



**SIMULASI KESTABILAN INTI PELURUHAN ZAT
RADIOAKTIF UNSUR THORIUM-232 DENGAN
PENDEKATAN ENERGI IKAT INTI
MODEL TETES CAIRAN
(*THE LIQUID DROP MODEL*)**

SKRIPSI

Oleh :

M. Imam Baihaqi

NIM.160210102114

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA
JURUSAN PENDIDIKAN MIPA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
UNIVERSITAS JEMBER
2020**



**SIMULASI KESTABILAN INTI PELURUHAN ZAT
RADIOAKTIF UNSUR THORIUM-232 DENGAN
PENDEKATAN ENERGI IKAT INTI
MODEL TETES CAIRAN
(*THE LIQUID DROP MODEL*)**

SKRIPSI

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

Oleh :

M. Imam Baihaqi

NIM.160210102114

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA
JURUSAN PENDIDIKAN MIPA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
UNIVERSITAS JEMBER
2020**

PERSEMBAHAN

Dengan membaca Basmalah dapat menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang serta tidak akan lupa sholawat serta kepada baginda Rosullah Nabi Muhammad SAW., skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Bapak Khudlori dan Ibu Siti Latifah yang tercinta, terima kasih telah mengiringi do'a setiap langkah penulis selama menuntut ilmu, kegigihan, pengorbanan, kesabaran, pengarahan dan dukungan yang telah dikasikan kepada penulis selama ini
2. Semua kyai, guru, ustad mulai pendidikan non formal dan pendidikan formal hingga perguruan tinggi, yang telah mengajari dan membimbing dengan penuh kesabaran.
3. Almamater Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember

MOTTO

Maka sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. (terjemahan Surat Al Insyirah ayat 5-6)^{*)}



^{*)}Departemen Agama Republik Indonesia. 2008. *Al Qur'am dan Terjemahannya*. Bandung: CV Penerbit Diponegoro

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : M. Imam Baihaqi

NIM : 160210102114

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul : “Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif Deret Thorium-232 dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan (*The Liquid Drop Model*)” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pad institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, 4 Februari 2020

Yang menyatakan,

M. Imam Baihaqi

NIM. 160210102114

SKRIPSI

**SIMULASI KESTABILAN INTI PELURUHAN ZAT
RADIOAKTIF UNSUR THORIUM-232 DENGAN
PENDEKATAN ENERGI IKAT INTI
MODEL TETES CAIRAN
(*THE LIQUID DROP MODEL*)**

Oleh :
M. Imam Baihaqi
NIM 160210102114

Dosen Pembimbing Utama : Drs. Albertus Djoko Lesmono, M.Si
Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Yushardi, M.Si

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif Deret Thorium-232 dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan (*The Liquid Drop Model*)” telah diuji dan disahkan

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Sekretaris,

Drs. Albertus Djoko Lemono, M.Si
NIP. 19641230 199302 1 001

Dr. Yushardi, M.Si
NIP. 19650420 199512 1 001

Anggota I,

Anggota II,

Drs. Trapsilo Prihandiodo, M.Si
NIP. 19620401 198702 1 001

Drs. Alex Harijanto, M.Si
NIP. 19641117 199103 1 001

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan

Universitas Jember,

Prof. Drs. Dafik, M.Sc, Ph.D
NIP : 19680802 199303 1 004

RINGKASAN

Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif Deret Thorium-232 dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan (*The Liquid Drop Model*); M. Imam Baihaqi; 160210102114; 47 halaman; Program Studi Pendidikan Fisika Jurusan Pendidikan MIPA Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.

Materi yang ada di alam terdiri dari partikel yang tidak bisa dibagi lagi dan sangatlah kecil disebut atom. Atom didalamnya terdapat inti atom terdiri dari proton dan neutron. Pada inti atom yang bersifat radioaktif atau tidak stabil akan mengalami proses perubahan spontan dengan memancarkan radiasi elektromagnetik dan partikel, peristiwa tersebut disebut peluruhan. Unsur yang mempunyai nomor massa lebih dari 83 merupakan unsur radioaktif. Beberapa unsur radioaktif yang ada di alam merupakan anggota dari empat deret radioaktif, yaitu deret uranium, thorium, aktinium, dan neptunium. Unsur radioaktif akan melakukan peluruhan secara spontan dan menghasilkan energi ikat dan energi disintegrasi. Penelitian sebelumnya hanya mengkaji tentang kestabilan inti dengan menggunakan energi ikat ini dengan melihat massa inti saja, sehingga penelitian tersebut kurang spesifik berhubung dalam suatu inti terdapat beberapa efek energi seperti efek permukaan, efek volume, efek coulomb, efek asimetri dan efek pasangan. Model yang sesuai untuk memprediksi kestabilan inti suatu unsur dengan memperhatikan efek-efek yang terdapat dalam suatu inti tersebut yaitu dengan model tetes cairan. Model tetes cairan mengibaratkan inti seperti suatu tetes cairan yang mempunyai kerapatan konstan.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kestabilan inti pada peluruhan zat radioaktif deret thorium, menghitung energi ikat inti, energi ikat per nukleon, dan energi didintegrasi dengan model tetes cairan. Penelitian ini dilakukan di laboratorium fisika lanjut Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Jember pada semester ganjil tahun ajaran 2019 – 2020. Jenis penelitian ini adalah penelitian pemodelan. Langkah-langkah penelitian ini adalah (1) mempersiapkan bahan-bahan yang dijadikan sebagai pendukung penelitian tentang simulasi

kestabilan deret thorium, (2) mengumpulkan kajian teori terkait kestabilan inti dan model tetes cairan yang dikemukakan oleh Von Wieszacker 1935 dalam buku Williams (1991), (3) membuat coding dan mensimulasikannya dengan berbantuan matlab 2013a, (4) memvalidasi hasil yang didapat, (5) menganalisis dan membahas hasil penelitian, dan (6) menyimpulkan hasil penelitian.

Hasil penelitian mendapatkan bahwa pada deret thorium dengan nuklida induk ${}^{232}_{90}\text{Th}$ menjadi nuklida yang stabil ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ mengalami proses peluruhan sebanyak 12 yaitu 7 peluruhan alfa (α) dan 6 peluruhan beta (β). Unsur induk ${}^{232}_{90}\text{Th}$ memiliki energi ikat inti yang terbesar yaitu 1769.9705 MeV dan energi ikat per nukleon paling kecil yaitu 7.6292 MeV. Grafik energi ikat inti terhadap nomor massa pada deret thorium menunjukkan penurunan secara linear sedangkan grafik energi ikat per nukleon terhadap nomor massa pada deret thorium menunjukkan kenaikan linear. Pada inti atom yang stabil yaitu ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ memiliki nilai energi ikat inti terkecil sebesar 1624.721 MeV dan nilai energi ikat per nukleon lebih besar dari inti atom deret thorium yaitu 7.8112 MeV. Semua unsur thorium memiliki hasil energi disintegrasi (Q_1) memenuhi syarat bahwa $Q_1 > 0$.

Kesimpulan penelitian ini adalah nuklida pada deret thorium mengalami 12 kali proses peluruhan yaitu 7 peluruhan alfa dan 6 peluruhan beta, inti induk ${}^{232}_{90}\text{Th}$ yang tidak stabil menjadi nuklida turunan yang stabil yaitu ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Energi ikat inti terbesar adalah nuklida induk ${}^{232}_{90}\text{Th}$ 1769.9705 MeV dan unsur ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ memiliki nilai energi ikat inti terkecil sebesar 1624.721 MeV sehingga diperoleh grafik yang menurun dan perbandingan terbalik dari energi ikat inti, hasil energi per nukleon terbesar adalah unsur ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ sebesar 7.8112 MeV serta energi yang terkecil unsur atau nuklida induk ${}^{232}_{90}\text{Th}$ sebesar 7.6292 MeV sehingga grafik naik. Energi disintegrasi yang terbesar adalah peluruhan alfa ${}^{232}_{90}\text{Th}$ menjadi ${}^{228}_{88}\text{Ra}$ sebesar 4.0745 MeV dan energi disintegrasi yang terkecil terjadi pada proses peluruhan beta ${}^{228}_{88}\text{Ra}$ menjadi ${}^{228}_{89}\text{Ac}$ sebesar 0.62698 MeV.

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif Deret Thorium-232 dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan (*The Liquid Drop Model*)”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat guna menyelesaikan program pendidikan strata atau (S1) Program Studi Pendidikan Fisika di Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember.

Penulis menyadari bahwa terselesaikannya penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

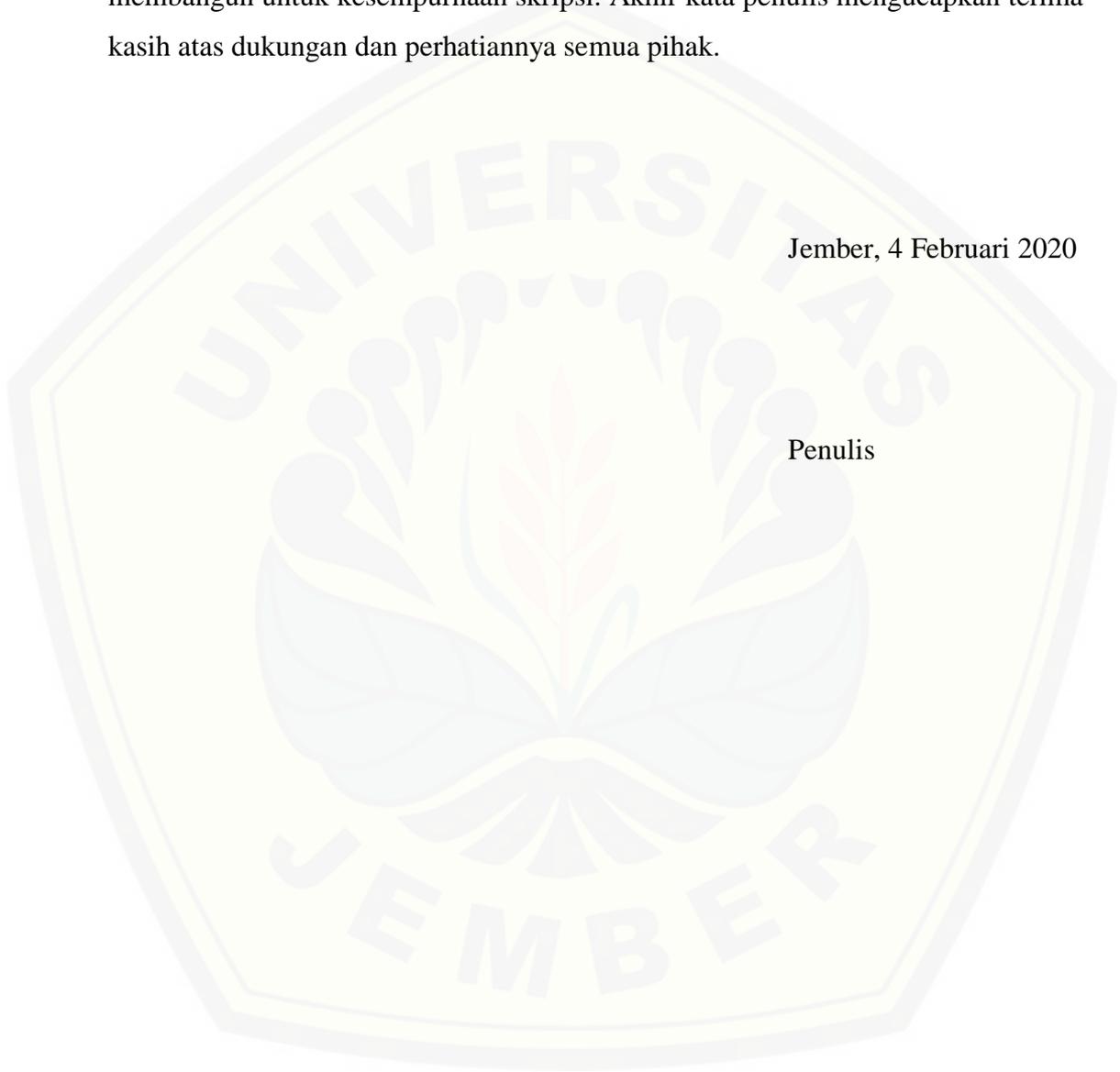
1. Prof. Drs. Dafik, M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember;
2. Dr. Dwi Wahyuni, M.Kes. selaku Ketua Jurusan Pendidikan MIPA Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember;
3. Drs. Bambang Supriadi, M.Sc selaku Kepala Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jember;
4. Dr. Supeno, M.Si, selaku Dosen Pembimbing Akademik (DPA) yang telah membimbing nasehat dan arahan;
5. Drs. Albertus Djoko Lesmono, M.Si, selaku Dosen Pembimbing Utama, Dr. Yushardi, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota, Drs. Trapsilo Prihandono, M.Si., selaku Dosen Penguji Utama, Drs. Alex Harijanto, M.Si., selaku Dosen Penguji Anggota, yang telah meluangkan waktu, fikiran dan perhatiannya demi terselesainya skripsi ini;
6. dr. Happy Harmono, M.Kes., dan Dr. Isa ma'rufi, M.Kes., selaku Pembina UKM Penalaran dan Penelitian Universitas Jember 2019, yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan saran terkait karya ilmiah;
7. Temen-temen seperjuangan Program Studi Pendidikan Fisika dan sahabat selama di UKM Penalaran dan Penelitian Universitas Jember;

8. Semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu yang telah memberikan dalam hal dukungan dan bantuan dalam penyusunan skripsi ini.

Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan wawasan bagi semua pihak. Aamiin. Penulis juga berharap menerima kritik dan saran yang dapat membangun untuk kesempurnaan skripsi. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dan perhatiannya semua pihak.

Jember, 4 Februari 2020

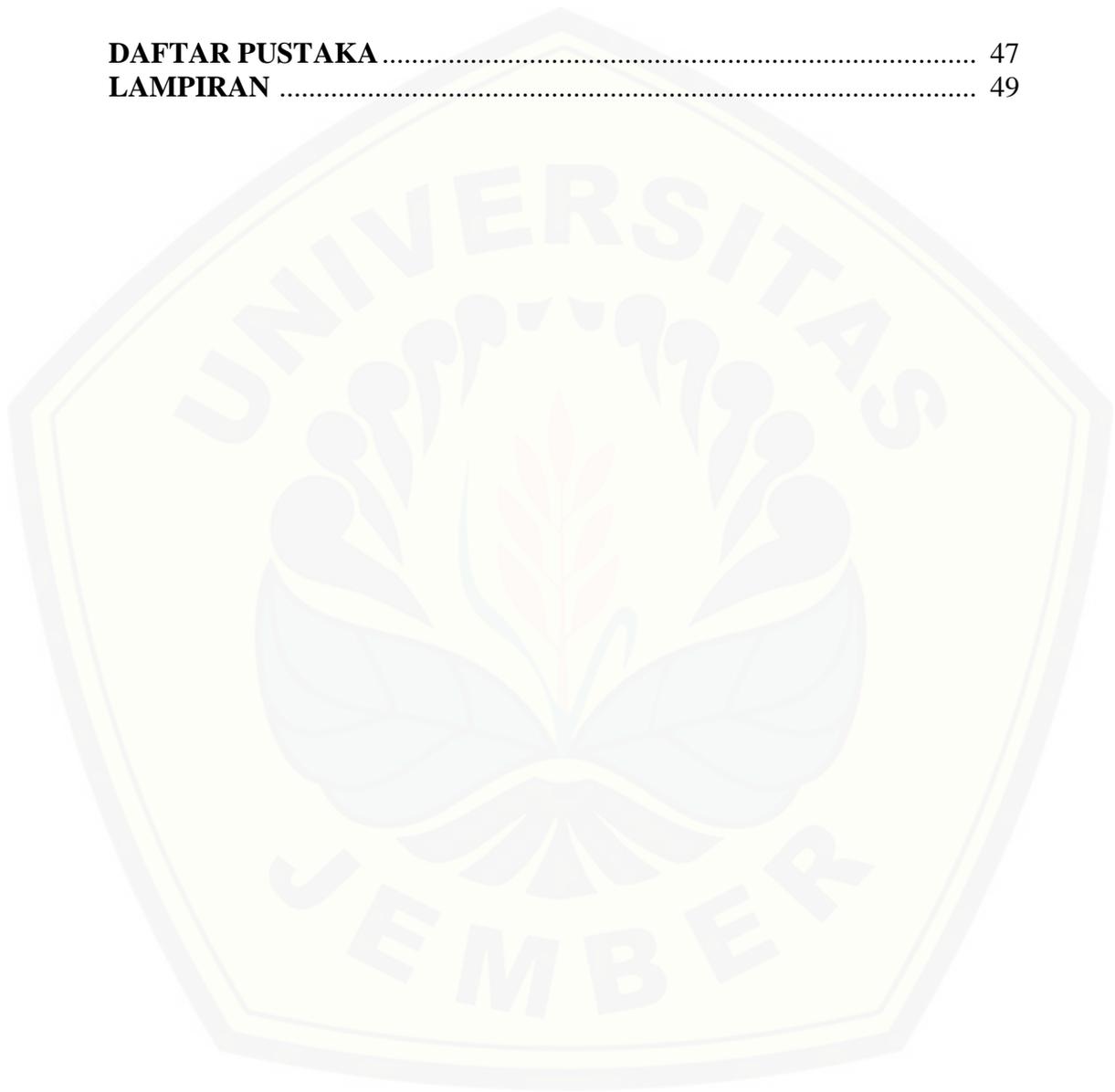
Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PENYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Unsur	6
2.2 Kestabilan Inti Atom	7
2.3 Energi Ikatan Inti	9
2.4 Unsur Radioaktif	11
2.5 Radioaktivitas	12
2.5.1 Peluruhan Radioaktif	12
2.5.2 Deret Radioaktif	19
2.6 Metode Tetapan Cairan	23
2.7 Matlab	26
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Jenis Penelitian	27
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	27
3.3 Definisi Operasional Variabel	27
3.3.1 Variabel Bebas	27
3.3.2 Variabel Terikat	27
3.3.3 Variabel Kontrol.....	28
3.4 Langkah Penelitian	28
3.5 Alat Penelitian	35
3.6 Teknik Penyajian Data	37
3.6.1 Data Pengamatan Hasil Simulasi	37
3.6.2 Data hasil Visualisasi Gambar	37

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Hasil Penelitian	38
4.2 Pembahasan	39
BAB 5. PENUTUP	46
5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN	49



