

Penemuan Keradioaktifan dan Kestabilan Inti

Drs. I Made Sukarna, MSi.



PENDAHULUAN

Modul 1 ini terdiri atas dua kegiatan belajar. Kegiatan Belajar 1, membahas penemuan keradioaktifan, yang tidak dapat dilepaskan dari penemuan partikel-partikel dasar suatu atom. Berkat penemuan partikel-partikel dasar atom (terutama penemuan elektron), ditemukan pula sinar-X dan dari penemuan sinar-X inilah ditemukan keradioaktifan. Oleh karena penemuan keradioaktifan berkaitan erat dengan penemuan sinar-X, maka pada modul ini akan dibahas terlebih dahulu penemuan sinar-X dan proses terjadinya. Pembahasan sinar-X ini dirasa perlu di samping karena terapannya saat ini sangat luas (foto rontgen, analisis bahan, penentuan struktur kristal, dll), sinar-X juga merupakan gejala sekunder yang terjadi saat interaksi materi dengan sinar-sinar radioaktif. Setelah itu, pada Kegiatan Belajar 2 dibahas kestabilan inti ditinjau dari segi massa inti induk dengan massa inti hasil (turunan), angka banding proton-neutron dalam inti, dan energetika kestabilan inti.

Setelah mempelajari Modul 1 ini diharapkan mahasiswa dapat:

1. menjelaskan proses penemuan unsur radioaktif,
2. mendefinisikan pengertian radioaktivitas,
3. menjelaskan sifat dasar sinar radioaktif,
4. menjelaskan istilah nukleon, nuklida, radionuklida, isotop, isobar, isoton, dan isomer,
5. menjelaskan kestabilan inti,
6. menjelaskan energi pengikat inti,
7. menghitung harga energi pengikat inti suatu nuklida,
8. menghubungkan energi pengikat inti dengan kestabilan inti,
9. menghitung energi yang terlibat dalam keradioaktifan,
10. menghubungkan harga energi dalam keradioaktifan dengan kestabilan inti.

Modul ini dilengkapi dengan rangkuman, latihan, tes formatif, beserta kunci jawabannya. Agar materi di dalam modul ini dapat dikuasai dengan baik, bacalah modul ini secara rinci dan kerjakan latihan soal beserta tes formatif yang ada di dalamnya.

KEGIATAN BELAJAR 1

Penemuan Keradioaktifan

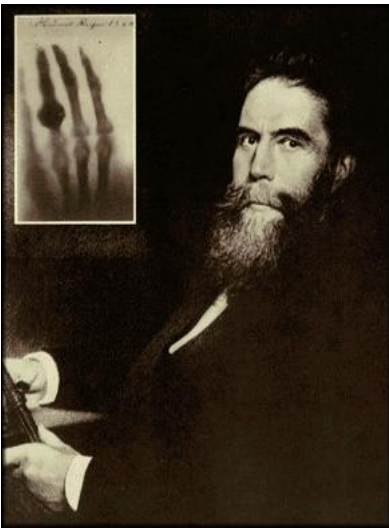
A. PENEMUAN SINAR-X

Percobaan menggunakan tabung sinar katode, menemukan bahwa terjadi pemancaran sinar dari katode ke anode dan sinar itu dikenal sebagai sinar katode. Penyelidikan lebih lanjut tentang massa, muatan sinar itu akhirnya sinar katode itu dikenal sebagai elektron dan semua materi (atom) mengandung elektron. Energi elektron ini sangat lemah dan energinya itu akan habis hanya karena bertabrakan dengan atom-atom gas yang ada dalam tabung sinar katode. Cobalah Anda pelajari kembali penemuan elektron ini dalam Modul Kimia Dasar.

Sinar-X ditemukan oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada 8 November 1895 di Universitas Gwyn Wüitzbung, Jerman. Penemuan tersebut bermula ketika tanpa sengaja ia melihat kilauan sinar yang keluar dari tabung sinar katode, di tempat terjadinya tabrakan antara sinar katoda (elektron) dengan dinding tabung sinar katode. Sinar apakah itu? Apakah sinar itu merupakan sinar katode (elektron) yang dipancarkan oleh katode dan dapat menembus dinding gelas tabung sinar katode? Pertanyaan-pertanyaan itu mendorongnya untuk dilakukan eksperimen lebih lanjut. Pada 8 November 1895, dilakukanlah eksperimen dengan menyimpan tabung sinar katode di dalam kotak kayu hitam dalam kamar gelap. Di luar kotak kayu diletakkan tabir yang dilapisi platinobarium sianida untuk menunjukkan adanya sinar yang keluar dari arah kotak kayu. Tabir platinobarium sianida akan berpendar bila kena sinar. Pada saat tabung dioperasikan ternyata tabir platinobarium sianida berpendar (*berfluoresensi*). Peristiwa ini menunjukkan bahwa telah terjadi sinar yang keluar menembus kotak kayu dan sinar itu pasti berasal dari tabung sinar katode. Sinar itu pasti memiliki energi yang besar karena dapat menembus kotak kayu. Eksperimen ini jelas menunjukkan bahwa sinar itu bukan merupakan sinar katode (elektron) karena sinar katoda (elektron) tidak dapat menembus lebih dari beberapa milimeter udara pada tekanan normal. Pasti telah terjadi suatu jenis radiasi baru, yang tidak tampak, dan mempunyai daya tembus besar (karena dapat menembus kayu). **Jenis radiasi tersebut diberi nama sinar-X**, mungkin karena sifat-sifatnya belum diketahui saat itu. Akhirnya, tidak sampai tahun 1912 ditunjukkan bahwa **sinar-X adalah suatu radiasi elektromagnetik; dengan kata lain**

menyerupai cahaya, dengan energi tinggi (frekuensi lebih tinggi), dan panjang gelombang lebih pendek.

Sinar-X tidak hanya dapat menyebabkan fluoressensi (pendar fluor), tetapi juga dapat menghitamkan film fotografi, bahkan meskipun dibungkus kertas atau disimpan dalam kotak kayu. Ini berarti zat yang tidak tembus cahaya, akan transparan dihadapan sinar-X. Artinya sinar-X itu lebih mudah menembus materi yang rapatannya kecil dibandingkan dengan materi yang rapatannya besar. Daging ditembus sinar-X lebih mudah daripada tulang. Hal inilah yang mendasari Roentgen mencoba menyinari bagian tubuh manusia, yang tidak dapat ditembus oleh sinar biasa, dengan sinar-X dan sinar-X yang menembus dikenakan pada film. Setelah proses pencucian film, maka struktur internal tubuh akan dapat dilihat. Dari penyinaran tangan dengan sinar-X ini, akan didapatkan struktur internal tangan seperti Gambar 1.1.



Gambar 1.1.
Foto diri Rontgen dan Film yang
Menunjukkan Struktur Internal
Tangan

Sifat sinar-X lainnya adalah: mengionkan gas, bergerak dengan lintasan lurus dan tidak dibelokkan oleh medan listrik dan medan magnetik, didifraksikan oleh kristal, dan menghancurkan sel hidup. Sel dengan kecepatan tumbuh taknormal, sangat efektif dihancurkan oleh sinar-X dan hal inilah yang merupakan dasar penggunaan sinar-X sebagai penyembuh sel cancer.

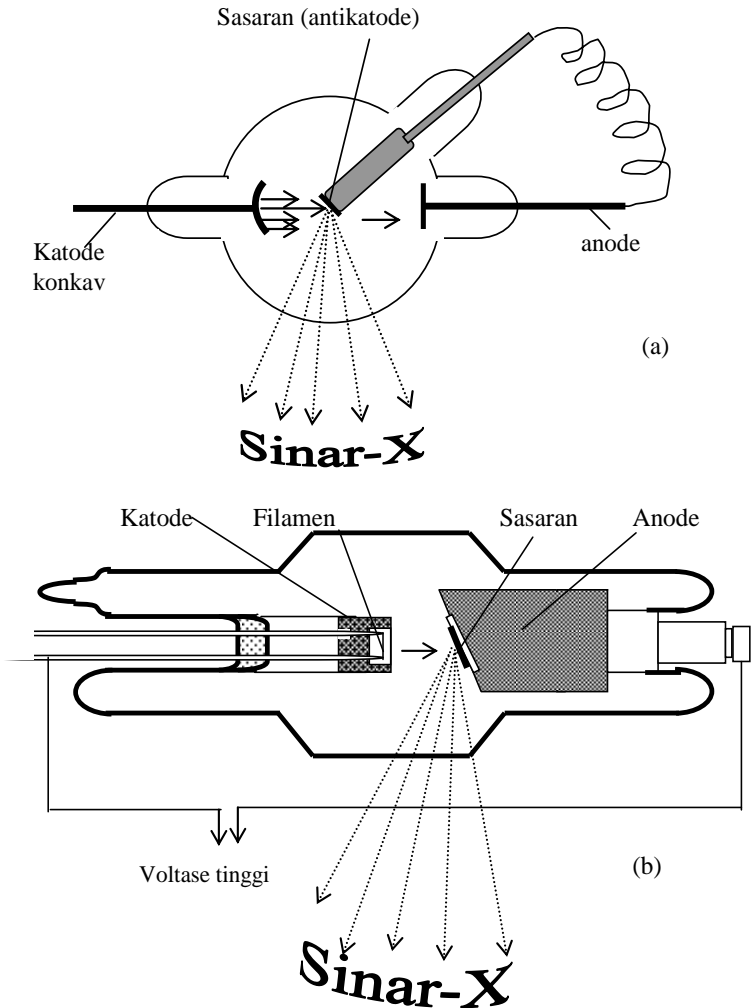
Roentgen mendapatkan bahwa sinar-X berasal dari suatu titik, tempat sinar katode menabrak dinding gelas. Hal ini sesuai dengan fakta eksperimen bahwa sinar-X dihasilkan ketika elektron menabrak materi (atom) penyusun gelas.

1. Proses Terjadinya Sinar-X

Sinar-X untuk keperluan medis saat ini telah dapat dihasilkan dari generatorsinar-X, yang berupa tabung sinar-X. Tabung sinar-X secara garis besar terdiri atas tabung vakum besar yang di dalamnya terdapat katode yang dipanaskan (pengemisi elektron) dan suatu anode (antikatode) sebagai sasaran. Tabung sinar-X konvensional, katodenya berbentuk konkaf untuk memfokuskan sinar katode pada sasaran

(tempat sinar-X akan dipancarkan) (Gambar 1.2a). Tabung sinar-X modern elektronnya berasal dari filamen panas (katode) dan dipercepat dalam suatu potensial tinggi, 50.000 volt, untuk menabrak antikatode tembaga yang di tengahnya disisipi tungsten (W) sebagai sasaran. Elektron ditahan oleh sasaran dan memberikan energinya dalam bentuk sinar-X (Gambar 1.2b).

Sinar-X yang dipancarkan terdiri atas dua tipe yaitu:



Gambar 1.2.

Tabung Sinar-X (a) Tabung Sinar-X Konvensional. (b) Tabung Sinar-X Modern

Penolakan Gambar 1.2 di sini sinar-X dengan panjang gelombang (λ) yang merupakan spektrum, seperti sinar tampak, dan sinar-X tipe yang kedua adalah sinar-X dengan λ diskrit. Sinar-X tipe pertama disebut *sinar-X kontinu (sinambung)* dan sinar-X tipe kedua *sinar-X karakteristik (cemiri-khas)*.

Sinar-X kontinu, dihasilkan dari proses perlambatan elektron dari katode ketika mendekati inti sasaran. Perlambatan elektron ini diakibatkan oleh tolakan elektron orbital atom sasaran. Perlambatan partikel bermuatan (elektron) akan mengemisikan radiasi elektromagnetik dari semua frekuensi, dengan kisaran energi rendah sampai tinggi (radiasi sinambung). Radiasi sinambung ini disebut *radiasi sinar-abar (bremstrahlung)*; abar artinya rem.

Berdasar prinsip kekekalan energi, elektron yang diperlambat tidak dapat mengemisikan radiasi elektromagnetik dengan energi lebih besar daripada energi kinetik elektron. Kemungkinan terbesar energi elektron yang diubah menjadi *bremstrahlung* berbanding lurus dengan energi partikel (elektron) dan nomor atom dari inti sasaran. Sebagai aturan umum, bagian dari energi kinetik elektron yang diubah menjadi *bremstrahlung* secara ini, bertambah sesuai dengan bertambahnya energi elektron dan bertambahnya nomor atom sasaran yang memperlambat elektron tersebut.

Untuk menerangkan terjadinya sinar-X cemiri diperlukan model atom. Model atom yang masih dapat digunakan dalam hal ini adalah model atom Bohr. Walaupun model atom Bohr ini gagal menerangkan terjadinya spektrum atom unsur-unsur yang lebih kompleks, tetapi karena keberhasilannya menerangkan proses transisi elektron dalam atom (eksitasi, deeksitasi), maka model atom ini masih berharga untuk menerangkan terjadinya sinar-X cermin.

Terjadinya sinar-X cemiri dapat diterangkan sebagai berikut. Apabila elektron yang terikat kuat (biasanya elektron kulit K atau L) dikenai radiasi/elektron dengan tenaga lebih besar dari tenaga ikat elektron tersebut, maka elektron akan menyerap semua tenaga radiasi/elektron tersebut. Sebagai akibatnya elektron akan dipentalkan keluar dari sistem atom (tempat ia semula terikat) dan meninggalkan tempat lowong. Lowongan elektron pada lintasan dalam (kulit K, $n = 1$) yang ditimbulkan oleh elektron yang pergi, dapat diisi oleh elektron-elektron yang berasal dari kulit-kulit yang lebih luar, misalnya elektron kulit L ($n = 2$) atau kulit M ($n = 3$) dan seterusnya. Tempat lowong pada kulit yang dihasilkan karena elektronnya mengisi kekosongan pertama, akan diisi oleh elektron dari kulit yang lebih luar lagi, demikian seterusnya. Penataan konfigurasi elektron terjadi secara

bertahap, setiap tahap terjadi loncatan elektron dari tingkat tenaga lebih tinggi ke tingkat tenaga lebih rendah. Kelebihan tenaga dipancarkan dalam bentuk sinar-X cemiri.

Model atom Bohr menyebutkan bahwa tingkat-tingkat tenaga di dalam atom bersifat diskrit. Dengan demikian, loncatan elektron dari kulit satu ke kulit yang lainnya dilakukan bersamaan dengan pemancaran sinar-X yang diskrit pula. Energi radiasi sinar-X yang dipancarkan karakteristik untuk tiap unsur sebab tiap unsur mempunyai energi diskritnya sendiri-sendiri.

2. Notasi Garis Spektra Sinar-X Cemiri

Unsur-unsur berat mempunyai elektron banyak. Setelah terjadi lowongan pada kulit bagian dalam, kebolehdjian elektron pada kulit lebih luar pindah ke kulit lebih dalam sangat banyak. Oleh karena itu, perlu dibedakan radiasi sinar-X yang dihasilkan dengan notasi-notasi tertentu. **Siegbahn** memberikan notasi sepektra sinar-X (seperti Ni $K_{\alpha 1}$; Au $L_{\beta 2}$; W L_{η} ;...) terdiri atas:

- a. simbol unsur kimia,
- b. simbol kulit atom tempat terjadinya lowongan elektron atau simbol yang menunjukkan arah berlangsungnya transisi elektron,
- c. huruf Yunani (ditulis agak ke bawah) disertai urutan angka, menunjukkan garis spektra sinar-X cemiri untuk suatu deret.

Garis $\alpha 1$ biasanya mempunyai intensitas terkuat di dalam suatu deret dan garis α muncul dari transisi elektron dengan $\Delta n = 1$. Garis β biasanya intensitasnya lebih kecil daripada α . Garis α dan γ biasanya muncul dari transisi elektron dengan $\Delta n = 1$ atau 2. Notasi ini tidak selalu sesuai aturan, tetapi garis spektra yang dihasilkan dari suatu transisi elektron pada tiap unsur selalu diberikan simbol sama.

B. PENEMUAN RADIOAKTIVITAS

Pada bulan Februari 1896, Henri Becquerel, ahli fisika Prancis, tertarik dengan penemuan sinar-X oleh W.C Rontgen yang dapat menghasilkan fluoressensi pada dinding gelas tabung sinar-X dan beberapa material lain. Di samping itu Becquerel telah mewarisi suatu gejala yang menarik dari ayah dan kakeknya, yaitu fosforessensi, suatu gejala zat tertentu yang dapat memancarkan sinar lemah setelah zat tersebut disinari dengan sinar kuat.

