitu ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , dan ^{238}U . Sekitar 99,3% uranium alami adalah uranium-238 yang memiliki waktu paruh $4,51 \times 10^9$ tahun sehingga dimanfaatkan sebagai penanggalan umur Bumi dan bahan bakar utama pada reaktor nuklir. Uranium-238 merupakan salah satu unsur radioaktif alam yang bernomor atom tinggi yang memiliki inti atom tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada timah-206 (Wiyatmo. W, 2012:77). Peristiwa peluruhan ini, dikenal sebagai deret peluruhan berantai uranium.

Penyelesaian peluruhan berantai membutuhkan kecakapan dan ketelitian yang memadai tentang konsep diferensial. Persamaan-persamaan yang menggambarkan fenomena tersebut cukup rumit yang penyelesaian atau perhitungan matematis memerlukan persamaan secara khusus (Yaya. S, 1989:1). Salah satu penyelesaian khusus yang dipilih untuk menyelesaikan persamaan tersebut adalah metode numerik. Metode numerik merupakan teknik yang digunakan untuk memformulasikan masalah-masalah matematis agar dapat

dipecahkan dengan operasi perhitungan. Selain itu metode numerik mampu menangani sistem persamaan yang kompleks (Duane dan Bruce, 2001:21).

Penelitian Toni Alchofino pada tahun 2009 tentang estimasi umur bumi menggunakan metode pentarikan uranium-timbal menyatakan bahwa uranium-238 merupakan bahan radioaktif yang yang paling umum ditemukan dan telah ada mulai awal terbentuknya bumi yakni $4,3 \times 10^9$ tahun yang lalu. Proses peluruhan uranium-238 menjadi timbal-208 dianggap dapat menggambarkan umur Bumi. Serta penelitian selanjutnya oleh John Robert pada tahun 2011 tentang penyelesaian peluruhan berantai pada inti atom anak radon-222 menjadi polonium-214 pada deret uranium-238 menunjukkan bahwa penyelesaian peluruhan berantai menggunakan persamaan Bateman dengan penyelesaian diferensial dan integral mendapatkan persamaan yang kompleks dan penelitian oleh M. Amaku (2009); L.moral dan A. F. Pacheco (2003) tentang penyelesaian diferensial peluruhan berantai pada inti atom anak radon-222 menjadi bismut-214 pada deret uranium-238 menunjukkan bahwa penyelesaian peluruhan berantai menggunakan persamaan Bateman dapat dilakukan dengan metode aljabar matriks. Metode penyelesaian diferensial peluruhan berantai menggunakan metode aljabar matriks dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah peluruhan radioaktif dan diimplementasikan secara komputasi (M. Amaku, 2009).

Berdasarkan penelitian di atas, proses peluruhan uranium-238 telah berlangsung mulai awal pembentukan Bumi dan analisa peluruhan berantai uranium-238 menjadi timbal-206 dapat menggunakan metode aljabar matriks. Metode aljabar matriks merupakan metode dalam matematika dalam penyelesaian sistem persamaan linier yang dapat dikembangkan ke sistem persamaan diferensial. Berdasarkan uraian di atas maka perlu diadakan penelitian tentang massa yang tersisa pada peluruhan berantai uranium-238 dengan metode aljabar matriks mulai awal pembentukan Bumi. Untuk itu perlu dilakukan penelitian dengan judul “Simulasi Numerik Massa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Unsur Uranium-238 Dengan Metode Aljabar Matriks”.

1.2 Rumusan Masalah

Berkaitan dengan uraian latar belakang di atas, maka permasalahan yang dapat dirumuskan dalam penelitian sebagai berikut :

1. Bagaimanakah massa sisa peluruhan zat radioaktif pada deret uranium-238 secara numerik ?
2. Bagaimanakah jumlah atom sisa peluruhan zat radioktif pada deret uranium-238?
3. Bagimanakah aktivitas peluruhan yang terjadi pada zat peluruhan zat radioakftif uranium-238?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dibahas dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Deret radioaktif yang digunakan yaitu peluruhan alami deret uranium-238.
- b. Variabel yang dihitung adalah massa terhadap waktu yang telah ditentukan.
- c. Massa awal yang digunakan adalah 7 gram
- d. Waktu selama peluruhan mulai terbentuknya Bumi yakni $4,3 \times 10^9$ tahun

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Menghitung besar massa sisa peluruhan zat radioaktif unsur uranium-238
2. Menghitung jumlah atom sisa peluruhan zat radioktif pada deret uranium-238
3. Menghitung aktivitas peluruhan yang terjadi pada zat peluruhan zat radioakftif uranium-238

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yakni :

- a. Bagi peneliti, sebagai masukan dan pertimbangan untuk melakukan penelitian lebih lanjut tentang pemecahan permasalahan diferensial peluruhan berantai menggunakan solusi matrik aljabar.

- b. Bagi instansi, sebagai reverensi untuk menambah pustaka pada permasalahan peluruhan berantai.
- c. Bagi pembaca, sebagai informasi tentang menyelesaikan solusi peluruhan berantai pada deret uranium-238.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab tinjauan pustaka ini dijelaskan tentang unsur radioaktif, radioaktivitas, peluruhan berantai, dan solusi aljabar matriks, yang masing-masing diuraikan sebagai berikut:

2.1 Unsur

Atom adalah partikel yang sangat kecil dan tidak bisa dibagi lagi. Semua materi yang ada di alam tersusun atom. Atom terdiri dari inti atom dan elektron yang mengelilingi inti atom dengan lintasan-lintasan kulit tertentu. Kumpulan atom yang mempunyai ukuran, massa, dan sifat kimia sama dinamakan unsur. Atom unsur tertentu berbeda dari atom semua unsur yang lain. Sebanyak 113 unsur telah teridentifikasi hingga saat ini. Delapan puluh tiga diantaranya terdapat secara alami di Bumi dan sisanya telah dibuat oleh ilmuwan.

Nama-nama unsur tersebut telah dituliskan dalam tabel periodik. Tabel periodik merupakan sebuah tabel dimana unsur-unsur yang mempunyai sifat-sifat fisis dan kimia yang mirip dikelompokkan bersama. Pada tabel periodik modern unsur-unsur disusun berdasarkan nomor atomnya (ditempatkan di atas lambang unsur) dalam baris horisontal yang disebut periode dan berdasarkan sifat-sifat kimianya dalam kolom-kolom vertikal yang disebut golongan.

Unsur – unsur golongan terdiri atas 2 golongan yaitu A dan B. Unsur – unsur golongan A disebut unsur - unsur representatif (utama) yang terdiri dari golongan yaitu golongan IA – VIIIA. Unsur – unsur golongan BB disebut unsur - unsur transisi yang terdiri dari 8 golongan yaitu golongan IB-VIIIB. Unsur-unsur dapat dibagi menjadi beberapa golongan berdasarkan jenis sub kulit yang terisi yakni unsur utama, gas mulia, atom logam transisi, laktanida, dan aktinida. Berikut gambar tabel periodik disertai dengan konfigurasi elektron.

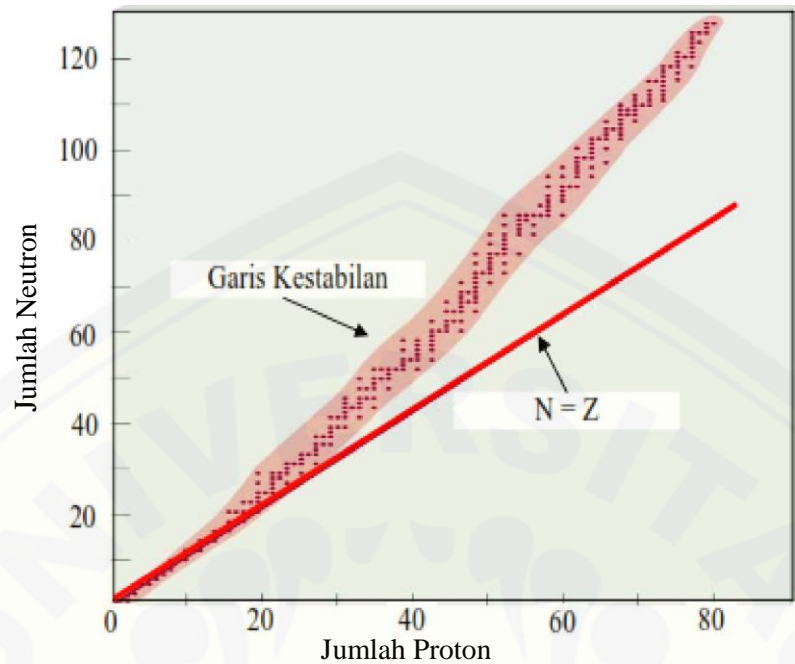
1A																												8A			
1 H $1s^1$	2A																						2 He $1s^2$								
3 Li $2s^1$	4 Be $2s^2$																	5 B $2s^2 2p^1$	6 C $2s^2 2p^2$	7 N $2s^2 2p^3$	8 O $2s^2 2p^4$	9 F $2s^2 2p^5$	10 Ne $2s^2 2p^6$								
11 Na $3s^1$	12 Mg $3s^2$																	13 Al $3s^2 3p^1$	14 Si $3s^2 3p^2$	15 P $3s^2 3p^3$	16 S $3s^2 3p^4$	17 Cl $3s^2 3p^5$	18 Ar $3s^2 3p^6$								
19 K $4s^1$	20 Ca $4s^2$	21 Sc $3d^1 4s^2$	22 Ti $3d^2 4s^2$	23 V $3d^3 4s^2$	24 Cr $3d^5 4s^1$	25 Mn $3d^5 4s^2$	26 Fe $3d^6 4s^2$	27 Co $3d^7 4s^2$	28 Ni $3d^8 4s^2$	29 Cu $3d^{10} 4s^1$	30 Zn $3d^{10} 4s^2$	31 Ga $4s^2 4p^1$	32 Ge $4s^2 4p^2$	33 As $4s^2 4p^3$	34 Se $4s^2 4p^4$	35 Br $4s^2 4p^5$	36 Kr $4s^2 4p^6$														
37 Rb $5s^1$	38 Sr $5s^2$	39 Y $4d^1 5s^2$	40 Zr $4d^2 5s^2$	41 Nb $4d^4 5s^1$	42 Mo $4d^5 5s^1$	43 Tc $4d^5 5s^2$	44 Ru $4d^7 5s^1$	45 Rh $4d^8 5s^1$	46 Pd $4d^{10}$	47 Ag $4d^{10} 5s^1$	48 Cd $4d^{10} 5s^2$	49 In $5s^2 5p^1$	50 Sn $5s^2 5p^2$	51 Sb $5s^2 5p^3$	52 Te $5s^2 5p^4$	53 I $5s^2 5p^5$	54 Xe $5s^2 5p^6$														
55 Cs $6s^1$	56 Ba $6s^2$	57 *La $5d^1 6s^2$	72 Hf $5d^2 6s^2$	73 Ta $5d^3 6s^2$	74 W $5d^4 6s^2$	75 Re $5d^5 6s^2$	76 Os $5d^6 6s^2$	77 Ir $5d^7 6s^2$	78 Pt $5d^9 6s^1$	79 Au $5d^{10} 6s^1$	80 Hg $5d^{10} 6s^2$	81 Tl $6s^2 6p^1$	82 Pb $6s^2 6p^2$	83 Bi $6s^2 6p^3$	84 Po $6s^2 6p^4$	85 At $6s^2 6p^5$	86 Rn $6s^2 6p^6$														
87 Fr $7s^1$	88 Ra $7s^2$	89 †Ac $6d^1 7s^2$	104 Rf $6d^2 7s^2$	105 Db $6d^3 7s^2$	106 Sg $6d^4 7s^2$	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110	111	112	Unknown	114	Unknown	††116	Unknown	††118														
* 58 Ce $4f^7 6s^2$																			59 Pr $4f^6 6s^2$	60 Nd $4f^6 6s^2$	61 Pm $4f^6 6s^2$	62 Sm $4f^6 6s^2$	63 Eu $4f^7 6s^2$	64 Gd $4f^7 5d^1 6s^2$	65 Tb $4f^7 6s^2$	66 Dy $4f^9 6s^2$	67 Ho $4f^{10} 6s^2$	68 Er $4f^{12} 6s^2$	69 Tm $4f^{13} 6s^2$	70 Yb $4f^{14} 6s^2$	71 Lu $5f^{14} 6s^2$
† 90 Th $6d^2 7s^2$																			91 Pa $5f^2 6d^1 7s^2$	92 U $5f^3 6d^1 7s^2$	93 Np $5f^4 7s^2$	94 Pu $5f^6 7s^2$	95 Am $5f^7 7s^2$	96 Cm $5f^7 6d^1 7s^2$	97 Bk $5f^9 7s^2$	98 Cf $5f^{10} 7s^2$	99 Es $5f^{11} 7s^2$	100 Fm $5f^{12} 7s^2$	101 Md $5f^{13} 7s^2$	102 No $5f^{14} 7s^2$	103 Lr $5f^{14} 6d^1 7s^2$