DAFTAR TABEL

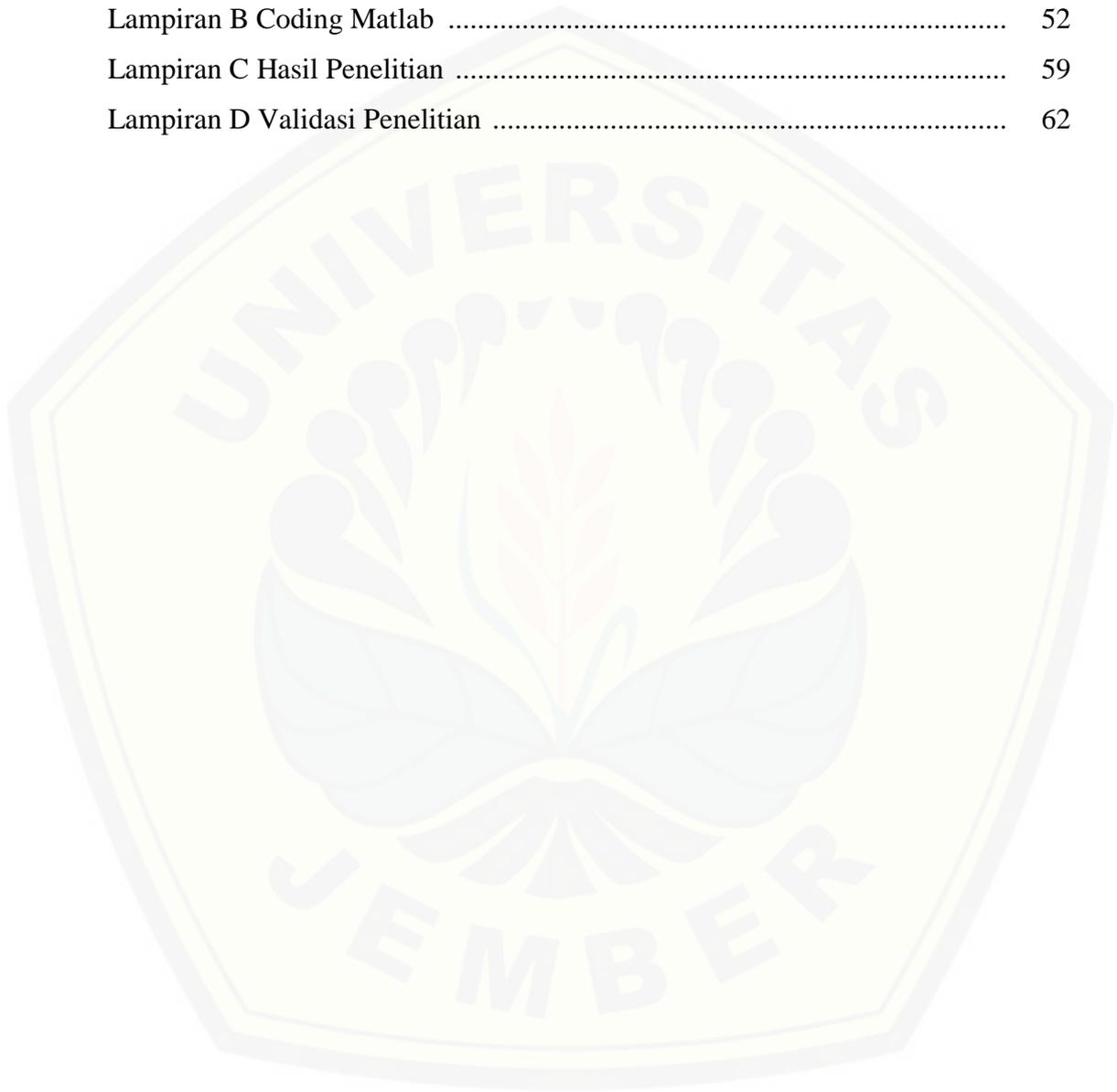
	Halaman
2.1 Harga $E_{B\ total}$, E_B rata-rata per nukleon dan sifat peluruhan beberapa nuklida	10
2.2 Deret Radioaktif	20
3.1 Hasil Perhitungan Energi Ikat Inti, Energi Ikat Per Nukleon, Dan Energi Disintegrasi Pada Peluruhan Deret Uranium Dengan Model Tetes Cairan	35
3.2 Pengamatan Peluruhan Inti Deret Radioaktif Thorium-2337	37
4.1 Hasil perhhitungan energi ikat inti, energi per nukleon, dan energi disintegrasi engan <i>software</i> MATLAB R2013a.....	38
4.2 Hasil perhhitungan energi ikat inti, energi per nukleon, dan energi disintegrasi secara <i>manual</i>	39

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Tabel Periodik	7
2.2 Inti-inti Stabil	8
2.3 Energi Ikat Inti Per Nukleon.....	11
2.4 Lintasan Sinar Alfa, Beta, Dan Gamma Dalam Medan Magnet B.....	13
2.5 Peluruhan Partikel Alfa	13
2.6 Peluruhan Partikel Beta	15
2.7 Penangkapan Elektron	17
2.8 Pemancaran Positron	17
2.9 Peluruhan Partikel Gamma.....	18
2.10 Deret Thorium	20
2.11 Deret Neptunium	21
2.12 Deret Uranium	22
2.13 Deret Aktinium	23
3.1 Bagan langkah-langkah penelitian	29
3.2 Model Tetes Cairan	29
3.3 <i>Flowchart</i> Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif	34
3.4 Hubungan Energi Ikat Inti dengan Unsur Deret Uranium	35
3.5 Hubungan Energi Ikat Inti Per Nukleon dengan Unsur Deret Uranium	36
3.6 Grafik Hubungan Energi Ikat Inti Terhadap Nomor Massa	37
3.7 Grafik Hubungan Energi Ikat Inti Per Nukleon Terhadap Nomor Massa	37
4.1 Peluruhan Deret Thorium	40
4.2 Grafik energi ikat inti atom dengan nomor massa pada deret Thorium ...	41
4.3 Grafik energi ikat inti atom per nukleon dengan nomor massa pada deret Thorium	41
4.4 Validasi grafik energi ikat inti atom dengan nomor massa pada deret Thorium	41
4.5 Validasi Grafik energi ikat inti atom per nukleon dengan nomor massa pada deret Thorium.....	41

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A Matrik Penelitian	49
Lampiran B Coding Matlab	52
Lampiran C Hasil Penelitian	59
Lampiran D Validasi Penelitian	62



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Materi yang ada di alam terdiri dari partikel yang tidak bisa dibagi lagi dan sangatlah kecil disebut atom. Atom didalamnya terdapat inti atom terdiri dari proton dan neutron. Inti atom dikelilingi oleh elektron dengan lintasan tertentu. Nomor atom Z yang mengandung muatan negatif maka harus ada yang mengandung muatan positif Z_e (Krane, 1992:220). Hal tersebut di dalam atom harus terdapat komponen tersebut. Sifat Inti atom terdiri dari dua bagian, yakni inti atom bersifat radioaktif dan stabil.

Pada inti atom yang bersifat radioaktif atau tidak stabil akan mengalami proses peluruhan spontan dengan memancarkan radiasi elektromagnetik dan partikel, hal ini yang biasa disebut radioaktivitas. Jenis – jenis radiasi elektromagnetik yaitu partikel (α), partikel (β), sinar gamma (γ), pancaran positron, dan penangkapan elektron. Unsur yang mempunyai nomor massa lebih dari 83 merupakan unsur radioaktif. Unsur radioaktif akan melakukan peluruhan secara spontan dan menghasilkan energi ikat dan energi disintegrasi. Energi disintegrasi adalah awal dari deret peluruhan yang akhirnya menghasilkan sebuah isotop yang stabil (Chang, 2003). Selain itu inti atom didalamnya terdapat energi ikat inti, menyatakan bahwa suatu nukleus dengan massa diam lebih kecil daripada aljabar massa nukleon unsur pembangunnya. Proses menyatukan nukleon-nukleon di dalam nukleus dengan mengurangi atau menyusutkan massa dengan energi negatifnya. Menurut Wiyatmo (2012:51) menyatakan bahwa energi ikat energi yang dibebaskan jika terjadi penyusunan nukleon-nukleon menjadi nukleus. Energi ikat inti terdapat perbedaan massa inti sesungguhnya dengan nukleon pembentuknya. Pada sumber referensi yang membahas tentang kestabilan inti peluruhan radioaktif, jarang mengkaji energi proses peluruhan tersebut dan lebih sering membahas tentang aktivitas peluruhan dan waktu paruhnya saja. Salah satunya penelitian pamungkas (2015) yang membahas tentang massa sisa, jumlah atom sisa, dan aktivitas peluruhan pada deret uranium. Energi pada proses peluruhan seperti energi disintegrasi dan energi ikat jarang dan bahkan belum dikaji

lebih dalam pada buku maupun jurnal, padahal hal ini sangat penting bahwa kestabilan suatu inti atom berkaitan dengan energi.

Kestabilan Inti atom dipengaruhi oleh ukuran atom dan jumlah proton-neutron. Apabila inti atom tidak stabil secara sendirinya bertransformasi mengalami perubahan inti atom menjadi stabil. Proses perubahan menjadi inti stabil akan mengalami proses peluruhan disebut radionuklida, sedangkan zat yang mengalami peluruhan disebut zat radioaktif. Pada prosesnya ada tiga aspek radioaktivitas, yakni ketika inti atom mengalami peluruhan alfa dan beta maka nomor atom (Z) bilangannya berubah dan inti akan berubah juga menjadi unsur yang berbeda. Kedua peluruhan energi timbul dari inti atom tanpa eksitasi eksternal, hal itu tidak seperti radiasi atomik. Ketiga proses peluruhan merupakan suatu proses statistik yang memenuhi kemungkinan. Kemungkinan yang terjadi hanya per satuan waktu dan tidak ada hubungan sebab akibat terkait peluruhan inti (Wiyatmo, 2012:60).

Penelitian oleh Sukarna pada tahun 1997 tentang mengkaji kestabilan inti dengan pendekatan energi ikat inti ini mengemukakan bahwa energi ikat inti dapat menerangkan kestabilan inti dan dapat memprediksi energi reaksi spontan inti (peluruhan), dimana nuklida yang relatif stabil mempunyai energi ikat per nukleon lebih besar dibandingkan nuklida yang kurang stabil. Pada peluruhan (reaksi inti spontan) energi terlepas dengan besarnya dapat diprediksi yaitu jumlah energi ikat inti hasil dikurangi dengan energi ikat inti semula. Selain itu menurut penelitian dari Suhendar (2016) yang berjudul “menentukan kestabilan nuklida-nuklida berdasarkan massa inti per nukleon” menyimpulkan bahwa massa inti per nukleon dapat digunakan untuk menentukan energi ikat inti per nukleon. Penelitian lain Akbar (2013) tentang kajian stabilitas inti super berat dengan nomor atom 110 sampai 220 dengan menggunakan model inti tetes cairan menyatakan bahwa model tetes cairan dapat digunakan untuk menentukan kestabilan inti dengan menghitung energi ikat per nukleon, sehingga dengan model tetes cairan dapat menjelaskan energi volume, koreksi permukaan, koreksi asimetri, dan koreksi energi pasangan, dan koreksi gaya tolak coulomb. Penelitian lain Mardiana (2019) tentang kajian kestabilan inti unsur-unsur pada proses peluruhan zat radioaktif dengan pendekatan energi ikat inti model tetes cairan menyatakan energi ikat inti pada unsur-unsur

radioaktif pada peluruhan mengalami beberapa perubahan, pada peluruhan alfa energi ikat mengalami penurunan cukup besar namun peluruhan beta energi ikat mengalami kenaikan dan penurunan sedikit. Selain itu penelitian Mardiana (2019) mengkaji energi ikat inti, energi ikat per nukleon dan energi disintegrasi pada unsur-unsur radioaktif yang tergolong pada deret uranium.

Penelitian sebelumnya hanya mengkaji tentang kestabilan inti dengan menggunakan energi ikat ini dengan melihat massa inti saja, sehingga penelitian tersebut kurang spesifik berhubung dalam suatu inti terdapat beberapa efek energi seperti efek permukaan, efek volume, efek coulomb, efek asimetri dan efek pasangan. Model yang sesuai untuk memprediksi kestabilan inti suatu unsur dengan memperhatikan efek-efek yang terdapat dalam suatu inti tersebut yaitu dengan model tetes cairan. Model tetes cairan mengibaratkan inti seperti suatu tetes cairan yang mempunyai kerapatan konstan. Penelitian sebelumnya tentang model tetes cairan yang dilakukan oleh Mardiana (2019) menjelaskan tentang kestabilan inti unsur-unsur pada proses peluruhan radioaktif deret Uranium, dimana unsur tersebut mengalami proses peluruhan alfa dan beta. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya yaitu terletak pada unsur, reaksi inti dan mensimulasikan proses peluruhan pada deret Thorium.

Unsur radioaktif yang terdapat di alam merupakan bagian dari empat deret radioaktif. Setiap deret terdiri dari urutan produk nuklida anak yang semuanya diturunkan dari nuklida induk tunggal. Salah satu unsur radioaktif yaitu thorium yang sering digunakan sebagai pembangkit tenaga nuklir. Thorium dimanfaatkan sebagai bahan instrumen optik, TIG elektroda, dan bahan bakar pengganti uranium sebagai bahan bakar reaktor nuklir. Pada dasarnya thorium-232 merupakan unsur radioaktif yang tidak stabil kemudian meluruh secara berantai menjadi inti stabil pada ^{208}Pb (Wiyatmo, 2012:77). Rantai peluruh tersebut merupakan peluruhan deret thorium.

Berdasarkan uraian di atas perlu adanya kajian peluruhan radioaktif deret thorium tentang kestabilan inti dengan melihat energinya seperti energi ikat inti, energi per nukleon, dan energi disintegrasi dengan model tetes cairan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian dengan judul “Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat

Radioaktif Deret Thorium-232 dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan (*The Liquid Drop Model*)”.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana kestabilan inti pada peluruhan zat Radioaktif unsur Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan ?
2. Bagaimana energi ikat inti dan energi ikat per nukleon unsur-unsur pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan ?
3. Bagaimana energi disintegrasi pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dibahas dalam penelitian sebagai berikut :

1. Deret radioaktif yang digunakan yaitu peluruhan alami deret thorium-232
2. Variabel yang dihitung adalah energi ikat inti, energi ikat inti per nukleon, dan energi disintegrasi dengan pendekatan energi ikat inti model tetes cairan
3. Energi disintegrasi pada proses peluruhan menggunakan energi peluruhan alfa dan beta
4. Penelitian menggunakan pendekatan energi ikat inti model tetes cairan.

1.4 Tujuan

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

1. Menganalisis Kestabilan inti pada peluruhan zat Radioaktif unsur Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan

2. Menganalisis energi ikat inti dan energi ikat per nukleon unsur-unsur pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan
3. Menganalisis energi disintegrasi pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Bagi peneliti, sebagai pertimbangan dan masukan untuk melakukan penelitian lebih lanjut tentang peluruhan deret radioaktif dengan pendekatan model tetes cairan.
2. Bagi Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Jember, sebagai referensi untuk menambah kajian pustaka pada permasalahan peluruhan deret radioaktif dengan pendekatan model tetes cairan.
3. Bagi pembaca, sebagai menambah wawasan dan informasi tentang menyelaskan peluruhan dengan deret thorium-232.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Unsur

Atom merupakan suatu elemen yang sangat kecil dan tidak bisa dibagi lagi. Berbagai penemuan atom hasil dari percobaan ilmuwan-ilmuwan dalam abad yang berbeda. Penemuan tersebut memunculkan berbagai hal baru mulai yang mendasar struktur atom ataoun karakteristik atom. Semua materi terdiri atas beberapa unsur yang didalamnya terbuat dari atom. Secara umum atom tidak menunjukkan muatan listrik (positif/negatif). Namun, atom merupakan satu kesatuan yang didalamnya terdapat beberapa elemen yaitu elektron, proton, dan neutron. Dalam struktur atom terdapat inti atom dan elektron yang mengelilingi inti dalam orbital tertentu. Inti atom tersusun atas proton dan neutron. Kumpulan atom uang mempunyai karakteristik ukuran, sifat kimia dan massa yang sama disebut unsur. Sehingga atom unsur tertentu berbeda dengan atom satu sama yang lainnya. Unsur yang sudah terverifikasi sebanyak 113 hingga saat ini. Ada delapan puluh tiga unsur yang berasal dari alam dan sisa dari ini buatan dari ilmuwan.

Unsur tersebut dikelompokkan dalam sebuah tabel periodik. Tabel periodik merupakan sebuah tabel yang menyajikan unsur-unsur sesusi golongan, sifat fisis dan kimia yang hampir mirip satu dengan lainnya. Pada tabel periodik tersusun berdasarkan periode dan golongan. Periode dimana unsur disusun sesuai dengan nomor atomnya (terletak di atas lambang unsur) dalam arah horizontal. Sedangkan golongan disusun arah vertikal sesuai dengan sifat-sifat kimianya.

Pada tabel periodik unsur-unsur dibedakan menjadi 2 golongan yaitu A dan B. Unsur – unsur yang terdapat pada golongan A disebut unsur utama yang terdiri dari golongan IA – VIIIA. Sedangkan Unsur – unsur B disebut unsur transisi dengan jumlah golongan 8 yaitu IB – VIIIB. Unsur – unsur tersebut dapat dikelompokkan menjadi beberapa golongan berdasarkan sub kulit yang terisi yaitu unsur utama, gas mulia, laktanida, aktinida, dan atom logam transisi. Sehingga dapat diperhatikan sesuai Gambar 2.1 tabel periodik berikut:

MAIN-GROUP ELEMENTS		TRANSITION ELEMENTS										MAIN-GROUP ELEMENTS						
1A (1)	2A (2)	3B (3)	4B (4)	5B (5)	6B (6)	7B (7)	8B (8)	9B (9)	10B (10)	1B (11)	2B (12)	3A (13)	4A (14)	5A (15)	6A (16)	7A (17)	8A (18)	
1 H 1.008																	2 He 4.003	
2 Li 6.941	4 Be 9.012												5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
3 Na 22.99	4 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95	
4 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.41	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80	
5 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3	
6 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.9	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)	
7 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Rf (263)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (267)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (272)	112 (285)	113 (284)	114 (289)	115 (288)	116 (292)			
		INNER TRANSITION ELEMENTS																
		58 Lanthanides Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 175.0			
		90 Actinides Th 232.0	91 Pa (231)	92 U 238.0	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)			

Gambar 2.1 Tabel Periodik (Silberberg, 2009)

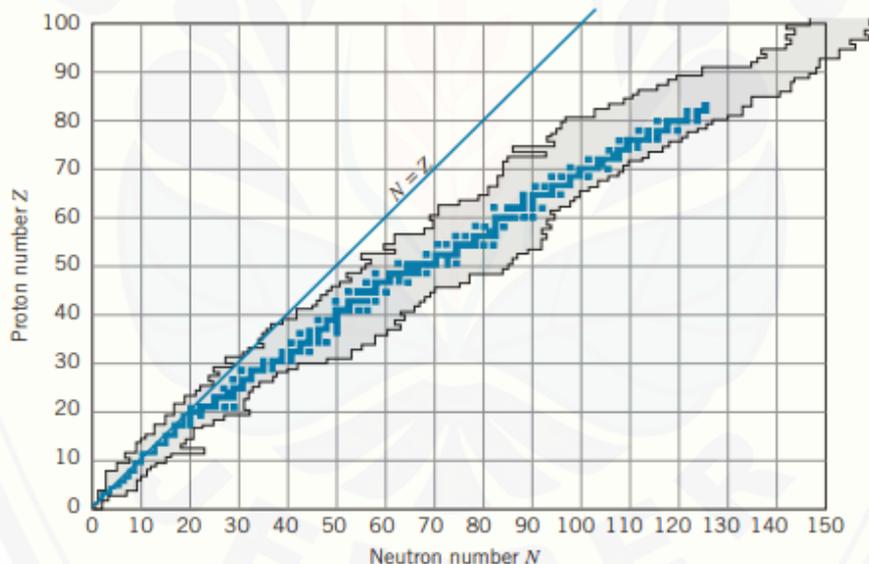
Pada tabel periodik tersebut unsur – unsur utama terdapat pada deret golongan IA – VIIA, yang mempunyai bilangan subkulit *s* atau *p* dengan bilangan kuantum tertinggi dengan belum terisi penuh. Pada golongan VIIA merupakan gas mulia dengan subkulit *p* yang terisi penuh kecuali pada helium. Logam transisi terdapat pada golongan IB dan IIB sampai VIIIB, yang mudah menghasilkan kation dengan subkulit *d* yang tidak terisi penuh. Pada golongan IIB adalah Zn, Cd, dan Hg bukan dari salah satu unsur utama maupun unsur transisi. Kemudian lantanida dan aktinida merupakan unsur transisi blok-*f* karena golongan tersebut mempunyai subkulit *f* yang tidak terisi penuh (Chang, 2004).