Ayahnya Edmud Becquerel (1820-1891) telah mempelajari fosforesensi garam uranium.

Sekitar tahun 1880 Henri Becquerel menyiapkan cuplikan kalium uranil sulfat, $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, dan mencatat bahwa zat tersebut berfosforesensi karena dieksitasi oleh sinar ultraviolet. Becquerel bertanya-tanya adakah hubungan antara fosforesensi ini dengan fluoressensi yang terjadi pada dinding tabung sinar katode yang telah diketahui mengemisikan sinar-X? Mungkinkah material yang berfosforesensi oleh sinar tampak mengemisikan radiasi yang daya tembusnya besar seperti sinar-X? Becquerel melanjutkan eksperimennya dengan membungkus plat fotografi dengan kertas, menempatkan garam uranium di atasnya, dan meletakkannya pada sinar matahari. Ketika plat foto dicuci, ternyata film menjadi hitam, yang menunjukkan bahwa garam uranium mengemisikan radiasi yang dapat menembus kertas. Akan tetapi, dia tetap bertanya-tanya apakah hitamnya film hanya diakibatkan oleh radiasi yang diemisikan oleh garam uranium akibat disinari oleh sinar matahari, atau apakah hitamnya film disebabkan oleh sinar matahari?

Pada tanggal 26 Februari 1896, Becquerel menyiapkan lagi plat foto dan garam uranium, tetapi karena saat itu matahari tidak bersinar, akhirnya disimpan di dalam laci. Pada tanggal 1 Maret 1896, matahari tetap belum tampak, namun plat foto tetap dicuci dengan harapan ada pengaruh radiasi yang lemah terhadap plat film. Di luar dugaannya, ternyata pengaruh radiasi terhadap plat foto sangat kuat. Hal ini berarti bahwa radiasi yang berpengaruh hanya berasal dari garam uranium. Jadi Becquerel telah menemukan suatu gejala baru, dan gejala itu oleh Madame Curie disebut *radioaktivitas* atau peluruhan (*decay*). Zat yang memancarkan radiasi disebut *zat radioaktif*, dan radiasi yang dipancarkan oleh zat radioaktif disebut *sinar radioaktif*.



Gambar 1.3.
Henry Becquerel

1. Eksperimen Madame Curie

Penyelidikan lebih lanjut oleh Becquerel menunjukkan bahwa radiasi dipancarkan pula oleh senyawa-senyawa uranium lain dan dari logam uranium; tetapi dia tidak dapat membuat pengukuran secara kuantitatif. Hal ini menggugah Marie Sklodowska Curie, kelahiran Polandia yang belajar di



Gambar 1.4.
Marie Sklodowska Curie

Paris, untuk menyelidiki radioaktivitas secara kuantitatif. Bersama suaminya, dia mengembangkan metode pengukuran radiasi.

Hasil pengukurannya menyimpulkan bahwa semua senyawa uranium yang dipelajari adalah radioaktif. Umumnya makin banyak uraniumnya, aktivitasnya makin besar. Selanjutnya, disimpulkan pula bahwa radiasi yang dipancarkan merupakan gejala atomik dan tidak tergantung pada keadaan fisik maupun kimianya. Marie dan Piere Curie menyelidiki senyawa lain yang mengemisikan radiasi dan akhirnya mendapatkan bahwa torium dan senyawa-senyawanya juga radioaktif.

Pengamatannya yang penting adalah bahwa mineral *pitchblende* yang mengandung uranium dan torium menunjukkan aktivitas yang jauh lebih

besar daripada radiasi yang dipancarkan oleh unsur-unsurnya sendiri. Madame Curie mula-mula menduga bahwa terdapat kesalahan dalam eksperimennya. Keraguan memang sering terjadi pada ilmuwan sebagai tanggapan terhadap gejala yang tidak diharapkan dan biasanya mereka akan mengulangi lagi eksperimennya untuk memperoleh kepastian hasil. Curie percaya bahwa bila mineral *pitchblende* aktivitasnya memang sangat besar, pasti mineral itu mengandung suatu unsur yang belum ditemukan, yang sifat kimianya erat berhubungan dengan bismuth. Bila logam baru ini telah dapat dipastikan keberadaannya, dia mengusulkan dengan nama *polonium*, sesuai dengan nama negara asalnya. Penyelidikan dimulai kembali dan akhirnya dengan cara pemisahan kimia, dia berhasil memisahkan polonium (Juli 1898); kemudian radium (1902) suatu zat baru yang sifat radioaktifnya sangat

tinggi (sejuta kali lebih besar daripada aktivitas uranium) dan dapat diidentifikasi secara spektroskopi.

Pada tahun 1902, Curie melaporkan bahwa 100 mg radium klorida bebas barium secara spektroskopi, mendapatkan massa atom relatif unsur tersebut kira-kira 225. Dengan pengukuran ulang, Curie mendapatkan massa atom relatif radium 226,5. Didamping itu Curie juga dapat memperoleh logam radium dengan cara mengelektrolisis leburan garamnya.

2. Satuan Aktivitas Radiasi

Untuk menghargai jasa Curie, maka satuan aktivitas radiasi dinyatakan dengan *curie* (*Ci*). Satu curie adalah jumlah zat radioaktif yang dapat menghasilkan $3,7 \times 10^{10}$ disintegrasi per sekon (dps) atau $2,2 \times 10^{12}$ disintegrasi per menit (dpm) partikel/sinar radioaktif. Satuan yang lebih kecil adalah milicurie (mCi) dan mikrocurie (μCi); $1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci}$, $1 \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci}$

Sejak tahun 1976, dalam sistem Satuan Internasional (SI), satuan aktivitas radiasi dinyatakan dalam becquerel (Bq), disini $1 \text{ Bq} = 1$ disintegrasi per sekon (atau 1 peluruhan perdetik). Kedua satuan tersebut sama-sama dapat digunakan. Hubungan antara kedua satuan tersebut adalah sebagai berikut:

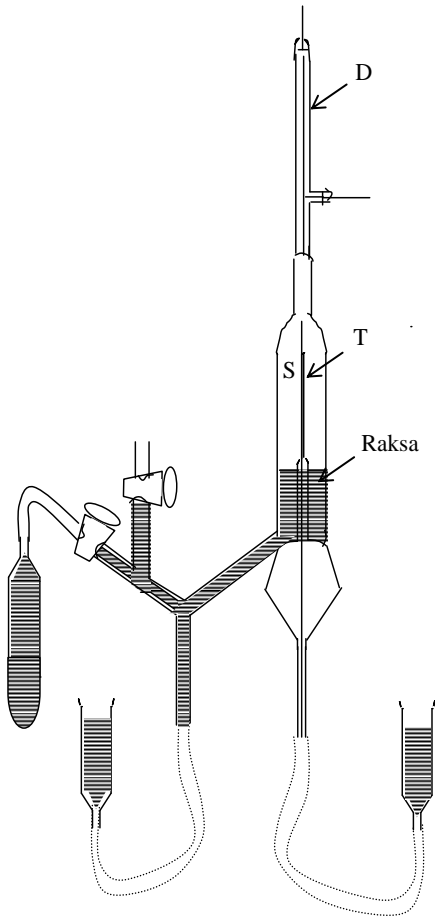
$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq},$$

$$1 \text{ Bq} = 27,027 \times 10^{-12} \text{ Ci}.$$

C. SIFAT-SIFAT DASAR SINAR RADIOAKTIF

Segera setelah ditemukan radioaktivitas, tiga jenis radiasi yang diemisikan oleh zat radioaktif ditemukan juga. Ketiga jenis sinar radioaktif ini dapat dibedakan dengan dua cara; **pertama dengan perbedaan daya tembusnya terhadap materi, dan kedua dengan sifat belokannya terhadap medan magnetik**. Sinar yang termudah diserap oleh materi diberi nama partikel alfa (α). Pada tahun 1903, Rutherford memperoleh bahwa partikel- α dibelokkan baik oleh medan magnetik maupun medan listrik ke arah kutub negatif. Dengan mengukur pembelokan itu dapat ditentukan angka banding muatan listrik partikel terhadap massanya dan kecepatan partikel tersebut. Diduga partikel tersebut adalah ion helium yaitu atom helium yang bermuatan positif (He^{2+}), dan kecepatannya sekitar 2×10^9 cm/det. Tahun 1909, Rutherford dan Royds mendapatkan suatu eksperimen yang

membuktikan sifat dasar partikel- α dengan metode yang ditunjukkan pada **Gambar 1.5**.



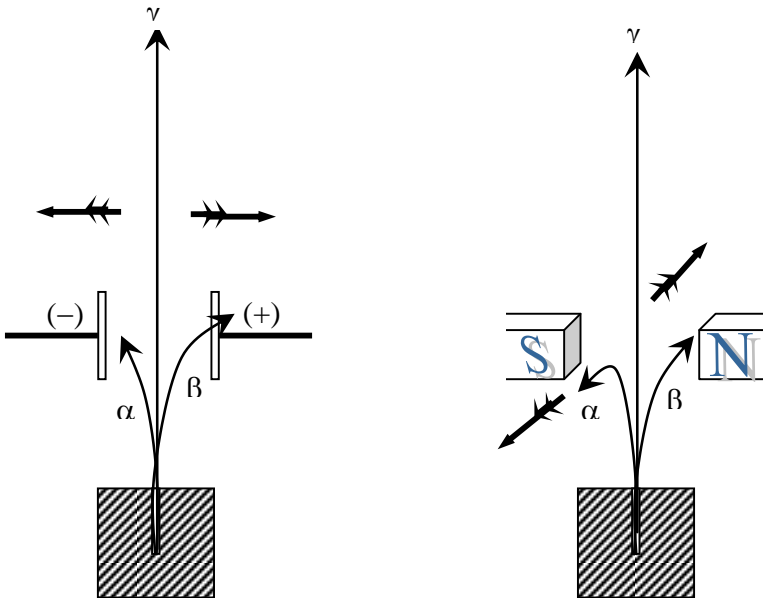
Gambar 1.5.
Alat Rutherford dan Royd untuk Mendeteksi
Sinar- α Hasil Peluruhan Zat Radioaktif

Tabung T, berisi sampel gas radon yang memancarkan partikel- α . Dinding tabung cukup tipis untuk dapat ditembus oleh partikel-partikel- α dari tabung T masuk ke dalam ruangan S. Dengan menaikkan permukaan air raksa di dalam tabung S, maka partikel-partikel- α akan terdesak masuk ke dalam tabung lucutan D dan spectra karakteristiknya dianalisis secara spektroskopi. Rutherford dan Royds mengamati adanya spektrum garis berwarna kuning dan hijau sangat cerah terjadi di dalam tabung lucutan dan spektrum itu sama dengan spektrum atom helium. Oleh karena itulah partikel- α tidak lain adalah inti helium. Inti helium, setelah di perlambat dan ditahan di dalam dinding gelas dari ruangan S, menangkap dua elektron dari sekelilingnya dan menjadi atom-atom

helium yang netral. Partikel- α dapat dihentikan oleh selembar kertas.

Jenis radiasi yang kedua memerlukan 1000 kali lebih banyak kertas yang sama untuk menghentikannya. Sinar kedua ini diberi nama *sinar beta* (β).

Sinar ini dibelokkan lebih mudah oleh medan magnetik daripada partikel- α dan dengan arah belokan berlawanan dengan belokan partikel- α . Sinar- β mempunyai muatan listrik negatif. Sinar ini diidentifikasi oleh Becquerel sebagai elektron yang bergerak dengan kecepatan tinggi. Percobaan pembelokan partikel- β dengan maksud untuk mengukur angka banding e/m partikel itu, lebih sulit daripada pengukuran e/m sinar katode atau elektron yang dipancarkan oleh filamen panas. Hal ini karena partikel- β tidak semuanya mempunyai kecepatan sama ketika dipancarkan oleh zat radioaktif. Namun, banyak zat radioaktif mengemisikan partikel- β yang kecepatannya hampir sama dengan kecepatan cahaya. Pembelokan sinar radioaktif karena pengaruh medan listrik dan magnet dapat dilihat pada **Gambar 1.6**.



Gambar 1.6.

Pengaruh Medan Listrik dan Medan Magnet terhadap Sinar- α , β , dan γ

Jenis radiasi ketiga yang dipancarkan oleh zat radioaktif disebut *sinar gamma* (γ) yang daya tembusnya lebih besar daripada partikel- β . Sinar- γ hanya dapat ditahan oleh timbal yang tebalnya beberapa cm. Diperlukan waktu lebih lama untuk menentukan sifat sinar- γ , tetapi pada akhirnya

Rutherford dan Andrade pada tahun 1914 dengan percobaan difraksinya dengan menggunakan suatu kristal yang sesuai, menunjukkan bahwa sinar- γ adalah radiasi elektromagnetik yang sama dengan sinar-X, sinar biasa, dan gelombang radio, hanya panjang gelombangnya sangat pendek. Oleh karena itu, foton sinar- γ mempunyai energi sangat tinggi, biasanya antara beberapa kiloelektronvolt (keV) dan beberapa milion elektron volt (MeV).

Setelah penemuan radioaktivitas, dapat diketahui bahwa pancaran berbagai jenis radiasi oleh zat radioaktif merupakan gejala atomik, bukan merupakan gejala molekuler. Hal ini berarti bahwa kecepatan pemancaran sinar radioaktif tidak tergantung pada keadaan rumus kimia zat, tetapi pada unsur radioaktif yang menyusun rumus kimia suatu zat.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Ceritakan proses ditemukannya sinar-X.
- 2) Jelaskan terjadinya sinar-X cemiri!
- 3) Mengapa sinar-X tiap-tiap unsur mempunyai tenaga yang sangat cemiri (karakteristik)?
- 4) Ceritakanlah proses penemuan radioaktivitas.
- 5) Sebutkan jasa Marie Curie?
- 6) Sebutkan dan jelaskan beberapa satuan aktivitas radiasi inti!
- 7) Sebutkan sifat-sifat sinar-sinar radioaktif?

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Sinar-X diketemukan oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada 8 November 1895 di Universitas Gwyn Wiitzbung, Jerman. Penemuan tersebut bermula ketika tanpa sengaja ia melihat kilauan yang terjadi bila sinar katoda menabrak dinding tabung sinar katode. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan tabung sinar katoda. Tabung sinar katode disimpan di dalam kotak kayu hitam dalam kamar gelap. Di dekat kotak diletakkan tabir platinobarium sianida yang dapat berpendar bila kena sinar. Pada saat tabung dioperasikan ternyata tabir berpendar (*berfluorensensi*). Fluorensensi tidak disebabkan oleh sinar katoda karena

telah diketahui bahwa sinar katoda (elektron) tidak dapat menembus lebih dari beberapa milimeter udara pada tekanan normal. Fluoresensi disebabkan oleh sinar yang mempunyai daya tembus besar dan sinar itu diberi nama *sinar-X*.