Gambar 2.1 Tabel periodik (Chang R, 2004: 231)

Unsur-unsur utama adalah unsur-unsur dalam golongan 1A hingga 7A, yang memiliki subkulit *s* atau *p* dengan bilangan kuantum tertinggi yang belum terisi penuh. Gas mulia adalah unsur-unsur golongan 8A mempunyai subkulit *p* yang terisi penuh kecuali helium. Logam transisi adalah unsur-unsur dalam golongan 1B dan 3B hingga 8B, yang mempunyai subkulit *d* yang tidak terisi penuh atau mudah menghasilkan kation dengan subkulit *d* yang tidak terisi penuh. Unsur-unsur pada 2B adalah Zn, Cd, dan Hg, yang bukan merupakan unsur utama maupun unsur transisi. Laktanida dan aktanida disebut unsur transisi blok-*f* karena kedua golongan ini memiliki subkulit *f* yang tidak terisi penuh. (Chang R, 2004: 232)

2.2 Kestabilan Inti Atom

Komposisi jumlah proton dan neutron sangat mempengaruhi kestabilan inti atom. Inti atom dikatakan stabil jika komposisi jumlah proton sama dengan jumlah neutron serta tingkat energinya dalam keadaan dasar. Inti atom dikatakan tidak stabil jika komposisi jumlah proton tidak sama dengan jumlah inti neutron serta tingkat energinya tidak dalam keadaan dasar. (Khoirul, 2006)



Gambar. 2.2 Grafik Kestabilan Inti Atom (Yusman Wiyatmo, 2012:52)

Inti ringan (jumlah proton ≤ 20) sangat stabil karena intinya mengandung jumlah proton dan neutron yang sama. Inti berat stabil jika memiliki jumlah neutron sama dengan 1,6 kali jumlah proton. Semakin banyak jumlah proton, gaya tolak menolak antar proton semakin kuat sehingga cenderung memisahkan dari nukleon. Inti – inti yang memiliki jumlah proton lebih dari 83 tidak memiliki inti stabil sehingga pada inti ini bersifat radioaktif.

2.3 Unsur Radioaktif

Atom terdiri dari inti atom dan elektron yang mengelilingi inti atom dengan lintasan-lintasan kulit tertentu. Kestabilan inti atom dipengaruhi oleh komposisi jumlah proton dan neutron. Inti atom yang tidak stabil secara spontan akan mengalami perubahan dari inti tidak stabil menjadi inti stabil. Inti atom yang tidak stabil dinamakan radionuklida. Zat yang mengandung radionuklida dinamakan zat radioaktif.

Unsur radioaktif merupakan suatu unsur atau bahan yang memancarkan radiasi partikel dan gelombang elektromagnet yang tidak dipengaruhi perubahan fisika dan kimia. Adapun perubahan fisika seperti perubahan tekanan, temperatur,

dan volume maupun bentuk kimia seperti perubahan susunan molekul-molekul atomnya. Unsur radioaktif memiliki nomor atom lebih dari 83 yang mempunyai komposisi jumlah proton dan neutron yang tidak seimbang atau tingkat energinya tidak berada dalam keadaan dasar salah satunya yaitu uranium yang memiliki nomor atom 92.

Uranium adalah salah satu unsur radioaktif yang paling umum ditemukan dan merupakan logam yang paling berat di alam. Uranium merupakan logam putih keperakan yang disimbolkan U dan mempunyai nomor atom 92 dalam deret aktinida di dalam tabel periodik. Uranium mempunyai 5 buah isotop yaitu ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , dan ^{238}U . Sekitar 99,3% uranium alami adalah uranium-238 yang memiliki waktu paruh $4,51 \times 10^9$ tahun sehingga dimanfaatkan sebagai penanggalan umur Bumi dan bahan bakar utama pada reaktor nuklir

2.3.1 Uranium-235

Uranium-235 merupakan salah satu unsur radioaktif alam yang memiliki waktu paruh $7,038 \times 10^8$ tahun. Uranium-235 hanya berkisar 0,72% di bumi. Uranium-235 memiliki atom yang tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada timbal-207. Uranium-235 bersifat fisil yang dapat digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir (Khoirul, 2006).

2.3.2 Uranium-238

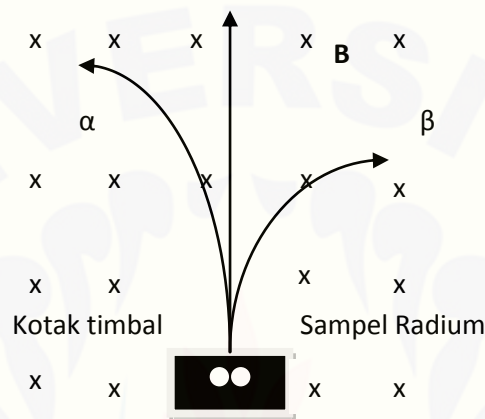
Uranium-238 merupakan salah satu unsur radioaktif alam yang bernomor atom 92 dan bermassa 238,048 dalam deret aktinida periode 7 tabel periodik. Uranium-238 memiliki inti atom tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada timbal-206. Uranium-238 bersifat fertil tetapi dapat berubah menjadi bahan fisil melalui reaksi penangkapan neutron dalam reaktor nuklir (Khoirul, 2006).

2.4 Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah kemampuan inti atom yang tidak stabil untuk memancarkan radiasi partikel dan gelombang elektromagnetik agar berubah menjadi inti stabil. Proses inti atom yang tidak stabil cenderung menjadi inti stabil disebut peluruhan radioaktif.

2.4.1 Peluruhan Radioaktif

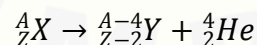
Dalam satu gram zat radioaktif terdapat miliaran atom radioaktif. Ada 3 jenis peluruhan radioaktif yakni: peluruhan alfa, peluruhan beta, dan peluruhan gamma (Khoirul Huda, 2006). Atom-atom tersebut memancarkan sinar radioaktif yakni α , β , dan γ . Berikut gambar sinar alfa, partikel beta, dan partikel gamma dalam pengaruh medan magnet homogen B.



Gambar 2.3. Lintasan Sinar Alfa, Beta, dan Gamma dalam medan magnet B (Yusman Wiyatmo, 2012:63)

Adapun sifat – sifat peluruhan alfa, peluruhan beta, dan peluruhan gamma sebagai berikut:

- Peluruhan alfa (α), terjadi karena inti induk memiliki nomor massa besar (Yusman Wiyatmo, 2012:64). Dalam peluruhan ini akan dipancarkan partikel alfa (α) berupa nukleus helium yang akan mereduksi inti induk sehingga kehilangan 2 neutron dan 2 proton serta membentuk nuklida baru. Proses peluruhan alfa dapat dituliskan secara simbolis sebagai berikut:

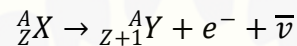


Sifat-sifat radiasi alfa (α) yakni :

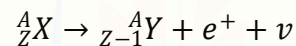
- 1) Daya ionisasi partikel alfa (α) sangat besar, ± 100 kali daya ionisasi partikel beta (β) dan 10.000 kali daya ionisasi sinar gamma (γ).
- 2) Memiliki daya tembus sangat pendek.
- 3) Partikel alfa (α) akan dibelokkan jika melewati medan magnet atau medan listrik.

- 4) Kecepatan partikel alfa (α) bervariasi antara 1/100 hingga 1/10 kecepatan cahaya
- b. Peluruhan beta (β), terjadi karena inti memiliki jumlah neutron lebih besar dari jumlah proton atau sebaliknya. Dalam peluruhan ini akan dipancarkan partikel beta yang bermuatan negatif (β^-) atau bermuatan positif (β^+) disertai neutrino (ν) atau antineutrino ($\bar{\nu}$) yang merupakan partikel tidak bermassa tetapi memiliki energi (Ronald G. dan William S, 2006:164). Dalam peluruhan β^- terjadi perubahan neutron menjadi proton di dalam inti atom. Partikel β^- identik dengan elektron (e^-).

Proses peluruhan β^- dapat dituliskan secara simbolis sebagai berikut:

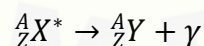


Peluruhan β^+ terjadi perubahan proton menjadi neutron di dalam inti atom. Partikel β^+ identik dengan positron (e^+). Proses peluruhan β^+ dapat dituliskan secara simbolis sebagai berikut:



Sifat radiasi beta (β):

- 1) Daya ionisasi 1/100 kali dari partikel alfa (α).
 - 2) Memiliki daya tembus yang lebih jauh daripada partikel (α).
 - 3) Kecepatan partikel (β) antara 1/100 hingga 99/100 kecepatan cahaya.
 - 4) Partikel (β) akan dibelokkan jika melewati medan listrik atau medan magnet.
- c. Peluruhan gamma (γ), terjadi karena inti memiliki energi yang berlebih (Wiyatmo Y, 2012:64). Dalam peluruhan ini tidak menyebabkan perubahan nomor atom dan nomor massa. Peluruhan gamma (γ) dapat ditulis secara simbolis sebagai berikut:



Sifat radiasi gamma (γ):

- 1) Partikel gamma (γ) dipancarkan oleh nuklida (inti atom) dalam keadaan tereksitasi dengan panjang gelombang antara $0,005 \text{ \AA}$ hingga $0,5 \text{ \AA}$.
- 2) Daya ionisasinya sangat kecil dibandingkan partikel alfa (α) atau beta (β).
- 3) Daya tembus lebih jauh dibandingkan partikel alfa (α) atau beta (β).

- 4) Partikel gamma (γ) tidak dibelokan ketika melewati medan magnet atau medan listrik karena partikel gamma (γ) tidak bermuatan.

2.4.2 Aktivitas Radiasi

Aktivitas merupakan laju peluruhan radioaktif dalam suatu bahan radioaktif. Aktivitas radiasi bergantung pada banyaknya inti radioaktif alam bahan (N) dan tetapan peluruhan (λ) sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$A = \lambda \cdot N \quad (2.1)$$

Tetapan peluruhan (λ) memiliki nilai yang berbeda untuk masing-masing inti. Aktivitas radiasi (A) didefinisikan sebagai jumlah peluruhan tiap waktu (Wiyatmo Y, 2012:69). Sehingga dapat ditulis secara matematis sebagai berikut:

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (2.2)$$

Tanda negatif menyatakan bahwa banyaknya inti radioaktif alam bahan (N) berkurang terhadap bertambahnya waktu. Berdasarkan persamaan (2.1) dan (2.2) didapatkan :

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (2.3)$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt \quad (2.4)$$

Mengintegrasikan kedua ruas dan perhitungan matematis :

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int_0^t dt \quad (2.5)$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t \quad (2.6)$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) menunjukkan bahwa jumlah inti atom untuk meluruh setiap saat N bergantung pada jumlah sampel mula-mula N_0 , selang waktu peluruhan t , dan tetapan desintegrasi λ yang merupakan persamaan dari hukum peluruhan radioaktif (Wiyatmo Y, 2012:67).