2.2 Kestabilan Inti Atom

Pada atom mempunyai sifat yang menakjubkan yaitu kemampuan atom untuk melakukan perubahan sendiri secara spontan dari suatu inti dengan nilai nomor atom (*Z*) dan nomor neutron (*N*) tertentu ke inti lainnya. Pada perubahan tersebut terdapat beberapa atom mempunyai sifat stabil dan atom lainnya yang

bersifat tidak stabil akan mengalami proses peluruhan menjadi suatu atom yang berbeda. Proses peluruhan inti atom yang tidak stabil akan mengalami secara alami hingga atom tersebut stabil (Krane, 2012:382).

Menurut Sutarto (2015:50) pada inti atom terdapat proton yang bermuatan positif dan neutron yang tidak bermuatan. Keduanya membentuk kesatuan yang solid dikarenakan adanya gaya. Gaya yang bekerja di dalam inti atom yaitu gaya coulomb dan gaya interaksi kuat. Gaya coulomb atau elektromagnetik ini berfungsi untuk mengikat neutron dan proton. Sedangkan gaya interaksi kuat yang menyebabkan neutron dengan proton tarik – menarik dan antara neutron dengan neutron. Jadi dalam hal ini neutron diilustrasikan berfungsi sebagai lem yang mengikat proton ataupun sesama neutron. Gambar 2.2 berikut adalah inti – inti stabil.



Gambar 2.2. Inti – inti stabil (Krane, 2012:383)

Pada grafik Gambar 2.2 tersebut memperlihatkan jumlah proton dan neutron yang kurang lebih sama. Inti ringan dengan jumlah proton ≤ 20 sangat stabil karena jumlah neutron dan proton sama. Inti berat akan stabil jika memiliki jumlah neutron 1,6 kali jumlah proton. Jadi, semua inti berat akan memiliki jumlah neutron lebih besar dari jumlah proton. Karakteristik inti-inti yang mempunyai jumlah proton 92 bersifat stabil karena tidak ada atom jenis ini yang ada di alam dan harus dihasilkan secara buatan. Unsur yang memiliki nomor proton 93 hingga 107

merupakan bersifat buatan manusia. Unsur ini akan mengalami proses radioaktif dan meluruh ke berbagai inti-inti atom sampai stabil.

2.3 Energi Ikat Inti

Pada nukleon dalam keadaan bebas, jika neutron dan protonnya tidak terikat sebagai inti dan memiliki energi lebih tinggi dibandingkan nukleon terikat dalam inti. Energi ikat inti (E_B) merupakan energi yang diperlukan untuk memecah neutron dan proton atau energi yang dilepaskan oleh nukleon untuk mencapai kestabilan inti (beiser, 1999: 420). Penemuan oleh Einstein terkait $E = mc^2$ menyatakan energi berkaitan dengan massa, dimana massa dapat dirubah menjadi energi dan sebaliknya energi dapat diubah menjadi massa. Pada reaksi inti (peluruhan) massa tidak hilang tetapi berubah menjadi energi (Sukarna, 2014).

Energi ikat inti (E_B) adalah selisih antara energi diam nukleon-nukleon unsur dan energi diam inti yang terbentuk. Dapat dituliskan dengan persamaan (2.1) dan (2.2).

$$E_B = (Zm_p + Nm_n - M_{inti})c^2 \quad (2.1)$$

dalam satuan MeV energi ikat inti diperoleh :

$$E_B = (Zm_p + Nm_n - M_{inti})(931,5 \frac{MeV}{u}) \quad (2.2)$$

dengan E_B , Z , m_p , N , m_n , dan M_{inti} masing – masing merupakan energi ikat inti, nomor atom, massa proton, neutron, massa neutron, dan massa inti. Untuk menentukan massa inti dengan mengurangkan massa electron total dari massa atom (Gautreau *et al*, 2006: 147).

Energi ikat (E_B) beberapa nuklida pada tabel 2.1, umumnya harga E_B makin besar dengan masing-masing besarnya nuklida dari Z terendah. Namun dilihat dari kestabilannya, dapat dilihat makin besar harga E_B tidak menampakkan atau memperlihatkan makin stabilnya suatu nuklida. Kestabilan nuklida diantara se isotop dicerminkan dengan harga E_B rata-rata per nukleon (E_B/A).

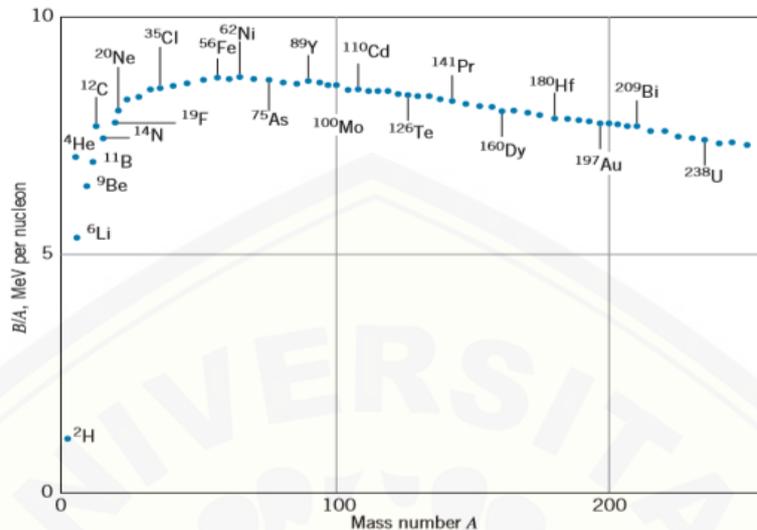
Tabel 2.1 Harga $E_{B\ total}$, E_B rata-rata per nukleon dan sifat peluruhan beberapa nuklida

Nuklida	E_B	E_B per nukleon	Sifat peluruhan
^4He	28,295	7,074	Stabil
^5He	29,265	5,858	β^-
^{15}O	111,945	7,464	β^+ , TE
^{16}O	127,617	7,976	Stabil
^{17}O	131,761	7,751	Stabil
^{18}O	139,805	7,767	Stabil
^{19}O	143,762	7,566	β^-
^{32}P	270,847	8,464	β^-
^{32}S	271,775	8,493	Stabil
^{55}Mn	482,065	8,765	Stabil
^{55}Fe	481,052	8,7464	TE
^{65}Cu	569,199	8,757	Stabil
^{65}Zn	567,065	8,724	TE, β^-
^{94}Kr	791,842	8,424	β^-
^{144}Ce	1197,299	8,315	β^-
^{234}Th	1777,622	7,597	β^-
^{238}U	1801,647	7,570	α
^{239}P	1804,676	7,551	FS

Keterangan : TE= Tangkapan Elektron, FS= fisi Spontan

(Sukarna,2014)

Pada Tabel 2.1, nilai harga E_B rata-rata per nukleon inti stabil lebih besar daripada inti kurang stabil. Inti yang kurang stabil kemudian meluruh secara langsung atau spontan membentuk nuklida lain dengan berbagai macam peluruhan ($\alpha, \beta^-, \beta^+, \gamma, TE$), nuklida lain dengan harga E_B rata-rata per nukleon lebih besar dari nuklida sebelum terjadinya peluruhan. Gambar 2.2 memperlihatkan kurva E_B rata-rata per nukleon sebagai fungsi A beberapa nuklida stabil (Sukarna, 2014). Gambar 2.3 adalah grafik energi ikat per nukleon.



Gambar 2.3 Energi ikat per nukleon (Krane, 2012: 376)

Energi ikat rata-rata per nukleon dapat dilihat dengan mulai dari nilai kecil atau rendah (0 bagi proton dan neutron, dan 1,1 MeV bagi deuterium), naik menuju maksimum 8,795 MeV bagi ${}^{62}\text{Ni}$ dan selanjutnya turun ke nilai sekitar 7,5 MeV bagi inti-inti berat (Krane, 2012: 353). Gambar 2.2 menjelaskan bahwa ada dua cara yang berbeda untuk melepaskan inti atom. Jika inti berat menjadi dua inti yang ringan, maka energi dilepaskan, karena energi ikat per nukleon lebih besar bagi kedua pecahan lebih ringan daripada inti atom semula, proses ini disebut dengan fisi inti. Selain itu, ketika menggabungkan kedua inti ringan menjadi inti berat dan energi ikat per nukleon yang terlepasakan lebih besar daripada energi yang dimiliki kedua inti awal, proses ini disebut dengan fusi inti (Krane, 2012: 354). Kemudian nuklida berat yang memiliki E_B kecil dapat melakukan reaksi fisi membentuk nuklida yang lebih kecil, dan nuklida ringan akan mengalami reaksi fusi membentuk nuklida yang lebih besar (Sukarna, 2014).

2.4 Unsur Radioaktif

Unsur radioaktif merupakan suatu unsur atau molekul-molekul yang menghasilkan radiasi partikel dan gelombang elektromagnet yang disebabkan oleh perubahan secara kimia dan fisis. Adapun perubahan secara kimia seperti perubahan unsur, susunan molekul–molekul, dan reaksi. Sedangkan perubahan fisis

meliputi tekanan, temperatur, dan volume. Unsur radioaktif dengan memiliki syarat atom lebih dari 83 yang didalamnya terdapat komposisi proton dan neutron yang tidak seimbang atau tingkat energinya berada dalam keadaan dasar. Salah satunya unsur thorium yang memiliki nomor atom 90.

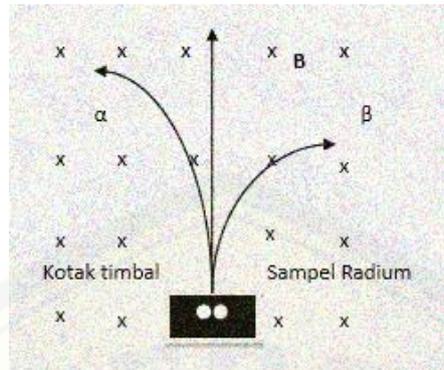
Thorium adalah salah satu unsur bersifat radioaktif yang keberadaanya masih ada di alam. Unsur thorium bahan metal yang banyak digunakan baik dalam bidang nuklir ataupun non nuklir. Dalam ranah non nuklir thorium ditemukan dalam bentuk gelas optik, lampu kaos, keramik, elektoda tungsten dan berbagai logam alloy. Thorium mempunyai 5 buah isotop yakni ^{228}Th , ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th , dan ^{234}Th . Semua isotop tersebut yang tidak stabil adalah thorium-232 yang memiliki waktu paruh $1,39 \cdot 10^{10}$ tahun. Thorium merupakan deret awal dari salah satu deret peluruhan yang akan berakhir pada Pb-208.

2.5 Radioaktivitas

Radioaktivitas merupakan proses inti atom yang tidak stabil mengalami perubahan dengan memancarkan radiasi partikel dan gelombang elektromagnetik yang menyebabkan inti atom tersebut stabil. Proses perubahan ini inti atom tidak stabil menjadi suatu inti atom stabil disebut dengan peluruhan radioaktif.

2.5.1 Peluruhan Radioaktif

Dalam proses peluruhan radioaktif terdapat 3 jenis yaitu peluruhan partikel alfa, peluruhan partikel beta, dan peluruhan partikel gamma. Proses peluruhan atom memancarkan sebuah sinar radioaktif yaitu α , β , dan γ . Berikut gambar pengaruh medan magnet B dengan sinar radioaktif. Gambar 2.4 berikut adalah Lintasan sinar alfa, beta, dan gamma dalam medan magnet B.

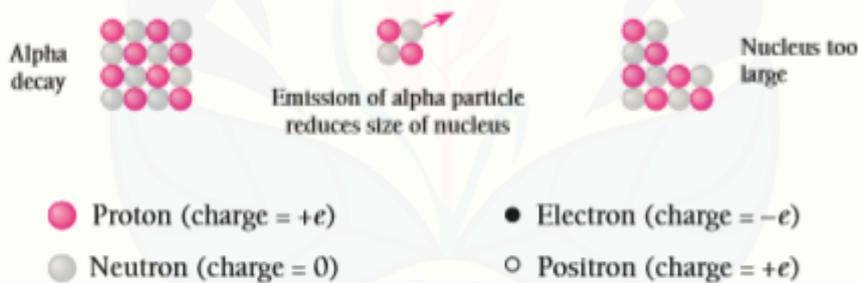


Gambar 2.4 Lintasan sinar alfa, beta, dan gamma dalam medan magnet B (Wiyatmo, 2012)

Adapun proses peluruhan alfa, beta, dan gamma sebagai berikut :

a. Peluruhan partikel Alfa atau α ,

Partikel alfa, menurut Sutarto (2015:54) unsur – unsur atom yang terjadi pada peluruhan partikel alfa dengan inti induk memiliki nomor massa lebih besar dari 83. Gambar 2.5 adalah contoh Peluruhan partikel alfa.



Gambar 2.5 peluruhan partikel alfa (Beiser, 2003: 421)

Peluruhan partikel alfa terdiri dari dua proton dan dua neutron serta membentuk nuklida lainnya. Proses peluruhan partikel alfa dapat dituliskan secara persamaan (2.3) sebagai berikut:



dengan C dan D masing-masing adalah inti induk dan inti anak. Contoh peluruhan alfa pada persamaan (2.4).



(Wiyatmo, 2012: 125).

Sifat – sifat partikel alfa atau α yaitu :

- 1) Mempunyai daya tembus pendek
- 2) Daya ionisasi partikel alfa atau α sangat besar, ± 100 kali daya ionisasi partikel beta atau β dan 10.000 kali daya ionisasi partikel gamma atau γ .
- 3) Partikel alfa atau α akan dibelokkan jika melalui medan magnet atau listrik.
- 4) Partikel alfa atau α bervariasi dengan kecepatan cahaya rentang 1/100 samapai 1/10.

Produk inti anak dari peluruhan terikat lebih erat dibandingkan inti induk, sehingga jenis peluruhan ini adalah membebaskan energi. Energi yang terlepas, yang muncul sebagai energi kinetik inti anak K_Y dan energi kinetik partikel alfa K_α , dapat ditentukan nilainya dari massa semua inti yang terlibat yaitu pada persamaan (2.5);

$$Q_1 = [m_{(x)} - m_{(y)} - m_{(\alpha)}]c^2 \quad (2.5)$$

Pada persamaan (2.5) sama seperti persamaan pada energi ikat, dengan massa elektron yang saling menghapuskan. Sehingga digunakan massa atom. Jika energi yang terlepas (energi disintegrasi Q_1) muncul sebagai energi kinetik, maka persamaan (2.6) :

$$Q_1 = K_{(y)} - K_{(\alpha)} \quad (2.6)$$

Dengan Q_1 , $K_{(y)}$, $K_{(\alpha)}$, $m_{(x)}$, $m_{(\alpha)}$ masing-masing adalah energi disintegrasi, energi kinetik inti anak, energi kinetik partikel alfa, massa atomik nuklida induk, massa atomik partikel alfa (Krane, 1999: 366).

Untuk peluruhan spontan atau langsung harus memenuhi $Q > 0$

$$\begin{aligned} Q_1 = K_{(y)} - K_{(\alpha)} &= [m_{(x)} - m_{(y)} - m_{(\alpha)}]c^2 \\ m_{(x)} - m_{(y)} - m_{(\alpha)} &> 0 \\ m_{(x)} &> m_{(y)} + m_{(\alpha)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) adalah syarat terjadinya peluruhan alfa, dimana biasanya hanya inti berat ($A > 200$) yang memenuhinya.

Energi disintegrasi partikel alfa berhubungan dengan energi ikat total inti persamaan (2.8) yaitu :

$$Q_1 = E_{B(Y)} + E_{B(\alpha)} - E_{B(X)} \quad (2.8)$$

Dengan keterangan berikut :

Q_1 = energi yang dilepaskan pada peluruhan partikel alfa

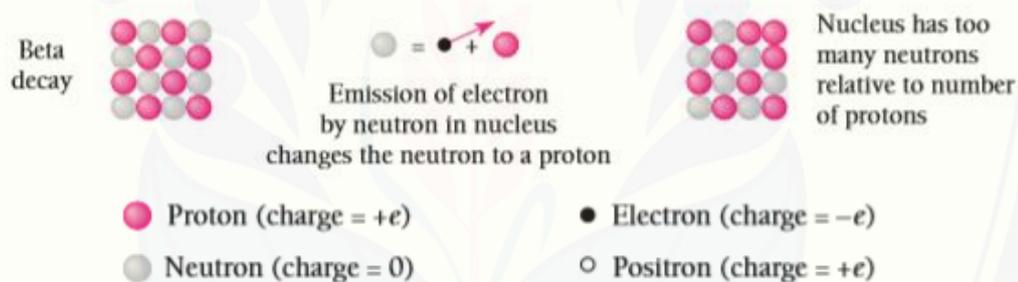
$E_{B(Y)}$ = energi ikat inti nuklida turunan

$E_{B(\alpha)}$ = energi ikat partikel alfa

$E_{B(X)}$ = energi ikat nuklida induk (Wiyatmo, 2012: 126-128).

b. Peluruhan partikel beta atau β ,

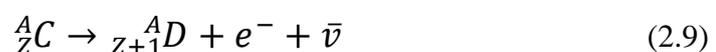
Peluruhan partikel beta merupakan suatu peluruhan yang terjadi jika inti mengandung terlalu banyak neutron daripada jumlah protonnya atau sebaliknya sehingga sebagian neutron akan mengubah menjadi proton untuk mentabilkan inti. Dengan cara ini, protonnya akan lebih banyak dan jumlah neutron akan berkurang. Suatu saat kestabilan inti ini akan muncul keseimbangan gaya. Namun, hal ini tidak akan terjadi karena atom tidak dapat berubah tanpa bantuan atau interaksi atom lainnya. Peluruhan beta dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Peluruhan partikel beta (Beiser, 2003: 421)

Dalam peluruhan ini neutron akan menghasilkan suatu partikel positif (β^+) dan negatif (β^-). Partikel positif (β^+) berada di dalam inti atom sedangkan partikel negatif (β^-) harus diemisikan. Proses peluruhan neutron berfungsi untuk menyelesaikan dua permasalahan. Pertama, produk yang dihasilkan proton yang berfungsi untuk gaya tarik dan gaya tolak dalam inti atom. Kedua, produk partikel negatif diemisikan kelebihan energi. Pada proses peluruhan ini juga akan menghasilkan neutrino (ν) dan anti neutrino $\bar{\nu}$ (Sutarto, 2015:52).