- 2) Sinar-X cemiri terjadi dari penataan konfigurasi elektron secara bertahap dari tingkat tenaga lebih tinggi ke tingkat tenaga lebih rendah. Oleh karena adanya lowongan elektron target sebagai akibat terhantam keluar dari atomnya oleh radiasi elektron dengan tenaga baru. Pada setiap tahap penataan terjadi loncatan elektron dari tingkat tenaga lebih tinggi ke tingkat tenaga lebih rendah, sambil melepaskan kelebihan tenaga dalam bentuk sinar-X cemiri.
- 3) Sinar-X tiap-tiap unsur mempunyai tenaga yang sangat cemiri (karakteristik) karena tiap atom suatu unsur mempunyai jarak lintasan elektron yang berbeda-beda. Maksudnya jarak elektron yang melintas di kulit K dan L dan seterusnya untuk setiap atom berbeda-beda.
- 4) Proses penemuan radioaktivitas adalah sebagai berikut. Henri Becquerel mempunyai cuplikan garam kalium uranil sulfat, $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, yang dapat berfosforesensi karena dieksitasi oleh sinar ultraviolet. Becquerel melanjutkan eksperimennya dengan membungkus plat fotografi dengan kertas, dan menempatkan garam uranium itu di atasnya, dan meletakkannya pada sinar matahari. Ketika plat foto dicuci, ternyata film menjadi hitam. Ini berarti ada radiasi yang dipancarkan oleh garam uranium akibat disinari oleh sinar matahari. Pada tanggal 26 Februari 1896, Becquerel menyiapkan lagi plat foto dan garam uranium, tetapi karena matahari tidak bersinar, akhirnya disimpan di dalam laci (berarti garam uranium tidak mendapat sinar matahari). Pada tanggal 1 Maret 1896, matahari tetap belum tampak, namun plat film foto tetap dicuci dengan harapan ada pengaruh radiasi yang lemah terhadap plat film. Di luar dugaannya, ternyata pengaruh radiasi terhadap plat foto sangat kuat. Hal ini berarti bahwa radiasi yang berpengaruh pada film foto hanya berasal dari garam uranium. Jadi, Becquerel telah menemukan suatu gejala baru, dan disebut *radioaktivitas*.
- 5) Jasa Marie Curie adalah menemukan hubungan radiasi yang dipancarkan oleh zat dengan jumlah zat itu.
- 6) Beberapa satuan aktivitas radiasi adalah:

- a) disintegrasi per sekon (dps) atau disintegrasi per menit (dpm);
 - b) *curie* (Ci). Satu curie adalah jumlah zat radioaktif yang dapat menghasilkan $3,7 \times 10^{10}$ disintegrasi per skond (dps) atau $2,2 \times 10^{12}$ disintegrasi per menit (dpm). Satuan yang lebih kecil adalah milicurie (mCi) dan mikrocure (μCi); $1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci}$, $1 \text{ μCi} = 10^{-6} \text{ Ci}$;
 - c) becquerel (Bq) $1 \text{ Bq} = 1$ disintegrasi per skond (= 1 peluruhan perdetik).
- 7) Sifat-sifat sinar radioaktif:
- Sinar alfa (α) :
- sinar radioaktif yang termudah diserap oleh materi. Dapat dihentikan oleh selembar kertas.
 - dibelokkan baik oleh medan magnet maupun medan listrik.
 - merupakan ion helium yaitu atom helium yang bermuatan positif (He^{2+}).
 - kecepatannya sekitar $2 \times 10^9 \text{ cm/det}$.
- Sinar beta (β) :
- dihentikan oleh 1000 kali lebih banyak kertas yang sama dengan untuk menghentikan sinar- α .
 - Sinar ini dibelokkan lebih mudah oleh medan magnetik daripada partikel- α dan dengan arah belokan berlawanan. Sinar- β mempunyai muatan listrik negatif.
 - Sinar ini diidentifikasi sebagai elektron yang bergerak dengan kecepatan tinggi.
- Sinar gamma (γ):
- daya tembusnya lebih besar daripada partikel- β . Sinar- γ hanya dapat ditahan oleh timbal yang tebalnya beberapa cm.
 - sinar- γ adalah radiasi elektromagnetik yang sama dengan sinar-X, cahaya biasa, dan gelombang radio, hanya panjang gelombangnya sangat pendek. Oleh karena itu, foton sinar- γ mempunyai energi sangat tinggi, biasanya antara beberapa kilo elektronvolt (keV) dan beberapa milion elektron volt (MeV).



Sinar-X ditemukan oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada 8 November 1895 di Universitas Gwyn Wiitzbung, Jerman. Penemuan tersebut bermula ketika tanpa sengaja dia melihat kilauan sinar yang keluar dari tabung sinar katode, di tempat terjadinya tabrakan antara sinar katoda (elektron) dengan dinding tabung sinar katode. Sinar-X yang dipancarkan terdiri atas dua tipe yaitu sinar-X dengan panjang gelombang yang merupakan spektrum, seperti sinar tampak, dan sinar-X dengan panjang gelombang tertentu. Sinar-X tipe pertama sebut saja sinar-X kontinu dan sinar-X tipe kedua sinar-X karakteristik. Sinar-X cemiri terjadinya karena transisi elektron dari kulit lebih luar ke kulit atom yang lebih dalam dikarenakan adanya kekosongan elektron pada kulit bagian dalam.

Sekitar tahun 1880 Henri Becquerel menyiapkan cuplikan kalium uranil sulfat. Dari percobaan selanjutnya diperoleh bahwa garam uranium memancarkan radiasi secara spontan. Jadi, Becquerel telah menemukan suatu gejala baru, dan gejala itu oleh Madame Curie disebut radioaktivitas. Zat yang memancarkan radiasi disebut zat radioaktif, dan radiasi yang dipancarkan oleh zat radioaktif disebut sinar radioaktif. Marie Sklodowska Curie, kelahiran Polandia yang kemudian belajar di Paris, menyelidiki radioaktivitas secara kuantitatif. Dengan suaminya, dia mengembangkan metode pengukuran radiasi. Hasil pengukurannya menyimpulkan bahwa semua senyawa uranium yang dipelajari adalah radioaktif. Umumnya makin banyak uraniumnya, aktivitasnya makin banyak. Untuk menghargai jasa Curie, satuan aktivitas radiasi dinyatakan dengan curie (Ci). Satu curie adalah jumlah zat radioaktif yang dapat menghasilkan $3,7 \times 10^{10}$ disintegrasi per second (dps) atau $2,2 \times 10^{12}$ disintegrasi per menit (dpm). Sejak tahun 1976, dalam sistem Satuan Internasional (SI), satuan aktivitas radiasi dinyatakan dalam becquerel (Bq), di mana $1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrasi per-second} (= 1 \text{ peluruhan perdetik})$. Pada masa peralihan seperti sekarang ini kedua satuan tersebut sama-sama digunakan. Tiga jenis radiasi yang diemisikan oleh zat radioaktif ditemukan juga. Ketiga jenis sinar radioaktif ini dapat dibedakan dengan dua cara: pertama dengan perbedaan daya tembusnya terhadap materi, dan kedua dengan sifat belokannya terhadap medan magnetik.



TES FORMATIF 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Penemuan sinar-X diawali dengan percobaan penemuan
 - A. tabung sinar katoda
 - B. sinar katode
 - C. proton
 - D. neutron

- 2) Jasa Becquerel adalah
 - A. menemukan garam kalium uranil sulfat
 - B. menemukan gejala radioaktivitas yang disebabkan garam kalium uranil sulfat
 - C. menemukan gejala radioaktivitas yang disebabkan uranium pada garam kalium uranil sulfat
 - D. menemukan aktivitas unsur radioaktif

- 3) Satuan aktivitas radiasi yang dipancarkan oleh zat radioaktif berdasarkan Sistem Internasional (SI) adalah
 - A. disintegrasi per sekon (dps)
 - B. curie (Ci)
 - C. becquerel (Bq)
 - D. becquerel per sekon (Bq s^{-1})

- 4) Satu curie (1 Ci) sama dengan:
 - A. $3,7 \times 10^{10}$ Bq
 - B. $3,7 \times 10^{10}$ dpm
 - C. 1 dps
 - D. 1 Bq

- 5) Sinar radioaktif yang daya tembusnya paling kecil terhadap materi adalah
 - A. sinar alfa
 - B. sinar beta
 - C. sinar gamma
 - D. sinar ultra violet

- 6) Sinar radioaktif dibedakan satu dengan yang lainnya atas dasar
 - A. daya tembusnya terhadap materi
 - B. pembelokannya terhadap medan magnet dan listrik

- C. muatan masing-masing sinar radioaktif itu
D. daya tembusnya pada materi dan pembelokannya pada medan magnet dan listrik
- 7) Sinar radioaktif yang berupa gelombang elektromagnetik adalah sinar
A. alfa
B. beta
C. gamma
D. katoda
- 8) Berdasarkan proses terjadinya, yang merupakan perbedaan sinar X dengan sinar radioaktif adalah
A. sinar-X merupakan peristiwa di luar inti atom sedangkan sinar radioaktif merupakan peristiwa inti atom.
B. sinar-X merupakan peristiwa di luar inti atom sedangkan sinar radioaktif merupakan peristiwa molekuler.
C. sinar-X terjadi setelah terjadinya kekosongan elektron pada kulit bagian terdalam dari atom sedangkan sinar radioaktif terjadi setelah inti ditabrak oleh sinar matahari
D. sinar-X merupakan peristiwa nuklir sedangkan sinar radioaktif merupakan peristiwa ekstra nuklir.
- 9) Sinar alfa diketahui merupakan inti helium berdasarkan atas
A. muatannya
B. daya tembusnya
C. simpangannya pada medan magnetik
D. spektrum yang dihasilkan.

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

KEGIATAN BELAJAR 2

Kestabilan Inti

A. ISOTOP DAN NUKLIDA

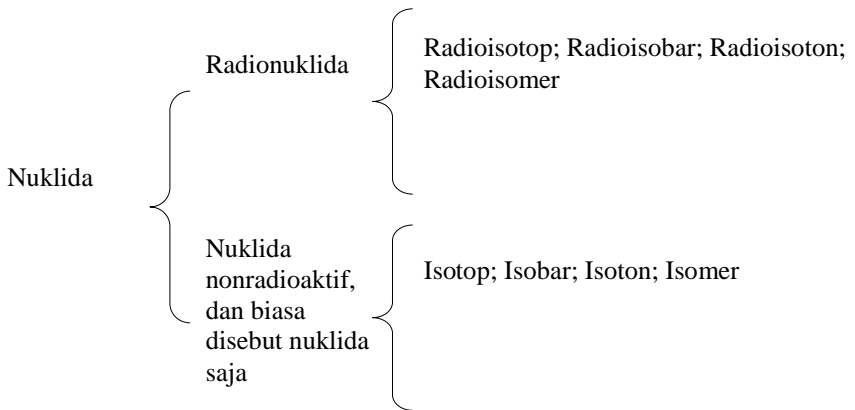
Penyusun utama inti atom adalah neutron dan proton dan disebut dengan istilah *nukleon*. Jumlah proton di dalam inti, yang sekaligus merupakan muatan inti, disebut nomor atom, dan diberi dengan lambang Z . Jumlah neutron di dalam atom dinyatakan dengan N . Jumlah neutron dan proton di dalam atom disebut bilangan massa, A . Jadi, $A = Z + N$.

Simbol yang digunakan untuk menyatakan spesies inti adalah simbol kimia unsur dengan nomor atom ditulis di sebelah kiri bawah (*left subscript*) dan bilangan massa ditulis di sebelah kiri atas (*left superscript*). Contoh, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$. Nomor atom sering tidak ditulis, sebab nomor atom khas untuk unsur kimia. Tidak ada dua unsur kimia mempunyai nomor atom yang sama. Berdasarkan hal itu, maka kadang-kadang spesies inti sering dituliskan sebagai berikut ini: He-4, N-14, U-235.

Tiap spesies inti dapat ditandai atas dasar jumlah proton dan neutron di dalamnya. Spesies atom dengan nomor atom sama tetapi berbeda bilangan massanya disebut *isotop*. Istilah isotop hanya boleh dipakai untuk spesies atom dari unsur sama, jumlah proton sama, tetapi jumlah neutron berbeda. Contoh: ${}^{35}_{17}\text{Cl}$, ${}^{37}_{17}\text{Cl}$.

Spesies atom yang ditandai oleh jumlah proton dan jumlah neutron di dalam intinya disebut *nuklida*. Nuklida-nuklida yang mempunyai bilangan massa sama, tetapi nomor atom berlainan disebut *isobar*, contoh ${}^{76}_{32}\text{Ge}$ dan ${}^{76}_{34}\text{Se}$. Selanjutnya, nuklida yang nomor atom dan bilangan massanya berlainan tetapi jumlah neutronnya sama disebut *isoton*, contoh ${}^{31}_{14}\text{Si}$, ${}^{31}_{15}\text{P}$, dan ${}^{32}_{16}\text{S}$. Ketiga spesies inti itu adalah isoton karena jumlah neutron ketiga nuklida itu sama yaitu 16. Apabila nuklida-nuklida mempunyai nomor atom dan bilangan massa sama, akan tetapi oleh suatu sebab mempunyai tenaga yang berbeda disebut *isomer*. Contoh: ${}^{124}_{51}\text{Sb}$, ${}^{124m_1}_{51}\text{Sb}$, dan ${}^{124m_2}_{51}\text{Sb}$, yang masing-masing mempunyai waktu paro 60 hari, 1,6 menit, dan 20 menit.

Simbol m_1 , m_2 dsbnya menyatakan bahwa nuklida itu ada dalam keadaan metastabil dan akan berubah menjadi keadaan stabil dengan memancarkan kelebihan energinya, biasanya dalam bentuk sinar- γ . Berdasar atas adanya nuklida radioaktif dan tidak radioaktif, nuklida dapat dibedakan sebagai berikut ini.



B. MASSA DAN KESTABILAN

Inti atom stabil adalah inti yang tidak dapat secara spontan meluruh atau berubah menjadi inti lain disertai pemancaran sinar radioaktif. Sebagai contoh, ${}_{92}^{238}\text{U}$ tidak dapat meluruh secara spontan dengan mengemisikan β^- atau β^+ . Agar proses peluruhan tersebut terjadi, maka ke dalam nuklida itu harus diberikan energi. ${}_{92}^{238}\text{U}$ disebut mempunyai kestabilan β atau stabil terhadap peluruhan β . Akan tetapi, U tidak stabil terhadap peluruhan alfa (α) karena ${}_{92}^{238}\text{U}$ dapat mengemisikan partikel α secara spontan menjadi ${}_{92}^{234}\text{Th}$ disertai pelepasan energi sebesar 1,27 MeV per nukleon. Energi yang dipancarkan sebesar 1,27 keV per nukleon itu hampir semuanya berupa energi kinetik partikel α . Di samping itu, ${}_{92}^{238}\text{U}$ dapat secara spontan membelah menjadi dua inti yang lebih kecil yang ukurannya hampir sama, disertai pembebasan energi sekitar 200 MeV. Jadi, untuk menyatakan kestabilan inti harus menyertakan jenis peluruhannya. Kestabilan inti terhadap jenis peluruhan tertentu dapat diketahui dengan memperhatikan massa total inti mula-mula dengan massa total inti hasil. Jika perubahan inti

berlangsung eksotermik, maka massa total hasil harus kurang daripada massa total inti mula-mula. Misalnya, ${}^{22}_{11}\text{Na}$ tidak dapat secara spontan mengemisikan partikel α menjadi ${}^{18}_9\text{F}$, oleh karena massa hasil (yaitu massa ${}^4_2\text{He}$ + massa ${}^{18}_9\text{F}$) lebih besar dari pada massa ${}^{22}_{11}\text{Na}$ dengan perbedaan sekitar 9,105 .s.m.a.

C. ANGKA BANDING PROTON-NEUTRON

Stabil-tidaknya suatu nuklida hanya dapat diketahui dengan mendeteksi radiasi yang dipancarkan dengan menggunakan detektor radiasi inti. Nuklida yang stabil tidak akan memancarkan radiasi inti. Berdasarkan deteksi radiasi yang dipancarkan oleh nuklida, maka nuklida stabil dan tidak stabil beserta jenis peluruhannya dapat diketahui dan dapat dilihat pada tabel nuklida. Beberapa di antara nuklida-nuklida itu dapat dilihat pada Tabel 1.1. Berdasarkan tabel nuklida itu Emilio Segre menyusun semua nuklida, baik yang stabil maupun tidak-stabil yang telah dijumpai saat itu ke dalam bentuk diagram yang dikenal dengan nama *diagram Segre (Segre Chart)* atau biasa juga disebut *peta nuklida* (Gambar 1.7). Nuklida-nuklida pada diagram tersebut disusun berdasarkan alur jumlah proton dan neutronnya. Sumbu vertikal pada diagram tersebut menyatakan jumlah proton, Z , dan sumbu horizontal menyatakan jumlah neutron. Dari peta itu dapat diketahui bahwa nuklida-nuklida yang terletak pada kotak horizontal merupakan isotop, nuklida-nuklida pada kotak kolom vertikal merupakan isoton, dan nuklida-nuklida yang terletak pada kotak dengan arah diagonal dari kiri atas ke kanan bawah, merupakan isobar. Kotak yang dihitamkan menunjukkan nuklida-nuklida yang stabil terhadap peluruhan β dan ia dihubungkan dengan suatu garis yang disebut pita **kestabilan** atau pita **kestabilan maksimum**. Garis kestabilan ini tidak selalu melalui nuklida yang jumlah proton dan neutronnya sama.