2.4.3 Waktu Paruh

Waktu paruh ($t_{1/2}$) didefinisikan sebagai periode waktu di mana jumlah cacah inti atom induk yang bersifat radioaktif tinggal separuh dari cacah semula (Wiyatmo Y, 2012:67). Jumlah inti induk N meluruh menjadi setengah inti induk awal ($\frac{1}{2}N_0$) ketika dalam waktu paruh ($t_{1/2}$). Berdasarkan persamaan (2.7) nilai waktu paruh unsur radioaktif diperoleh:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

$$\frac{\frac{1}{2}N_0}{N_0} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (2.9)$$

$$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda t_{1/2} \quad (2.10)$$

Jika $\ln 1 = 0$, maka persamaan (2.10) menjadi:

$$-\ln 2 = -\lambda t_{1/2} \quad (2.11)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.12) menunjukkan bahwa besar konstanta peluruhan radioaktif (λ) bergantung pada waktu paruhnya. Secara matematis dapat dituliskan:

$$\lambda = \frac{0,693}{t_{1/2}} \quad (2.13)$$

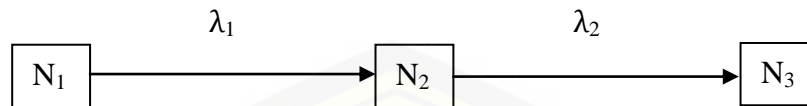
2.5 Peluruhan Berantai

Inti atom yang tidak stabil secara spontan akan menjadi inti atom yang stabil. Proses inti atom yang tidak stabil menjadi stabil disebut peluruhan radioaktif. Inti radioaktif tidak selalu meluruh dan menghasilkan inti anak stabil. Seringkali inti anak juga tidak stabil, sehingga terjadi peluruhan yang belum stabil kemudian bertahap meluruh menjadi inti yang stabil.

2.5.1 Proses Peluruhan Berantai

Inti atom radioaktif (N_1) yang meluruh dengan tetapan peluruhan λ_1 menjadi inti atom baru (N_2) dengan tetapan peluruhan λ_2 , kemudian meluruh lagi menjadi inti atom stabil (N_3). Jika dianalogikan dengan suatu generasi maka inti

atom ke-1 disebut dengan inti atom induk, generasi ke-2 disebut inti atom anak, dan generasi ke-3 disebut inti atom cucu seperti yang disajikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.4 Skema Peluruhan Berantai

Sistem peluruhan berantai pada gambar di atas dapat diselesaikan dengan persamaan diferensial yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.14)$$

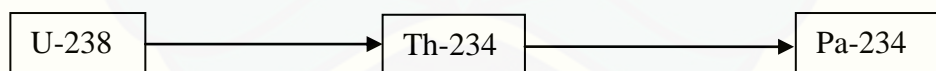
$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.15)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (2.16)$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) merupakan persamaan Bateman pada peluruhan berantai, untuk banyak peluruhan ($i=1, 2, 3, \dots, n$) (M. Amaku (2009); L.moral dan A. F. Pacheco (2003)).

Proses peluruhan radioaktif alami deret uranium, inti induk uranium-238 meluruh menjadi inti cucu proaktinium-234, maka dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.5 Skema Peluruhan U-238 Menjadi Pa-234

Proses peluruhan pada gambar 2.9 jumlah zat yang meluruh dalam waktu t dapat menggunakan persamaan Bateman

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.18)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.19)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3 \quad (2.20)$$

N_1, N_2, N_3 adalah jumlah atom dari U-238, Th-234, dan Pa-234. λ adalah konstanta peluruhan yang didapat dicari menggunakan persamaan 2.13.

Dengan menggunakan integral dan persamaan matematis persamaan 2.18, 2.19, dan 2.20, maka jumlah inti atom yang meluruh pada inti induk uranium-238, inti anak thorium-234, dan inti cucu proaktinium-234

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.21)$$

$$\int_{N_1(0)}^{N_1(t)} \frac{dN_1}{N_1} = -\lambda_1 \cdot \int_0^t dt \quad (2.22)$$

$$\ln N_1(t) - \ln N_1(0) = -\lambda_1 \cdot t \quad (2.23)$$

$$N_1(t) = N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad (2.24)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.25)$$

Jumlah peluruhan inti anak

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 \quad (2.26)$$

Kedua ruas dikalikan $e^{\lambda_2 t}$

$$\frac{dN_2}{dt} \cdot e^{\lambda_2 t} + \lambda_2 N_2 \cdot e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_1 \cdot e^{\lambda_2 t} \quad (2.28)$$

$$\frac{d}{dt} (N_2 \cdot e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_1 \cdot e^{\lambda_2 t} \quad (2.29)$$

Jika $N_1(t) = N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}$

$$\frac{d}{dt} (N_2 \cdot e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_1(0) \cdot e^{(\lambda_2 t - \lambda_1 t)} \quad (2.30)$$

Mengintegrasikan kedua ruas dan persamaan matematis

$$\int_0^t \frac{d}{dt} (N_2 \cdot e^{\lambda_2 t}) = \int_0^t \lambda_1 N_1(0) \cdot e^{(\lambda_2 t - \lambda_1 t)} \quad (2.31)$$

$$N_2(t) \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} - N_2(0) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1) \quad (2.32)$$

Kedua ruas dikalikan $e^{-\lambda_2 t}$

$$\begin{aligned} N_2(t) \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_2 t} - N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t} \\ = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1)e^{-\lambda_2 t} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$N_2(t) = N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.34)$$

Jika N_2 menjadi unsur stabil dimana diasumsikan $N_2(0) = 0$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.35)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (2.36)$$

$$\frac{dN_3}{dt} + \lambda_3 N_3 = \lambda_2 N_2 \quad (2.37)$$

Kedua ruas dikalikan $e^{\lambda_3 t}$

$$\frac{dN_3}{dt} \cdot e^{\lambda_3 t} + \lambda_3 N_3 \cdot e^{\lambda_3 t} = \lambda_2 N_2 \cdot e^{\lambda_3 t} \quad (2.38)$$

$$\frac{d}{dt} (N_3 e^{\lambda_3 t}) = \lambda_2 N_2 \cdot e^{\lambda_3 t} \quad (2.39)$$

Jika $N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$

$$\frac{d}{dt} (N_3 e^{\lambda_3 t}) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \cdot e^{\lambda_3 t} \quad (2.40)$$

Mengintegrasikan kedua ruas dan persamaan matematis

$$\int_0^t \frac{d}{dt} (N_3 e^{\lambda_3 t}) = \int_0^t \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \cdot e^{\lambda_3 t} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} N_3(t) e^{\lambda_3 t} - N_3(0) = \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot N_1(0) \left(\frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)} \right) + \\ \lambda_2 \cdot \lambda_1 \cdot N_1(0) \left(\frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

Kedua ruas dikalikan $e^{-\lambda_3 t}$

$$\begin{aligned} N_3(t) e^{\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} - N_3(0) \cdot e^{-\lambda_3 t} \\ = \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot N_1(0) \left(\frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)} - \frac{e^{(\lambda_3 - \lambda_2)t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)} \right) \cdot e^{-\lambda_3 t} \\ + \lambda_2 \cdot \lambda_1 \cdot N_{A0} \left(\frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right) e^{-\lambda_3 t} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Jika N_3 menjadi unsur stabil dimana diasumsikan $N_3(0) = 0$

$$N_3(t) = \lambda_2 \cdot \lambda_1 \cdot N_1(0) \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right) \quad (2.44)$$

Persamaan (2.24), (2.35) dan (2.44) merupakan persamaan untuk mencari jumlah peluruhan inti induk, inti anak dan inti cucu yang meluruh secara eksponensial waktu. Tahapan – tahapan peluruhan tersebut akan mengikuti suatu urutan hingga menjadi inti atom stabil yang disebut deret radioaktif.

2.5.2 Deret Radioaktif

Sebagian besar unsur radioaktif yang terdapat di alam adalah merupakan anggota dari empat deret radioaktif. Masing – masing deret terdiri dari urutan produk nuklida anak yang semuanya diturunkan dari nuklida induk tunggal.

Nama deret didasarkan pada nama nuklida induknya dan dicirikan oleh nomor massa anggotanya. Setiap deret mempunyai karakteristik tersendiri misalkan pada deret Torium jumlah setiap nomor massa nuklida habis dibagi 4 sehingga nomor massa berlaku $4n$. Daftar deret radioaktif tersebut disajikan pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Deret Radioaktif

Nomor massa	Nama Deret	Nuklida Induk	Umur Paruh (tahun)	Produk akhir
$4n$	Torium	${}_{90}^{232}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
$4n+1$	Neptunium	${}_{92}^{237}\text{Np}$	$2,25 \cdot 10^6$	${}_{83}^{209}\text{Bi}$
$4n+2$	Uranium	${}_{92}^{238}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
$4n+3$	Aktinium	${}_{92}^{235}\text{U}$	$7,07 \cdot 10^8$	${}_{82}^{207}\text{Pb}$

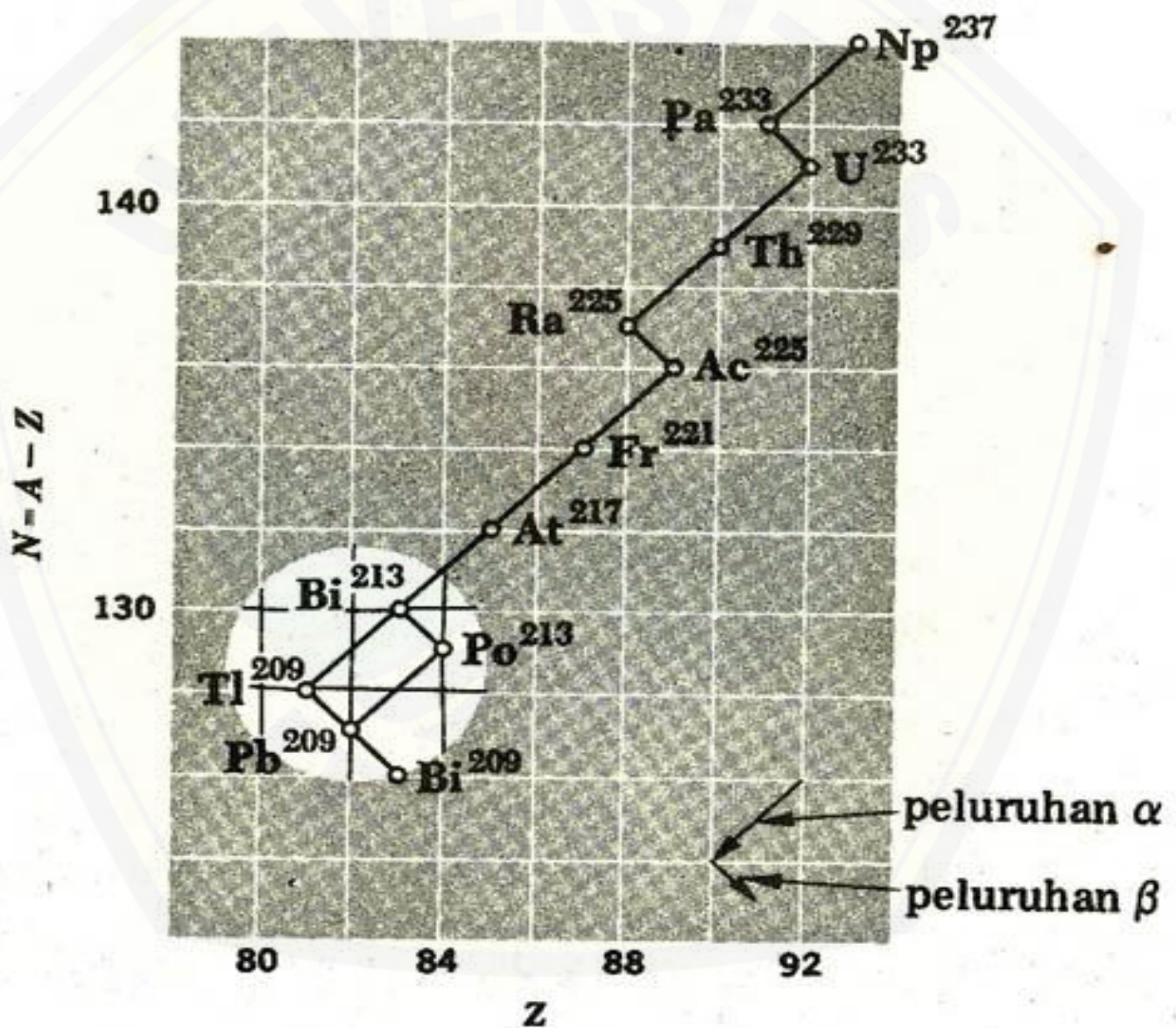
Sumber: (Wiyatmo Y, 2012)

2.5.3 Deret Torium

Torium-232 merupakan unsur radioaktif alam yang memiliki atom tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada timbal-208. Dalam deret torium-232 terjadi 12 proses peluruhan yakni 7 peluruhan alfa (α) dan 6 peluruhan beta (β), setiap nomor massa A nuklida pada deret torium habis dibagi 4 sehingga dinamakan deret $4n$. Berikut gambar deret torium-232.