Peluruhan partikel beta (β^-) dapat dituliskan dengan persamaan (2.9) sebagai berikut :



Selanjutnya untuk peluruhan beta positif (β^+) dapat dituliskan dalam persamaan (2.10) sebagai berikut :



Persamaan (2.11) berikut adalah harga Q bagi peluruhan beta.

$$Q_1 = [m_{(x)} - m_{(y)}]c^2 \quad (2.11)$$

Pada peluruhan beta syarat terjadinya peluruhan yaitu $Q_1 > 0$, sehingga $m_{(x)} > m_{(y)}$ (peluruhan dapat terjadi dengan massa atomic nuklida induk lebih besar dari massa atomic nuklida turunan) (Wiyatmo, 2012: 144-148). Energi disintegrasi partikel beta berhubungan dengan energi ikat inti pada persamaan (2.12) yaitu :

$$Q_1 = E_{B(Y)} - E_{B(X)} + m_n - m_H \quad (2.12)$$

Dengan keterangan :

$E_{B(Y)}$ = energi ikat inti nuklida turunan

$E_{B(\alpha)}$ = energi ikat partikel alfa

$E_{B(X)}$ = energi ikat nuklida induk

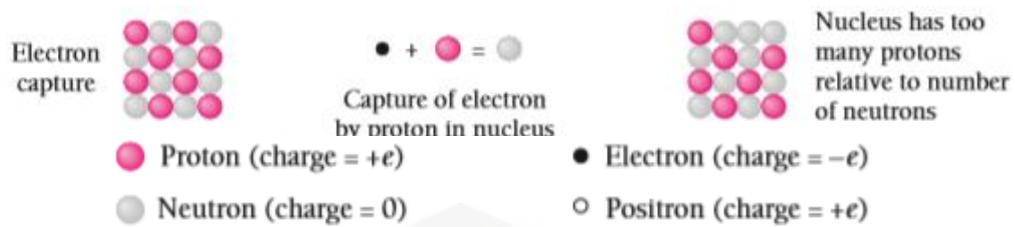
m_n = massa neutron (939,573 MeV)

m_H = massa atom hidrogen (938,791 MeV)

Sifat – sifat partikel beta atau β , yaitu :

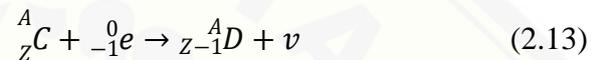
- 1) Daya tembus lebih jauh dari partikel alfa (α)
 - 2) Memiliki daya ionisasi 1/100 kali partikel alfa (α)
 - 3) Kecepatan partikel beta atau β antara 1/100 sampai 99/100 kecepatan cahaya
 - 4) Pada gambar 2.3 dapat dilihat partikel beta atau β akan dibelokkan jika melewati medan magnet atau medan listrik.
- c. Penangkapan Elektron

Penangkapan elektron terjadi karena suatu atom dengan inti yang memiliki nilai proton $>$ neutron. Penangkapan elektron dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Penangkapan Elektron (Beiser, 2003: 421)

Penangkapan elektron mengalami proses dengan peluruhan dengan satu elektron orbit ditangkap proton dalam inti sehingga dapat berubah menjadi neutron, jumlah nukleon tetap namun satu proton berubah menjadi neutron. Persamaan (2.13) merupakan reaksi peluruhan ini memenuhi :



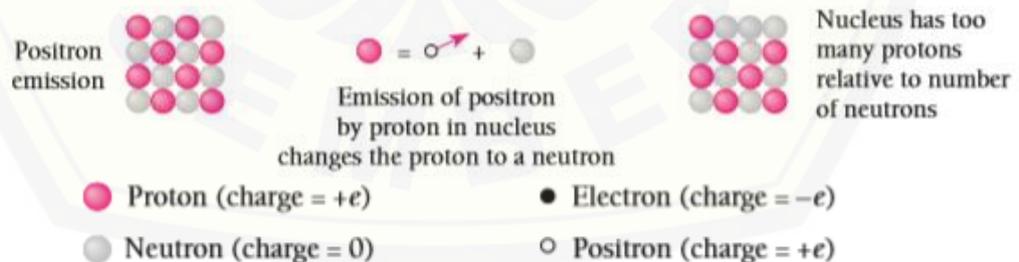
Contoh dari peluruhan penangkapan elektron : ${}^{15}_8 O + {}_{-1}^0 e \rightarrow {}^{15}_7 N + \nu$. Dengan nilai Q_1 peluruhan pada persamaan (2.14) adalah :

$$Q_1 = [m_{(x)} - m_{(y)}]c^2 \quad (2.14)$$

Syarat terjadinya peluruhan adalah $Q_1 > 0$, sehingga $m_{(x)} > m_{(y)}$ (peluruhan dapat terjadi dengan massa atomic nuklida induk lebih besar dari massa atomic nuklida turunan) (Wiyatmo, 2012: 145-150).

d. Pemancaran Positron

Pemancaran positron dapat terjadi karena inti atom mempunyai proton > neutron. Pemancaran positron dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Penangkapan Positron (Beiser, 2003: 421)

Proses terjadinya pemancaran positron disebabkan oleh elektron β^+ (positron). Persamaan (2.15) adalah reaksi peluruhan pemancaran elektron :



Contoh peluruhan ini pada persamaan (2.16) yaitu



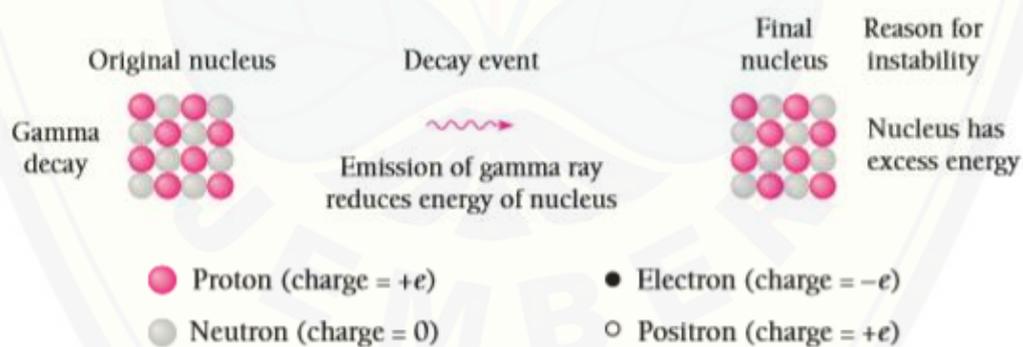
Dimana inti atom ${}_{7}^{12}\text{N}$ yang mempunyai jumlah proton lebih besar dari jumlah neutronnya. Inti atom tersebut kemudian meluruh dengan mengubah satu protonnya menjadi neutron disertai dengan pemancaran elektron positif dalam bentuk radiasi β^{+} dan neutrino. Pada peluruhan pemncaran positron memiliki nilai Q_1 pada persamaan (2.17) yaitu :

$$Q_1 = [m_{(x)} - m_{(y)} - 2m_{(e)}]c^2 \quad (2.17)$$

Syarat terjadinya peluruhan adalah $Q_1 > 0$, sehingga $m_{(x)} > m_{(y)} + 2m_{(e)}$ (peluruhan dapat terjadi dengan massa atomik nuklida induk setidaknya $2m_{(e)}$ lebih besar dari massa atomik nuklida turunan) (Wiyatmo, 2012: 145-148).

e. Peluruhan partikel gamma atau γ

Peluruhan partikel gamma terjadi karena energi dalam inti berlebih sehingga akan ada pemancaran energi kinetik dan radiasi elektromagnetik atau gamma (Wiyatmo, 2012:172). Peluruhan ini tidak menyebabkan perubahan nomor massa maupun nomor atom. Peluruhan partikel gamma dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.9 Peluruhan Partikel Gamma (Beiser, 2003: 421)

Peluruhan partikel gamma atau γ dapat dituliskan secara persamaan (2.18) sebagai berikut :



Inti atom yang mengalami tereksitasi dapat memancarkan foton. Pada prosesnya menuju ke tingkat energi dasar, inti melepas energi dalam bentuk radiasi foton sinar

partikel gamma. Sinar partikel gamma memiliki rentang energi 0,1 MeV – 10 MeV yang menandakan ciri khas atau karakteristik selisih energi antar keadaan-keadaan inti. Energi-energi tersebut bersesuaian dengan Panjang gelombang dengan rentang $10^4 \text{ fm} - 100 \text{ fm}$ (Wiyatmo, 2012: 172).

Sifat – sifat Peluruhan partikel gamma atau γ yaitu :

- 1) Daya ionisasi lebih kecil daripada partikel alfa (α) atau beta (β)
- 2) Daya tembus lebih jauh daripada partikel alfa (α) atau beta (β)
- 3) Proses peluruhan dalam keadaan tereksitasi yang dipancarkan oleh nuklida (inti atom) dengan panjang gelombang 0,005 Å sampai 0,5 Å
- 4) Partikel gamma (γ) tidak memiliki muatan sehingga tidak dibelokkan ketika melewati medan listrik atau medan magnet.

2.5.2 Deret Radioaktif

Inti atom yang tidak stabil secara langsung akan menjadi inti atom yang stabil disebut peluruhan radioaktif. Inti radioaktif meluruh untuk mencapai kestabilan inti. Setiap inti atom mempunyai karakteristik yang tersendiri sehingga akan mengalami jenis peluruhan yang berbeda. Beberapa inti atom tidak selalu meluruh dan menghasilkan inti anak stabil. Seringkali inti anak juga tidak stabil, sehingga meluruh perlahan sampai mencapai inti yang stabil. Ada beberapa atom yang berasal dari alam maupun buatan manusia.

Unsur radioaktif yang terdapat di alam merupakan bagian dari empat deret radioaktif. Setiap 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 ciri khas tersendiri misalnya deret Torium jumlah setiap nomor massa nuklida habis dibagi 4 sehingga massa berlaku $4n$. Daftar deret radioaktif tersebut disajikan pada Tabel 2.2 Deret Radioaktif berikut:

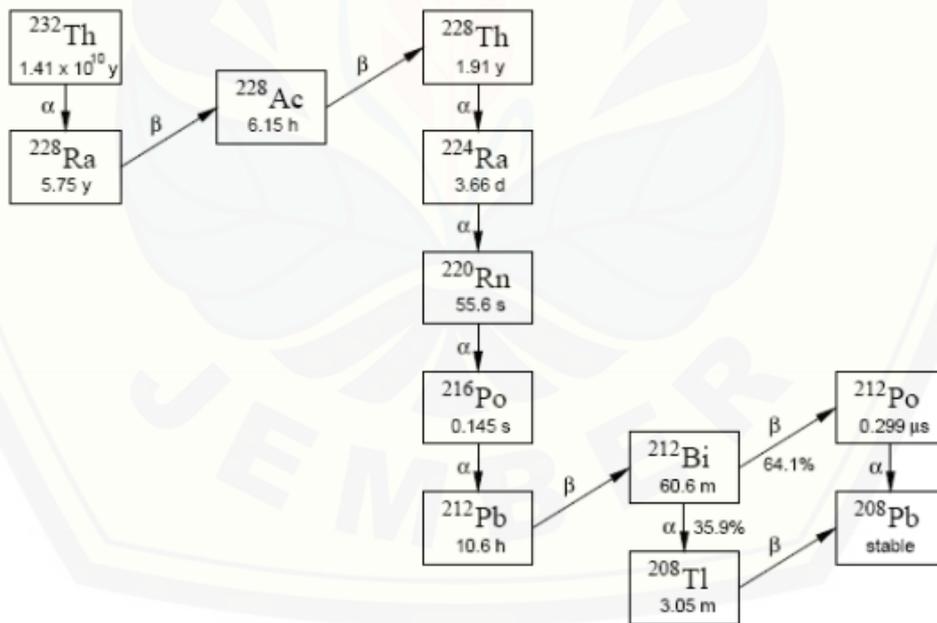
Tabel 2.2 Deret Radioaktif

Nomor Massa	Nama Deret	Nuklida Induk	Umur Paruh (tahun)	Produk akhir
4n	Thorium	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \times 10^{10}$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
4n+1	Neptunium	$^{237}_{92}\text{Np}$	$2,25 \times 10^6$	$^{209}_{83}\text{Bi}$
4n+2	Uranium	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,51 \times 10^9$	$^{206}_{82}\text{Pb}$
4n+3	Aktinium	$^{235}_{92}\text{U}$	707×10^8	$^{207}_{82}\text{Pb}$

(Sutarto, 2015:64)

a. Deret Thorium

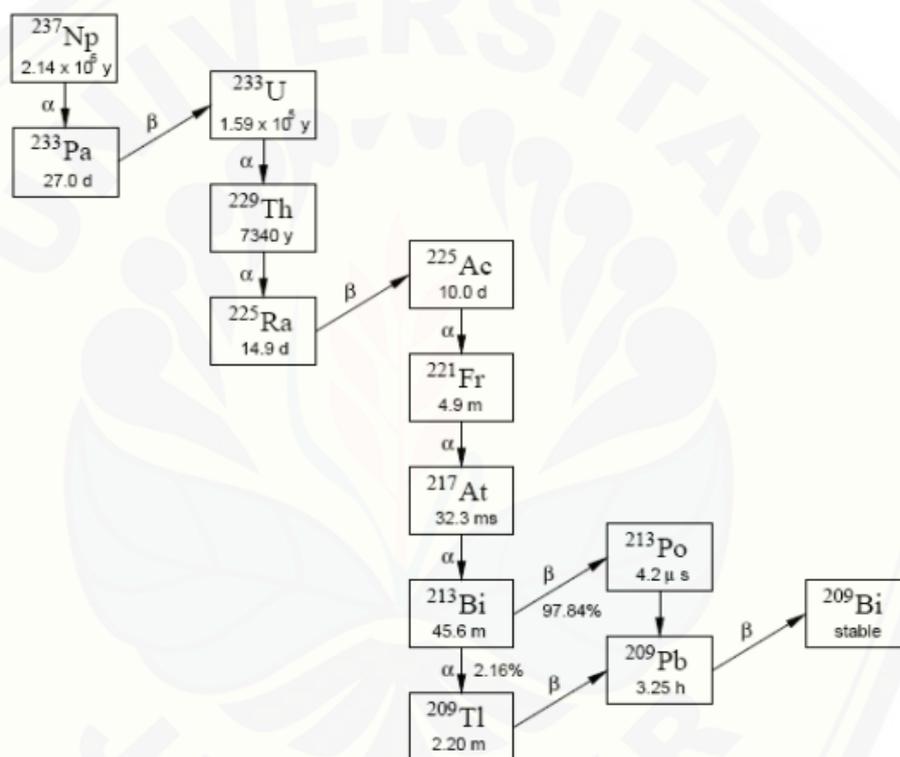
Thorium-232 merupakan unsur radioaktif alam yang mempunyai atom tidak stabil kemudian meluruh dengan stabil sampai menghasilkan produk Timbal-208. Dalam deret thorium -232 terjadi proses peluruhan sebanyak 12 yaitu 7 peluruhan alfa (α) dan 6 peluruhan beta (β), setiap nomor massa A nuklida pada deret thorium habis dibagi 4 sehingga massa berlaku 4n. Gambar (2.10) berikut adalah deret Thorium-232.



Gambar 2.10 Deret Thorium (IAEA, 2010:2)

b. Deret Neptunium

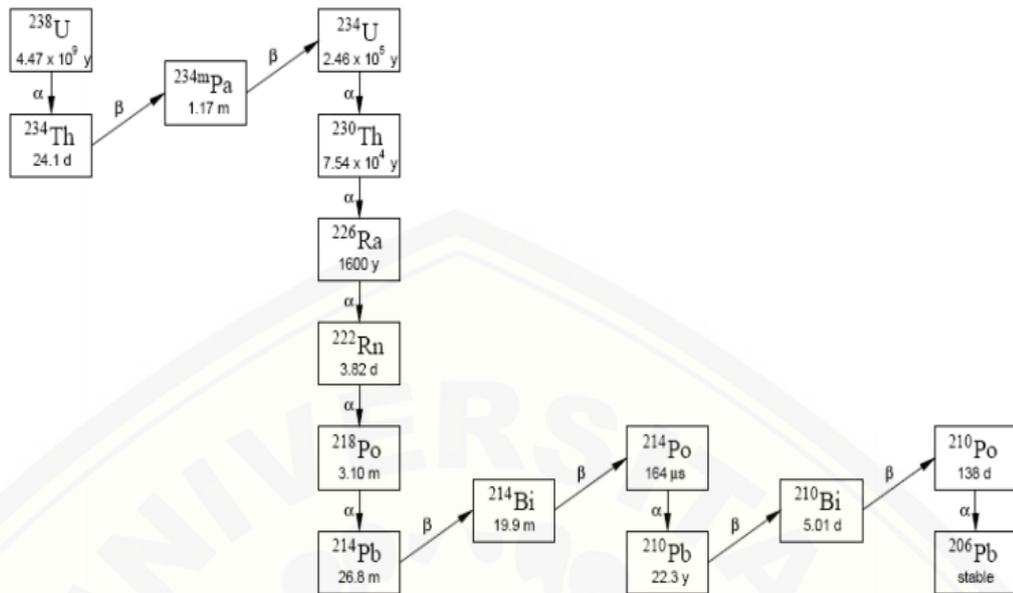
Neptunium-237 adalah unsur radioaktif alam yang memiliki atom tidak stabil kemudian akan melakukan proses meluruh menjadi inti stabil dengan produk bismut-209. Dalam deret neptunium-237 terjadi 13 proses peluruhan, yaitu 8 peluruhan alfa (α) dan 5 peluruhan beta (β). Setiap nomor massa A nuklida pada deret neptunium habis dibagi 4 dan sisa 1 sehingga nomor massa dapat dituliskan $4n+1$. Berikut Gambar (2.11) merupakan deret Neptunium.



Gambar 2.11 Deret Neptunium (IAEA, 2010:2)

c. Deret Uranium

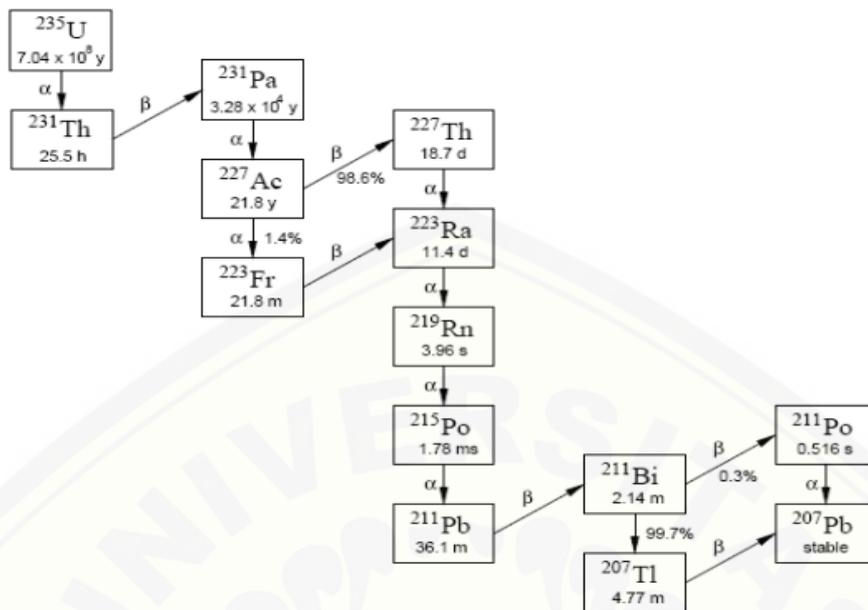
Uranium-238 salah satu radioaktif alam yang memiliki inti atom tidak stabil kemudian melakukan peluruhan sehingga menghasilkan produk timbal-206. Peluruhan alami deret uranium-238, nomor massa A nuklida akan meluruh sebesar $4n+2$, dengan setiap nomor massa pada deret habis dibagi 4 dan sisa 2. Uranium mengalami 14 proses peluruhan yaitu 8 peluruhan alfa (α) dan 6 peluruhan beta (β). Berikut Gambar (2.12) adalah deret Uranium



Gambar 2.12 Deret Uranium (IAEA, 2010:2)

d. Deret Aktinium

Aktinium merupakan deret radioaktif buatan manusia dengan menggunakan uranium-235. Produk hasil peluruhan inti yang tidak stabil meluruh menjadi inti stabil pada timbal-207. Pada deret aktinium terdapat 14 proses tahapan yaitu 14 proses peluruhan yaitu 9 peluruhan alfa (α) dan 5 peluruhan beta (β). Setiap nomor massa A nuklida habis dibagi 4 dan sisa 3 sehingga dinamakan $4n+3$. Berikut Gambar (2.13) adalah deret Aktinium dengan menggunakan Uranium-235.