Keteraturan sifat inti yang tampak pada digram (Z vs N) itu adalah bahwa hampir semua nuklida yang meluruh dengan peluruhan β^+ dan tangkapan elektron (*Electron capture, EC*) terletak di sebelah kiri garis kestabilan dan hampir semua nuklida yang meluruh dengan peluruhan β^- terletak di sebelah kanan garis kestabilan. Inti yang jumlah neutronnya terlalu banyak atau disebut juga nuklida yang kaya akan neutron dibandingkan nuklida stabilnya, akan meluruh agar nilai angka banding proton-neutron itu

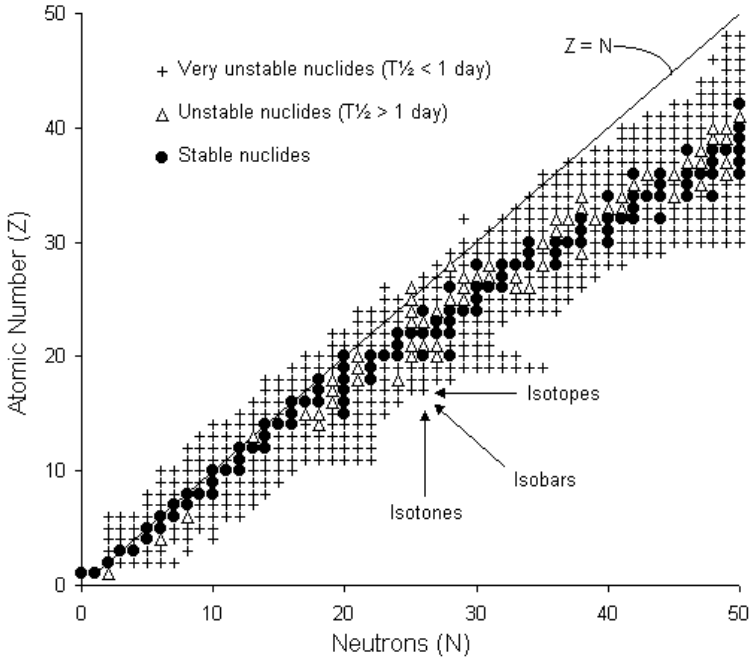
menjadi berkurang. Pada proses ini sebuah neutron diubah menjadi proton disertai pengemisian β^- . Dengan demikian maka, jika suatu nuklida mempunyai proton Z dan bilangan masa A , maka angka banding proton-neutronnya semula adalah $\frac{Z}{(A - Z)}$. Setelah mengemisikan β^- , maka angka

banding proton-neutronnya menjadi $\frac{Z + 1}{(A - Z - 1)}$ dan angka banding ini lebih besar daripada angka

Tabel 1.1 Tabel nuklida beberapa nuklida.

Z	lambang Nuklida	A	Kelimpaan atau $t_{1/2}$	Mode peluruhan	Δ (MeV)		
0	n	1	10,6 m	β^- , no γ	8,071		
1	H	1	99,985%		7,289		
		2	0,0148%		13,136		
		3	12,33 y	β^- , no γ	14,950		
2	He	3	$1,38 \times 10^{-14}\%$		14,931		
		4	99,99986%		2,425		
		6	0,808 s	β^- , no γ	17,597		
		8	0,122 s	β^- , β^- n 12%	31,609		
8	O	13	8,9 ms	β^+ p	23,105		
		14	70,60 s	β^+ 99,89%	8,008		
		15	122 s	EC 0,11%, no γ	2,855		
		16	99,76%		-4,737		
		17	0,038%		-0,810		
		18	0,204%		-0,783		
		19	26,9 s	β^-	3,331		
		20	13,5 s	β^-	3,799		
		10	Ne	20	90,51%		-7,043
15	P	28	270 ms	β^+	-7,160		
		29	4,1 s	β^+ b	-16,949		
		30	2,50 m	β^+ . EC	-20,204		
		31	100 %		-24,440		
		32	14,28 d	β^- , no γ	-24,305		
		33	25,3 d	β^- , no γ	-26,337		
		34	12,4 s	β^-	-24,55		
		35	47 s	β^-	-24,94		
		16	S	29	0,19 s	β^- , β^+ p	-3,16
				30	1,2 s	β^+	-14,062
				31	2,6 s	β^+	-19,044
32	95,02%				-26,015		
33	0,75%				-26,566		
34	4,21%				-29,931		
20	Ca	35	87,4 d	β^- , no γ	-28,864		
		40	96,94%		-34,847		
46	Pa	118	3,1 s	β^-	-76,21		
90	Th	234	24,10 d	β^-	40,612		
92	U	236	$2,342 \times 10^7$ y	α	42,442		
		236f	0,12 ms	SF	44,79		
		237	6,75 d	β^-	45,389		
		238	$99,275\%, 4,468 \times 10^9$ y	α	47,307		
		238f	0,19 ms	IT 96%, SF4%	49,866		

Keterangan: SF = pembelahan spontan, no γ = tidak memancarkan γ , IT = Transisi Isomerik, EC = *Electron capture* (Tangkapan Elektron)



Gambar 1.7.

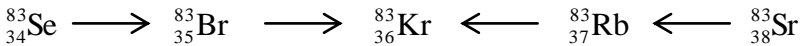
Peta Nuklida. Nuklida Stabil Ditunjukkan oleh Kotak yang Berwarna Hitam

banding proton-neutron nuklida semula. Jika inti kekurangan neutron atau kelebihan proton dan inti seperti ini disebut juga dengan inti kaya proton, dibandingkan dengan jumlah proton pada nuklida stabilnya, peluruhannya adalah dengan mengemisikan β^+ atau TE sehingga akan mengubah angka banding proton-neutron menjadi $\frac{Z - 1}{(A - Z + 1)}$ yang lebih kecil dibanding angka banding proton-neutron semula.

Pita kestabilan untuk nuklida-nuklida ringan (nomor atom ≤ 20), membentuk sudut mendekati 45° yang berarti bahwa umumnya nuklida akan lebih stabil dengan jumlah proton sama dengan jumlah neutron. Nuklida-nuklida lebih berat, dengan naiknya muatan inti atau bertambah banyaknya

jumlah proton di dalam inti, maka akan terjadi tolak menolak antar proton di dalam inti sehingga proton kurang kuat diikat oleh inti. Oleh karena itu, inti lebih stabil dimiliki oleh inti yang mengandung neutron lebih banyak. Hal ini terlihat dengan membeloknya pita kestabilan ke arah nuklida yang jumlah neutronnya makin banyak dibandingkan jumlah proton. Pita kestabilan nuklida berakhir sampai nuklida dengan jumlah proton 82. Ini berarti nuklida yang jumlah protonnya lebih besar daripada 82 adalah nuklida-nuklida yang tidak stabil yaitu tidak stabil terhadap peluruhan α .

Oleh karena nuklida yang terletak pada pita kestabilan merupakan nuklida yang lebih stabil, maka ia mestinya juga merupakan nuklida yang paling ringan. Seperti isobar ${}^{83}_{34}\text{Se}$; ${}^{83}_{35}\text{Br}$; ${}^{83}_{36}\text{Kr}$; ${}^{83}_{37}\text{Rb}$; ${}^{83}_{38}\text{Sr}$, akan meluruh sebagai berikut ini.



Kr-83 merupakan nuklida yang terletak pada garis kestabilan dan merupakan nuklida yang paling ringan.

Kestabilan inti tidak hanya dipengaruhi oleh angka banding proton-neutron, tetapi dipengaruhi juga oleh genap-ganjilnya jumlah proton dan neutron di dalam inti. Berdasarkan ganjil-genapnya jumlah proton dan neutron, inti diklasifikasikan menjadi inti genap-genap artinya jumlah proton genap dan neutron genap, inti ganjil-genap, genap-ganjil, dan ganjil-ganjil. Nuklida yang paling stabil adalah nuklida tipe genap-genap, yang paling tidak stabil adalah tipe ganjil-ganjil. Nuklida tipe genap-ganjil dan ganjil-genap kestabilannya hampir sama dan terletak antara kestabilan nuklida genap-genap dan ganjil-ganjil. Perbedaan kestabilan keempat tipe nuklida tersebut juga tampak dari jumlah nuklida stabilnya di alam. Nuklida stabil untuk tipe genap-genap jumlahnya adalah 157, tipe genap-ganjil 55, tipe ganjil-genap 50, dan tipe ganjil-ganjil 4. Nuklida tipe ganjil-ganjil umumnya selalu tidak stabil terhadap peluruhan β ; hanya ada empat nuklida yang stabil terhadap peluruhan β yaitu ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, dan ${}^{14}\text{N}$.

Kestabilan inti berdasar genap-ganjilnya jumlah proton dan neutron, dapat dijelaskan dengan asumsi bahwa energi dibebaskan (kestabilan bertambah) jika 2 nukleon dengan tipe sama bergabung bersama membentuk pasangan. Di dalam inti tipe genap-genap, semua nukleon berpasangan. Di dalam inti tipe genap-ganjil dan ganjil-genap pasti ada 1 nukleon yang tidak punya pasangan. Ketidakstabilan terbesar dari inti ganjil-ganjil karena pasangan tidak terjadi antara neutron dengan proton. Jika proton dengan

neutron dapat berpasangan mestinya kestabilan inti ganjil-ganjil sama besarnya dengan kestabilan inti genap-genap.

Peta kestabilan inti hanya merupakan informasi untuk mengetahui kestabilan inti secara eksperimen. Misalnya, jika kita ingin mengetahui kestabilan ^{22}Na dan ^{23}Na , maka kita harus melihat petanuklida itu. Kita tidak bisa hanya melihat jumlah proton dan neutron yang ada di dalam nuklida itu atau nilai angka bandingnya. Jika hanya berpedoman pada jumlah proton dan neutron atau nilai angka bandingnya, maka kita akan terperangkap pada kesalahan. Sebagai contoh berdasarkan angka banding jumlah proton dan neutron, maka ^{22}Na merupakan nuklida yang stabil karena angka banding proton terhadap neutronnya sama dengan satu, dan ^{23}Na merupakan nuklida yang tidak stabil karena jumlah proton dan neutronnya tidak sama. Kenyataan (fakta empiris) menunjukkan bahwa garis kestabilan melalui ^{23}Na dan tidak melalui ^{22}Na . Jadi, ^{23}Na merupakan nuklida stabil dan ^{22}Na merupakan nuklida yang tidak stabil dengan memancarkan β^+ karena berada di atas pita kestabilan.

D. ENERGETIKA KESTABILAN INTI

1. Energi Pengikat Inti

Suatu atom X , yang mempunyai proton sebanyak Z dan bilangan massa A , dilambangkan dengan A_ZX . Di sini A menyatakan jumlah proton dan neutron, yang di dalam kimia inti disebut nukleon dan atom X biasanya disebut nuklida.

Sistem nukleon dalam keadaan bebas artinya proton dan neutronnya tidak terikat sebagai inti, maka nukleon yang terdiri atas Z proton, $(A - Z)$ neutron, dan massa totalnya $ZM_p + (A - Z)M_n$, akan mempunyai nilai energi tertentu. Jika nukleonnya dalam keadaan terikat sebagai inti, dan ditulis sebagai A_ZX dengan massa total M , maka nukleon itu akan mempunyai nilai energi tertentu pula. Sistem nukleon-bebas mempunyai energi lebih tinggi dibandingkan nukleon-terikat dalam inti. Oleh karena itu, nukleon-bebas relatif kurang stabil daripada nukleon-terikat dalam inti. Itulah sebabnya nukleon-bebas tidak pernah diperoleh di alam dalam keadaan stabil. Sistem nukleon yang tidak stabil selalu ingin lebih stabil dengan melepas sebagian energinya. Energi yang dilepas saat nukleon bebas membentuk nukleon terikat sebagai inti disebut **energi pengikat inti** (*Nuclear Binding Energy*) nuklida tersebut dan dilambangkan dengan E_B .

Massa berkaitan erat dengan energi. Hubungan massa dengan energi dinyatakan oleh Einstein sebagai $E = mc^2$, dengan m adalah massa dan c adalah kecepatan cahaya yaitu 3×10^{10} cm s⁻¹. $E = mc^2$ menyatakan bahwa massa dapat diubah menjadi energi dan energi dapat diubah menjadi massa. Bila massa hilang selama reaksi inti (peluruhan) maka sesungguhnya massa itu tidak hilang tetapi dia berubah menjadi energi. Jika massa hilang sebanyak 1 sma, maka energi yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan hubungan $E = mc^2$ yaitu dengan memasukkan massa (m) = $1,660566 \times 10^{-24}$ gram. Massa sebanyak $1,660566 \times 10^{-24}$ gram ini sama dengan 1 sma dan diperoleh,

$$E = 1,492442 \times 10^{-3} \text{ erg}$$

Satuan energi dalam CGS itu dapat diubah ke dalam sistem SI dengan mengingat bahwa,

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ joule (J)} = 10^7 \text{ erg}$$

Energi pada ilmu kimia dan biologi, sering dinyatakan dalam satuan *kalori*,

$$1 \text{ kalori} = 4,1845 \text{ J}$$

Partikel kecil seperti partikel inti, energinya biasanya dinyatakan dalam *elektron volt* (eV), *kiloelektron volt* (keV) atau *million elektron volt* (MeV).

$$1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV} \text{ dan } 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV.}$$

Satu elektron volt didefinisikan sebagai energi yang diperlukan untuk membawa muatan $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb, dari tempat satu ke tempat lain dengan perbedaan potensial 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602189 \times 10^{-12} \text{ erg} = 1,602189 \times 10^{-19} \text{ joule.}$$

Dengan menggunakan satuan energi yang baru ini, diperoleh kesetaraan antara massa dan energi sebagai berikut:

$$1 \text{ sma (amu)} = 931,5 \text{ MeV, artinya apabila massa sebesar 1 sma hilang maka akan terjadi energi sebesar 931,5 MeV.}$$

Selanjutnya, apabila satu elektron hilang, maka akan terjadi energi sebesar 0,51 MeV 1 sme (M_e) = 0,51 MeV.

Oleh karena massa ekuivalen dengan energi, maka dapat juga dikatakan bahwa energi pengikat inti adalah ekuivalen dengan selisih antara massa nukleon bebas dengan massa inti.

Contoh.

Jika diketahui massa nuklida netral $^1_1\text{H} = 1,007825$ sma, $^{16}_8\text{O} = 15,9949149$ sma. dan massa $^1_0\text{n} = 1,0086645$ sma, maka energi pengikat inti $^{16}_8\text{O}$,

$$\begin{aligned} E_B \text{ } ^{16}_8\text{O} &= [\{ZM_p + (A - Z)M_n\} - M_{o-16}] \times 931,5 \text{ MeV} & (1.1) \\ &= 8(M_p - M_e) + (16 - 8)M_n - (M_{o-16} - 8M_e) \times 931,5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= [8(1,007825) - 8M_e + 8(1,0086645) - 15,9949149 + 8 M_e] \times 931,5 \\
 &\quad \text{MeV} \\
 &= 127,61736 \text{ MeV}.
 \end{aligned}$$

Oleh karena yang diketahui di dalam soal itu adalah massa nuklida netral, maka untuk mengetahui massa intinya, massa nuklida netral itu harus dikurangi dengan massa elektron (Me) seperti perhitungan di atas. Akan tetapi, massa elektron itu tidak mempengaruhi harga E_B karena telah saling meniadakan. Jadi untuk menghitung E_B suatu nuklida dapat menggunakan massa nuklida netral yang diketahui.

Buku Kimia Inti saat ini sebagian besar tidak lagi mencantumkan massa atom total tetapi mencantumkan kelebihan massa (*mass excess*) yang kadang-kadang disebut defek massa (*mass defect*) yang dilambangkan dengan Δ MeV yaitu:

$$MeV = (M - A) \tag{1.2}$$

Di sini M adalah masa nuklida dan A adalah bilangan massa.