2.5.4 Deret Neptunium

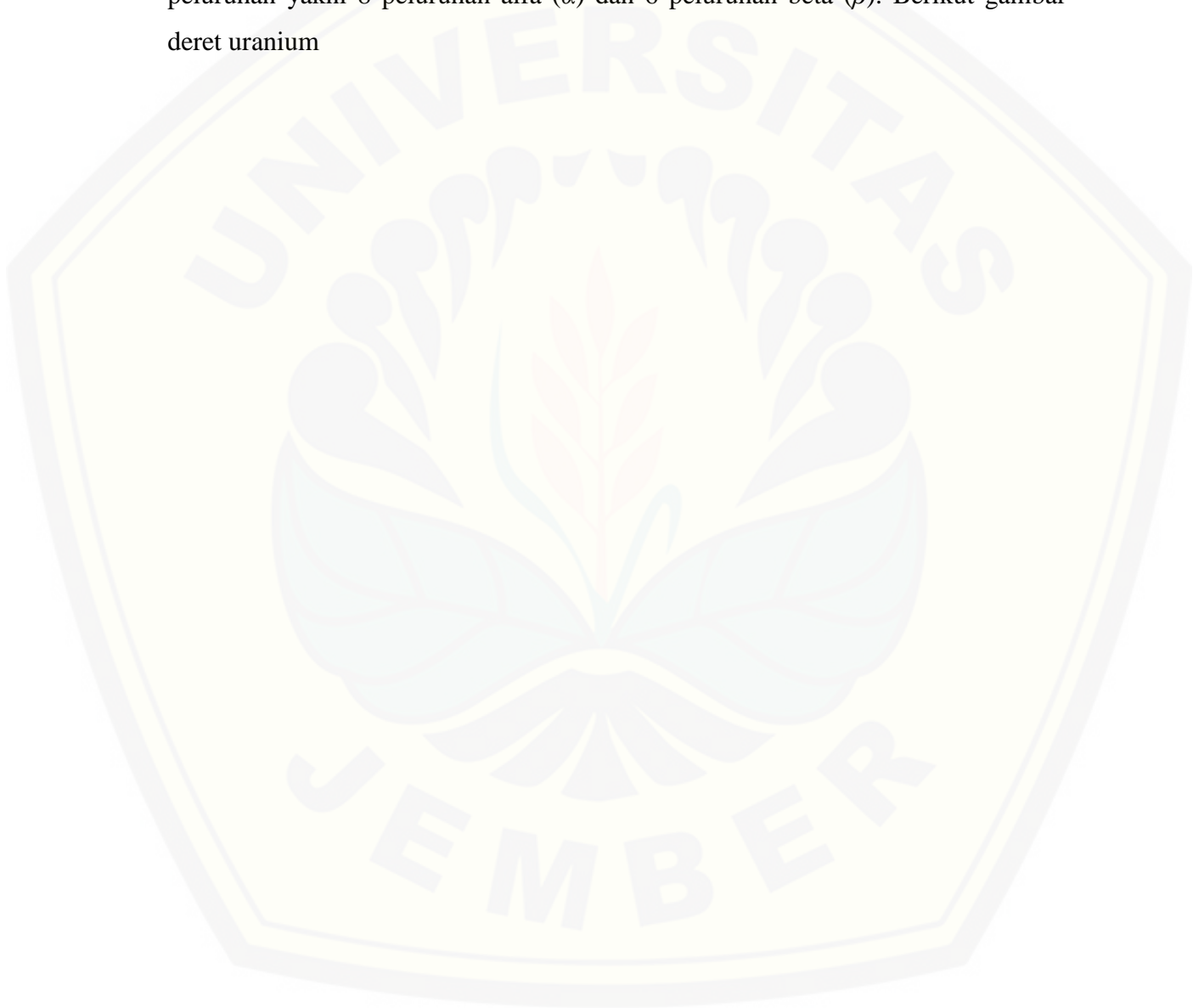
Neptunium-237 merupakan unsur radioaktif alam yang memiliki atom tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada bismut-209. Dalam deret bismut-209 terjadi 13 proses peluruhan, yakni 8 peluruhan (α) dan 5 peluruhan beta (β) setiap nomor massa A nuklida pada deret neptunium habis dibagi 4 dan sisa 1 sehingga dinamakan deret $4n+1$. Berikut gambar deret neptunium



Gambar 2.7 Deret Neptunium (Martin L, 1996)

2.4.4 Deret Uranium

Uranium-238 merupakan salah satu radioaktif alam yang memiliki inti atom tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada timbal-206. Peluruhan alami deret uranium-238, nomor massa A nuklida yang dari inti tak stabil U-238 menjadi inti stabil Pb-206 meluruh sebesar $4n+2$, setiap nomor massa A pada deret uranium habis dibagi 4 dan sisa 2, serta mengalami 14 tahap peluruhan yakni 8 peluruhan alfa (α) dan 6 peluruhan beta (β). Berikut gambar deret uranium



84 Polonium	210	212	214	215	216	218	219	220	222	223	224	225	226	227	228	228	229	230	231	232	233	234	235	238 U	
83 Bismuth		210	211	214	216	218	219	220	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	238 U		
82 Lead	206	209	210	211	214	216	218	219	220	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	238 U	
81 Thallium		207	208	209	211	212	214	216	218	219	220	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	238 U

Gambar 2.8 Deret uranium-238 (Hussain, R. dan Hayder, H.,

Setiap hasil nuklida pada deret uranium-238 mempunyai waktu paruh masing-masing. Nuklida induk mempunyai waktu paruh yang lebih lama dibandingkan dengan nuklida anak. Berikut waktu paruh pada deret uranium-238.

Tabel 2.2 Waktu paruh peluruhan nuklida pada deret uranium-238

No	Nuklida	Waktu Paruh
1.	Uranium-238	$4,51 \times 10^9$ tahun
2.	Thorium-234	24,1 hari
3.	Proaktinium-234	6,66 jam
4.	Uranium-234	$2,48 \times 10^5$ tahun
5.	Thorium-230	76000 tahun
6.	Radium-226	1620 tahun
7.	Radon-222	3,823 hari
8.	Polonium-218	3,05 detik
9.	Timbal-214	26,8 menit
10.	Bismut-214	19,7 menit
11.	Polonium-214	164 detik
12.	Timbal-210	22 tahun
13.	Bismut-210	5,1 hari
14.	Polonium-210	138,4 hari
15.	Timbal-206	-

(Ronald,G dan William,S, 2006:271)

2.4.6 Deret Aktinium

Deret aktinium merupakan deret peluruhan unsur radioaktif uranium-235 yang memiliki inti atom tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada timbal-207. Dalam deret aktinium, terjadi 14 proses peluruhan yakni 9 peluruhan (α) dan 5 peluruhan beta (β), setiap nomor massa A nuklida dari deret aktinida habis dibagi 4 dan sisa 3 sehingga dinamakan deret $4n+3$. Berikut gambar deret uranium-235

2.6 Hubungan Jumlah Atom Dengan Massa Atom

Massa suatu atom terkait erat dengan jumlah elektron, proton, dan neutron yang dimiliki atom tersebut. Berdasarkan perjanjian internasional, atom karbon-12 dipakai sebagai standar sehingga satu satuan massa atom didefinisikan sebagai suatu massa yang besarnya tepat sama dengan seperduabelas massa dari atom karbon-12

Satuan massa atom memberikan skala relatif dari massa berbagai unsur. Tetapi karena atom hanya mempunyai massa yang sangat kecil, tidak ada skala yang dapat digunakan untuk menimbang satuan massa atom dalam satuan yang terkalibrasi.

Pada sistem SI, mol adalah banyaknya suatu zat yang mengandung entitas dasar sebanyak jumlah atom yang terdapat dalam tepat 12 g isotop karbon-12. Satu mol karbon mengandung $6,022 \times 10^{23}$ atom. Jumlah ini disebut bilangan Avogadro (N_A). Massa dari karbon-12 merupakan massa molar yang didefinisikan sebagai massa (dalam gram atau kilogram) dari satu mol entitas zat. (Chang R, 2004: 85)

Konsep bilangan Avogadro dan massa molar dapat mengonversi antara massa dan mol atom, dan antara jumlah atom dan massa serta massa dari satu atom yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$N = \frac{m}{M} \times N_A \quad (2.46)$$

$$m = M \times \frac{N}{N_A} \quad (2.47)$$

Keterangan :

m = massa atom (gram)

M = massa molar (gram)

N = jumlah atom (atom)

N_A = bilangan Avogadro ($6,0221367 \times 10^{23}$ atom)

Persamaan (2.7) merupakan persamaan peluruhan radioaktif dimana atom meluruh secara eksponensial waktu, dengan menggunakan konversi antara massa dan jumlah atom pada persamaan (2.46), maka didapat:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.48)$$

Jika $N = \frac{m}{M} \times N_A$, maka persamaan (2.48)

$$\frac{m}{M} \times N_A = \frac{m_0}{M} \times N_A \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.49)$$

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.50)$$

m adalah massa atom yang tersisa selama peluruhan eksponensial waktu, dan m_0 adalah massa atom mula-mula. Pengonversian antara jumlah zat atom dan massa atom juga berlaku pada persamaan peluruhan berantai.

2.7 Solusi Aljabar Matriks

Aljabar matriks merupakan salah satu cabang matematika yang pada umumnya digunakan untuk memudahkan dalam penyelesaian sistem persamaan linier. Metode aljabar matriks mempunyai keuntungan dapat mengembangkan ke sistem persamaan diferensial linear dalam n buah fungsi yang tak diketahui dan dengan koefisien konstan dengan mudah (Santoso S,1998).

Persamaan (2.2) merupakan persamaan diferensial linier homogen yang dapat digunakan dalam penerapan peluruhan, sedangkan pada persamaan (2.17) merupakan solusi penyelesaian peluruhan berantai Bateman yang dapat dituliskan menggunakan matriks.

$$\mathbf{N}' = \Lambda \mathbf{N} \quad (2.51)$$

Persamaan (2.51) merupakan perkalian matriks Λ dengan matriks \mathbf{N} dengan komponen:

$$\mathbf{N}' = \begin{bmatrix} N_1' \\ N_2' \\ \vdots \\ N_n' \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_1 & -\lambda_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & -\lambda_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{n-1} & -\lambda_n \end{bmatrix}$$

(2.54)

$$\begin{bmatrix} N_1' \\ N_2' \\ N_3' \\ \vdots \\ N_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_1 & -\lambda_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & -\lambda_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{n-1} & -\lambda_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix}$$

(2.55)

$$\begin{bmatrix} N_1' \\ N_2' \\ N_3' \\ \vdots \\ N_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 \cdot N_1 \\ \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 \\ \lambda_2 \cdot N_2 - \lambda_3 \cdot N_3 \\ \vdots \\ \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \end{bmatrix}$$

(2.56)

Persamaan (2.56) menghasilkan persamaan yang identik dengan persamaan Bateman (2.17). Pada peluruhan radioaktif jumlah inti atom untuk meluruh setiap saat N bergantung pada jumlah sampel mula-mula N_0 , selang waktu peluruhan t , dan tetapan desintegrasi λ jika \mathbf{N} merupakan matriks kolom jumlah inti atom mula-mula dan Λ merupakan matriks segitiga konstanta peluruhan λ maka solusi penyelesaian diferensial matriks dengan kondisi N_0 dapat dianalogikan dengan menggunakan matriks eksponensial.

$$N(t) = e^{\Lambda t} N_0 \quad (2.57)$$

Persamaan (2.57) merupakan matriks eksponensial yang sama dengan persamaan peluruhan radioaktif pada persamaan (2.7) yang didefinisikan dari ekspansi eksponensial Taylor.

$$e^{\Lambda t} = 1 + \Lambda t + \frac{(\Lambda t)^2}{2!} + \frac{(\Lambda t)^3}{3!} + \dots \quad (2.58)$$

Persamaan peluruhan berantai merupakan sistem persamaan diferensial homogen tak nol membutuhkan solusi dalam penyelesaiannya. Salah satu metode untuk mencari solusi dalam sistem persamaan diferensial tersebut dengan menggunakan nilai eigen.