Gambar 2.13 Deret Aktinium (IAEA, 2010:2)

2.6 Metode Tetes Cairan

Model tetes cairan dikemukakan oleh Von Wieszacker pada tahun 1935 dengan mendapati bahwa sifat-sifat inti berhubungan dengan ukuran, massa, dan energi ikat yang hampir mirip dengan di dalam tetes cairan. Dalam tetes cairan terdapat interaksi yang kuat antara sesama nukleon. Kerapatan tetes cairan yaitu konstan, jumlah partikel sebanding dengan di dalam cairan, penguapan energi berbanding lurus dengan massa atau jumlah partikel yang membentuk tetesan (Gautreau *et al*, 2006: 180). Tates cairan yang tidak berputar tanpa adanya medan eksternal (medan gravitasi) lainnya akan menyesuaikan tempat (bentuknya) untuk meminalkan energinya. Bentuk bulat dan meminimalkan energi tegangan permukaan positif. Jika cairan yang volumenya diperkecil (dimampatkan), maka kerapatannya konstan, tidak bergantung pada jari-jari R dan diperoleh $R \propto n^{1/3}$, dengan n adalah jumlah molekul dalam tetesan, dimana volume proporsional dengan jumlah penyusun berasal dari gaya nuklir yang menstabilkan sistem ikatan yang terisolasi (Takigawa and Washiyama, 2017:42). Setiap molekul (kecuali satu yakni di dalam/di dekat permukaan) terikat pada tetesan dengan energi α , ini merupakan energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan molekul dari dalam tetesan

dan karena gaya antara molekul. Gaya – gaya ini biasanya dapat diabaikan pada jarak antar molekul yang lebar, dapat tarik-menarik pada pemisahan yang sebanding dengan ukuran molekul dan menjadi sangat tolak-menolak pada pemisahan yang lebih dekat. Mengambil nol energi ketika semua molekul dipisahkan oleh jarak yang jauh, persamaan (2.2) energi dari tetesan adalah

$$-an + 4\pi R^2 T \quad (2.19)$$

dengan keterangan T merupakan tegangan permukaan cairan atau diubah dalam energi ikat tetesan E_B sebagai fungsi n , sehingga persamaan (2.20) :

$$E_B = an - \beta n^{2/3} \quad (2.20)$$

dimana β berisi semua konstanta dari efek permukaan kecuali ketergantungan pada n . Efek permukaan ini dimisalkan mirip dengan tetes cairan, nukleon pada nukleor kurang rapat sehingga masih ada celah partikel didekatnya untuk berinteraksi, diharapkan penurunan energi ikat inti dengan meningkatnya jumlah nukleon di permukaan (Wong and Kalelkar, 1990:139). Jika tetesan membawa muatan q , terdapat efek tambahan karena energi potensial mekanik dari distribusi muatan dan energi elektrostatis (Cottingham *et al*, 2001:43). Jika muatan terdistribusi secara merata di permukaan, lalu energi coulomb adalah $\frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 R}$, jika itu terdistribusi secara merata diseluruh tetesan maka energi coulomb sebesar $\frac{3q^2}{20\pi\epsilon_0 R}$. Energi ini mengurangi energi ikat, yang dimana menjadi persamaan (2.21) :

$$E_B = an - \beta n^{2/3} - \gamma \frac{q^2}{n^{1/3}} \quad (2.21)$$

dimana γ berisi semua efek coulomb kecuali ketergantungan pada q dan n . Tetes cairan dapat diilustrasikan dengan sebuah atom yang dapat dianggap bahwa pertama inti atom berbentuk bulat. Kedua nukleon-nukleon dalam inti hampir mirip dengan molekul-molekul pada tetesan, yakni terdapat gaya tarik pada jarak dekat yang menaik nukleon-nukleon bersama, dan gaya tolak pada jarak lebih dekat yang dapat menghentikan nukleon-nukleon menjadi satu dengan lainnya. Dan ketiga kerapatan inti adalah konstan. Dengan ilustasikan tersebut dapat ditarik persamaan (2.22) energi ikat inti E_B dengan perumpamaan sederhana dengan mengubah $n \rightarrow A$ dan $q \rightarrow Z$:

$$E_B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad (2.22)$$

dimana a_v , a_s , dan a_c sekarang nilainya tetap (konstan) dengan kasus ini, untuk volume a_v , untuk efek permukaan a_s , dan untuk efek coulomb a_c . Persamaan (2.22) ini tidak memenuhi ketentuan dikarenakan untuk A tetap dan nukleus dengan $Z = 0$ memiliki energi pengikat terbesar. Pada peluruhan beta ditemukan bahwa proses ini mengubah neutron menjadi proton atau mengikat proton menjadi neutron. Peristiwa perubahan ini dengan pengurangan energi. Jika persamaan (2.22) benar, maka inti dengan $Z \neq 0$ akan berubah sehingga $Z \rightarrow 0$. Hal itu tidak terjadi, sehingga perlu adanya menambahkan efek mekanika kuantum (WilliamS, 1991: 56-57). Jika ada sebuah inti mengandung lebih banyak proton daripada neutron (atau sebaliknya) $Z \neq N$, maka energi dan massa yang berkaitan akan bertambah disebabkan karena adanya asas larangan pauli (Gautreau *et al*, 2006: 181). Oleh karena itu perlu mengemukakan efek yang mengaruhi energi ikat inti untuk $Z \neq N$, yaitu efek asimetri :

$$-a_a \frac{(Z-N)^2}{A} = -a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} \quad (2.23)$$

Persamaan ini ditambahkan ke dalam persamaan energi ikat (2.22).

Efek yang selanjutnya yaitu efek pasangan. Hal ini menjelaskan fakta bahwa ditemukan secara eksperimental, dua neutron atau dua proton selalu terikat lebih kuat daripada satu proton dan satu neutron, yakni seperti pasangan nukleon. Untuk inti A ganjil (Z genap, N ganjil atau Z ganjil, N genap) $\delta(Z, A) = 0$. Untuk A genap ada dua hal yang harus diperhatikan: (1) Z ganjil, N ganjil, (2) Z genap, N genap. Energi ikat akan lebih besar untuk Z genap- N genap daripada Z ganjil- N ganjil, sehingga $\delta(Z, A) = +a_p/A^{1/2}$ untuk inti Z genap- N genap, dan $\delta(Z, A) = -a_p/A^{1/2}$ untuk Z ganjil- N ganjil, maka persamaan (2.24) energi ikat diperoleh :

$$E_B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1} \pm \delta(Z, A) \quad (2.24)$$

Menurut William (1991), Tetapan koefisien di persamaan (2.24) diperoleh dari data eksperimen nilainya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} a_v &= 15,56 \text{ MeV} ; & a_c &= 0,697 \text{ MeV} ; \\ a_s &= 17,23 \text{ MeV} ; & a_a &= 23,285 \text{ MeV} ; \end{aligned}$$

$$a_p = 12 \text{ MeV}$$

Dengan keterangan dimana a_v untuk koefisien volume, a_s untuk koefisien permukaan, a_c untuk koefisien coulomb, a_a untuk koefisien asimetri, dan a_p untuk koefisien pasangan. Nilai- nilai koefisien di atas untuk inti sedang dan berat. Untuk inti ringan ($A < 20$) tidak dimasukkan karena tidak ada kurva halus energi pengikatan terhadap nomor massa A atau nomor atom Z karena efek dari pentupan shell (Williams, 1991: 57-60).

2.7 Matlab

Matlab merupakan singkatan dari *Matrices Laboratory* yang berfungsi sebagai perangkat lunak untuk komputasi teknis dan saintifik yang dikembangkan oleh MathWorks (Sahyar, 2016). Matlab sebagai bahasa pemrograman memungkinkan untuk membuat matriks, pemplotan fungsi dan data, implementasi algoritma, pembuatan antar muka pengguna, dan pengantarmukaan dalam bahasa pemrograman (Sahyar, 2016). Matlab juga sebagai visualisasi yang menawarkan banyak kemampuan untuk menyelesaikan berbagai persoalan atau kasus yang berkaitan langsung dengan keilmuan matematika seperti bidang fisika, rekayasa teknik, stastistika, komputasi, dan modelling (Marwan, 2017).

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis Penelitian ini adalah penelitian pemodelan. Pemodelan merupakan suatu tahapan dalam membuat model dari suatu sistem yang nyata (Law dan Kelton, 1991). Selain itu Menurut Altiok dan Melamed (2007) pemodelan adalah suatu pola umum yang digunakan menganalisis sistem yang kompleks dengan tujuan memberikan prediksi ukuran kinerja sistem yang menarik. Pola ini menciptakan representasi yang sederhana dari suatu sistem yang diteliti. Pada penelitian ini menggunakan model tetes cairan yang dikemukakan oleh Von Wieszacker 1935 dalam buku Williams (1991).

3.2 Tempat, dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium fisika lanjut Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Jember pada semester ganjil tahun ajaran 2019 – 2020.

3.3 Definisi Operasional Variabel

3.3.1 Variabel Bebas

Unsur radioaktif adalah unsur yang memiliki karakteristik tidak stabil karena mempunyai banyak proton dan neutron di dalam inti atom. Unsur radioaktif yang digunakan ialah isotop thorium. Inti atom unsur thorium ini merupakan inti berat yang tidak stabil dan akan mengalami peluruhan untuk menacapai stabil dengan memancarkan sianar radioaktif. Unsur radiaaktif isotop thorium dalam tabel periodik mempunyai atom > 83 dengan tingkat energi tidak berada pada keadaan dasar dan perbandingan jumlah proton dan neutron tidak seimbang.

3.3.2 Variabel Terikat

a. Energi Ikat Inti

Energi ikat inti adalah energi yang dibebaskan ketika penyusunan inti dari nukleon yang terpisah atau energi yang dibutuhkan untuk memisahkannya menjadi

proton dan neutron (Krane, 1999: 420). Energi ikat inti dapat diperoleh dengan mengurangi energi diam nukleon pembentuk dengan energi diam inti yang terbentuk. Energi ikat inti per nukleon didapat dari energi ikat total inti dengan jumlah nukleon proton dan neutron dalam inti atau energi rata-rata yang dibutuhkan untuk menghilangkan per nukleon.

b. Energi Disintegrasi

Energi disintegrasi merupakan energi yang dibebaskan pada saat proton, neutron, deuteron atau zarah alfa ditangkah inti atau disebut proses peluruhan. Pada hal ini terdapat energi disintegrasi partikel alfa dan beta yang masing-masing mempunyai energi yang berbeda.

3.3.3 Variabel Kontrol

a. Thorium-232

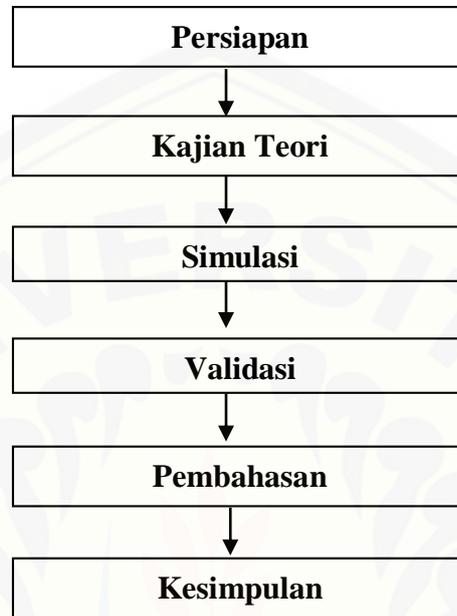
Thorium-232 adalah salah satu unsur radioaktif yang berasal dari alam yang mempunyai proton atau nomor atom 90 dan memiliki massa 232 terletak pada deret aktinida 7 pada tabel periodik. Thorium-232 mempunyai inti tidak stabil dan meluruh menjadi stabil dengan produk timbal-208. Meluruhnya thorium-232 dikenal dengan deret radioaktif thorium-232. Peluruhan berantai deret thorium-232 terjadi proses peluruhan sebanyak 12 yaitu 7 peluruhan alfa (α) dan 6 peluruhan beta (β).

b. Metode tetes cairan

Metode Tetes Cairan merupakan salah satu penyelesaian dengan sifat-sifat inti berhubungan dengan massa, ukuran, dan energi ikat serta model yang menganggap bahwa suatu inti diumpamakan sebagai tetes cairan. Energi ikat inti E_B model tetes cairan adalah jumlah dari berbagai energi yaitu energi volume, energi coulomb, energi permukaan, energi asimetri, dan energi pasangan, dengan masing-masing energi terpengaruh pada bilangan massa (A) dan muatan atau nomor inti (Z)

3.4 Langkah Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian simulasi dengan diagram alir sebagai berikut:

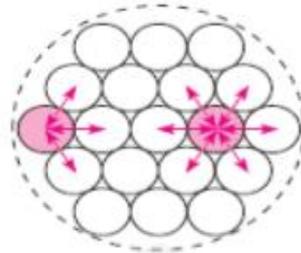


Gambar 3.1 Bagan Langkah-langkah Penelitian

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

a. Persiapan

Langkah pertama penelitian mempersiapkan bahan-bahan untuk dijadikan informasi dengan mencari literatur jurnal, buku, dan referensi lainnya untuk menambah pengetahuan dan pemahaman tentang simulasi kestabilan deret thorium-232 menggunakan metode tetes cairan. Variabel unsur radioaktif untuk menentukan energi ikat inti dan energi ikat per nukleon unsur-unsur pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan dan energi disintegrasi pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan. Model tetes cairan dapat dilihat pada Gambar 3.2 :



Gambar 3.2 Model Tetes Cairan (Krane, 1992: 424)

Model ini diilustrasikan dengan menganggap inti sebagai tetesan cairan, tetesan cairan menguapkan energi yang dibutuhkan sebanding dengan jumlah molekul di dalam cairan tersebut yang berarti energi ikatnya sebanding dengan jumlah molekul yang sebanding dengan jumlah molekul yang terkandung pada cairan tersebut. Suku pertama yaitu $a_v A$ dengan keterangan volume. Kemudian energi pada volume dikoreksi dengan menyatakan bahwa nukleon-nukleon yang terdapat pada permukaan inti kurang terikat dibanding dengan nukleon yang di terletak di dalam. Koreksi ini sebanding dengan luas permukaan inti tersebut, dengan menghasilkan koreksi $a_s A^{2/3}$. Adanya proton dalam inti akan menyebabkan energi ikat berkurang, karena dalam inti ada gaya coulomb antar proton yang bersifat tolak – menolak. Hal itu perlu adanya koreksi akibat gaya coulomb antar proton yakni $a_c Z (Z - 1) A^{-1/3}$ yang besarnya berpengaruh dari jumlah proton yang berinteraksi (Gautreau *et al*, 2006). Energi ikat dapat diperbaiki dengan memasukkan variabel dua efek yang sebenarnya tidak cocok dengan model tetes cairan namun bisa diterangkan dengan model yang menghasilkan tingkat energi. Salah satu faktor penyebabnya dikarenakan jumlah proton di dalam inti melebihi jumlah neutron ataupun sebaliknya, hal ini berarti tingkat energi yang lebih tinggi harus terisi, sedangkan ini tidak terjadi jika Z dan N sama atau menghasilkan koreksi asimetri $a_a (A - 2Z)^2 A^{-1}$. Selanjutnya efek kedua terjadi karena kecenderungan terjadi pasangan proton dan neutron, sehingga inti genap-genap merupakan inti termantap, lalu mempunyai energi ikat lebih tinggi daripada yang diharapkan. Inti yang berada dipuncak dalam kurva empiris energi ikat nukleon seperti ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, dan ${}^{12}_6\text{C}$. Pada kondisi lain, inti ganjil-ganjil memiliki proton dan neutron yang tak berpasangan serta memiliki energi ikat yang rendah (Gautreau *et al*, 2006). Energi pasangan bernilai positif untuk inti genap-genap atau genap-ganjil

dan bernilai negatif untuk ganjil-ganjil dan berubah terhadap A menurut $A^{-\frac{1}{2}}$, sehingga menghasilkan koreksi energi pasangan $a_p A^{-\frac{1}{2}}$ (Gautreau *et al*, 2006). Maka persamaan (3.1) energi ikat menggunakan model tetes cairan yang dikemukakan oleh Von Wieszacker 1935 dalam buku Williams (1991):

$$E_B = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1} \pm \delta(Z, A) \quad (3.1)$$

Pada keterangan sebelumnya a_p bernilai -12 MeV untuk inti dengan proton (nomor atom) Z dan nomor massa A bernilai genap dan a_p bernilai $+12 \text{ MeV}$ untuk inti dengan nomor atom dan massa ganjil.

b. Kajian Teori

Menerapkan dan memadukan teori yang sudah ada di berbagai buku literatur mengenai peluruhan zat radioaktif. Teori yang dikembangkan pengkajian simulasi deret thorium-232 menggunakan model tetes cairan. Langkah pertama dengan menentukan energi ikat dan energi disintegrasi pada proses peluruhan radioaktif.

c. Pengcodingan dan Simulasi Perhitungan dengan MATLAB

Melakukan perhitungan untuk mendapatkan energi ikat inti energi ikat inti, energi ikat per nukleon unsur-unsur dan energi disintegrasi pada proses peluruhan deret radioaktif thorium-232. Pada thorium-232 dengan induk nomor atom 90 dan bermassa 232 pada deret thorium dengan waktu paruh $1,39 \times 10^{10}$ tahun menggunakan metode tetes cairan dengan bantuan matlab R2013a dengan 5 tahap yaitu:

1. Persamaan energi ikat model tetes cairan

$$E_B = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1} \pm \delta(Z, A) \quad (3.2)$$

keterangan :

A = nomor massa

Z = nomor atom

$a_v = 15,56 \text{ MeV}$ (koefisien volume)

$a_s = 17,23 \text{ MeV}$ (koefisien permukaan)

$a_c = 0,697 \text{ MeV}$ (koefisien coulomb)

$$a_a = 23,285 \text{ MeV} \text{ (koefisien asimetri)}$$

$$a_p = 12 \text{ MeV} \text{ (koefisien pasangan)}$$

$$\delta(Z, A) = +a_p A^{-\frac{1}{2}}, \text{ untuk } Z \text{ genap-N genap}$$

$$\delta(Z, A) = 0 \text{ untuk } A \text{ ganjil (} Z \text{ genap-N ganjil atau } Z \text{ ganjil-N genap)}$$

$$\delta(Z, A) = -a_p A^{-\frac{1}{2}}, \text{ untuk } Z \text{ ganjil-N ganjil}$$

Persamaan energi ikat inti per nukleon :

$$E_b = \frac{E_B}{A} \quad (3.3)$$

2. Persamaan energi yang dilepas pada peluruhan (energi disintegrasi) deret thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan :

1. Peluruhan alpa

$$Q_1 = E_{B(Y)} + E_{B(\alpha)} - E_{B(X)} \quad (3.4)$$

2. Peluruhan beta

$$Q_1 = E_{B(Y)} - E_{B(X)} + m_n - m_H \quad (3.5)$$

Keterangan :

$$E_{B(Y)} = a_v A_Y - a_s A_Y^{\frac{2}{3}} - a_c Z_Y^2 A_Y^{-\frac{1}{3}} - a_a (A_Y - 2Z_Y)^2 A^{-1} \pm \delta(Z_Y, A_Y)$$

$$E_{B(\alpha)} = a_v A_\alpha - a_s A_\alpha^{\frac{2}{3}} - a_c Z_\alpha^2 A_\alpha^{-\frac{1}{3}} - a_a (A_\alpha - 2Z_\alpha)^2 A^{-1} \pm \delta(Z_\alpha, A_\alpha)$$

$$E_{B(X)} = a_v A_X - a_s A_X^{\frac{2}{3}} - a_c Z_X^2 A_X^{-\frac{1}{3}} - a_a (A_X - 2Z_X)^2 A^{-1} \pm \delta(Z_X, A_X)$$

$E_{B(Y)}$ = energi ikat nuklida turunan

$E_{B(\alpha)}$ = energi ikat partikel alfa

$E_{B(X)}$ = energi ikat nuklida induk

m_n = massa neutron (939,573 MeV)

m_H = massa atom hidrogen (938,791 MeV)