Harga Δ MeV beberapa nuklida dapat dilihat pada Tabel 1.1. Untuk menghitung E_B suatu nuklida, dapat langsung menggunakan harga Δ MeV ini tanpa harus mencari harga M terlebih dahulu. Kalaupun M dicari terlebih

dahulu yaitu $M = \left(A + \frac{\Delta}{931,5} \right)$ sma, hasilnya akan sama. Penyelesaian

contoh di atas dengan konsep Δ MeV ini adalah sbb:

$$\begin{aligned}
 E_{B\ 0-16} &= \left[\left\{ 8 \times \left(A_p + \frac{\Delta_p}{931,5} \right) \right\} + \left\{ 8 \times \left(\frac{\Delta_n}{931,5} \right) - \left(A_{0-16} + \frac{\Delta_{0-16}}{931,5} \right) \right\} \right] \\
 &\quad \text{s.m.a } 931,5 \text{ MeV} / \text{s.m.a} \\
 &= (8 \times \Delta_p) + (8 \times \Delta_n) - (A_{016}) \text{ MeV} \\
 &= (8 \times 7,289) + 8 \times (8,071) - (-4,737) \text{ MeV} \\
 &= 127,617 \text{ MeV}.
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan itu, secara umum dapat dibuat rumus umum bahwa energi pengikat inti nuklida A_ZX adalah:

$$E_{B\ Z} {}^A X = (Z \times \Delta_p) + [(A - Z) \times \Delta_n] - (\Delta_{X-A}) \text{ MeV} \tag{1.3}$$

Harga E_B beberapa nuklida dapat dilihat pada Tabel 1.2. Dari E_B pada Tabel 1.2 tersebut, dapat diketahui bahwa, E_B umumnya akan makin besar dengan makin besarnya nuklida. Namun, kalau dilihat kestabilannya, ternyata dengan makin besarnya harga E_B , tidak mencerminkan makin stabilnya nuklida itu. Hal yang mencerminkan kestabilan nuklida di antara nuklida seisisotop adalah harga E_B rata-rata per nukleon, yaitu E_B total dibagi jumlah nukleon (A); Periksa Tabel 1.2.

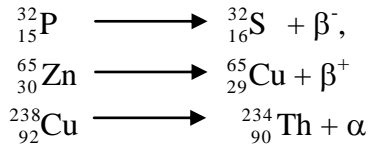
Tabel 1.2.
Harga E_B total dan E_B rata-rata per nukleon, serta sifat peluruhan beberapa nuklida.

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

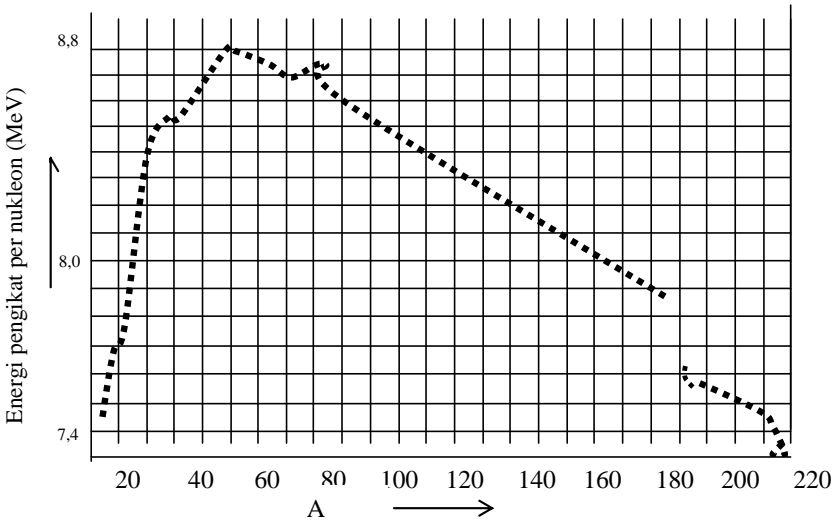
Pengkajian harga E_B rata-rata per nukleon pada Tabel 1.2, diperoleh bahwa inti stabil mempunyai E_B rata-rata per nukleon lebih besar daripada inti kurang stabil. Inti kurang stabil dapat meluruh secara spontan dengan satu atau beberapa jenis peluruhan (α , β^- , β^+ , γ , TE) membentuk nuklida lain yang

memiliki E_B maupun E_B rata-rata per nukleonnya lebih besar, misalnya peluruhan beberapa nuklida berikut ini.



Berdasarkan contoh reaksi peluruhan itu dapat diketahui bahwa E_B nuklida hasil juga lebih besar dari E_B nuklida semula.

Nilai E_B rata-rata per nukleon nuklida stabil dapat dibuat kurvanya sebagai fungsi A . Kurva ini dapat dilihat pada Gambar 1.8 yang menampakkan bahwa E_B rata-rata per nukleon berharga maksimum ($\sim 8,8$ MeV) pada $A = 60$, yaitu E_B yang nuklida besi dan nikel. Harga E_B rata-rata per nukleon hampir tetap dalam semua inti, kecuali untuk beberapa inti ringan. Nuklida di alam cenderung ingin berada dalam keadaan lebih stabil yaitu cenderung ingin mempunyai E_B rata-rata per nukleon lebih besar. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya reaksi fisi untuk nuklida berat dan reaksi fusi untuk inti-inti ringan. Pada Gambar 1.8 juga terlihat bahwa, nuklida berat, yang mempunyai E_B rata-rata per nukleon kecil, dapat melakukan reaksi pembelahan (reaksi fisi) membentuk nuklida yang lebih kecil, sehingga E_B rata-rata per nukleon nuklida-hasil mendekati harga maksimumnya. Demikian pula nuklida ringan akan melakukan reaksi penggabungan (reaksi fusi) membentuk nuklida yang lebih besar agar E_B rata-rata per nukleon nuklidanya mendekati maksimum. Reaksi fisi dan fusi ini akan menghasilkan energi yang sangat besar seperti energi matahari yang diperkirakan karena adanya reaksi fusi.

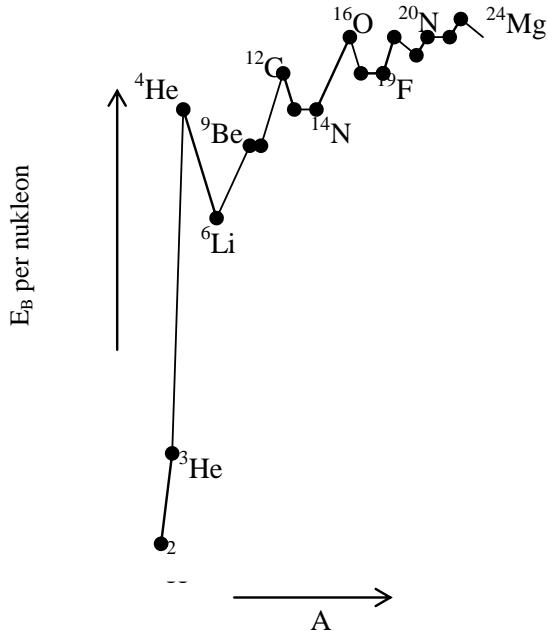


Gambar 1.8.

Energi Pengikat Rata-rata Per nukleon sebagai Fungsi A Nuklida Stabil

Gambar 1.9 menunjukkan kurva E_B terhadap A untuk nuklida-nuklida stabil dengan $2 \leq A \leq 25$ dengan skala lebih besar daripada Gambar 1.8.

Kurva ini memperlihatkan dengan jelas bahwa ada nuklida yang mempunyai E_B per nukleon lebih tinggi daripada nuklida tetangganya. Hal ini menunjukkan bahwa nuklida itu relatif lebih stabil daripada tetangganya atau dengan kata lain nuklida itu mempunyai kestabilan ekstra. Kestabilan ekstra ini terutama dipunyai oleh nuklida bernukleon genap-genap.

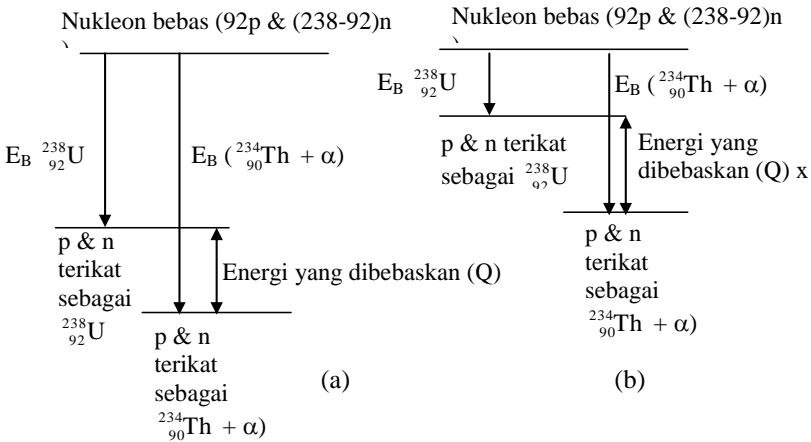


Gambar 1.9.
 E_B Rata-rata per Nukleon sebagai Fungsi A untuk Nuklida Stabil dengan $2 \leq A \leq 25$

E. ENERGI YANG DILEPASKAN PADA PELURUHAN (Q)

Keadaan Energi pengikat inti (E_B) dan E_B rata-rata per nukleon bagi inti yang meluruh dan inti yang terjadi pada suatu peluruhan dapat digambarkan dalam bentuk diagram; misalnya diagram E_B dan E_B rata-rata per nukleon untuk peluruhan, ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$, dapat dilihat pada Gambar 1.10.

Diagram itu (Gambar 1.10), menunjukkan bahwa energi yang dilepas saat nukleon bebas membentuk ${}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$ ini merupakan $E_B({}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha)$, lebih besar daripada saat nukleon bebas membentuk ${}^{238}_{92}\text{U}$ dan ini merupakan $E_B({}^{238}_{92}\text{U})$. Hal ini berarti peluruhan ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$ masih akan membebaskan energi (Q) sebesar: $Q = E_B({}^{234}_{90}\text{Th} + \alpha) - E_B({}^{238}_{92}\text{U})$.



Gambar 1.10.

Diagram E_B (a) dan Diagram E_B Rata-rata per Nukleon (b) untuk Peluruhan

$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$. Energi yang Dibebaskan pada Kedua Diagram tersebut Sama Besarnya

$$\begin{aligned}
 &= [(90 \times \Delta_p) + (234 - 90) \times \Delta_n - (\Delta_{Th234})] + [(2 \times \Delta_p) + (4 - 2) \\
 &\quad \times \Delta_n - \Delta_{He-4}] - [(92 \times \Delta_p) + (238 - 92) \times \Delta_n - (\Delta_{U-238})] \\
 &= [(90 \times \Delta_p) + (144) \times \Delta_n - (\Delta_{Th234})] + [(2 \times \Delta_p) + (2) \times \Delta_n - \Delta_{He-4}] \\
 &\quad - [(92 \times \Delta_p) + (146) \times \Delta_n - (\Delta_{U-238})] \\
 &= (\Delta_{U-238}) - (\Delta_{Th234} + \Delta_{He-4}) \\
 &= 47,307 - (40,612 + 2,425) = 4,27 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

Q dengan hasil sama dapat diperoleh dengan perhitungan menggunakan E_B rata-rata per nukleon (Gambar 1.10b) yaitu

$$Q = [E_B \text{ rata-rata per nukleon } (^{234}_{90}\text{Th} + \alpha) - E_B \text{ rata-rata per nukleon } ^{238}_{92}\text{U}] \times 238 \quad (1.4)$$

Berdasarkan perhitungan itu, secara umum besarnya energi yang dilepas (Q) dari suatu peluruhan adalah:

$$Q = \Delta_{\text{nuklida semula}} - (\Delta_{\text{nuklida hasil}} + \Delta_{\text{partikel yang dilepas}}) \quad (1.5)$$

Energi yang dilepas pada peluruhan ${}_{92}^{238}\text{U}$ itu, dapat pula dicari dengan menggunakan massa karena energi yang dilepas ekuivalen dengan kehilangan massa. Perhitungan Q menggunakan massa ini dapat dijabarkan dengan menggunakan perhitungan Q pada peluruhan ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + \alpha$.

$$\begin{aligned} Q &= (\Delta_{\text{U-238}}) - (\Delta_{\text{Th234}} + \Delta_{\text{He-4}}) \\ &= (M_{\text{U-238}} - A_{\text{U-238}}) \times 931,5 - [(M_{\text{Th-234}} - A_{\text{Th-234}}) \times 931,5 + \\ &\quad (M_{\text{He-4}} - A_{\text{He-4}}) \times 931,5] \\ &= (M_{\text{U-238}} - (238)) - [(M_{\text{Th-234}} - 234) + (M_{\text{He-4}} - 4) \times 931,5] \\ &= (M_{\text{U-238}} - (M_{\text{Th-234}} + M_{\text{He-4}})) \times 931,5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Berdasarkan penjabaran itu energi yang dilepas (Q) dalam suatu peluruhan adalah:

$$Q = [M_{\text{nuklida semula}} - (M_{\text{nuklida hasil}} + M_{\text{partikel yang dilepas}})] \times 931,5 \text{ MeV} \quad (1.6)$$

Reaksi fisi dan fusi, yang sangat eksoergik, dapat dijelaskan berlangsungnya dan dapat diperkirakan besarnya energi yang dilepaskan dengan rumus yang sama dengan peluruhan. Reaksi fisi pada inti atom akan menghasilkan inti-inti lebih kecil yang terletak kira-kira di tengah tabel periodik. Ini dapat terjadi karena inti-inti hasil fisi yang terletak di tengah tabel periodik tersebut mempunyai E_B rata-rata per nukleon lebih besar (lihat Gambar 2.6) daripada inti semula. Misalnya reaksi fisi: ${}_{92}^{238}\text{X}$ menjadi 2 bagian yang persis sama, yaitu $2\left({}_{46}^{119}\text{Y}\right)$. Energi yang terlibat dalam reaksi fisi itu dapat dihitung dengan konsep E_B maupun menggunakan massa, seperti perhitungan energi yang dibebaskan pada peluruhan. Misalnya akan dicari energi fisi ${}_{92}^{238}\text{X}$ itu dengan konsep E_B sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned} E_B \text{ X} &= \{92(7,289) + 146(8,071) - (44,79)\} \text{ MeV} \\ &= 1788,022 \text{ MeV} \\ &= 1788,022 \text{ MeV}/238 \text{ nukleon} \\ &= 7,5763644 \text{ MeV/nukleon.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_B \text{ Y} &= \{46(7,289) + 72(8,071) - (-76,21)\} \text{ MeV} \\ &= 992.616 \text{ MeV} \\ &= 992.616 \text{ MeV}/119 \text{ nukleon} \\ &= 8,412 \text{ MeV/nukleon.} \end{aligned}$$

Dalam hal ini $E_B Y > E_B X$

Jadi energi yang dibebaskan pada pembelahan itu (Q) adalah:

$$\begin{aligned} Q &= 2E_B Y - E_B X \text{ atau} \\ &= 236 (2E_B \text{ rata-rata per nukleon Y} - E_B \text{ rata-rata per nukleon X}) \text{ atau} \\ &= \Delta X - 2 (\Delta Y) \\ &= 44,79 - 2 (-76,21) \\ &= 197,21 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Dengan membandingkan harga E_B nuklida induk (*parent*) dengan nuklida turunan (*daughter*) atau dengan menghitung energi yang dilepas dalam suatu peluruhan dapat diketahui apakah peluruhan tersebut berlangsung spontan atau tidak spontan. Apabila Q berharga positif berarti peluruhan membebaskan energi jadi peluruhan berjalan spontan sebaliknya bila Q berharga negatif, peluruhan tidak spontan. Seperti peluruhan ${}_{92}^{238}\text{U}$ menjadi ${}_{93}^{238}\text{Np} + \beta^-$, tidak membebaskan energi tetapi memerlukan energi dengan kata lain peluruhan ${}_{92}^{238}\text{U}$ menjadi ${}_{93}^{238}\text{Np} + \beta^-$ adalah tidak spontan. Jadi, peluruhan itu tidak berlangsung atau ${}_{92}^{238}\text{U}$ stabil terhadap peluruhan β^- .

Berdasar penjelasan di atas dapat dinyatakan bahwa jika secara energetik suatu peluruhan tidak mungkin berlangsung, maka tentu proses tersebut tidak terjadi secara spontan. Tetapi harus berhati-hati karena ada proses peluruhan secara energetik terjadi, tetapi belum dapat disimpulkan proses itu berlangsung. Hal ini karena proses itu berlangsung dengan kecepatan yang tidak dapat diukur. Sebagai contoh, ${}_{74}^{182}\text{W}$ yang meluruh memancarkan partikel α membentuk ${}_{72}^{178}\text{Hf}$. Massa total ${}_{74}^{182}\text{W}$ lebih besar daripada massa ${}_{2}^4\text{He} +$ massa ${}_{72}^{178}\text{Hf}$. Jadi, secara energetik proses tersebut berlangsung spontan. Tetapi proses tersebut tidak segera dapat diamati karena waktu paro ${}_{74}^{182}\text{W}$ sangat panjang sehingga partikel yang dipancarkan per menit sangat rendah, lebih rendah daripada batas deteksi teknik-teknik yang ada.