2.7.1 Nilai Eigen Untuk Mencari Solusi Sistem Persamaan Diferensial Homogen Peluruhan Berantai

Sebuah matriks bujur sangkar dengan orde $n \times n$ misalkan A , dan sebuah vektor kolom X . Vektor X adalah vektor dalam ruang Euklidian R^n yang dihubungkan dengan sebuah persamaan:

$$Ax = \lambda x \quad (2.59)$$

Dimana λ adalah suatu skalar dan x adalah vektor yang tidak nol. Skalar λ dinamakan nilai Eigen dari matriks A . Nilai eigen adalah nilai karakteristik dari suatu matriks bujur sangkar. Vektor x dalam persamaan (2.59) adalah suatu vektor yang tidak nol yang memenuhi persamaan (2.59) untuk nilai eigen yang sesuai dan disebut dengan vektor eigen (Redjeki S, 2009: 36).

D merupakan matriks diagonal lambda dan V merupakan vektor eigen dari Λ dengan menggunakan cara pada persamaan (2.59) maka VD akan bernilai sama dengan λx .

$$\Lambda V = VD \quad (2.60)$$

$$\Lambda \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots \\ x_1 & x_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots \\ x_1 & x_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$\Lambda \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots \\ x_1 & x_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots \\ x_1 \cdot \lambda_1 & x_2 \cdot \lambda_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

Pada persamaan (2.60) D merupakan matriks diagonal negatif lambda yang merupakan matriks nilai eigen dan V merupakan matriks vektor eigen sehingga Λ dapat didiagonalisasi dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Lambda V = VD \quad (2.63)$$

$$\Lambda = VDV^{-1} \quad (2.64)$$

Substitusi persamaan (2.64) ke persamaan (2.58) maka diperoleh:

$$e^{At} = e^{\mathbf{V}D\mathbf{t}\mathbf{V}^{-1}} \quad (2.65)$$

$$e^{At} = 1 + \mathbf{V}D\mathbf{t}\mathbf{V}^{-1} + \frac{(\mathbf{V}D\mathbf{t}\mathbf{V}^{-1})^2}{2!} + \dots \quad (2.66)$$

$$e^{At} = \mathbf{V}\mathbf{V}^{-1} + \mathbf{V}D\mathbf{t}\mathbf{V}^{-1} + \frac{\mathbf{V}(D\mathbf{t}^2)\mathbf{V}^{-1}}{2!} + \dots \quad (2.67)$$

$$e^{At} = \mathbf{V}\mathbf{V}^{-1}(1 + D\mathbf{t} + \frac{D\mathbf{t}^2}{2!} + \dots) \quad (2.68)$$

$$e^{At} = \mathbf{V}e^{D\mathbf{t}}\mathbf{V}^{-1} \quad (2.69)$$

\mathbf{V} merupakan vektor eigen dan \mathbf{V}^{-1} merupakan invers vektor eigen \mathbf{V} . $e^{D\mathbf{t}}$ merupakan matriks diagonal eksponensial negatif konstanta peluruhan, secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$e^{D\mathbf{t}} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\lambda_2 t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\lambda_n t} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

Substitusi persamaan (2.69) ke persamaan (2.57) maka diperoleh:

$$N(t) = \mathbf{V}e^{D\mathbf{t}}\mathbf{V}^{-1} N_0 \quad (2.71)$$

Persamaan (2.71) merupakan persamaan umum peluruhan radioaktif menggunakan solusi nilai eigen pada persamaan diferensial homogen peluruhan berantai yang serupa dengan persamaan peluruhan radioaktif Bateman (L.Moral dan A.F. Pacheco, 2003).

Deret uranium-238 dalam peluruhannya hingga stabil tidak ada percabangan seperti pada peluruhan pada deret lainnya, untuk mencari vektor eigen \mathbf{V} dan invers vektor eigen \mathbf{V}^{-1} dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{2,1} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ S_{3,1} & S_{3,2} & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n,1} & S_{n,2} & S_{n,3} & S_{n,n-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

$$\mathbf{V}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{2,1} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ T_{3,1} & T_{3,2} & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{n,1} & T_{n,2} & T_{n,3} & T_{n,n-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Simbol $S_{i,j}$ dan $T_{i,j}$ merupakan hasil dari perhitungan

$$F_{q,r}^p = \frac{\lambda_r}{\lambda_q - \lambda_p} \quad (2.74)$$

Nilai setiap $S_{i,j}$ dan $T_{i,j}$

$$S_{i,j} = F_{i,i-1}^j F_{i-1,i-2}^j \dots F_{j+1,j}^j \quad (2.75)$$

$$T_{i,j} = F_{j,j}^i F_{j+1,j+1}^i \dots F_{i-1,i-1}^i \quad (2.76)$$

(Moral dan Pacheco, 2003)

Persamaan 2.18, 2.19, dan 2.20, merupakan jumlah inti atom yang meluruh pada inti induk uranium-238, inti anak thorium-234, dan inti cucu proaktinium-234. Solusi persamaan-persamaan tersebut dapat dicari menggunakan metode aljabar matriks dengan nilai eigen.

$$\begin{bmatrix} N_1' \\ N_2' \\ N_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ S_{2,1} & 1 & 0 \\ S_{3,1} & S_{3,2} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\lambda_2 t} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\lambda_3 t} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ T_{2,1} & 1 & 0 \\ T_{3,1} & T_{3,2} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} N_1(0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Elemen matriks $S_{i,j}$ dan $T_{i,j}$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.74), (2.75) dan (2.76)

$$S_{2,1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

(2.78)

$$S_{3,1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \times \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} \quad (2.79)$$

$$S_{3,2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} \quad (2.80)$$

$$T_{2,1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (2.81)$$

$$T_{3,1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_3} \times \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} \quad (2.82)$$

$$T_{3,2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} \quad (2.83)$$

Substitusi elemen – elemen matriks (2.78), (2.79), (2.80), (2.81), (2.82), (2.83) ke persamaan (2.77) dan menggunakan persamaan matematis

$$N_1' = e^{-\lambda_1 t} \times N_1(0) \quad (2.84)$$

$$N_2' = (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \times \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \times N_1(0). \quad (2.85)$$

$$N_3' = \lambda_2 \times \lambda_1 \times \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right) \times N_1(0) \quad (2.86)$$

Persamaan (2.84), (2.85), dan (2.86) merupakan persamaan peluruhan atom induk hingga cucu yang identik dengan persamaan (2.24), (2.25), dan (2.26).

BAB. 3 METODELOGI PENELITIAN

Pada bab metodologi penelitian ini dijelaskan tentang tempat dan waktu penelitian, definisi operasional variabel, langkah penelitian, alat penelitian, dan teknik penyajian yang masing-masing diuraikan sebagai berikut:

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium komputer Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Jember pada semester genap tahun ajaran 2013-2014.

3.2 Definisi Operasional Variabel

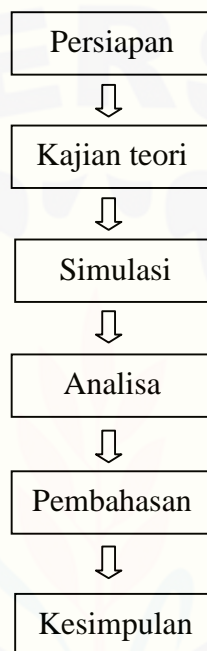
Definisi operasional variabel diperlukan untuk mencegah terjadinya salah pengertian dalam penelitian. Adapun variabel yang perlu didefinisikan yakni: peluruhan radioaktif, uranium-238, dan metode aljabar matrik.

- a. Peluruhan radioaktif merupakan proses inti atom yang tidak stabil secara spontan berubah menjadi inti stabil. Peluruhan radioaktif biasanya terjadi pada unsur radioaktif yang memiliki nomor atom lebih dari 83 yang mempunyai komposisi jumlah proton dan neutron yang tidak seimbang atau tingkat energinya tidak berada dalam keadaan dasar. Peluruhan radioaktif memancarkan 3 jenis radiasi yakni, radiasi alfa (α), radiasi beta (β) dan radiasi gamma (γ).
- b. Uranium-238 merupakan salah satu unsur radioaktif alam yang bernomor atom 92 dan bermassa 238,048 dalam deret aktinida periode 7 tabel periodik. Uranium-238 memiliki inti atom tidak stabil kemudian meluruh menjadi inti stabil pada timah-206 yang dikenal dengan deret radioaktif uranium-238. Peluruhan berantai uranium-238 mengalami 14 tahap peluruhan yakni 8 peluruhan alfa (α) dan 6 peluruhan beta (β).
- c. Metode aljabar matriks merupakan metode penyelesaian sistem persamaan linier yang dapat dikembangkan ke sistem persamaan diferensial linear dengan n buah fungsi yang tak diketahui dan dengan koefisien konstan

dengan mudah. Penyelesaian peluruhan radioaktif dengan menggunakan aljabar matriks dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan Bateman untuk mencari solusi sistem persamaan diferensial.

3.3 Langkah Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian simulasi dengan diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3.1 Langkah penelitian

Berdasarkan Gambar 3.1 dapat dijelaskan langkah-langkah penelitian sebagai berikut:

a. Persiapan

Mempersiapkan bahan-bahan untuk dijadikan informasi dengan mencari literatur buku serta jurnal untuk menambah pengetahuan dan pemahaman tentang simulasi numerik peluruhan zat radioaktif unsur uranium-238 menggunakan metode aljabar matrik. Variabel waktu paruh untuk menentukan konstanta peluruhan pada deret uranium-238 ditunjukkan dalam tabel berikut,

Tabel 3.1 Waktu paruh peluruhan nuklida pada deret uranium-238

No	Nuklida	Waktu Paruh
1.	Uranium-238	$4,51 \times 10^9$ tahun
2.	Thorium-234	24,1 hari
3.	Proaktinium-234	6,66 jam
4.	Uranium-234	$2,48 \times 10^5$ tahun
5.	Thorium-230	76000 tahun
6.	Radium-226	1620 tahun
7.	Radon-222	3,823 hari
8.	Polonium-218	3,05 detik
9.	Timbal-214	26,8 menit
10.	Bismut-214	19,7 menit
11.	Polonium-214	164 detik
12.	Timbal-210	22 tahun
13.	Bismut-210	5,1 hari
14.	Polonium-210	138,4 hari
15.	Timbal-206	-

(Ronald,G dan William,S, 2006:271)

b. Kajian teori

Menerapkan teori yang sudah ada mengenai peluruhan zat radioaktif menggunakan aljabar matrik terhadap peluruhan berantai uranium-238.

c. Simulasi

Melakukan perhitungan untuk mendapatkan massa sisa, peluruhan atom, dan aktivitas nuklida-nuklida yang terjadi pada massa 7 gram uranium-238 yang mempunyai jumlah atom sebesar $1.77121815264706 \times 10^{22}$ pada deret uranium-238 selama $4,3 \times 10^9$ tahun menggunakan metode aljabar matriks dengan matlab 6.1 dengan 5 tahap yakni :

1. Persamaan umum peluruhan

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1}N_{n-1} - \lambda_n N_n$$

Keterangan :

N = jumlah atom (atom)

 λ = tetapan peluruhan $n = 1, 2, 3, \dots, 15$

2. Persamaan peluruhan dengan metode aljabar matriks

$$N(t) = \mathbf{V}e^{\mathbf{D}t}\mathbf{V}^{-1} N_0$$

Keterangan :

N_0 = jumlah atom awal

\mathbf{V} = matriks vektor eigen tetapan peluruhan

$e^{\mathbf{D}t}$ = matriks diagonal eksponensial negatif tetapan peluruhan

\mathbf{V}^{-1} = matriks invers vektor eigen tetapan peluruhan

$N(t)$ = jumlah atom peluruhan selama waktu t

3. Menyusun persamaan peluruhan dengan metode matriks dengan bahasa pemrograman matlab

- a. Peluruhan atom unsur uranium-238

```
Lambda= -diag(lambda)+...
    diag(lambda(1:(end-1)), -1);
[V,D]= eig(Lambda);
Nt= V*diag(inv(V)*N0)*...
    exp(D*repmat(t,length(N0),1))
```

- b. Massa sisa peluruhan unsur uranium-238

```
R=diag(M)*(1/A)*Nt
```

- c. Aktivitas peluruhan

```
R= diag(lambda)*Nt;
```

4. Melakukan kajian dengan sumber data* pada dengan toleransi 10^{-6}
 5. Hasil pemrograman yaitu : massa sisa atom , peluruhan atom, dan aktivitas
 7 gram peluruhan unsur uranium-238 selama $4,3 \times 10^9$ tahun

- d. Pembahasan

Melakukan pembahasan secara runtun mengenai hasil analisa peluruhan zat radioaktif unsur uranium-238.