3. Coding Matlab

a. Energi Ikat Inti (Persamaan (3.2))

av=15.56;

as=17.23;

ac=0.697;

```

aa=23.285;
ap=12;
A=input('nomor massa, A=');
Z=input('nomor atom, Z= ');
if A~=228 && A~=232
    N=A-Z;
    Ev=av.*A;%energi volume
    Es=as.*(A).^2./3;%energi permukaan
    Z=ac.*(Z.^2);
    Ax=A.^1./3;
    Ec=Z./Ax;%energi coulomb
    Ea=aa.*((A-2.*Z).^2)./A;%energi asimetri
    if floor(A/2)==(A/2) && floor(Z/2)==(Z/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A/2)<(A/2) && floor(Z/2)<(Z/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
    Ep=ap.*A.^(-1./2);%energi pasangan
    EB=Ev-Es-Ec-Ea+Ep; %energi ikat

```

b. Energi Ikat Per Nukleon (Persamaan (3.3))

```
Eb=EB./A; %energi ikat per nukleon
```

c. Energi Disintegrasi

```
E $\alpha$ =28.295; %MeV
```

```
mn=939.573; %massa neutron (MeV)
```

```
mH=938.791; %massa atom Hidrogen (MeV)
```

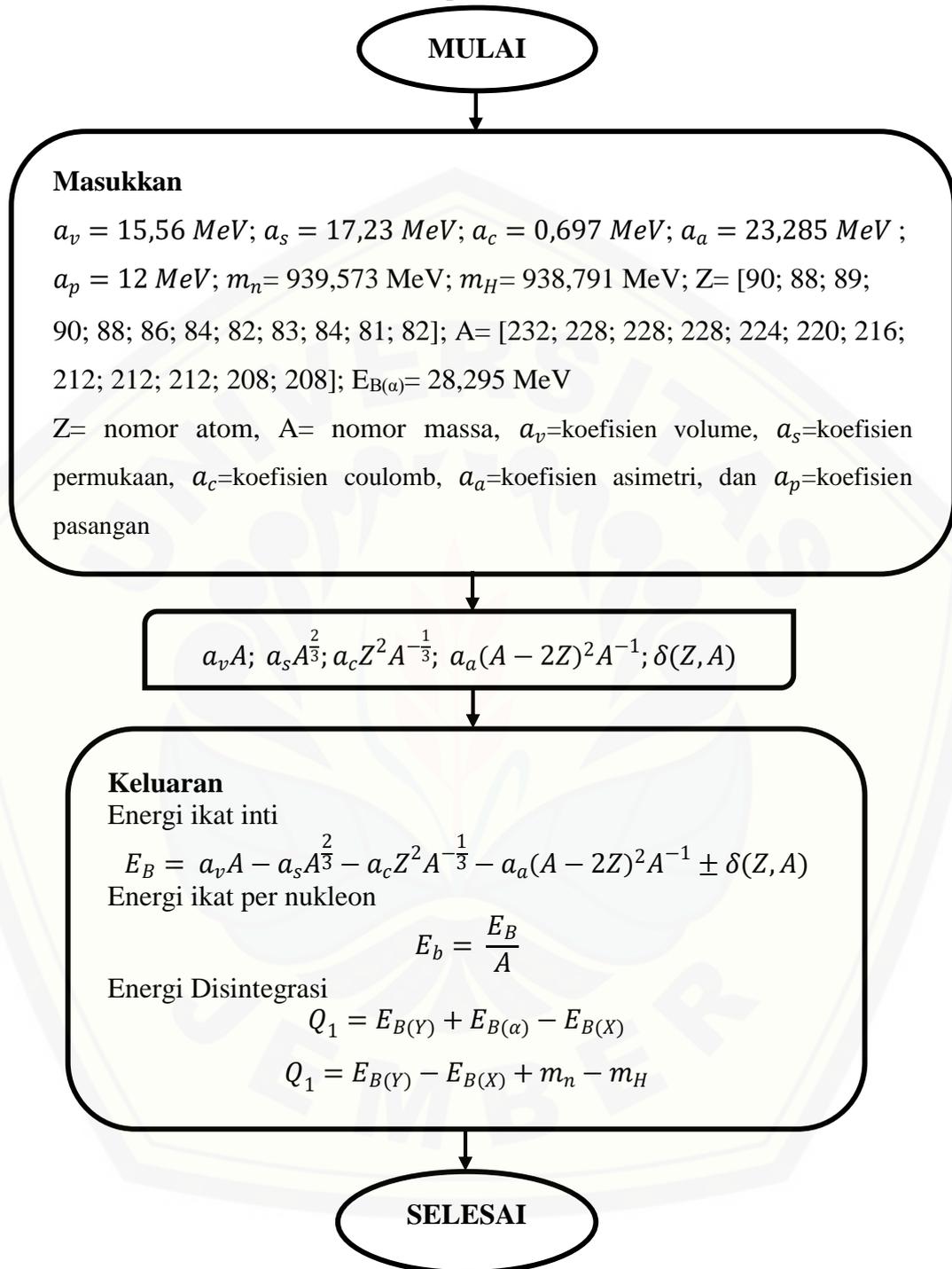
1. Peluruhan Alfa (Persamaan (3.4))

```
 $Q_1 = E_{B(Y)} + E_{B(\alpha)} - E_{B(X)}$ ; %energi disintegrasi partikel alfa
```

2. Peluruhan Beta (persamaan (3.5))

```
 $Q_1 = E_{B(Y)} - E_{B(X)} + mN - mH$ ; %energi disintegrasi partikel beta
```

3. Flowchart Simulasi kestabilan inti peluruhan zat radioaktif



Gambar 3.3 Flowchart Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif

d. Validasi

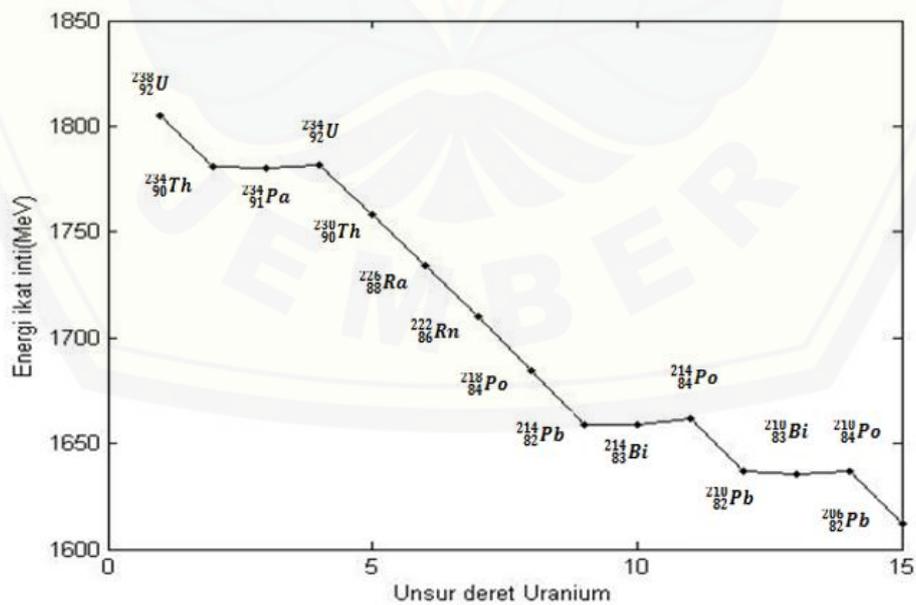
Validasi dilakukan dengan menggunakan data dan grafik yang telah diperoleh dari penelitian sebelumnya yang sesuai dan relevan dengan pokok bahasan deret

radioaktif dengan metode tetes cairan. Data dan grafik yang digunakan memvalidasi hasil penelitian ini berasal dari penelitian Mardiana (2019) yang disajikan dalam Tabel 3.1, Gambar 3.4, dan Gambar 3.5 berikut :

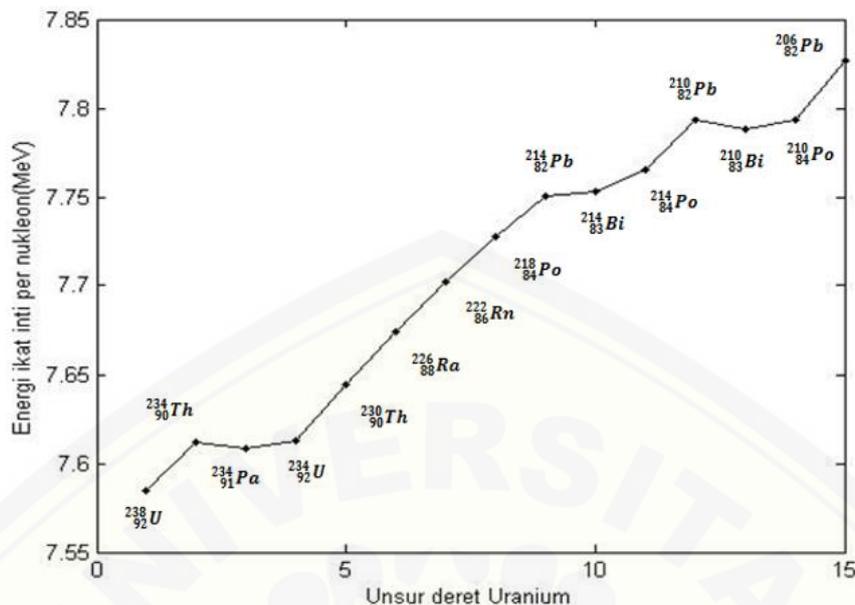
Tabel 3.1 Hasil Perhitungan Energi Ikat Inti, Energi Ikat Per Nukleon, Dan Energi Disintegrasi Pada Peluruhan Deret Uranium Dengan Model Tetes Cairan

Nuklida	Jenis Peluruhan	E_B (MeV)	E_B/A (MeV)	Q (MeV)
$^{238}_{92}U$	$^4_2\alpha$	1805,1	7,5845	4,3977
$^{234}_{90}Th$	$^0_{-1}\beta$	1781,2027	7,612	-0,1637
$^{234}_{88}Pa$	$^0_{-1}\beta$	1780,257	7,6079	1,9518
$^{234}_{92}U$	$^4_2\alpha$	1781,4268	7,6129	5,1037
$^{234}_{90}Th$	$^4_2\alpha$	1758,2355	7,6445	4,435
$^{226}_{88}Ra$	$^4_2\alpha$	1734,3755	7,6742	3,7547
$^{222}_{86}Rn$	$^4_2\alpha$	1709,8352	7,702	3,0621
$^{218}_{84}Po$	$^4_2\alpha$	1684,6023	7,7275	2,3563
$^{214}_{82}Pb$	$^0_{-1}\beta$	1658,6636	7,7508	1,2408
$^{214}_{83}Bi$	$^0_{-1}\beta$	1659,1224	7,7529	3,4185
$^{214}_{84}Po$	$^4_2\alpha$	1661,7589	7,7652	3,1266
$^{210}_{82}Pb$	$^0_{-1}\beta$	1636,5905	7,7933	-0,2639
$^{210}_{83}Bi$	$^0_{-1}\beta$	1635,5446	7,7883	1,9268
$^{210}_{84}Po$	$^4_2\alpha$	1636,6894	7,7938	3,8803
$^{206}_{82}Pb$	Stabil	1612,2747	7,8266	Stabil

(Mardiana, 2019: 30)



Gambar 3.4 Hubungan Energi Ikat Inti dengan Unsur Deret Uranium



Gambar 3.5 Hubungan Energi Ikat Inti Per Nukleon dengan Unsur Deret Uranium

e. Pembahasan

Melakukan pembahasan secara runtut dan sistematis peluruhan zar radioaktif thorium-232.

f. Kesimpulan

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

3.5 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)
- b. Bahasa pemrograman komputer MATLAB versi R2013a yaitu :
 1. Energi ikat inti dan energi ikat per nukleon unsur-unsur pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan metode tetes cairan.
 2. Jumlah energi disintegrasi pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan metode tetes cairan.
 3. Metode Tetes Cairan untuk mencari energi ikat inti dan energi disintegrasi.

3.6 Teknik Penyajian

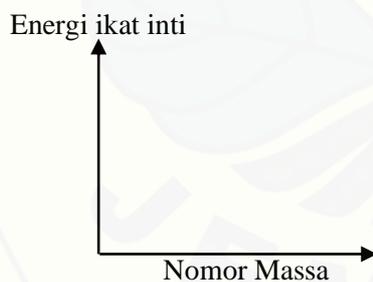
3.6.1 Data pengamatan hasil simulasi

Data pengamatan hasil simulasi merupakan hasil perhitungan besar energi ikat setelah mengalami peluruhan deret radioaktif thorium-232.

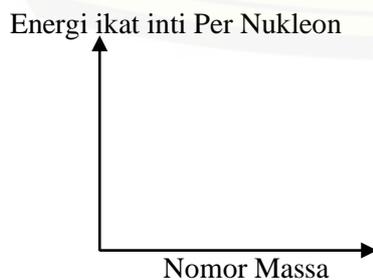
Tabel 3.2 Hasil pengamatan peluruhan inti deret radioaktif thorium-232

Nuklida	Jenis Peluruhan	E_v	E_s	E_c	E_a	E_p	E_B	E_b	Q_1
$^{232}_{90}Th$	$^4_2\alpha$								
$^{228}_{88}Ra$	$^0_{-1}\beta$								
$^{228}_{89}Ac$	$^0_{-1}\beta$								
$^{228}_{90}Th$	$^4_2\alpha$								
$^{224}_{88}Ra$	$^4_2\alpha$								
$^{220}_{86}Rn$	$^4_2\alpha$								
$^{216}_{84}Po$	$^4_2\alpha$								
$^{212}_{82}Pb$	$^0_{-1}\beta$								
$^{212}_{83}Bi$	$^4_2\alpha$								
$^{212}_{84}Po$	$^4_2\alpha$								
$^{208}_{81}Ti$	$^0_{-1}\beta$								
$^{208}_{82}Pb$	Stabil								

3.6.2 Data hasil visualisasi gambar



Gambar 3.6 Grafik hubungan energi ikat inti terhadap nomor massa deret peluruhan thorium



Gambar 3.7 Grafik hubungan energi ikat inti Per Nukleon terhadap nomor massa deret peluruhan thorium

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan mengenai Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif Deret Thorium-232 dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan (*The Liquid Drop Model*), maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

- a. Unsur pada deret thorium merupakan deret peluruhan dari unsur induk ${}^{232}_{90}\text{Th}$ yang memiliki inti atom tidak stabil dan kemudian meluruh secara spontan menjadi inti atom stabil pada unsur ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Kestabilan inti atom pada deret radioaktif thorium dengan perbandingan rasio N/P pada unsur ${}^{232}_{90}\text{Th}$ sampai dengan unsur ${}^{208}_{81}\text{Ti}$ dan ${}^{212}_{84}\text{Po}$ memiliki $N/P > 1.5$, dimana bahwa inti berat dikatakan stabil apabila rata-rata jumlah neutron satu setengah kali jumlah protonnya, sehingga unsur-unsur tersebut akan meluruh secara spontan dengan memancarkan partikel alfa atau mengurangi proporsi neutron menjadi proton dan electron dalam inti. Kemudian unsur ${}^{212}_{84}\text{Po}$ memiliki jumlah neutron satu setengah jumlah protonnya apabila dilihat dari N/P dapat dikatakan unsur stabil, namun ${}^{212}_{84}\text{Po}$ bukan unsur stabil karena inti tersebut dengan $Z > 83$ dan $A > 209$ akan mengalami peluruhan secara spontan menjadi inti yang lebih ringan atau stabil dengan memancarkan partikel alfa sehingga diperoleh inti turunan atau anak ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ yang merupakan unsur dengan inti atom yang stabil. Selain itu untuk mendapatkan inti atom yang stabil dapat juga dengan unsur ${}^{208}_{81}\text{Ti}$, dimana unsur ${}^{208}_{81}\text{Ti}$ dapat dikatakan stabil dengan $Z < 83$, namun unsur ${}^{208}_{81}\text{Ti}$ bukan unsur stabil karena inti memiliki jumlah N/P 1.58 dan $N < 126$ akan mengalami peluruhan secara spontan menjadi inti yang lebih ringan dengan memancarkan peluruhan partikel beta sehingga diperoleh inti anak ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ yang merupakan unsur dengan inti atom yang stabil. Unsur ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ merupakan inti atom yang stabil dengan perbandingan rasio N/P 1.5 dan memiliki $Z < 83$, $A < 126$, $N < 206$.

- b. Energi ikat inti deret thorium dengan pendekatan model tetes cairan memiliki energi ikat inti yang terbesar pada nuklida induk adalah unsur ${}^{232}_{90}\text{Th}$ sebesar 1769.9705 MeV dan energi ikat inti terkecil pada nuklida turunannya adalah unsur ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ sebesar 1624.721 MeV, terlihat bahwa energi ikat inti pada deret thorium mengalami grafik penurunan secara linear. Pada peluruhan beta energi ikat mengalami kenaikan dan penurunan sedikit sedangkan peluruhan alfa mengalami penurunan yang cukup besar, sedangkan energi ikat per nukleon berbanding terbalik dengan energi ikat inti, unsur ${}^{232}_{90}\text{Th}$ sebagai nuklida induk memiliki energi ikat inti per nukleon terkecil yaitu 7.6292 MeV dan unsur ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ memiliki energi ikat inti terbesar yaitu 7.8112 MeV, sehingga diperoleh grafik yang mengalami kenaikan linear. Pada peluruhan alfa energi ikat inti per nukleon mengalami kenaikan yang cukup besar dan peluruhan beta mengalami penurunan sedikit. Jika semakin stabil suatu unsur pada deret thorium maka energi ikat inti akan semakin kecil dan energi per nukleon semakin besar.
- c. Energi disintegrasi (Q_1) unsur pada deret thorium semuanya berharga positif sehingga unsur-unsur deret thorium memenuhi syarat $Q_1 > 0$. Energi disintegrasi pada peluruhan alfa memiliki nilai energi disintegrasi yang lebih besar daripada energi disintegrasi pada peluruhan beta.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, diharapkan peneliti selanjutnya dapat mengkaji dan mensimulasikan pada proses peluruhan unsur radioaktif dengan menggunakan model inti yang berbeda misalnya model subkulit dan tidak hanya menggunakan deret radioaktif saja melainkan menggunakan unsur radioaktif yang berbeda sehingga dapat menambah pustaka sebagai materi fisika khususnya fisika inti pada materi kestabilan inti atom.

DAFTAR PUSTAKA

- Agency, I. A. E. 2010. *Analytical Methodology for the Determination of Radium Isotopes in Environmental Samples*. Vienna: IAEA Vienna International Centre.
- Akbar , A. M. 2013. Kajian Stabilitas Inti Super Berat Dengan Nomor Atom 110 sampai Dengan 200 Menggunakan Model Inti Tetes Cairan. Dalam: *Skripsi*. Bogor : Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor.
- Altioek, T. dan B. Melamed. 2007. *Simulation Modeling and Analysis with Arena*. London: Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Beiser, A. 1999. *Concepts Of Modern Physics*. Sixth penyunt. New York: McGraw-Hill.
- Benedict M., T. H. Pigford, dan H. W. Levi. 1981. *Nuclear Chemical Second Edition, Fuel*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Chang, R. 2004. *Kimia Dasar: Konsep-konsep Inti*. Edisi ke-3 penyunt. Jakarta: Erlangga.
- Cottingham, W. N. dan D. A. Greenwood. 2001. *An Introduction to Nuclear Physics Second Edition*. Cambridge:Cambridge University Press.
- Gautreau, R., dan William, S. 2006. *Scaum's Outlines Fisika Modern*. Jakarta: Erlangga.
- Krane, K. 1992. *Fisika Modern*. Cetakan I penyunt. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
- Kolesnikov, N. N. 2016. The Binding Energies And Stability Of Heavy And Superheavy Nuclei, *Moscow University Physics Bulletin*. 71(4): 381-388.
- Law, A. dan D. Kelton. 2014. *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Mardiana, I. 2019. Kajian Kestabilan Inti Unsur-Unsur Pada Proses Peluruhan Zat Radioaktif Dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan. Dalam: *Skripsi*. Jember: Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Unversitas Jember.
- Marwan. 2017. *Belajar Mudah Matlab Beserta Aplikasinya*. Yogyakarta: Andi.