F. MODEL TETES CAIRAN DAN PERSAMAAN SEMIEMPIRIS MASSA DAN ENERGI PENGIKAT INTI

Volume inti dan energi pengikat inti (E_B), berbanding lurus terhadap jumlah nukleon (A). Volume inti yang berbanding lurus terhadap jumlah

nukleon menunjukkan bahwa inti tidak dapat dimampatkan (*incompressible*). Energi pengikat inti yang berbanding lurus terhadap jumlah nukleon, menunjukkan bahwa gaya inti (yaitu gaya jarak pendek yang bekerja pada jarak sekitar jari-jari inti) mempunyai sifat kejenuhan; ini berarti bahwa nukleon di dalam inti hanya berinteraksi dengan sejumlah kecil nukleon lain, persis seperti atom di dalam suatu tetes cairan (*liquid drop*). Dalam suatu tetes cairan, atom yang berada di sebelah dalam hanya diikat kuat oleh sejumlah atom tetangga yang mengelilinginya sedangkan atom yang berada di permukaan hanya diikat kuat oleh atom-atom tetangganya di bagian dalam inti. Hal inilah yang menyebabkan tetes cairan berbentuk bulat dan mempunyai tegangan permukaan. Inti yang sama dengan tetes cairan ini juga mempunyai tegangan permukaan. Berdasarkan sifat inti yang sama seperti suatu tetes cairan ini, kemudian disarankan menghitung E_B dengan suatu model tetes cairan (*liquid drop model*) yang bermuatan dengan tegangan permukaannya (*surface tension*). Berdasarkan model ini, E_B merupakan jumlah dari berbagai energi yaitu energi volume, energi permukaan, dan energi Coulomb, serta sumbangan dari energi-energi lain, dan tiap-tiap energi mempunyai fungsi yang tergantung pada bilangan massa (A) dan muatan inti (Z).

Persamaan E_B dengan model tetes cairan pertama kali diberikan oleh C.F Von Weizsäcker pada tahun 1935. Kini persamaan Weizsäcker atau persamaan semiempiris energi ikat Weizsäcker telah direvisi dengan menambahkan suku-suku dan mengubah koefisien persamaan tersebut. Revisi itu dilakukan oleh W.D. Myers dan W.J. Swiatecki dan persamaan E_B model tetes cairan yang dihasilkan sebagaimana berikut ini.

$$E_B = C_1 A \left[1 - k \left(\frac{N - Z}{A} \right)^2 \right] - C_2 A^{2/3} \left[1 - k \left(\frac{N - Z}{A} \right)^2 \right] - C_3 Z^2 A^{-1/3} + C_4 Z^2 A^{-1} + \delta \quad (1.7)$$

Dalam persamaan ini, E_B adalah energi pengikat yaitu energi yang diperlukan untuk menguraikan inti menjadi nukleon penyusunnya, dalam MeV. Z , dan N adalah lambang untuk jumlah proton dan neutron. Harga koefisiennya adalah: $C_1 = 15,677$ MeV, $C_2 = 18,56$ MeV, $C_3 = 0,717$ MeV, $C_4 = 1,211$ MeV, dan $k = 1,79$. Suku δ akan didiskusikan di bawah ini.

Persamaan itu disebut persamaan semiempiris karena konstantanya harus disesuaikan. Ada besaran yang diturunkan dari sifat partikel itu dan ada tetapan yang nilainya ditetapkan secara empiris.

Berikut akan dibahas tiap-tiap suku dari persamaan tersebut.

Suku pertama, $= C_1 A \left[1 - k \left(\frac{N - Z}{A} \right)^2 \right]$, merupakan energi volume.

Suku ini, yang paling dominan dalam persamaan tersebut, berbanding lurus terhadap A dan jadi juga terhadap volume inti. Jadi, suku ini menyatakan bahwa E_B berbanding lurus dengan jumlah nukleon. Hal ini akibat dari karakter *rentang pendek* (*short range*) dan karakter kejenuhan dari gaya inti. Kejenuhan gaya inti hampir sempurna jika $N = Z$ (seperti ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$). Hal ini ditunjukkan dengan pengamatan besarnya nilai E_B yang disebabkan oleh gaya inti. E_B nuklida yang terletak di sebelah kiri dan kanan dari nuklida dengan $N = Z$, menurun secara simetris. Berdasar kenyataan empiris inilah maka energi volume pada persamaan tersebut dikoreksi dengan:

$\left(\frac{N - Z}{A} \right)^2$, yang dikenal dengan energi simetri.

Suku ke 2, $C_2 A^{2/3} \left[1 - k \left(\frac{N - Z}{A} \right)^2 \right]$, merupakan energi permukaan.

Sebagaimana model tetes cairan, nukleon-nukleon di permukaan inti tidak dikelilingi oleh nukleon lain sebanyak nukleon yang berada di dalam inti. Jadi, nukleon di permukaan diikat kurang kuat atau dengan kata lain nukleon di permukaan inti mempunyai gaya ketidakjenuhan. Akibatnya, pengurangan E_B berbanding lurus terhadap jumlah nukleon di permukaan inti. Jadi, pengurangan E_B berbanding lurus terhadap luas permukaan inti yaitu berbanding lurus terhadap R^2 atau $A^{2/3}$. Oleh karena adanya pengurangan E_B ini, maka suku ke-2 pada persamaan semiempiris tersebut diberi tanda negatif. Bertambahnya ukuran inti, menyebabkan angka banding permukaan terhadap volume berkurang sehingga suku ke-2 ini menjadi kurang berarti.

Faktor koreksi terhadap energi permukaan sebesar $\left(\frac{N - Z}{A} \right)^2$ tidak

dicantumkan di dalam kebanyakan persamaan E_B yang konvensional. Namun, bila faktor koreksi ini diabaikan dari persamaan Myers-Swiatecki, maka koefisien suku-suku lain dalam persamaan tersebut harus diatur kembali agar diperoleh harga E_B yang sesuai dengan eksperimen. Faktor koreksi ini dicantumkan oleh Myers dan Swiatecki dan dinyatakan dalam bentuk fungsi yang sama seperti faktor koreksi terhadap energi volum, dengan maksud

untuk memastikan bahwa inti dengan harga $(N-Z)$ besar, cukup membuat energi volum menjadi sama dengan nol, demikian juga energi permukaan.

Suku ke 3, $C_3 Z^2 A^{-1/3}$, menyatakan energi Coulomb, yang merupakan energi tolakan elektrostatik antara proton-proton. Tolakan elektrostatik akan menurunkan energi pengikat. Oleh karena itu, suku ini diberi tanda negatif pada persamaan itu. Energi elektrostatik inti, yang dianggap berbentuk bola

bermuatan-seragam dengan muatan q dan jari-jari R , adalah $\frac{3}{5} q^2 / R$. Oleh

karena $q = Ze$ dan $R = r_0 A^{1/3}$, maka energi elektrostatik inti dengan jari-jari R

dan nomor atom Z dapat ditulis sebagai $\left(\frac{3e^2}{5r_0} \right)^2 Z^2 A^{-1/3}$. Koefisien $C_3 =$

0,717 MeV, diperoleh dengan memasukkan harga r sebesar $1,205 \text{ fm}$. Oleh karena ketergantungan energi Coulomb terhadap Z , maka ia menjadi makin penting dengan bertambahnya Z .

Muatan inti tidak seragam tetapi terdistribusi dalam batas-batas yang baur. Batas muatan baur ini menimbulkan perlunya suatu koreksi terhadap energi Coulomb. Koreksi ini dinyatakan oleh suku ke 4. Koefisien C_4 sebesar $1,211 \text{ MeV}$ berhubungan dengan ketebalan kulit (*skin thickness*), $de = 2,4 \text{ fm}$, sesuai dengan hasil percobaan hamburan elektron (*electron scattering*).

Suku ke 5, yang dilambangkan dengan δ , menyatakan energi pasangan (*pairing energy*). Energi pengikat inti tergantung pada apakah N dan Z genap atau ganjil. Inti genap-genap merupakan inti yang paling stabil dengan harga δ sebesar

$+\frac{11}{A^2}$. Untuk inti genap-ganjil dan ganjil-genap, $\delta = \text{nol}$, dan inti ganjil-

ganjil, δ sebesar $-\frac{11}{A^2}$. Kestabilan ganjil-genapnya inti dapat dijelaskan dari

kecenderungan dua partikel yang sama untuk melengkapi tingkat energi dengan memasang spin yang berlawanan. Inilah yang menyebabkan suku δ dalam persamaan semi empiris energi pengikat disebut energi pasangan.

Energi Permukaan Inti dan Parabola Massa

Energi pengikat semua inti dapat disajikan sebagai fungsi A dan Z dengan grafik tiga dimensi. Dengan tanpa membuat energi permukaan inti dalam 3 dimensi, masih diperoleh informasi yang sangat berguna yaitu

dengan lebih mempertimbangkan massa atom total, M , dibanding dengan energi pengikat, E_B .

Berdasarkan definisi energi pengikat inti, dapat ditulis kembali suatu persamaan seperti berikut ini.

$$M = ZM_p + (A - Z)M_n - \frac{E_B}{931,5} \quad (1.8)$$

Di dalam hal ini, M_p dan M_n masing-masing massa atom hidrogen dan massa neutron. Penggabungan persamaan (1.7) dengan (1.8), diperoleh persamaan semi empiris massa seperti berikut ini.

$$M = 939,573A - 0,782Z - \left(C_1A - C_2A^{2/3} \right) \left[1 - k \left(\frac{1 - 2Z}{A} \right) \right] + Z^2 \left(C_3A^{-1/3} - C_4A^{-1} \right) - \delta \quad (1.9)$$

Persamaan (1,9) ini merupakan persamaan kuadrat pada Z . Kalau dibuat grafik M terhadap Z , akan diperoleh grafik berbentuk parabola dengan verteks pada bagian bawah. Persamaan (1.9) dapat ditulis dalam bentuk berikut ini.

$$M = f_1(A)Z^2 + f_2(A)Z + f_3(A) - \delta \quad (1.10)$$

dengan 3 koefisiennya merupakan fungsi A masing-masing dengan nilai sebagai berikut:

$$f_1(A) = 0,717 A^{-1/3} + 111,036 A^{-1} - 132,89 A^{-4/3}$$

$$f_2(A) = 132,89 A^{-1/3} - 113,029$$

$$f_3(A) = 951,958 A - 14,66 A^{2/3}$$

Untuk nuklida-nuklida dengan A sama atau nuklida seisorbar, koefisien-koefisien tersebut konstan. Persamaan kuadrat itu menyajikan satu parabola jika A ganjil ($\delta = 0$) dan 2 parabola jika A genap ($\delta = +1/A^{1/2}$ dan $-1/A^{1/2}$).

Parabola massa atau parabola energi, yang merupakan irisan energi permukaan inti melalui bidang datar dengan A tetap ini sangat berguna dalam sistematika peluruhan β sebab harga energi yang terlibat dalam peluruhan β antara isobar-isobar yang bertetangga dapat dibaca secara langsung. Sebagai contoh adalah parabola untuk $A = 157$ dan $A = 75$ seperti ditunjukkan pada Gambar 1.11 dan pasangan parabola untuk $A = 156$ pada Gambar 1.12.

Verteks setiap parabola massa untuk A tertentu, merupakan massa minimum atau energi pengikat maksimum atau merupakan nuklida yang paling stabil dari sederetan nuklida-nuklida seisorbar. Nuklida terstabil ini dapat diketahui dari muatan inti (Z) nuklida tersebut. Untuk memperoleh muatan inti nuklida terstabil (Z_A), maka persamaan kuadrat tersebut di

diferensialkan terhadap Z dengan A tetap dan hasil diferensial itu disamakan dengan nol.

$$\frac{\partial M}{\partial Z} = 2f_1(A)Z + f_2(A) = 0$$

$$Z_A = \frac{-f_2(A)}{2f_1(A)} \tag{1.11}$$

Oleh karena Z merupakan fungsi kontinu, maka harga Z_A yang diperoleh tidak merupakan bilangan bulat. Sebagai contoh untuk $A = 157$, akan diperoleh $Z_A = 64,69$, untuk $A = 156$, diperoleh $Z_A = 64,32$, dan untuk $A = 75$ diperoleh $Z_A = 33,13$.

Persamaan 1.10 dapat ditulis dalam bentuk berikut ini.

$$M = f_1(A)(Z - Z_A)^2 - \delta + f(A) \tag{1.12}$$

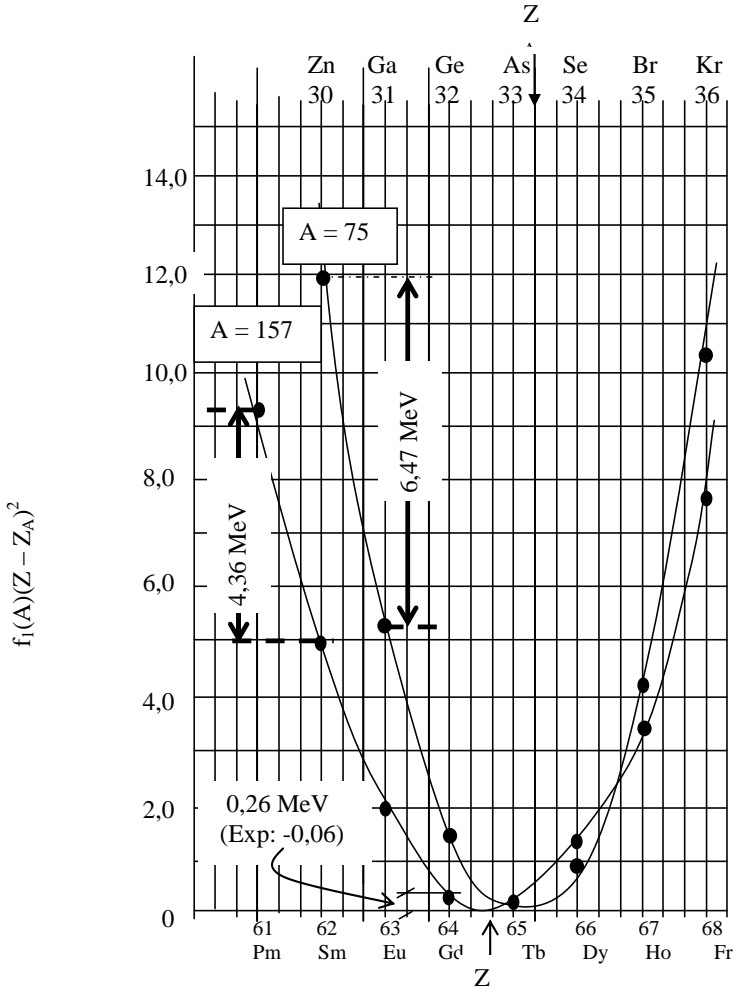
Di sini, $f(A) = f_3(A) - \frac{f_2(A)^2}{4f_1(A)}$. Jadi, ordinat parabola pada Gambar 1.11

dan 1.12 adalah $f_1(A)(Z - Z_A)^2$; dengan demikian maka nuklida dengan A ganjil yang $Z = Z_A$, skala ordinatnya akan berharga nol; dan untuk nuklida dengan A genap, titik nol dari ordinat terletak ditengah, di antara verteks parabola nuklida genap-genap dan parabola nuklida ganjil-ganjil (lihat Gambar 1.12).

Perbedaan energi nuklida seisobar yang bertetangga ditentukan oleh harga $f_1(A)$ yang makin menurun dengan bertambahnya A . Lembah kestabilan (*stability valley*) permukaan energi inti dengan demikian makin lebar dengan bertambahnya A , seperti terlihat pada Gambar 1.11.

Berdasarkan kurva parabola nuklida seisobar, dapat diketahui bahwa untuk nuklida dengan A ganjil, hanya ada satu nuklida yang stabil terhadap peluruhan β , yaitu nuklida yang letaknya terdekat dengan harga minimum parabola. Untuk nuklida seisobar dengan A genap biasanya ada 2 dan kadang-kadang 3 nuklida stabil terhadap peluruhan β , semuanya dari jenis genap-genap. Pada Gambar 1.12, ^{156}Gd dan ^{156}Dy keduanya stabil karena keduanya mempunyai massa terkecil daripada tetangganya yaitu ^{156}Tb , yang merupakan ganjil-ganjil. Sebenarnya ^{156}Dy , yang massanya lebih besar daripada ^{156}Gd , secara termodinamika tidak stabil. Peluruhan ^{156}Dy menjadi ^{156}Gd , memerlukan proses peluruhan β ganda (*double β -decay*) meliputi emisi dua partikel β (dalam hal ini β^+) atau dua proses tangkapan elektron secara serentak. Peluruhan semacam itu mempunyai waktu paro yang sangat lama, sehingga secara eksperimen sukar diketahui adanya peluruhan ganda tersebut. Peluruhan β ganda yang sudah nyata terbukti terjadi secara

eksperimen adalah ^{130}Te menjadi ^{130}Xe dengan $t_{1/2} = 2 \times 10^{21}$ tahun, dan ^{82}Se menjadi ^{82}Kr dengan $t_{1/2} = 1 \times 10^{20}$ tahun.



