

BAB 1

STRUKTUR INTI

Para ilmuwan pada abad kesembilan belas telah menerima gagasan bahwa unsur kimia terdiri dari atom-atom, walaupun pengetahuan mereka tentang atom itu sendiri belum begitu banyak. Pengetahuan tentang atom terutama tentang struktur atom menjadi lebih baik ketika seorang ahli fisika Inggris, J.J. Thomson pada tahun 1897 menemukan elektron. Elektron mengandung muatan listrik negative, sedangkan atom muatan listriknya netral. Agar muatan atom netral tentulah harus ada muatan positif sebanyak muatan negatifnya, untuk mengimbangi muatan negatifnya. Karena massa elektron yang dihitung oleh J.J. Thomson sedemikian kecilnya, tentulah sebagian besar massa atom dibawa oleh muatan positifnya.

Tahun 1898 J.J. Thomson mengusulkan bahwa atom merupakan bola bermuatan positif serbasama yang mengandung elektron, yang juga terdistribusi serbasama, sehingga kemudian model atom Thomson ini disebut sebagai Model plum-pudding (model kue) Thomson.

1.1 Model Atom Rutherford

Selama 13 tahun Model Thomson ini diterima oleh dunia pengetahuan sampai pada tahun 1911 dilakukan test eksperimental terhadap Model Atom Thomson oleh Geiger dan Marsden atas usul Ernest Rutherford. Eksperimen ini kemudian disebut sebagai Eksperimen Hamburan Rutherford. Geiger dan Marsden menempatkan sebuah sampel bahan radioaktif yang menghasilkan peluruhan alfa dibelakang layar timbal sehingga menghasilkan berkas partikel alfa yang tajam. Berkas alfa itu kemudian diarahkan ke selaput emas yang tipis. Di belakang layar timbal ditempatkan layar zink sulfide atau layar fluoresen yang dapat digerakkan melingkar dan akan menghasilkan kelipan (skintilasi) cahaya apabila ditumbuk oleh partikel alfa.

Jika model Thomson benar maka hanya gaya listrik lemah saja yang akan beraksi pada partikel alfa yang menembus selaput emas yang tipis tersebut, dan momentum awalnya sudah cukup untuk menembusnya dengan sedikit

penyimpangan dari lintasan semula, sekitar 1^0 atau kurang. Tetapi apa yang diamati dan diukur oleh Geiger dan Marsden tidak sesuai dengan apa yang dihitung sesuai dengan Model Atom Thomson. Ternyata banyak partikel alfa yang muncul dari selaput emas tersebut dengan penyimpangan kurang dari 1^0 , tetapi beberapa terhambur dengan sudut yang sangat besar. Bahkan sebagian kecil terhambur dalam arah yang berlawanan dengan arah semula. Dengan hasil seperti yang diamati oleh Geiger dan Marsden tersebut pastilah muatan positif dari atom tersebut tidak menyebar seperti yang kita lihat pada Model Atom Thomson tetapi terdistribusi pada ruang yang sangat kecil sehingga menghasilkan gaya yang sangat kuat terhadap partikel alfa.

Rutherford kemudian mengusulkan satu-satunya model yang dapat menjelaskan hasil eksperimen tersebut adalah model yang terdiri inti kecil yang bermuatan positif yang merupakan tempat terkonsentrasinya hampir seluruh massa atom dengan elektron-elektronnya terdapat pada jarak yang agak jauh. Jadi atom dapat dipandang sebagai sesuatu yang terdiri dari sebagian besar ruang hampa. Dengan demikian dapat dipahami bahwa mengapa sebagian besar partikel alfa dapat menembus selaput emas. Tetapi apabila partikel alfa mendekati inti, partikel tersebut akan mengalami medan listrik yang kuat sehingga akan terhambur dengan sudut yang besar.

Sebagai akibat impuls $\int Fdt$ yang diberikan oleh inti pada partikel alfa, momentum partikel alfa berubah sebesar Δp dari harga semula p_1 ke harga akhir p_2 . Jadi

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \int Fdt \quad (1.1)$$

Karena inti tetap diam selama partikel alfa melewatinya maka energi kinetik alfa tetap konstan

$$p_2 = p_1 = mv \quad (1.2)$$

Impuls $\int F dt$ berarah sama dengan arah perubahan momentum Δp , besarnya sama dengan

$$\left| \int F dt \right| = \int F \cos \phi dt \quad (1.3)$$

Dengan ϕ menyatakan sudut sesaat antara F dan Δp sepanjang lintasan partikel alfa. D

Gaya listrik yang ditimbulkan inti pada partikel alfa bekerja sepanjang vektor jari-jari yang menghubungkan keduanya, sehingga tidak terdapat torka pada partikel alfa, dengan demikian momentum sudutnya adalah tetap

$$m\omega r^2 = \text{konstan} = mr^2 \frac{d\phi}{dt} = mvb \quad (1.4)$$

Dimana b adalah jarak minimum partikel alfa yang mendekati inti bila tidak mendapat gaya antara keduanya atau parameter dampak. Besarnya gaya F yang bekerja pada partikel alfa adalah