- e. Kesimpulan

Hasil analisis dan pembahasan kemudian disimpulkan untuk menjawab rumusan masalah dalam penelitian.

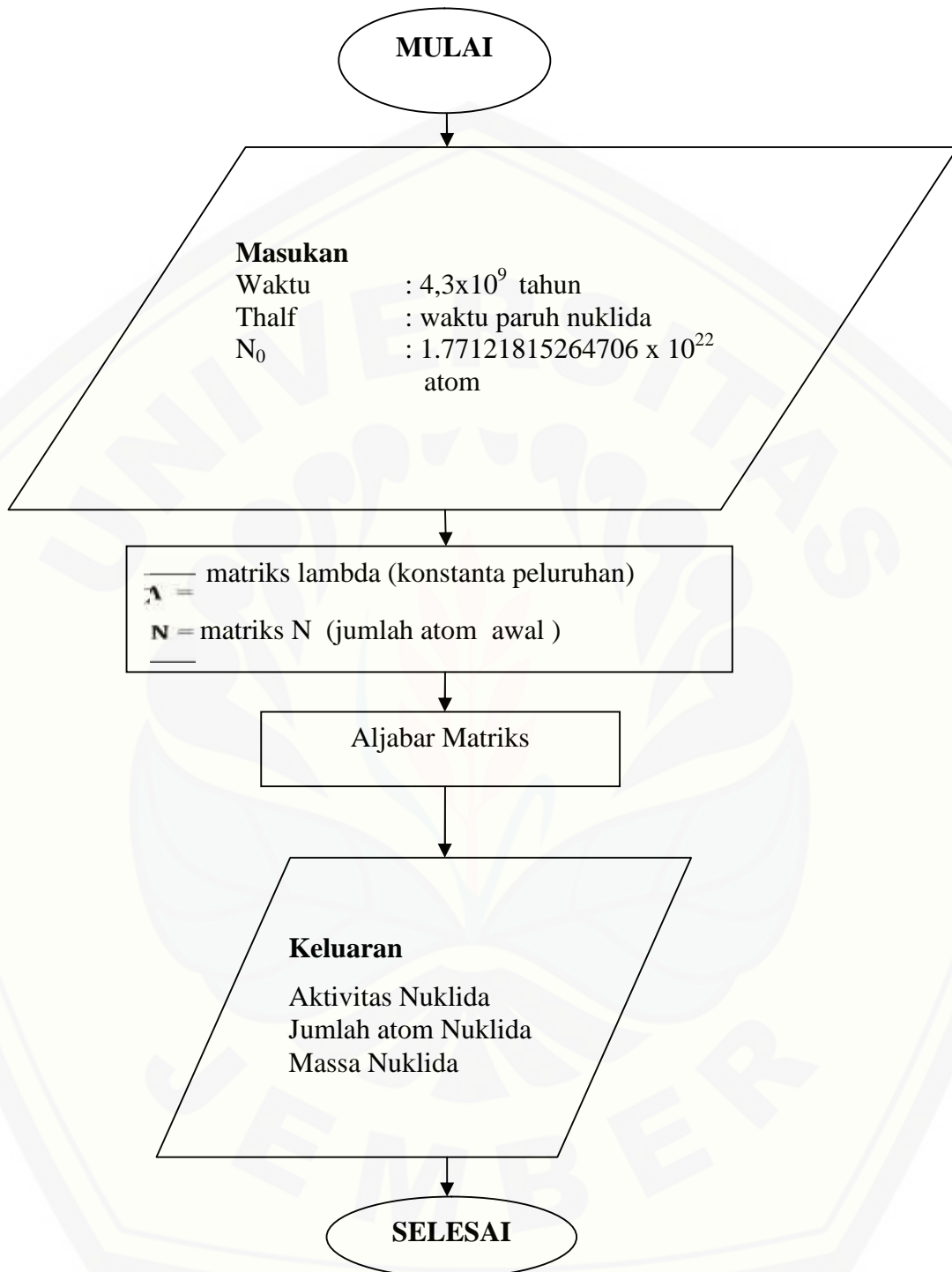
*⁾ <http://web.mit.edu/lululiu/Public/8.13/alpha/decay>

3.4 Alat Penelitian

Alat penelitian adalah alat yang dibutuhkan selama penelitian ini berlangsung. Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- a. Komputer dengan spesifikasi *Personal Computer* (PC)
Intel Atom 1.5 GHz, O.S Windows 7, Ram 2 Gb.
- b. Bahasa pemrograman komputer MATLAB versi 6.1
 1. Fungsi matrik Λ untuk menampilkan diagonal matrik lambda ($n \times n$)
 2. Fungsi matrik N untuk menampilkan jumlah atom yang terdapat dalam 7 gram uranium-238
 3. Metode aljabar matriks untuk mencari jumlah inti atom yang meluruh dalam selang waktu t

Flowchart simulasi numerik peluruhan zat radioaktif



3.5 Teknik penyajian

Teknik penyajian dibagi dua sub anak yaitu 3.5.1 data hasil simulasi dan sub anak bab 3.5.2, data hasil visualisasi gambar.

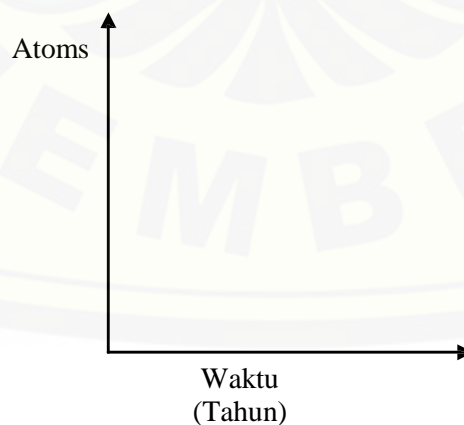
3.5.1 Data pengamatan hasil simulasi

Data pengamatan hasil simulasi merupakan hasil perhitungan besar sisa massa setelah mengalami peluruhan selama waktu t . Adapun tabel hasil penelitian sebagai berikut:

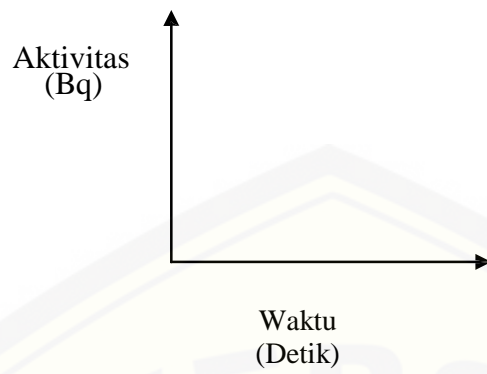
Tabel 3.2 Pengamatan massa sisa peluruhan inti zat radioaktif uranium-238

No	Nuklida	Waktu Paruh (tahun)	N_t (atoms)	m_t (gram)
1.	Uranium-238	$4,51 \times 10^9$		
2.	Thorium-234	$6,2387 \times 10^{-2}$		
3.	Proaktinium-234	$7,6027 \times 10^{-4}$		
4.	Uranium-234	$2,48 \times 10^5$		
5.	Thorium-230	$7,60 \times 10^4$		
6.	Radium-226	$1,62 \times 10^3$		
7.	Radon-222	$4,3642 \times 10^{-4}$		
8.	Polonium-218	$9,6712 \times 10^{-8}$		
9.	Timbal-214	$5,0989 \times 10^{-6}$		
10.	Bismut-214	$3,7481 \times 10^{-5}$		
11.	Polonium-214	$5,2004 \times 10^{-6}$		
12.	Timbal-210	22		
13.	Bismut-210	$1,3973 \times 10^{-2}$		
14.	Polonium-210	$3,7918 \times 10^{-1}$		
15.	Timbal-206	Stabil		

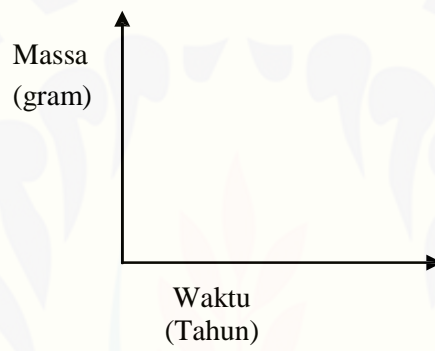
3.5.2 Data pengamatan hasil visualisasi gambar



Gambar 3.2 Grafik hubungan jumlah atom yang meluruh terhadap waktu



Gambar 3.3 Kesetimbangan sekuler peluruhan berantai uranium-238



Gambar 3.4 Grafik hubungn massa dengan waktu paruh

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab hasil dan pembahasan ini dijelaskan tentang data pengamatan hasil simulasi peluruhan inti zat radioaktif unsur uranium-238 serta pembahasan yang masing – masing diuraikan sebagai berikut :

4.1 Data Pengamatan Hasil Simulasi

Hasil analisa data peluruhan berantai alami inti zat radioaktif unsur uranium 238 dapat dilihat sebagai berikut.

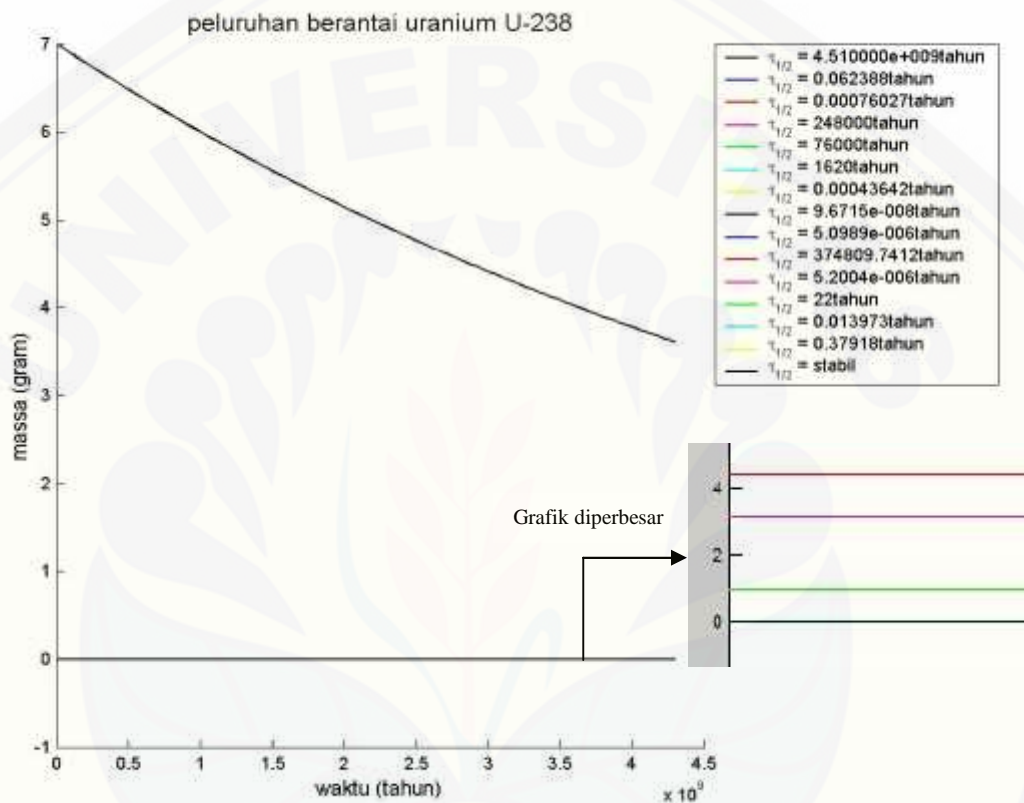
Tabel 4.1 Pengamatan massa sisa peluruhan inti zat radioaktif uranium-238