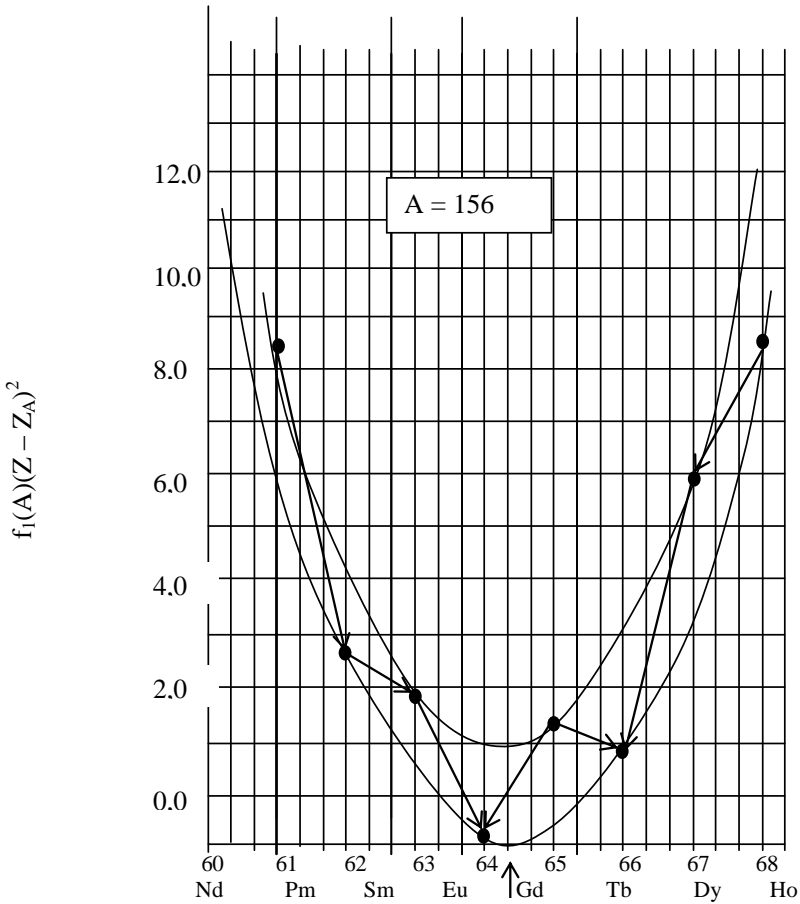
Gambar 1.11.

Parabola Massa untuk $A = 75$ dan $A = 157$, Dihitung dari Persamaan 1.9.

Perbedaan Massa antara Isobar yang Bertetangga Dicantumkan, demikian pula perbedaan Massa yang diperoleh secara Eksperimen Dicantumkan dalam Tanda Kurung. Skala Z sebelah atas Menunjukkan Isobar dengan $A = 75$, sedangkan Skala di bawah untuk $A = 157$.

Dari Gambar 1.12 dapat pula dicatat bahwa inti ganjil-ganjil (sebagai contoh $^{156}_{65}\text{Tb}$) dapat meluruh menjadi inti genap-genap tetangganya dengan mengalami 2 jenis peluruhan beta (peluruhan bercabang), yaitu dengan mengemisikan sinar- β^- , dan dengan tangkapan elektron (atau mungkin mengemisikan β^+). Untuk $^{156}_{65}\text{Tb}$, cabang peluruhan yang mengemisikan β^- kenyataan tidak dapat terdeteksi karena energi peluruhannya sangat kecil, tetapi ada sejumlah contoh radionuklida yang mengalami peluruhan bercabang yaitu seperti ^{64}Cu .

Penentuan Z_A (nuklida paling stabil dari nuklida seisobar) dengan kurva parabola massa ini (atau persamaan 1.10) tidak 100% benar. Sebagai contoh, menurut persamaan tersebut, ^{157}Tb merupakan anggota isobar dengan $A = 157$ yang stabil. ^{157}Gd dengan demikian diharapkan akan meluruh dengan mengemisikan β^- menjadi ^{157}Tb dengan energi peluruhan 0,26 MeV. Kenyataan ^{157}Gd stabil terhadap peluruhan β^- dan ^{157}Tb merupakan nuklida tidak stabil yang mengalami peluruhan dengan tangkapan elektron, dengan energi peluruhan sebesar 0,06 MeV. Jadi, penentuan Z_A untuk isobar dengan $A = 157$, dengan teori persamaan parabola massa mempunyai kesalahan sekitar 0,2 satuan, artinya Z_A untuk isobar dengan $A = 157$ agar menunjuk pada Z_A nuklida ^{157}Gd , hasil Z_A harus diturunkan 0,2 satuan.



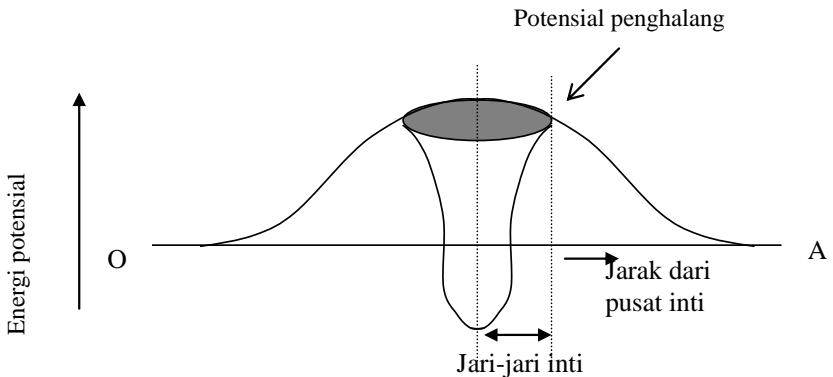
Gambar 1.12.
Parabola Massa untuk A = 156, Dihitung dari Persamaan 1.9

G. MODEL KULIT INTI

Inti terdiri dari proton-proton dan neutron-neutron. Harusnya terjadi gaya di antara nukleon-nukleon tersebut. Sebenarnya gaya yang terjadi di antara nukleon-nukleon sangat kompleks yang tampak secara nyata adalah gaya antara p-p, n-p, n-n. Gaya p-p mestinya merupakan gaya tolak. Kenyataan yang ada nukleon tetap ada dalam inti, artinya gaya p-p tidak menyebabkan

inti musnah bahkan dapat menolak proton seperti menolak muatan positif partikel alpha yang didekatkan ke inti.

Gaya antarnukleon dalam inti atom akan berubah menjadi gaya tarik menarik bila jarak antar nukleon atau antarnukleon yang datang dari luar sangat dekat yaitu berorde sekitar 10^{-13} cm (1 fm = 1 fermi). Untuk memahami adanya gejala ini, secara sederhana dapat divisualisasikan dengan suatu model inti yang disebut **model sumur potensial inti**.



Gambar 1.13.

Penyajian Model Inti sebagai Sumur Potensial Kedalaman Sumur Menunjukkan Besarnya Energi. Lereng di atas Garis Horizontal OA merupakan Potensial Penghalang (*potential barrier*)

Model sumur potensial memperlihatkan bahwa partikel α pada eksperimen Rutherford tidak akan mencapai inti bila energi α tidak cukup besar yaitu sama atau lebih besar dari potensial penghalang (*potential barrier*). Partikel α yang mendekati inti akan mendapat gaya tolak elektrostatis dari inti. Jika energi partikel α cukup tinggi, dan dapat melewati potensial penghalang atau mencapai pinggir sumur, ia akan sangat mudah mencapai inti. Pada keadaan ini gaya tolak elektrostatis inti berubah menjadi gaya tarik. Gaya yang bekerja pada rentang-jarak pendek (*short range force*) inilah yang menyebabkan kestabilan inti. Gaya inilah yang disebut **gaya inti**. Gaya ini besarnya sekitar 10^{-3} Coulomb. Semua nukleon dalam inti ditarik oleh gaya inti. Untuk partikel bermuatan sejenis masih berlaku gaya Coulomb yaitu gaya rentang-jarak jauh (*long range force*). Jadi, dalam inti bekerja 2 gaya yaitu gaya inti dan gaya Coulomb dan kedua gaya ini saling

berkompetisi. Gaya inti cenderung membuat inti lebih stabil sedangkan gaya Coulomb cenderung membuat ini menjadi tidak stabil.

Ketinggian potensial penghalang tergantung muatan inti dan muatan partikel yang datang kepadanya. Ketinggian potensial penghalang itu harganya dapat diturunkan dari hukum Coulomb yang berlaku apabila dua inti bermuatan saling berdekatan.

$$V_C = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(R_1 + R_2)} \quad (1.13)$$

di sini, $Z_1 e$ = muatan inti atom nuklida sasaran; $Z_2 e$ = muatan inti partikel yang datang; R_1 dan R_2 berturut-turut adalah jari-jari inti atom nuklida sasaran dan partikel inti yang datang dalam cm.

Satuan V_c adalah erg, bila satuan muatan inti adalah esu dan R dalam cm. V_c dalam satuan SI ($Nm = J$) adalah sebagai berikut.

$$V_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(R_1 + R_2)} \quad (1.14)$$

di sini, ϵ_0 = permitivity = $8,8542 \cdot 10^{12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^2$
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 $R = 1 \text{ fermi (f}_m) = 10^{-15} \text{ m}$

Pemasukan harga-harga tersebut ke dalam persamaan 3.13 diperoleh V_c dalam $Nm = J$ dan dengan mengingat bahwa, $1 \text{ eV} = 0,1602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ dan $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, akan diperoleh harga V_c dalam satuan MeV yaitu sebesar,

$$V_C = 1,44 \frac{Z_1 Z_2 e^2}{(R_1 + R_2)} \text{ MeV} \quad (1.15)$$

Dengan mempelajari pelepasan partikel-partikel dari inti, memungkinkan untuk mengukur ketinggian potensial penghalang dan kedalaman sumur potensial. Kedalaman sumur ini telah diperoleh sebesar sekitar 40 MeV. Namun kenyataannya, energi yang diperlukan untuk melepaskan satu neutron atau satu proton dari inti kurang dari 40 MeV. Ini berarti tidak semua nukleon berada di dasar sumur potensial. Hal ini sesuai dengan kaidah mekanika kuantum, bahwa tidak mungkin nukleon di dalam sumur potensial tetap diam dalam keadaan tanpa gerakan. Nukleon diperbolehkan mengadopsi tipe gerakan tertentu dengan energi bervariasi di atas dasar sumur. Dari sinilah

akhirnya muncul model inti lain yang melengkapi model sumur potensial yaitu **model kulit inti** (*nuclear shell model*).

Model kulit inti ini didukung pula oleh adanya kestabilan ekstra yang dipunyai oleh nuklida dengan jumlah proton atau muatan inti, Z , sebanyak 2, 8, 20, 28, 50, atau 82 atau jumlah neutron, n , sebanyak: 2, 8, 20, 28, 50, 82, atau 126.

Kestabilan ekstra nuklida dengan Z atau n sebanyak bilangan itu ditunjukkan dengan kelimpahannya yang besar di alam dan nuklida itu bila direaksikan dengan neutron kemungkinan terjadinya reaksi nuklir sangat kecil. Karena itu bilangan-bilangan tersebut dikenal dengan **bilangan gaib** (*magic number*).

Kestabilan ekstra juga dijumpai pada gas mulia dengan jumlah elektron (Z) : 2; 10; 18; 36; 54 ... Dengan demikian, masalah inti mempunyai kemiripan dengan sifat elektron pada atom. Pada gas mulia kestabilan ekstra disebabkan oleh kulit elektron yang sudah penuh. Pada inti tampaknya kestabilan ekstra disebabkan pula oleh nukleon yang mengisi kulit sampai penuh dan oleh karena itu sangat mungkin susunan nukleon dalam inti sama dengan susunan elektron dalam kulit atom. Hal ini didukung oleh nukleon sejenis yang saling berpasangan. Hanya saja bilangan yang menyatakan jumlah Z atau n pada inti ekstra-stabil tidak sama dengan jumlah Z pada atom ekstra-stabil. Hal ini karena pada inti tidak ada sentral dan nukleon menempati ruang yang sangat kecil sehingga dapat mengakibatkan adanya interaksi spin (s) dengan orbit (l) (*spin-orbit coupling*) dan menyebabkan terjadinya *splitting* (pemecahan) tingkat energi.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Apakah yang Anda ketahui dengan nukleon, nuklida, radionuklida, isotop, radioisotop.
- 2) Nuklida ringan yang jumlah protonnya (Z) lebih banyak daripada neutron (n), berdasar kurva stabilitas inti (diagram Z vs n), nuklida tersebut tidak stabil. Agar menjadi lebih stabil hal apakah yang dilakukan nuklida tersebut? Jelaskan!
- 3) Sebutkan minimal 2 informasi yang dapat diperoleh dari peta nuklida.

- 4) Apakah yang Anda ketahui dengan Energi Pengikat inti (E_B) dan Energi Pengikat Inti penukleon? Adakah hubungan antara kedua energi pengikat inti tersebut dengan kestabilan relatif suatu nuklida? Kalau ada bagaimanakah hubungannya?
- 5) Jelaskan dengan cara menghitung energi yang dilepas, apakah peluruhan $^{32}\text{P} \longrightarrow ^{32}\text{S} + \beta^- + \nu$ terjadi?
Diketahui: $\Delta ^{32}\text{P} = -24,305 \text{ MeV}$, $\Delta ^{32}\text{S} = -26,015 \text{ MeV}$.
- 6) Ramalkan dengan persamaan parabola massa, model tetes cairan suatu inti, apakah nuklida $^{23}_{11}\text{Na}$ stabil atau tidak.

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Nukleon adalah proton dan neutron yang menyusun inti atom. Nuklida adalah spesies inti yang ditandai oleh jumlah proton dan neutronnya. Radionuklida adalah spesies inti yang ditandai oleh jumlah proton dan neutronnya dan bersifat radioaktif. Isotop adalah nuklida yang jumlah protonnya sama sedangkan bilangan massanya berbeda. Radioisotop adalah radionuklida yang jumlah protonnya sama sedangkan bilangan massanya berbeda.
- 2) Nuklida tidak stabil yang jumlah protonnya lebih besar daripada jumlah neutronnya akan menjadi lebih stabil dengan memancarkan positron (β^+) atau tangkapan elektron orbital.
- 3) Informasi yang dapat diperoleh dari peta nuklida adalah:
- Nuklida yang stabil dan tidak stabil beserta jenis peluruhannya
 - Nuklida seisisotop, seisisobar, seisisoton beserta letaknya pada peta nuklida.
- Untuk peta nuklida yang dibuat dengan menempatkan jumlah proton sebagai sumbu tegak dan jumlah neutron sebagai sumbu mendatar, maka isotop terletak pada satu lajur horizontal, isoton terletak pada satu lajur vertikal, dan isobar terletak pada satu lajur diagonal dari kiri atas ke kanan bawah.
- 4) Energi pengikat inti adalah energi yang dilepas saat nukleon bebas membentuk inti (nukleon terikat) atau energi yang ekuivalen dengan selisih antara massa nukleon bebas dengan massa inti. Energi pengikat inti per nukleon adalah energi pengikat inti dibagi bilangan massa. Ada hubungan antara kestabilan relatif nuklida dengan energi pengikat inti dan energi pengikat inti per nukleon. Untuk nuklida seisisobar, nuklida

yang relatif lebih stabil adalah nuklida yang energi pengikat intinya maupun energi pengikat inti per nukleonnya lebih besar. Untuk nuklida seisisotop, nuklida yang relatif lebih stabil adalah nuklida yang energi pengikat inti per nukleonnya lebih besar.