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2} \quad (1.5)$$

Hubungan gaya ini dengan perubahan momentum partikel alfa adalah

$$\frac{4\pi\epsilon_0 mv^2 b}{Ze^2} \sin \frac{\theta}{2} = \int_{-(\pi-\theta)/2}^{+(\pi-\theta)/2} \cos \phi d\phi = 2 \cos \frac{\theta}{2} \quad (1.6)$$

Sudut hamburan θ berhubungan dengan parameter dampak b melalui persamaan

$$\cot \frac{\theta}{2} = \frac{2\pi\epsilon_0 mv^2}{Ze^2} b \quad (1.7)$$

Jika dinyatakan dalam energi kinetik partikel K maka

$$\cot \frac{\theta}{2} = \frac{4\pi\epsilon_0 K}{Ze^2} \quad (1.8)$$

Dalam eksperimen ini layar fluoresen ditempatkan pada jarak r dari selaput emas, dan partikel alfa yang dihamburkan dideteksi melalui kelipan yang ditimbulkannya.

Mencari fraksi partikel f yang datang dengan sudut θ atau lebih adalah sebagai berikut. Kita tinjau selaput setebal t yang berisi n atom per satuan volume. Banyaknya inti target per satuan luas ialah nt , dan berkas partikel alfa yang datang pada bidang seluas A akan berinteraksi dengan ntA inti. Penampang hamburan kumpulan untuk sudut θ atau lebih sama dengan banyaknya inti target ntA dikalikan dengan penampang σ untuk hamburan seperti itu per inti, atau sama dengan $ntA\sigma$. Besar fraksi f dari banyaknya partikel alfa datang yang dihamburkan dengan sudut θ atau lebih merupakan rasio antara penampang kumpulan $ntA\sigma$ dan luas target total A atau

$$f = \frac{\text{banyaknyapartikelalfa terhamburdengansudut } \theta \text{ atau lebih}}{\text{jumlahpartikelalfa datang}}$$

$$f = \frac{\text{penampangkumpulan}}{\text{luas target}} = \frac{ntA\sigma}{A} = nt\pi b^2 \quad (1.9)$$

Dengan mensubstitusikan harga b maka harga f menjadi

$$f = \pi nt \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 K} \right)^2 \cot^2 \frac{\theta}{2} \quad (1.10)$$

Kita anggap selaput emas ini cukup tipis sehingga penampang inti yang berdekatan tidak saling tindih dan partikel alfa yang dihamburkan menerima seluruh defleksinya dari interaksinya dengan inti tunggal.

Partikel alfa yang terhamburkan antara sudut θ dan $\theta + d\theta$ mencapai daerah bola berjari-jari r yang tebalnya $rd\theta$. Jari-jari daerah itu ialah $r \sin\theta$, sehingga bidang dS dari layar yang ditubruk partikel ini ialah

$$dS = (2\pi r \sin \theta)(rd\theta) = 2\pi r^2 \sin \theta d\theta$$

$$= 4\pi r^2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} d\theta \quad (1.11)$$

Jika sebanyak N_i partikel alfa menumbuk selaput emas, banyaknya partikel yang terhambur ke dalam sudut $d\theta$ pada sudut θ ialah $N_i df$. Banyaknya $N(\theta)$ per satuan luas yang sampai ke layar pada sudut θ yang merupakan kuantitas yang terukur ialah

$$N(\theta) = \frac{N_i |df|}{dS} = \frac{N_i \pi m t \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 K} \right) \cot \frac{\theta}{2} \csc^2 \frac{\theta}{2} d\theta}{4\pi r^2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} d\theta} \quad (1.12)$$

Atau

$$N(\theta) = \frac{N_i \pi m t Z^2 e^4}{(8\pi\epsilon_0)^2 r^2 K^2 \sin^4(\theta/2)} \quad (1.13)$$

Persamaan ini disebut sebagai rumus hamburan Rutherford. Persamaan ini menunjukkan bahwa hipotesis inti atom Rutherford adalah benar, sehingga Rutherford dianggap sebagai penemu inti atom.

1.2 Dimensi Inti

Dengan menggunakan Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada hamburan partikel alfa kita dapat menentukan batas atas dimensi inti. Pada pendekatan terpendek r_0 dari sebagian besar partikel alfa yang energetik yang bertatapan (head-on) yang akan diikuti dengan sudut hamburan 180° , energi kinetik awal K dari partikel diubah seluruhnya menjadi energi potensial

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r_0} \quad (1.14)$$

Pendekatan terpendek r_0 dapat dihitung

$$r_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{K} \quad (1.15)$$

Dengan mengambil harga K maksimum alamiah dari partikel alfa yaitu 7,7 Mev, harga Z untuk emas 79 d diperoleh dan konstanta

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$$

Diperoleh harga $r_0 = 3,8 \times 10^{-16} \text{ Z m}$. Untuk emas harga $r_0 = 3,8 \times 10^{-16} \cdot 79 \text{ m} = 3,0 \times 10^{-14} \text{ m}$.