- Sahyar. 2016. *Algoritma & Pemrograman Menggunakan MATLAB (Matlab Laboratory)*. Jakarta: Kencana.
- Silberberg, , M. S. 2009. *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change (5th edition)*. New York: McGraw Hill.
- Suhendar, D. 2016. Menentukan Kestabilan Nuklida-nuklida Berdasarkan Massa Inti Per Nukleon. *Chimica et Acta*. 4(2): 60-71.
- Sukarna, I. M. 1997. Kajian Kestabilan Inti Dengan Pendekatan Energi Pengikat. *Cakrawala Pendidikan*. 16(3): 165-175.
- Sukarna, I. M. 2014. *Radiokimia*. I penyunt. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.
- Sutarto. 2015. *Seri Konsep Fisika: Fisika Nuklir dan Partikel*. Jakarta: Erlangga.
- Takigawa, N. dan K. Washiyama. 2017. *Fundamentals of nuclear physics, Fundamentals of Nuclear Physics*. Tokyo: Springer Nature.
- Williams, W. S. C. 1991. *Nuclear and Particle Physics*. New York: Oxford University Press.
- Wiyatmo, Y. 2012. *Fisika Nuklir dalam Telaah Semi-Klasik dan Kuantum*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Wong, S. S. M. dan M. S. Kalelkar. 1990. *Introductory Nuclear Physics*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Lampiran A.

MATRIK PENELITIAN

Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Variabel	Data dan Teknik Pengambilan Data	Metode Penelitian
Simulasi Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif Unsur Thorium-232 Dengan Pendekatan Energi Ikat Inti Model Tetes Cairan (<i>The Liquid Drop Model</i>)	<p>1. Menganalisis Kestabilan inti pada peluruhan zat Radioaktif unsur Neptoenium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan</p> <p>2. Menghitung energi ikat inti dan energi ikat per nukleon unsur-unsur pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan.</p> <p>3. Menghitung energi disintegrasi pada proses</p>	<p>Variabel Bebas :</p> <ul style="list-style-type: none"> Unsur Radioaktif isotop thorium <p>Variabel kontrol :</p> <ul style="list-style-type: none"> Deret Thorium Model tetes cairan <p>Variabel Terikat :</p> <ul style="list-style-type: none"> energi ikat inti dan energi ikat per nukleon unsur-unsur pada proses peluruhan deret radioaktif 	<p>Sumber Data :</p> <p>Sumber rujukan dari buku fisika modern, buku fisika nuklir, jurnal dan penelitian terkait</p> <p>Teknik Pengambilan Data :</p> <p>Menggunakan persamaan energi ikat inti dan energi ikat per nukleon dengan model tetes cairan dan persamaan disintegrasi energi ikat dengan model tetes cairan,</p>	<p>Jenis penelitian :</p> <p>Penelitian Pemodelan</p> <p>Teknik Analisis Data :</p> <p>Persamaan Energi ikat model tetes cairan :</p> $E_B = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1} \pm \delta(Z, A)$ <p>keterangan :</p> <p>A = nomor massa Z = nomor atom $a_v = 15,56 \text{ MeV}$ $a_s = 17,23 \text{ MeV}$ $a_c = 0,697 \text{ MeV}$</p>

	<p>peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan</p>	<p>Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan</p> <ul style="list-style-type: none"> energi disintegrasi pada proses peluruhan deret radioaktif Thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan 	<p>persamaan tersebut dimasukkan dalam bahasa pemrograman MATLAB</p>	<p>$a_a = 23,285 \text{ MeV}$ $a_p = 12 \text{ MeV}$ $\delta(Z, A) = +a_p A^{-\frac{1}{2}}$, untuk Z genap-N genap $\delta(Z, A) = 0$ untuk A ganjil (Z genap-N ganjil atau Z ganjil-N genap) $\delta(Z, A) = -a_p A^{-\frac{1}{2}}$, untuk Z ganjil-N ganjil</p> <p>Persamaan energi ikat inti per nukleon :</p> $E_b = \frac{E_B}{A}$ <p>Persamaan energi yang dilepas pada peluruhan (energi disintegrasi) deret thorium dengan pendekatan energi ikat model tetes cairan :</p> <ul style="list-style-type: none"> peluruhan alpa $Q_1 = E_{B(Y)} + E_{B(\alpha)} - E_{B(X)}$
--	--	---	--	--

			<ul style="list-style-type: none"> • peluruhan beta $Q_1 = E_{B(Y)} - E_{B(X)} + m_n - m_H$ <p>Keterangan :</p> <p>$E_{B(Y)}$ = energi ikat inti nuklida turunan</p> <p>$E_{B(\alpha)}$ = energi ikat partikel alpa</p> <p>$E_{B(X)}$ = energi ikat nuklida induk</p> <p>m_n = massa neutron (939,573 MeV)</p> <p>m_H = massa atom hidrogen (938,791 MeV)</p>
--	--	--	---

Lampiran B.

Coding Matlab

Persamaan Energi Ikat Model Tetes Cairan

Persamaan

$$E_B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a (A - 2Z)^2 A^{-1} \pm \delta(Z, A)$$

Data

Nomor Massa (A)

Nomor Atom (Z)

Eb

Ep

Keterangan

$a_v = 15,56 \text{ MeV}$ (Koefisien Volume)

$a_s = 17,23 \text{ MeV}$ (Koefisien Permukaan)

$a_c = 0,697 \text{ MeV}$ (Koefisien Coulumb)

$a_a = 23,285 \text{ MeV}$ (Koefisien Asimetri)

$a_p = 12 \text{ MeV}$ (Koefisien Pasangan)

$$\delta(Z, A) = \begin{cases} +a_p A^{-1/2} & , \text{ Untuk } Z \text{ genap-N genap} \\ 0 & , \text{ Untuk } A \text{ ganjil (} Z \text{ ganjil atau } Z \text{ ganjil-N ganjil)} \\ -a_p A^{-1/2} & , \text{ Untuk } Z \text{ ganjil-N ganjil} \end{cases}$$

```

clc
clear
close

disp('=====')
disp('=====')
disp('=====')
disp('=====Kestabilan Inti Peluruhan Zat
Radioaktif=====')
disp('=====')
disp('=====')
disp('=====')
av=15.56;
as=17.23;
ac=0.697;
aa=23.285;
ap=12;
A1=input('nomor massa, A=');
Z1=input('nomor atom, Z= ');
if A1~=228 && A1~=232
    N1=A1-Z1;
    Ev=av.*A1;%energi volume
    Es=as.*(A1).^(2./3);%energi permukaan
    Z2=ac.*(Z1.^2);
    Ax=A1.^(1./3);
    Ec=Z2./Ax;%energi coulomb
    Ea=aa.*((A1-2.*Z1).^2)./A1;%energi asimetri
        if floor(A1/2)==(A1/2) && floor(Z1/2)==(Z1/2) ;

```

```

        ap=12;
    elseif floor(A1/2)<(A1/2) && floor(Z1/2)<(Z1/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
    Ep=ap.*A1.^(-1./2);%energi pasangan
    E1=Ev-Es-Ec-Ea+Ep; %energi ikat
    e1=E1./A1; %energi ikat per nukleon
    disp('Bukan inti deret Torium')
    disp(['Energi ikat inti atom = ',num2str(E1),' Mev']);
    disp(['Energi ikat per nekleon atom = ',num2str(e1),' Mev']);
else
    disp('Inti Atom Stabil')
    %untuk A1
    Ev_1=av.*A1;%energi volume
    Es_1=as.*(A1).^(2./3);%energi permukaan
    Z2_1=ac.*(Z1.^2);
    Ax_1=A1.^(1./3);
    Ec_1=Z2_1./Ax_1;%energi coulomb
    Ea_1=aa.*((A1-2.*Z1).^2)./A1;%energi asimetri
    if floor(A1/2)==(A1/2) && floor(Z1/2)==(Z1/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A1/2)<(A1/2) && floor(Z1/2)<(Z1/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
    Ep_1=ap.*A1.^(-1./2);%energi pasangan
    E1_1=Ev_1-Es_1-Ec_1-Ea_1+Ep_1; %energi ikat
    e1_1=E1_1./A1; %energi ikat per nukleon
    %untuk A2
    A2=A1-4;
    Z2=Z1-2;
    Ev_2=av.*A2;%energi volume
    Es_2=as.*(A2).^(2./3);%energi permukaan
    Z2_2=ac.*(Z2.^2);
    Ax_2=A2.^(1./3);
    Ec_2=Z2_2./Ax_2;%energi coulomb
    Ea_2=aa.*((A2-2.*Z2).^2)./A2;%energi asimetri
    if floor(A2/2)==(A2/2) && floor(Z2/2)==(Z2/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A2/2)<(A2/2) && floor(Z2/2)<(Z2/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
    Ep_2=ap.*A2.^(-1./2);%energi pasangan
    E1_2=Ev_2-Es_2-Ec_2-Ea_2+Ep_2; %energi ikat
    e1_2=E1_2./A2; %energi ikat per nukleon
    %untuk A3
    A3=A1-4;
    Z3=Z2+1;
    Ev_3=av.*A3;%energi volume
    Es_3=as.*(A3).^(2./3);%energi permukaan
    Z2_3=ac.*(Z3.^2);

```

```

Ax_3=A3.^(1./3);
Ec_3=Z2_3./Ax_3;%energi coulomb
Ea_3=aa.*((A3-2.*Z3).^2)./A3;%energi asimetri
    if floor(A3/2)==(A3/2) && floor(Z3/2)==(Z3/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A3/2)<(A3/2) && floor(Z3/2)<(Z3/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_3=ap.*A3.^(-1./2);%energi pasangan
E1_3=Ev_3-Es_3-Ec_3-Ea_3+Ep_3; %energi Ikat
e1_3=E1_3./A3; %energi ikat per nukleon
%untuk A4
A4=A1-4;
Z4=Z3+1;
Ev_4=av.*A4;%energi volume
Es_4=as.*(A4).^(2./3);%energi permukaan
Z2_4=ac.*(Z4.^2);
Ax_4=A4.^(1./3);
Ec_4=Z2_4./Ax_4;%energi coulomb

Ea_4=aa.*((A4-2.*Z4).^2)./A4;%energi asimetri
    if floor(A4/2)==(A4/2) && floor(Z4/2)==(Z4/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A4/2)<(A4/2) && floor(Z4/2)<(Z4/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_4=ap.*A4.^(-1./2);%energi pasangan
E1_4=Ev_4-Es_4-Ec_4-Ea_4+Ep_4; %energi Ikat
e1_4=E1_4./A4; %energi ikat per nukleon
%untuk A5
A5=A4-4;
Z5=Z4-2;
Ev_5=av.*A5;%energi volume
Es_5=as.*(A5).^(2./3);%energi permukaan
Z2_5=ac.*(Z5.^2);
Ax_5=A5.^(1./3);
Ec_5=Z2_5./Ax_5;%energi coulomb
Ea_5=aa.*((A5-2.*Z5).^2)./A5;%energi asimetri
    if floor(A5/2)==(A5/2) && floor(Z5/2)==(Z5/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A5/2)<(A5/2) && floor(Z5/2)<(Z5/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_5=ap.*A5.^(-1./2);%energi pasangan
E1_5=Ev_5-Es_5-Ec_5-Ea_5+Ep_5; %energi Ikat
e1_5=E1_5./A5; %energi ikat per nukleon
%untuk A6
A6=A5-4;
Z6=Z5-2;
Ev_6=av.*A6;%energi volume

```

```

Es_6=as.*(A6).^(2./3);%energi permukaan
Z2_6=ac.*(Z6.^2);
Ax_6=A6.^(1./3);
Ec_6=Z2_6./Ax_6;%energi coulomb
Ea_6=aa.*((A6-2.*Z6).^2)./A6;%energi asimetri
    if floor(A6/2)==(A6/2) && floor(Z6/2)==(Z6/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A6/2)<(A6/2) && floor(Z6/2)<(Z6/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_6=ap.*A6.^(-1./2);%energi pasangan
E1_6=Ev_6-Es_6-Ec_6-Ea_6+Ep_6; %energi ikat
e1_6=E1_6./A6; %energi ikat per nukleon
%untuk A7
A7=A6-4;
Z7=Z6-2;
Ev_7=av.*A7;%energi volume
Es_7=as.*(A7).^(2./3);%energi permukaan
Z2_7=ac.*(Z7.^2);
Ax_7=A7.^(1./3);
Ec_7=Z2_7./Ax_7;%energi coulomb
Ea_7=aa.*((A7-2.*Z7).^2)./A7;%energi asimetri
    if floor(A7/2)==(A7/2) && floor(Z7/2)==(Z7/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A7/2)<(A7/2) && floor(Z7/2)<(Z7/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_7=ap.*A7.^(-1./2);%energi pasangan
E1_7=Ev_7-Es_7-Ec_7-Ea_7+Ep_7; %energi ikat
e1_7=E1_7./A7; %energi ikat per nukleon
%untuk A8
A8=A7-4;
Z8=Z7-2;
Ev_8=av.*A8;%energi volume
Es_8=as.*(A8).^(2./3);%energi permukaan
Z2_8=ac.*(Z8.^2);
Ax_8=A8.^(1./3);
Ec_8=Z2_8./Ax_8;%energi coulomb
Ea_8=aa.*((A8-2.*Z8).^2)./A8;%energi asimetri
    if floor(A8/2)==(A8/2) && floor(Z8/2)==(Z8/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A8/2)<(A8/2) && floor(Z8/2)<(Z8/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_8=ap.*A8.^(-1./2);%energi pasangan
E1_8=Ev_8-Es_8-Ec_8-Ea_8+Ep_8; %energi ikat
e1_8=E1_8./A8; %energi ikat per nukleon
%untuk A9
A9=A8;
Z9=Z8+1;

```

```

Ev_9=av.*A9;%energi volume
Es_9=as.*(A9).^(2./3);%energi permukaan
Z2_9=ac.*(Z9.^2);
Ax_9=A9.^(1./3);
Ec_9=Z2_9./Ax_9;%energi coulomb
Ea_9=aa.*((A9-2.*Z9).^2)./A9;%energi asimetri
    if floor(A9/2)==(A9/2) && floor(Z9/2)==(Z9/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A9/2)<(A9/2) && floor(Z9/2)<(Z9/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_9=ap.*A9.^(-1./2);%energi pasangan
E1_9=Ev_9-Es_9-Ec_9-Ea_9+Ep_9; %energi Ikat
e1_9=E1_9./A9; %energi ikat per nukleon
%untuk A10
A10=A9;
Z10=Z9+1;
Ev_10=av.*A10;%energi volume
Es_10=as.*(A10).^(2./3);%energi permukaan
Z2_10=ac.*(Z10.^2);
Ax_10=A10.^(1./3);
Ec_10=Z2_10./Ax_10;%energi coulomb
Ea_10=aa.*((A10-2.*Z10).^2)./A10;%energi asimetri
    if floor(A10/2)==(A10/2) && floor(Z10/2)==(Z10/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A10/2)<(A10/2) && floor(Z10/2)<(Z10/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_10=ap.*A10.^(-1./2);%energi pasangan
E1_10=Ev_10-Es_10-Ec_10-Ea_10+Ep_10; %energi Ikat
e1_10=E1_10./A10; %energi ikat per nukleon
%untuk A11
A11=A9;
Z11=Z10-1;
Ev_11=av.*A11;%energi volume
Es_11=as.*(A11).^(2./3);%energi permukaan
Z2_11=ac.*(Z11.^2);
Ax_11=A11.^(1./3);
Ec_11=Z2_11./Ax_11;%energi coulomb
Ea_11=aa.*((A11-2.*Z11).^2)./A11;%energi asimetri
    if floor(A11/2)==(A11/2) && floor(Z11/2)==(Z11/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A11/2)<(A11/2) && floor(Z11/2)<(Z11/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_11=ap.*A11.^(-1./2);%energi pasangan
E1_11=Ev_11-Es_11-Ec_11-Ea_11+Ep_11; %energi Ikat
e1_11=E1_11./A11; %energi ikat per nukleon
%untuk A12
A12=A11-4;

```

```

Z12=Z11-2;
Ev_12=av.*A12;%energi volume
Es_12=as.*(A12).^(2./3);%energi permukaan
Z2_12=ac.*(Z12.^2);
Ax_12=A12.^(1./3);
Ec_12=Z2_12./Ax_12;%energi coulomb
Ea_12=aa.*((A12-2.*Z12).^2)./A12;%energi asimetri
    if floor(A12/2)==(A12/2) && floor(Z12/2)==(Z12/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A12/2)<(A12/2) && floor(Z12/2)<(Z12/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_12=ap.*A12.^(-1./2);%energi pasangan
E1_12=Ev_12-Es_12-Ec_12-Ea_12+Ep_12; %energi ikat
e1_12=E1_12./A12; %energi ikat per nukleon
%untuk A13
A13=A12;
Z13=Z12+1;
Ev_13=av.*A13;%energi volume
Es_13=as.*(A13).^(2./3);%energi permukaan
Z2_13=ac.*(Z13.^2);
Ax_13=A13.^(1./3);
Ec_13=Z2_13./Ax_13;%energi coulomb
Ea_13=aa.*((A13-2.*Z13).^2)./A13;%energi asimetri
    if floor(A13/2)==(A13/2) && floor(Z13/2)==(Z13/2) ;
        ap=12;
    elseif floor(A13/2)<(A13/2) && floor(Z13/2)<(Z13/2);
        ap =-12;
    else
        ap =0;
    end
Ep_13=ap.*A13.^(-1./2);%energi pasangan
E1_13=Ev_13-Es_13-Ec_13-Ea_13+Ep_13; %energi ikat
e1_13=E1_13./A13; %energi ikat per nukleon
%energi disintegrasi
E1alfa=28.295; %MeV
mn=939.573; %massa neutron (MeV)
mH=938.791; %massa atom Hidrogen (MeV)
Ed_1=E1_2+E1alfa-E1_1; %energi disintegrasi partikel alfa
Ed_2=E1_3-E1_2+mn-mH; %energi disintegrasi partikel beta
Ed_3=E1_4-E1_3+mn-mH; %energi disintegrasi partikel beta
Ed_4=E1_5+E1alfa-E1_4; %energi disintegrasi partikel alfa
Ed_5=E1_6+E1alfa-E1_5; %energi disintegrasi partikel alfa
Ed_6=E1_7+E1alfa-E1_6; %energi disintegrasi partikel alfa
Ed_7=E1_8+E1alfa-E1_7; %energi disintegrasi partikel alfa
Ed_8=E1_9-E1_8+mn-mH; %energi disintegrasi partikel beta
Ed_9=E1_10-E1_9+mn-mH; %energi disintegrasi partikel beta
Ed_10=E1_13+E1alfa-E1_10; %energi disintegrasi partikel alfa
Ed_11=E1_9-E1_8+mn-mH; %energi disintegrasi partikel beta
Ed_12=E1_13+E1alfa-E1_12; %energi disintegrasi partikel alfa
Ed_13='Stabil'; %atom stabil
disp('deret Torium')
disp('nomer massa          nomer Atom          energi ikat inti
energi ikat per nukleon          energi disintegrasi');