- 5) Energi yang dilepas (Q) pada peluruhan: $^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S} + \beta^- + \nu$ adalah $-24,305 \text{ MeV} - (-26,015 \text{ MeV}) = 1,710 \text{ MeV}$. Oleh karena pada peluruhan itu terjadi pelepasan energi, maka peluruhan itu terjadi.
- 6) $Z_A = \frac{-f_2(A)}{2f_1(A)} = \frac{(132,89 \times 23^{-1/3} - 111,029)}{2(0,717 \times 23^{-1/3} + 111,036 \times 23^{-1} - 132,89 \times 23^{-4/3})}$
 $= 10,547601 \approx 11$

Jadi, dari isotop Na, yang stabil adalah $^{23}_{11}\text{Na}$ dan terletak pada pita kestabilan pada peta nuklida.



RANGKUMAN

Inti stabil adalah inti yang tidak dapat secara spontan meluruh atau berubah. Definisi kestabilan yang lebih terbatas adalah dengan memperhatikan jenis peluruhan yang tidak terjadi pada inti tersebut. Sebagai contoh, ^{238}U tidak dapat meluruh secara spontan dengan mengemisikan β^- atau β^+ . ^{238}U dikatakan mempunyai kestabilan β , tetapi tidak stabil terhadap peluruhan α . Kestabilan nuklida dapat ditinjau dari berbagai aspek, sebagaimana akan dibahas di bawah ini.

1. Massa dan kestabilan

Kestabilan inti terhadap jenis peluruhan tertentu dapat diketahui dengan memperhatikan massa total inti mula-mula dengan massa total inti hasil. Jika perubahan inti berlangsung eksotermik (perubahan spontan), maka massa total hasil harus kurang dari pada massa total inti mula-mula. Misalnya, ^{22}Na tidak dapat secara spontan mengemisikan partikel- α menjadi ^{18}F , oleh karena massa hasil (yaitu massa ^4He + massa ^{18}F) lebih besar daripada massa ^{22}Na dengan perbedaan sekitar 8,49 MeV.

2. Angka banding proton-neutron

Angka banding jumlah proton terhadap jumlah neutron dalam inti mempengaruhi jenis peluruhan inti. Ada diagram yang sangat membantu menjelaskan sifat-sifat inti dengan menghubungkannya dengan jumlah proton dan neutron. Diagram itu disebut diagram Segre (Segre chart) yaitu diagram yang dibuat dengan mengalurkan jumlah proton (sumbu vertikal) dengan jumlah neutron (sumbu

horizontal) nuklida-nuklida. Nuklida-nuklida yang stabil terhadap peluruhan β dihubungkan dengan suatu garis yang disebut garis kestabilan atau garis kestabilan maksimum. Keteraturan sifat-sifat inti yang tampak pada diagram tersebut adalah bahwa hampir semua nuklida yang meluruh dengan peluruhan β^+ dan TE (Tangkapan Elektron) terletak di sebelah kiri garis kestabilan dan hampir semua nuklida yang meluruh dengan peluruhan β^- terletak di sebelah kanan garis kestabilan. Peluruhan ini terjadi karena nuklida yang kaya proton akan mengubah protonnya menjadi neutron, sebaliknya nuklida yang kaya neutron akan mengubah neutronnya menjadi proton dan nuklida dengan jumlah proton sama dengan neutron umumnya stabil. Bagaimanakah dengan ^{22}Na yang ternyata tidak stabil dan ^{23}Na yang ternyata stabil?

3. Energi pengikat inti

Kestabilan inti merupakan persoalan energi. Energi yang terkait dengan masalah tersebut adalah energi pengikat inti. Energi pengikat inti adalah energi yang dilepas saat nukleon bebas membentuk inti. Energi pengikat inti dibagi jumlah nukleon disebut energi pengikat inti rata-rata per nukleon. Energi pengikat inti dan energi pengikat rata-rata per nukleon dapat menjelaskan kestabilan relatif nuklida. Nuklida kurang stabil dapat meluruh menjadi nuklida lain, yang energi pengikat rata-rata per nukleonnya lebih besar. Di samping itu, energi pengikat inti dan energi pengikat rata-rata per nukleon dapat memperkirakan besarnya energi yang terlibat dalam reaksi spontan inti (peluruhan) reaksi fisi, fusi, dan reaksi penembakan inti. Masalah ^{22}Na yang ternyata tidak stabil dan ^{23}Na yang ternyata stabil dapat dijelaskan dengan energi pengikat inti atau dapat dijelaskan dengan menghitung energi yang dilepas apabila terjadi peluruhan?

4. Model tetes cairan dan persamaan semiempiris massa dan energi ikat serta hubungannya dengan kestabilan.

Volume dan energi pengikat total inti, berbanding lurus terhadap jumlah nukleon (A). Volume inti yang berbanding lurus dengan jumlah nukleon menunjukkan bahwa inti tidak dapat dimampatkan (*incompressible*). Energi pengikat total inti yang berbanding lurus terhadap jumlah nukleon, menunjukkan bahwa gaya inti mempunyai sifat kejenuhan. Ini yang berarti bahwa nukleon di dalam inti hanya berinteraksi dengan sejumlah kecil nukleon lain, persis seperti atom-atom di dalam suatu tetes cairan (liquid drop) di mana atom yang berada di sebelah dalam hanya diikat kuat oleh sejumlah atom tetangga yang mengelilinginya sedangkan atom yang berada di permukaan hanya diikat kuat oleh atom-atom tetangga di bagian

dalam. Persamaan Energi pengikat inti dengan model tetes cairan menurut W.D Myers dan W.J Switecki adalah:

$$E_B = C_1 A \left[1 - k \left(\frac{N - Z}{A} \right)^2 \right] - C_2 A^{2/3} \left[1 - k \left(\frac{N - Z}{A} \right)^2 \right] - C_3 Z^2 A^{-1/3} + C_4 Z^2 A^{-1} + \delta$$

Persamaan ini dapat diturunkan lebih lanjut dengan menyubstitusikannya ke dalam persamaan energi pengikat inti secara teoretis, menjadi:

$$M = f_1(A)Z^2 + f_2(A)Z + f_3(A) - \delta$$

dengan 3 koefisien yang merupakan fungsi A. Untuk nuklida tertentu (A tertentu), koefisien-koefisien tersebut konstan dan persamaan tersebut merupakan persamaan parabola, yang berlaku untuk nuklida-nuklida dengan A sama (seisobar). Untuk nuklida seisobar dengan persamaan tersebut dapat diketahui nuklida yang paling stabil terhadap peluruhan beta yaitu

$$Z_A = \frac{-f_2(A)}{2f_1(A)}$$

5. Model kulit inti dan hubungannya dengan kestabilan inti

Inti terdiri dari proton dan neutron. Harusnya terjadi gaya di antara nukleon-nukleon tersebut. Gaya antarnukleon dalam inti atom akan berubah menjadi gaya tarik menarik bila jarak antarnukleon-nukleon atau antarnukleon yang datang dari luar sangat dekat yaitu sekitar 10^{-13} Cm (= 1 fermi). Gaya tolak elektrostatis antarnukleon dalam inti berubah menjadi gaya tarik. Gaya yang bekerja pada rentang jarak pendek inilah yang menyebabkan kestabilan inti. Gaya inilah yang disebut gaya inti. Untuk partikel bermuatan yang datang dari luar partikel sebelum sampai ke inti harus mengatasi gaya tolak Coulomb, gaya Coulomb ini merupakan gaya rentang jarak jauh (*long range force*), sampai partikel itu dapat melewati gaya Coulomb maksimum (*potensial barrier*). Tiap nuklida mempunyai potensial barrier sendiri-sendiri. Saat nukleon dikeluarkan dari inti harusnya memerlukan energi paling sedikit sama dengan potensial barrier, tetapi ternyata tidak. Hal inilah yang memunculkan model kulit inti (*nuclear shell model*). Model ini didukung oleh kestabilan ekstra yang dipunyai inti dengan jumlah proton atau muatan inti, Z, sebanyak 2, 8, 20, 28, 50, 82 atau jumlah neutron, n, sebanyak: 2, 8, 20, 28, 50, 82, dan 126, yang dikenal dengan bilangan gaib (*magic number*).



TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Penyusun utama inti yang berupa proton dan neutron disebut juga dengan istilah
 - A. nuklida
 - B. nukleon
 - C. inti atom
 - D. radionuklida

- 2) Spesies inti yang dinyatakan dengan lambang ${}^A_Z\text{X}$ mempunyai neutron sebanyak
 - A. Z
 - B. A
 - C. A-Z
 - D. Z-A

- 3) Masing-masing spesies inti dari kumpulan spesies inti: ${}^1_1\text{H}$; ${}^2_1\text{H}$; ${}^3_1\text{H}$ disebut:
 - A. Nukleon
 - B. Nuklida
 - C. Isotop
 - D. Radionuklida

- 4) Isobar adalah sekumpulan nuklida yang mempunyai
 - A. Z sama, tetapi A berbeda
 - B. Z berbeda tetapi, A sama
 - C. N sama tetapi A, berbeda
 - D. N berbeda tetapi, A sama

- 5) Inti yang stabil ditandai dengan
 - A. perbandingan jumlah proton terhadap neutron yang sama dengan satu
 - B. perbandingan jumlah proton terhadap neutron yang lebih besar dari satu
 - C. perbandingan jumlah proton terhadap neutron yang lebih kecil dari satu
 - D. perbandingan jumlah proton terhadap neutron yang tidak selalu sama dengan satu

- 6) Apabila peta nuklida dibuat dengan sumbu tegak sebagai jumlah proton dan sumbu mendatar sebagai jumlah neutron, maka suatu nuklida yang **tidak stabil** dengan memancarkan sinar β^- , akan terletak di
- di bawah pita kestabilan
 - di atas pita kestabilan
 - pada pita kestabilan
 - di atas dan bawah pita kestabilan
- 7) Suatu nuklida tidak stabil pemancar sinar beta, baik β^- maupun β^+ , akan menghasilkan nuklida yang se
- Isotop
 - Isobar
 - Isoton
 - Isomer
- 8) Apabila diketahui defek massa $(\Delta)_1^1H = 7,289 \text{ MeV}$;
 $n = 8,071 \text{ MeV}$; $= {}_{15}^{32}P = -24,305 \text{ MeV}$, maka energi pengikat inti per nukleon ${}_{15}^{32}P$ adalah sebesar
- 270,874 MeV
 - 271,775 MeV
 - 8,464 MeV
 - 8,493 MeV
- 9) Apabila Energi pengikat inti ${}_{25}^{55}Mn = 482,065 \text{ MeV}$ dan ${}_{26}^{55}Fe = 481,052$, maka
- Mn-55 relatif lebih stabil daripada Fe-55
 - Fe-55 relatif lebih stabil daripada Mn-55
 - Fe-55 tidak stabil dengan memancarkan sinar β^-
 - Mn-55 tidak stabil dengan memancarkan sinar β^+
- 10) Model tetes cairan inti dengan persamaan semiempiris massa dapat dipakai untuk meramalkan kestabilan nuklida-nuklida yang
- seisotop
 - seisobar
 - seisoton
 - seisomer

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali
80 - 89% = baik
70 - 79% = cukup
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

- 1) B, diawali dengan penemuan sinar katode. Sinar-X terjadi dari tabrakan sinar katode dengan dinding gelas tabung sinar katode. Penemuan tabung sinar katode, akan tidak menghasilkan sinar-X tanpa adanya sinar katode.
- 2) C, menemukan gejala radioaktivitas yang disebabkan uranium pada garam kalium uranil sulfat. Gejala radioaktivitas adalah gejala atomik bukan molekuler.
- 3) C, becquerel (Bq).
- 4) A, $3,7 \times 10^{10}$ Bq. $1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$, sehingga $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ dps}$.
- 5) A, sinar alfa. Sinar alfa dapat dihentikan oleh selembar kertas tipis. Sinar beta dihentikan oleh selembar karton, sedangkan sinar gamma dihentikan oleh timbal. Sinar ultra-violet bukan sinar radioaktif.
- 6) D, daya tembusnya pada materi dan pembelokannya pada medan magnet dan listrik.
- 7) C, sinar gamma. Sinar radioaktif yang lain semuanya berupa partikel.
- 8) A, sinar-X merupakan peristiwa di luar inti atom (ekstranuklir) sedangkan sinar radioaktif merupakan peristiwa inti atom nuklir. Sinar radioaktif bukan gejala molekuler tetapi gejala atomik.
- 9) D, spektrum yang dihasilkan. Spektrum sinar alfa sama dengan spektrum gas helium, yang berasal dari ion He^{2+} yang telah menerima 2 elektron.

Tes Formatif 2

- 1) D, nukleon. Nukleon adalah proton dan neutron yang menyusun inti atom. Jumlah proton dan neutron pada inti atom disebut bilangan massa.
- 2) C, A-Z. Spesies inti dilambangkan dengan ${}^A_Z\text{X}$, di sini, X adalah lambang nuklida, Z adalah jumlah proton dan $A = \text{jumlah proton} + \text{neutron}$.
- 3) B, nuklida. Nuklida adalah spesies inti yang ditandai oleh jumlah proton dan jumlah neutronnya. Kumpulan nuklida yang jumlah protonnya sama seperti pada nomor 3 itu disebut isotop.

- 4) B, Z berbeda tetapi, A sama. Isobar dapat pula dikatakan sebagai nuklida-nuklida yang mempunyai bilangan massa (proton + neutron) sama.
- 5) D, perbandingan jumlah proton terhadap neutron yang tidak selalu sama dengan satu. Inti atau nuklida stabil, tidak selalu ditandai oleh perbandingan jumlah proton terhadap neutron yang sama dengan satu. Bisa saja jumlah proton lebih besar daripada jumlah n, atau jumlah neutron yang lebih besar daripada jumlah proton, merupakan inti atau nuklida yang stabil. Contoh, ${}_{15}^{32}\text{P}$ dan ${}_{15}^{30}\text{P}$ adalah nuklida yang tidak stabil, yang stabil adalah nuklida ${}_{15}^{31}\text{P}$. Contoh lain, ${}_{11}^{22}\text{Na}$ tidak stabil sedangkan yang stabil adalah ${}_{11}^{23}\text{Na}$.
- 6) A, di bawah pita kestabilan. Radionuklida pemancar β^- adalah radionuklida yang kaya neutron. Jadi, pada peta nuklida jumlah proton vs jumlah neutron, radionuklida itu terletak di bawah pita kestabilan.
- 7) B, Isobar. Radionuklida pemancar β^- akan menghasilkan nuklida yang jumlah protonnya bertambah satu sedangkan bilangan massanya tetap. Demikian pula radionuklida pemancar β^+ akan menghasilkan nuklida yang jumlah protonnya berkurang satu dan bilangan massanya tetap.
- 8) C, 8,464 MeV.

Energi pengikat inti

$$\begin{aligned}(E_B) {}_{15}^{32}\text{P} &= \{15 \Delta p + (32 - 15) \Delta n\} - P - 32 \\ &= 15 \times 7,289 \text{ MeV} + 17 \times 8,071 \text{ MeV} - (-24,305 \text{ MeV}) \\ &= 270,874 \text{ MeV}\end{aligned}$$

$$\text{Energi pengikat inti per nukleon} = \frac{270,874}{32} = 8,464 \text{ MeV}.$$

- 9) A, Mn-55 relatif lebih stabil dari pada Fe-55. Oleh karena Mn-55 lebih stabil daripada Fe 55 dan Mn-55 dan Fe-55 seisobar, maka Fe-55 akan menjadi lebih stabil (menjadi Mn-55) disertai pemancaran β^+ atau tangkapan elektron.
- 10) B. Seisobar. Persamaan semiempiris model tetes cairan, berlaku untuk nuklida-nuklida yang A (bilangan massa)-nya sama, baik yang A-nya ganjil maupun genap.

Daftar Pustaka

- Anonim. (1993). *Kamus Kimia Inti dan Radiokimia*. Jakarta: Depdikbud.
- Carswell, D.J. (1967). *Introduction to Nuclear Chemistry*. Elsevier Publishing Company: Amsterdam.
- Cunningham J G. (1972). *Chemical Aspects of The Atomic Nucleus*. The Chemical Society: London.
- David J. Malcolme-Lowes. (1979). *Introduction to Radiochemistry*. New York: John Wiley & Sons.
- Friedlander G. *et al.* (1981) *Nuclear and Radiochemistry*. New York: John Wiley & Sons.
- Harvey B G. (1965). *Nuclear Chemistry*. Prentice-Hall, Inc: New Jersey.
- Keller C, Easton D.B.J. (1988). *Radiochemistry*. John Wiley & Sons: New York.