No	Nuklida	Waktu paruh (tahun)	N_t (atoms)	m_t (gram)
1.	Uranium-238	$4,51 \times 10^9$	9,12e+21	3,62
2.	Thorium-234	$6,24 \times 10^{-2}$	1,26e+11	4,89e-11
3.	Proaktinium-234	$7,60 \times 10^{-4}$	1,54e+9	5,98e-13
4.	Uranium-234	$2,48 \times 10^5$	5,03e+17	1,95e-5
5.	Thorium-230	$7,60 \times 10^4$	1,54e+17	5,88e-5
6.	Radium-226	$1,62 \times 10^3$	3,28e+15	1,23e-6
7.	Radon-222	$4,36 \times 10^{-4}$	8,92e+8	3,29e-13
8.	Polonium-218	$9,67 \times 10^{-8}$	1,96e+5	7,09e-17
9.	Timbal-214	$5,09 \times 10^{-6}$	1,03e+7	3,68e-15
10.	Bismut-214	$3,75 \times 10^{-5}$	7,58e+7	2,69e-14
11.	Polonium-214	$5,20 \times 10^{-6}$	1,05e+7	3,75e-15
12.	Timbal-210	22	4,5e+13	1,6e-8
13.	Bismut-210	$1,39 \times 10^{-2}$	2,82e+10	9,83e-12
14.	Polonium-210	$3,79 \times 10^{-1}$	7,69e+11	2,68e-10
15.	Timbal-206	Stabil	1,41e+12	4,81e-10

4.2 Pembahasan

Berdasarkan penelitian yang peneliti lakukan di laboratorium fisika dengan waktu simulasi 5 detik dengan toleransi $10e-6$, peluruhan berantai alami yang terjadi pada uranium-238 yang bermassa 7 g selama $4,3 \times 10^9$ tahun yang lalu menunjukkan nuklida induk memiliki massa sisa terbanyak dibandingkan dengan massa sisa nuklida turunannya karena waktu paruh yang dimiliki nuklida-nuklida turunannya sangat singkat dibandingkan lamanya peluruhan ($t_{1/2} \ll t_{\text{peluruhan}}$). Nuklida yang memiliki waktu paruh lebih pendek daripada waktu peluruhannya ($t_{1/2} \ll t_{\text{peluruhan}}$) maka nuklida tersebut lebih cepat habis ($m_t \rightarrow$

0). Pada nuklida turunan dengan waktu paruh terlama yaitu uranium-234 dengan waktu paruh $2,48 \times 10^5$ tahun memiliki massa sisa sebesar $5,98 \times 10^{-13}$ gram sedangkan pada nuklida turunan dengan waktu paruh tersingkat yaitu polonium-218 dengan waktu paruh $9,67 \times 10^{-8}$ tahun memiliki massa sisa sebesar $7,09 \times 10^{-17}$ gram.

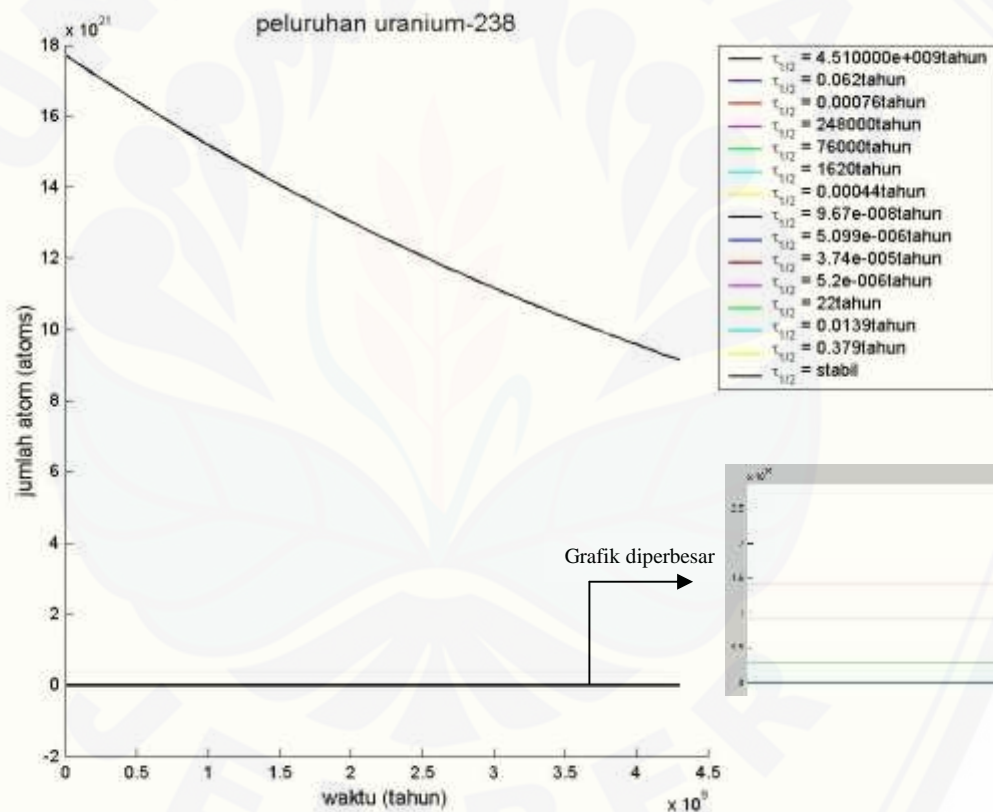


Gambar 4.1 Grafik hubungan massa dan waktu

Grafik di atas menunjukkan massa nuklida meluruh selama eksponensial waktu sehingga grafik menurun. Massa nuklida induk mempunyai massa sisa sebesar 3,62 gram sedangkan nuklida turunannya mempunyai massa nuklida yang sangat sedikit sehingga grafik menunjukkan mendekati nol. Massa peluruhan nuklida bergantung pada waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida dan lamanya peluruhan. Semakin lama waktu peluruhan yang dimiliki nuklida maka massa sisa semakin besar dan sebaliknya.

Massa 7 gram uranium-238 memiliki jumlah atom sebanyak $1,77 \times 10^{22}$ atoms. Proses peluruhan berantai pada nuklida induk uranium-238 atom akan

meluruh selama $4,3 \times 10^9$ tahun dan membentuk nuklida-nuklida baru. Setiap massa nuklida memiliki jumlah atom yang berbeda dengan nuklida lainnya. Banyaknya jumlah atom yang meluruh bergantung dengan waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida dan lama peluruhannya. Semakin lama waktu paruh yang dimiliki nuklida maka semakin banyak jumlah atom peluruhan nuklida dan sebaliknya. Banyaknya jumlah atom pada setiap nuklida dapat menunjukkan besar massa dalam nuklida tersebut. Bahwa semakin besar massa sisa dalam nuklida maka semakin banyak jumlah atomnya dan sebaliknya. Nuklida induk yang memiliki waktu paruh paling lama dibandingkan dengan nuklida turunannya mempunyai jumlah atom sebesar $9,12 \times 10^{21}$ atom.



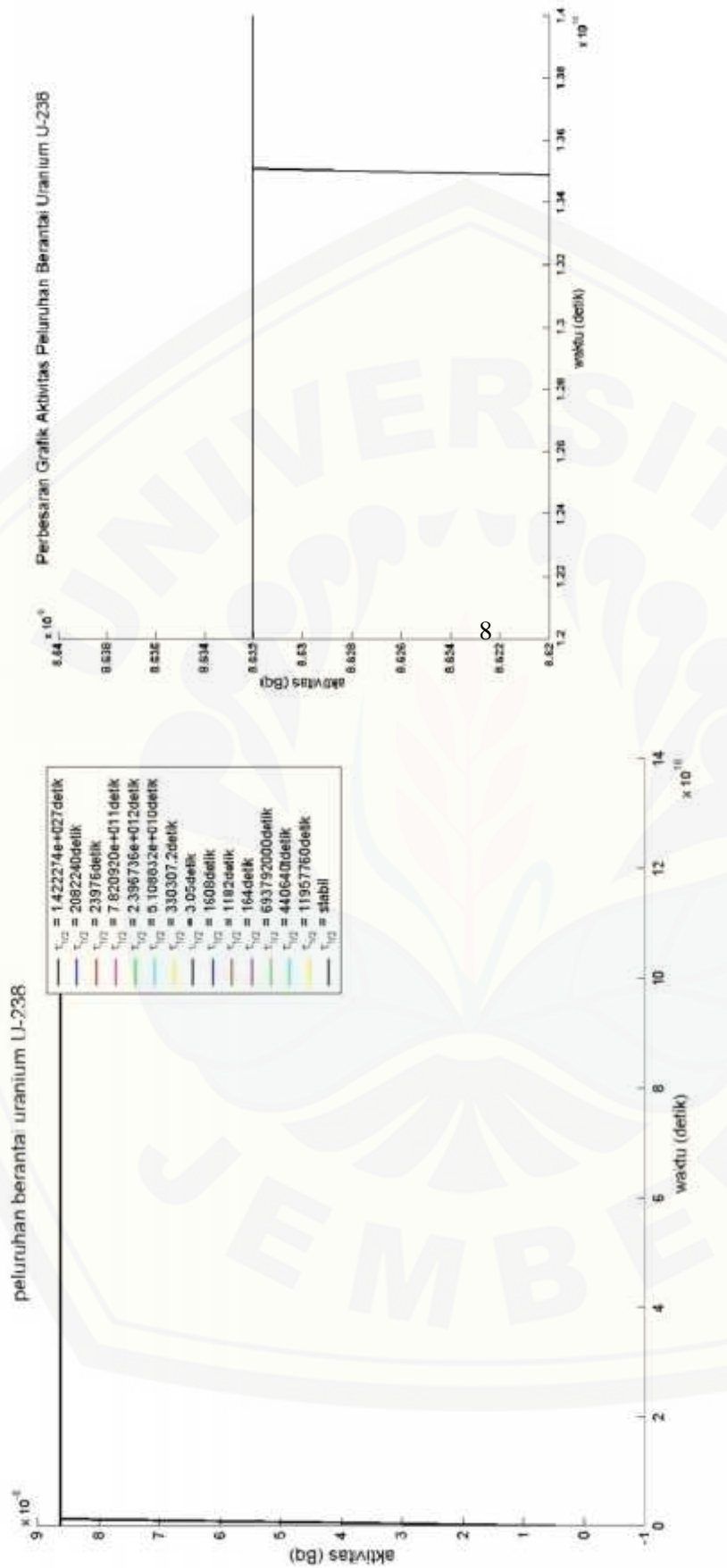
4.2 Grafik hubungan jumlah atom yang meluruh dan waktu

Grafik di atas menunjukkan bahwa jumlah atom yang terdapat dalam nuklida selama peluruhan berlangsung. Banyak atom yang meluruh berbanding terbalik dengan lamanya waktu peluruhan. Semakin lama waktu peluruhan maka semakin banyak jumlah atom yang meluruh sehingga sisa atom nuklida semakin sedikit. Peluruhan atom yang terjadi pada deret uranium-238 menghasilkan sisa

atom nuklida induk yang lebih banyak dibandingkan dengan nuklida-nuklida turunannya. Banyaknya atom yang meluruh ditunjukkan dengan grafik yang menurun sebesar eksponensial waktu. Grafik pada nuklida – nuklida hasil peluruhan mendekati nol dikarenakan perbedaan jumlah atom yang terdapat pada nuklida – nuklida turunannya sangat banyak dibandingkan dengan nuklida induk. Jumlah atom nuklida yang meluruh bergantung pada lamanya waktu peluruhan dan waktu paruh nuklida.

Peluruhan berantai alami unsur uranium-238 hingga menjadi timbal-206 dipengaruhi oleh waktu peluruhan, tetapan peluruhan nuklida dan lamanya waktu peluruhan. Proses peluruhan zat radioaktif pada deret uranium-238 menunjukkan bahwa nuklida induk memiliki tetapan peluruhan yang sangat kecil dibanding dengan tetapan peluruhan turunannya ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) sehingga aktivitas induk secara terukur tidak menurun selama waktu paruh turunannya dan suatu saat aktivitas induk akan sama dengan aktivitas turunannya hal ini dikenal dengan kesetimbangan sekuler.