```

```

        disp([' ', num2str(A1), ' ', num2str(Z1), ' ',
', num2str(E1_1), ' ', num2str(e1_1), ' ',
', num2str(Ed_1)]);
        disp([' ', num2str(A2), ' ', num2str(Z2), ' ',
', num2str(E1_2), ' ', num2str(e1_2), ' ',
', num2str(Ed_2)]);
        disp([' ', num2str(A3), ' ', num2str(Z3), ' ',
', num2str(E1_3), ' ', num2str(e1_3), ' ',
', num2str(Ed_3)]);
        disp([' ', num2str(A4), ' ', num2str(Z4), ' ',
', num2str(E1_4), ' ', num2str(e1_4), ' ',
', num2str(Ed_4)]);
        disp([' ', num2str(A5), ' ', num2str(Z5), ' ',
', num2str(E1_5), ' ', num2str(e1_5), ' ',
', num2str(Ed_5)]);
        disp([' ', num2str(A6), ' ', num2str(Z6), ' ',
', num2str(E1_6), ' ', num2str(e1_6), ' ',
', num2str(Ed_6)]);
        disp([' ', num2str(A7), ' ', num2str(Z7), ' ',
', num2str(E1_7), ' ', num2str(e1_7), ' ',
', num2str(Ed_7)]);
        disp([' ', num2str(A8), ' ', num2str(Z8), ' ',
', num2str(E1_8), ' ', num2str(e1_8), ' ',
', num2str(Ed_8)]);
        disp([' ', num2str(A9), ' ', num2str(Z9), ' ',
', num2str(E1_9), ' ', num2str(e1_9), ' ',
', num2str(Ed_9)]);
        disp([' ', num2str(A10), ' ', num2str(Z10), ' ',
', num2str(E1_10), ' ', num2str(e1_10), ' ',
', num2str(Ed_10)]);
        disp([' ', num2str(A11), ' ', num2str(Z11), ' ',
', num2str(E1_11), ' ', num2str(e1_11), ' ',
', num2str(Ed_11)]);
        disp([' ', num2str(A12), ' ', num2str(Z12), ' ',
', num2str(E1_12), ' ', num2str(e1_12), ' ',
', num2str(Ed_12)]);
        disp([' ', num2str(A13), ' ', num2str(Z13), ' ',
', num2str(E1_13), ' ', num2str(e1_13), ' ',
', num2str(Ed_13)]);
end

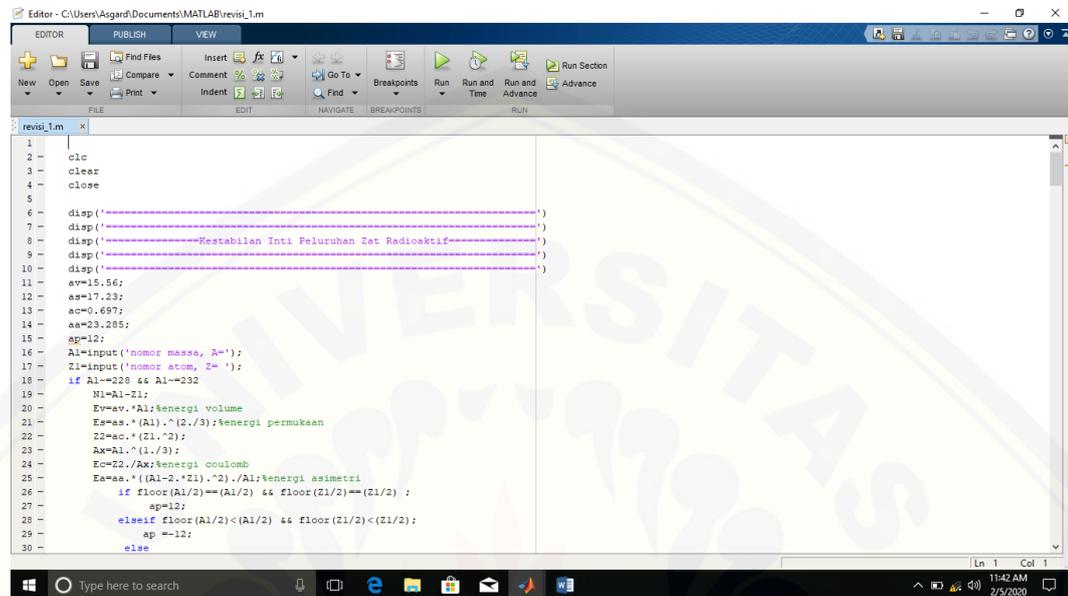
disp('=====')

```

Lampiran C.

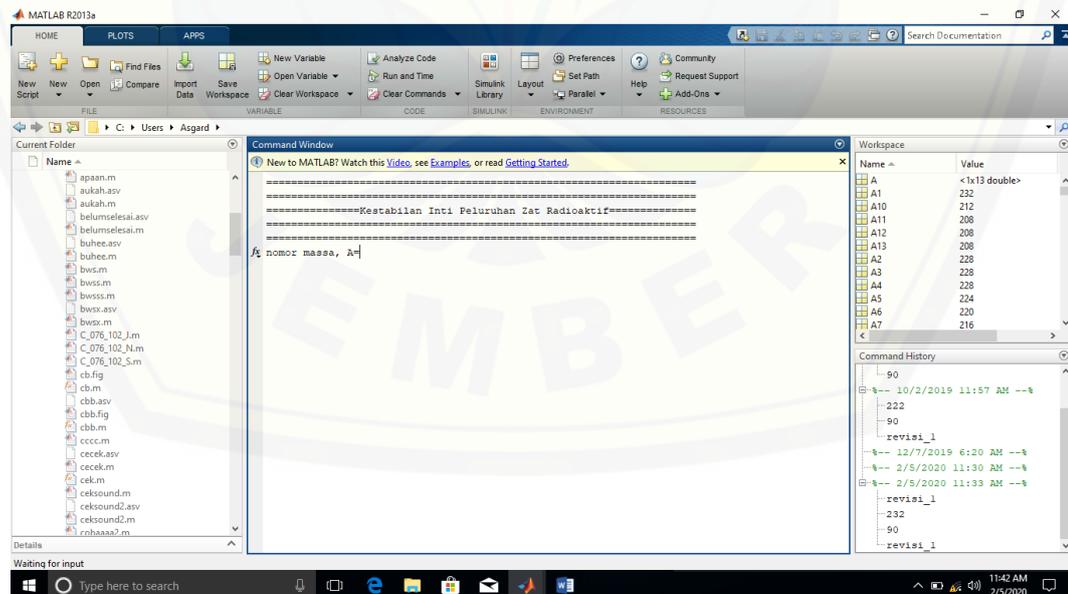
Hasil Penelitian

1. Membuka m.file lalu pilih *Run/run section*



```
1
2 clc
3 clear
4 close
5
6 disp('=====')
7 disp('=====Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif=====')
8 disp('=====')
9 disp('=====')
10 disp('=====')
11 av=15.56;
12 as=17.23;
13 ac=0.697;
14 aa=23.285;
15 ap=12;
16 A1=input('nomor massa, A=');
17 Z1=input('nomor atom, Z= ');
18 if A1==228 && A1==232
19     N1=A1-Z1;
20     Ev=av.*A1;%energi volume
21     Es=aa.*(A1).^2./3;%energi permukaan
22     Z2=ac.*(Z1.^2);
23     Aw=A1.^(1./3);
24     Ec=22./Aw;%energi coulomb
25     Eaaa.*(A1-2.*Z1).^2./A1;%energi asimetri
26     if floor(A1/2)==(A1/2) && floor(Z1/2)==(Z1/2);
27         ap=12;
28     elseif floor(A1/2)<(A1/2) && floor(Z1/2)<(Z1/2);
29         ap=-12;
30     else
```

2. Tampilan simulasi lalu masukkan nomor massa (A) dan nomor atom (Z) pada deret thorium, kemudian tekan *Enter* pada *Keyboard*



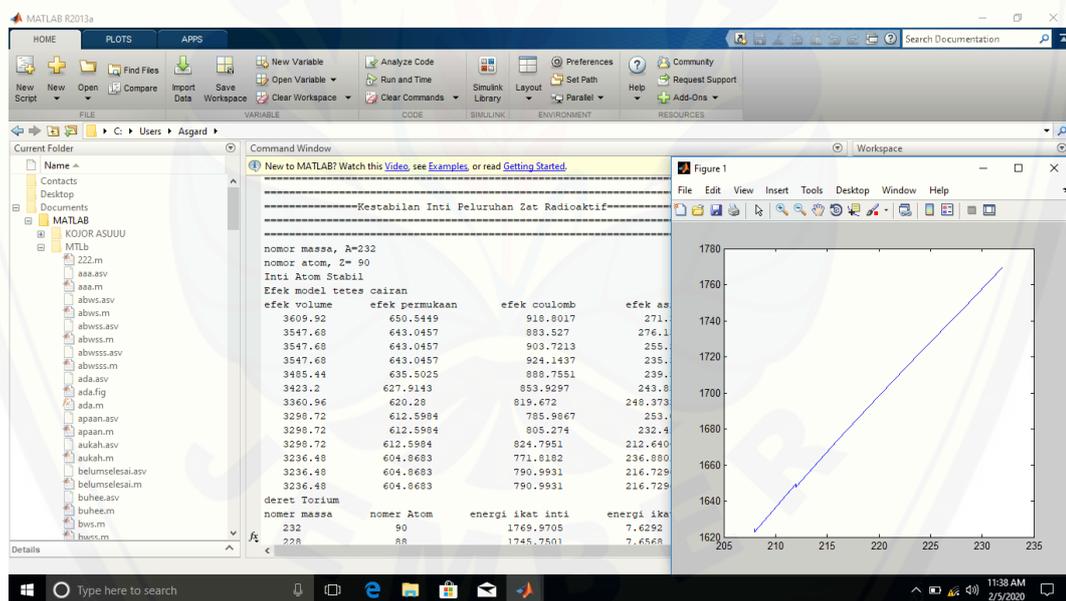
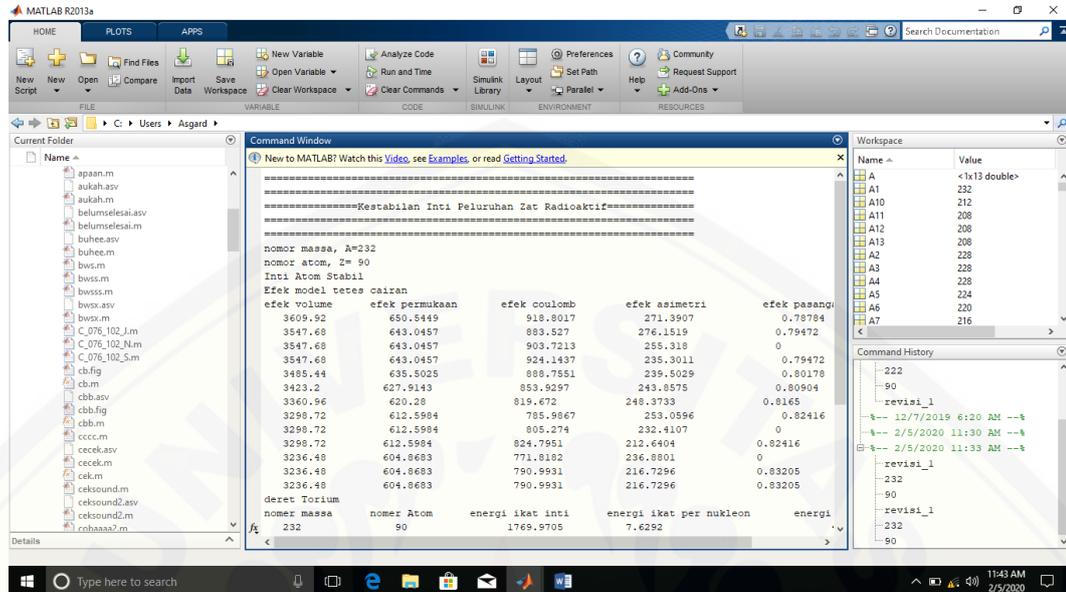
The screenshot shows the MATLAB R2013a interface. The Command Window displays the output of the script, including the title '=====Kestabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif====='. The Workspace window shows the following variables:

Name	Value
A	<1x13 double>
A1	232
A10	212
A11	208
A12	208
A13	208
A2	228
A3	228
A4	228
A5	224
A6	220
A7	216

The Command History window shows the following commands:

```
-- 10/2/2019 11:57 AM -->
-- 222
-- 90
-- 90
revisi_1
-- 12/7/2019 6:20 AM -->
-- 2/5/2020 11:30 AM -->
-- 2/5/2020 11:33 AM -->
revisi_1
-- 232
-- 90
revisi_1
```

3. Hasil Simulasi deret thorium secara otomatis dan grafik energi ikat inti dan energi per nukleon



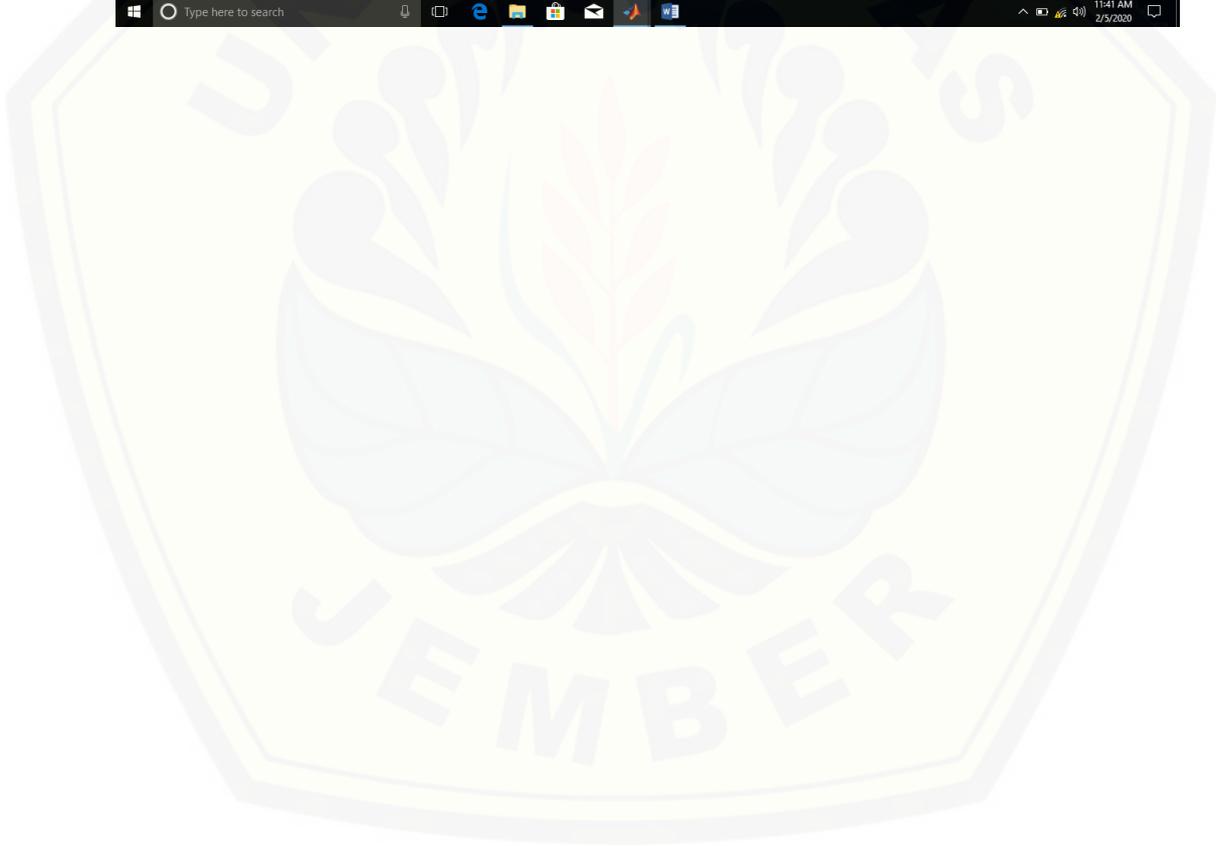
The image shows the MATLAB R2013a software interface. The Command Window displays the following text:

```

=====Restabilan Inti Peluruhan Zat Radioaktif=====
nomor massa, A=232
nomor atom, Z= 90
Inti Atom Stabil
Efek model tetes cairan
efek volume      efek permukaan      efek coulomb      efek asimetri
3609.92           650.5449           918.8017           271.3907
3547.68           643.0457           893.527            276.1519
3547.68           643.0457           903.7213           255.318
3547.68           643.0457           924.1437           235.3011
3485.44           635.5025           888.7551           239.5029
3423.2            627.9143           853.9297           243.8575
3360.96           620.28             819.672            248.3733
3298.72           612.5984           785.9867           253.0596
3298.72           612.5984           805.274            232.4107
3298.72           612.5984           824.7951           212.6404
3236.48           604.8683           771.8182           236.8801
3236.48           604.8683           790.9931           216.7296
3236.48           604.8683           790.9931           216.7296

deret Torium
nomer massa      nomer Atom      energi ikat inti      energi ikat per nu
232              90              1769.9705            7.6292
228              88              1745.7501            7.6568
    
```

The Figure 2 window shows a line plot of the data from the table above. The x-axis represents the mass number (A) from 205 to 235, and the y-axis represents the binding energy per nucleon (MeV) from 7.6 to 7.85. The plot shows a blue line that starts at approximately (208, 7.68), has a small step down at A=212, and then generally decreases with some fluctuations, ending at approximately (232, 7.63).



Lampiran D.

Validasi Penelitian

1. Model tetes Cairan

A	Z	N	av	as	ac	aa	ap(+)	ap(-)	ap(0)
232	90	142	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
228	88	140	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
228	89	139	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
228	90	138	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
224	88	136	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
220	86	134	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
216	84	132	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
212	82	130	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
212	83	129	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
212	84	128	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
208	81	127	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0
208	82	126	15.56	17.23	0.697	23.285	12	-12	0

Ev	Es	Ec	Ea	Ep	EB	Eb	E α	mN	mH	Q1
3609.92	650.5449	918.8017	271.3907	0.787839	1769.971	7.629183	28.295	939.573	938.791	4.074518
3547.68	643.0457	883.527	276.1519	0.794719	1745.75	7.656798	28.295	939.573	938.791	0.626976
3547.68	643.0457	903.7213	255.318	0	1745.595	7.656119	28.295	939.573	938.791	1.171214
3547.68	643.0457	924.1437	235.3011	0.794719	1745.984	7.657826	28.295	939.573	938.791	4.792021
3485.44	635.5025	888.7551	239.5029	0.801784	1722.481	7.689649	28.295	939.573	938.791	4.12128
3423.2	627.9143	853.9297	243.8575	0.80904	1698.308	7.71958	28.295	939.573	938.791	3.438616
3360.96	620.28	819.672	248.3733	0.816497	1673.451	7.747459	28.295	939.573	938.791	2.743289
3298.72	612.5984	785.9867	253.0596	0.824163	1647.899	7.773111	28.295	939.573	938.791	1.319499
3298.72	612.5984	805.274	232.4107	0	1648.437	7.775646	28.295	939.573	938.791	1.855361
3298.72	612.5984	824.7951	212.6404	0.824163	1649.51	7.780709	28.295	939.573	938.791	3.505692
3236.48	604.8683	771.8182	236.8801	0	1622.913	7.802468	28.295	939.573	938.791	2.589653
3236.48	604.8683	790.9931	216.7296	0.83205	1624.721	7.811159	28.295	939.573	938.791	0

Keterangan

A = nomor massa

Z = nomor atom

$a_v = 15,56 \text{ MeV}$ (koefisien volume)

$a_s = 17,23 \text{ MeV}$ (koefisien permukaan)

$a_c = 0,697 \text{ MeV}$ (koefisien coulomb)

$a_a = 23,285 \text{ MeV}$ (koefisien asimetri)

$a_p = 12 \text{ MeV}$ (koefisien pasangan)

E_v = energi volume (MeV)

E_s = energi permukaan (MeV)

E_c = energi coulomb (MeV)

E_a = energi asimetri (MeV)

E_p = energi pasangan (MeV)

E_B = energi ikat inti (MeV)

E_b = energi ikat per nukleon (MeV)

E_α = energi ikat inti alfa (MeV)

Q_1 = energi disintegrasi

m_n = massa neutron (939,573 MeV)

m_H = massa atom hidrogen (938,791 MeV)