Berikut grafik kesetimbangan sekuler peluruhan berantai uranium-238



Grafik 4.3 Kesetimbangan sekuler peluruhan berantai uranium-23

Grafik di atas menunjukkan kesetimbangan sekuler peluruhan berantai uranium-238 ketika aktivitas peluruhan sebesar $8,63 \times 10^{-6}$ Bq. Kesetimbangan sekuler terjadi pada waktu $1,35 \times 10^{15}$ detik setara dengan 42,8 juta tahun. Dalam keadaan ini besar aktivitas setiap nuklida sama, sehingga saat nuklida induk U-238 meluruh maka pada saat yang sama sebuah nuklida anak Pb-206 akan terbentuk. Faktor utama terjadi kesetimbangan sekuler yaitu waktu paruh yang dimiliki nuklida induk jauh lebih lama dibandingkan nuklida turunan-turunannya dan waktu terjadi peluruhan sangat lama dibandingkan dengan waktu paruh turunan-turunannya ($t_{1/2} \ll t_{\text{peluruhan}}$).

Uraian peluruhan berantai alami pada deret uranium-238 di atas menunjukkan bahwa massa yang dihasilkan bergantung pada lamanya peluruhan, jumlah massa awal dan tetapan peluruhan yang besarnya bergantung pada waktu paruh nuklida. Peluruhan berantai alami unsur radioaktif uranium-238 menjadi timbal-206 (stabil) mengalami 14 tahap peluruhan yakni 8 peluruhan alfa yang memancarkan sinar alfa berupa nukleus helium yang mereduksi 2 neutron dan 2 proton nuklida induk serta 6 peluruhan beta yang merupakan konversi spontan neutron menjadi proton. Massa sisa peluruhan berantai alami pada deret uranium-238 sesuai dengan hukum peluruhan radioaktif yang menyatakan bahwa unsur radioaktif akan meluruh selama eksponensial waktu. Nuklida yang memiliki waktu paruh yang singkat dibandingkan dengan waktu peluruhannya massa sisa lebih sedikit peluruhan dibandingkan dengan nuklida yang memiliki waktu paruh yang lebih lama. Massa yang dihasilkan dalam proses peluruhan berantai alami unsur uranium-238 hingga menjadi unsur timbal-206 tidak hanya mendapatkan unsur dalam wujud padat tetapi ada juga dalam wujud gas mulia yaitu unsur radioaktif radon-222 dengan waktu paruh 3,8 hari yang kemudian meluruh menjadi nuklida radioaktif dalam wujud padat hingga timbal-206 (stabil). Perbedaan hasil simulasi dengan sumber data didapat error sebesar 2% dan data ini masih bisa di bawah 5% sehingga masih berada pada nilai toleransi yang diperbolehkan.

BAB 5. PENUTUP

Pada bab penutup ini dijelaskan tentang kesimpulan dan saran yang masing – masing diuraikan sebagai berikut:

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai “Simulasi Numerik Massa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Unsur Uranium-238 Dengan Metode Aljabar Matriks” maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

- a. Besarnya massa sisa dalam peluruhan unsur uranium-238 yang berlangsung selama $4,3 \times 10^9$ tahun menunjukkan nuklida induk memiliki massa sisa sebesar 3,62 gram sedangkan massa sisa nuklida turunannya mendekati nol. Nuklida turunan dengan waktu paruh terlama yaitu uranium-234 dengan waktu paruh $2,48 \times 10^5$ tahun memiliki massa sisa sebesar $5,98 \times 10^{-13}$ gram sedangkan pada nuklida turunan dengan waktu paruh tersingkat yaitu polonium-218 dengan waktu paruh $9,67 \times 10^{-8}$ tahun memiliki massa sisa sebesar $7,09 \times 10^{-17}$ gram. Massa peluruhan nuklida bergantung pada waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida dan lamanya peluruhan. Semakin lama waktu peluruhan yang dimiliki nuklida maka massa sisa semakin besar dan sebaliknya.
- b. Jumlah atom uranium-238 yang meluruh selama selama $4,3 \times 10^9$ menunjukkan nuklida induk memiliki jumlah atom paling banyak dibandingkan nuklida turunannya yaitu sebesar $9,15 \times 10^{21}$ atom. Jumlah peluruhan bergantung pada jumlah atom awal dan tetapan disintegrasi (λ) yang bergantung pada lamanya waktu paruh yang dimiliki setiap nuklida. Semakin lama waktu paruh yang dimiliki nuklida maka semakin banyak jumlah atom peluruhan nuklida dan sebaliknya.
- c. Besarnya aktivitas peluruhan yang terjadi pada deret uranium-238 sebesar $8,63 \times 10^{-6}$ Bq. Pada proses peluruhan uranium-238 terjadi kesetimbangan sekuler yang terjadi pada waktu $1,35 \times 10^{15}$ detik setara dengan 42,8 juta tahun . Dalam keadaan ini besar aktivitas setiap nuklida sama, sehingga saat nuklida

induk U-238 meluruh maka pada saat yang sama sebuah nuklida anak Pb-206 akan terbentuk.

5.2 Saran

Diharapkan penelitian “Simulasi Numerik Massa Peluruhan Inti Zat Radioaktif Unsur Uranium-238 Dengan Metode Aljabar Matriks” akan mendapat respon bagi peneliti waktu akan datang guna melanjutkan dengan metode-metode lain ataupun variabel yang berbeda.



DAFTAR BACAAN

- Amaku, M., Pascholati, P.R., dan Vanin, V.R. 2010. *Decay Chain Differential Equations: Solution Through Matrix Algebra*. Sao Paulo: Universidade Sao Paulo
- Chang R. 2004. *Kimia Dasar: Konsep-Konsep Inti Jilid 1 Edisi 3*. Jakarta: Erlangga
- Duane, H. dan Bruce, L. 2001. *Mastering Matlab-6:A Comprehensive Tutorial and Reference*. Boston: Prentice Hall
- Hussain, R., dan Hayder, H. 2011. *Natural Occuring Radionuclide Materials*. <http://www.intechopen.com/books/radioisotopes-applications-in-physical-science/natural-occurring-radionuclide-materials>. [19 Oktober 2011]
- Karyono, 2009. “Keberadaan Gas Radioaktif Alam Radon, Toron, dan Aktinon di Bumi Yang Harus Diwaspadai”. Tidak Diterbitkan. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada
- Khoirul, H. 2006. *Modul Dasar Fisika Radiasi* http://www.ansn.bapeten.go.id/modul_fisika_radiasi. [8 Juni 2006]
- Moral, L. dan Pachecho, F. 2003. *Algebraic Approach To The Radioactive Decay Equations*. Zaragoza: University of Zaragoza
- Parington, J.R., Knox, H. D., Baum, M., dan Reiner, F. 1996. *Nuclides and Isotopes 15th edition*. General Electric Co. dan Kapl, Inc.
- Ronald, G., dan William S., 2006. *Schaum's Outlines: Fisika Modern Edisi 2*. Jakarta: Erlangga
- Santoso, W. 1998. *Persamaan Diferensial Biasa Dengan Penerapan Modern Edisi 2*. Jakarta: Erlangga
- Wiyatmo, Y. 2012. *Fisika Nuklir Dalam Telaah Semi Klasik dan Kuantum*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar
- Yaya, S. 1989. *Panduan Pengajar Buku Persamaan Diferensial*. Jakarta: P2LPTK

Lampiran A

MATRIK PENELITIAN

Judul	Permasalahan	Variable	Indikator	Sumber Data	Metode Penelitian
SIMULASI NUMERIK MASSA PELURUHAN INTI ZAT RADIOAKTIF UNSUR URANIUM-238 DENGAN METODE ALJABAR MATRIKS	1. BERAPAKAH MASSA SISA PELURUHAN ZAT RADIOAKTIF PADA DERET URANIUM-238 SECARA NUMERIK ?	1. WAKTU PELURUHAN ZAT RADIOAKTIF UNSUR URANIUM-238 2. MASSA ZAT RADIOAKTIF UNSUR URANIUM-238	1. WAKTU PARUH, NOMOR MASSA NUKLIDA, DAN KONSTANTA PELURUHAN	BUKU FISIKA KOMPUTASI DAN BUKU FISIKA MATEMATIKA	TEKNIK PENGAMBILAN DATA YAKNI 1. PERSAMAN PELURUHAN RADIOAKTIF DENGAN PERSAMAAN BATEMAN 2. APROKSIMASI NUMERIK PERSAMAAN ALJABAR MATRIKS DENGAN NILAI EIGEN


```

        ['\tau_{1/2} = ' num2str(a(7)) 'tahun'],
    ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(a(8)) 'tahun'],
    ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(a(9)) 'tahun'],
    ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(a(10)) 'tahun'],
    ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(a(11)) 'tahun'],
    ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(a(12)) 'tahun'],
    ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(a(13)) 'tahun'],
    ...
        ['\tau_{1/2} = '
num2str(a(14)) 'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} =
stabil'])

```

peluruhan massa

```

function [R]=uraniumdecay(t,lambda,N0)
M=[238;234;234;234;230;226;222;218;214;214;214;210
;210;210;206];
thalf=[4.51e9;0.062387671;0.000760274;2.48e5;76000
;1620;0.000436416;9.671486555e-8;5.098934e-
6;3.748097412e5;5.200405885e-
6;22;0.013972603;0.379178082;log(2)];
Lambda= -diag(lambda)+...
        diag(lambda(1:(end-1)),-1);
[V,D]= eig(Lambda);
Nt= V*diag(inv(V)*N0)*...
        exp(D*repmat(t,length(N0),1));

```

```

R=diag(M)*(1/A)*Nt
hold on
plot(t, R(1, :), 'k-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(2, :), 'b-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(3, :), 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(4, :), 'm-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(5, :), 'g-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(6, :), 'c-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(7, :), 'y-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(8, :), 'k-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(9, :), 'b-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(10, :), 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(11, :), 'm-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(12, :), 'g-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(13, :), 'c-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(14, :), 'y-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(15, :), 'k-', 'LineWidth', 1);
hold off
title('peluruhan berantai uranium U-
238', 'fontsize', 12);
xlabel('waktu (tahun)', 'fontsize', 10);
ylabel('massa (gram)', 'fontsize', 10);
set(gca, 'FontSize', 8);
legend(['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(1))
'tahun'], ...
['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(2))
'tahun'], ...
['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(3))
'tahun'], ...
['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(4))
'tahun'], ...

```

```

        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(5))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(6))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(7))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(8))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(9))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(10))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(11))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(12))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(13))
'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} = '
num2str(thalf(14)) 'tahun'], ...
        ['\tau_{1/2} =
stabil'])

```

aktivitas peluruhan

```

function [R]=activity(t,lambda,N0)
thalf=[1.4222736e27;2082240;23976;782092e6;2396736
e6;5108832e4;330307.2;3.05;1608;1182;164;693792e3
;440640;11957760;log(2)];
Lambda= -diag(lambda)+...
        diag(lambda(1:(end-1)),-1);
[V,D]= eig(Lambda);
Nt= V*diag(inv(V)*N0)*...

```

```

        exp(D*repmat(t,length(N0),1));
R= diag(lambda)*Nt;
hold on
plot(t, R(1, :), 'k-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(2, :), 'b-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(3, :), 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(4, :), 'm-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(5, :), 'g-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(6, :), 'c-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(7, :), 'y-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(8, :), 'k-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(9, :), 'b-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(10, :), 'r-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(11, :), 'm-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(12, :), 'g-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(13, :), 'c-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(14, :), 'y-', 'LineWidth', 1);
plot(t, R(15, :), 'k-', 'LineWidth', 1);
hold off
title('peluruhan berantai uranium U-
238','fontsize',12);
xlabel('waktu (detik)', 'fontsize', 10);
ylabel('aktivitas (Bq)', 'fontsize', 10);
set(gca, 'FontSize',8);
legend(['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(1))
'detik'], ...
['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(2))
'detik'], ...
['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(3))
'detik'], ...

```

```

        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(4))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(5))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(6))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(7))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(8))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(9))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(10))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(11))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(12))
'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} = ' num2str(thalf(13))
'tdetik'], ...
        ['\tau_{1/2} = '
num2str(thalf(14)) 'detik'], ...
        ['\tau_{1/2} =
stabil'])

```