Kalau diperhatikan daftar massa inti dapat dilihat bahwa massa nuklida sangat dekat dengan kelipatan massa hidrogen. Hal ini menimbulkan anggapan bahwa semua inti tersusun dari proton-proton dengan sejumlah elektron berada dalam inti untuk menetralkan beberapa proton, yaitu dengan A proton dan A -Z proton. Model inti semacam ini disebut sebagai Model proton-elektron atau hipotesis elektron nuklir. Bukti bahwa elektron terdapat dalam inti dapat dilihat dengan adanya peluruhan beta yang merupakan elektron cepat yang berasal dari inti atom.

Walaupun hipotesis elektron nuklir kelihatannya menarik, terdapat beberapa alasan yang menentanginya.

(1). Momentum Sudut Inti

Proton dan elektron adalah partikel Fermi dengan bilangan kuantum spin $\frac{1}{2}$. Artinya momentum sudut $\frac{1}{2} \hbar$. Hubungan antara nomor massa A dan Momentum sudut inti I adalah, inti dengan jumlah proton ditambah elektron yang genap harus memiliki spin bilangan bulat, sedangkan inti dengan jumlah proton ditambah elektron yang ganjil harus memiliki spin setengah bilangan bulat. Jadi jika A ganjil maka $I = -\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$ dan jika A genap maka $I = 0, 1, 2, 3, 4$. Hasil eksperimen menunjukkan hasil yang berbeda. Misalnya untuk ${}^{14}_7\text{N}$ dengan nomor massa A = 14 dan nomor atom Z = 7, artinya nuklida ini memiliki 14 proton dan 7 elektron, sehingga total nukleonnya adalah 21. Harusnya inti ini memiliki spin setengah bilangan bulat, ternyata spinnya I = 1.

(2) Momen Magnetik Inti

Dari spektrum atom diperoleh bahwa rotasi dari sebuah elektron dengan momentum sudut $l\hbar$, akan menghasilkan momen magnetik sebesar l magneton Bohr. Satuan Momen magnetik ini bersesuaian dengan gerak orbital elektron

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e c} = \frac{e\hbar}{2m_e c} = 0.927 \times 10^{-20} \frac{\text{erg}}{\text{gauss}} \quad (1.16)$$

Untuk proton dengan massa 1836 kali massa elektron memiliki momen magnetik

$$\mu_N = \frac{eh}{4\pi m_p c} = \frac{\mu_B}{1836} = 5.05 \times 10^{-24} \frac{\text{erg}}{\text{gauss}} \quad (1.17)$$

Pengukuran yang dilakukan terhadap momen magnetik inti menunjukkan bahwa momen magnetik inti jauh lebih dari pada momen magnetik elektron yaitu dalam order μ_N bukan dalam order μ_B .

(3) Ukuran Nuklir

Dari sudut pandang mekanika gelombang, panjang gelombang elektron diberikan oleh panjang gelombang de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} \quad (1.18)$$

Dimana p, m_e , dan v adalah momentum, massa, dan kecepatan elektron. Agar elektron dapat berada di dalam inti, maka panjang gelombang elektron haruslah kurang atau kurang lebih sama dengan diameter inti. Hal ini membutuhkan energi yang tinggi dari elektron. Sesuai dengan prinsip ketidakpastian

$$\Delta x \Delta p \geq h \quad (1.19)$$

Dimana Δx dan Δp adalah ketidakpastian posisi dan momentum dari elektron. Karena jari-jari inti berat dengan nomor massa 200 adalah sekitar 0.6×10^{-12} cm, ketidakpastian elektron adalah $\Delta x = 2R = 1,2 \times 10^{-12}$ cm. Dengan demikian diperoleh

$$p \approx \frac{h}{\Delta x} = \frac{6,6 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}}{1,2 \times 10^{-12} \text{ cm}} = 5,5 \times 10^{-15} \frac{\text{erg} \cdot \text{sec}}{\text{cm}} \quad (1.20)$$

Dari mekanika relativistik diperoleh hubungan antara energi dan momentum

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (1.21)$$

Dimana $m_0 c^2$ adalah energi diam elektron. Dengan memasukkan harga momentum dan energi diam elektron diperoleh

$$\begin{aligned} E^2 &= (5,5 \times 10^{-15})^2 (3 \times 10^{10})^2 + (9,1 \times 10^{-28})^2 (3 \times 10^{10})^4 \\ &= \left[(2,7 \times 10^{-8}) + (6,5 \times 10^{-13}) \right] \text{erg}^2 \end{aligned} \quad (1.22)$$

Suku kedua dapat diabaikan sehingga diperoleh

$$E = (1,65 \times 10^{-4}) \text{erg} = \frac{1,65 \times 10^{-4} \text{erg}}{1,6 \times 10^{-12} \text{erg/ev}} = 10,5 \times 10^7 \text{ev} = 105 \text{Mev} \quad (1.23)$$

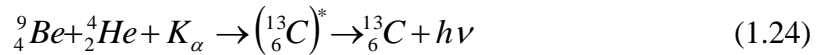
Ini berarti bahwa jika elektron berada dalam inti sebagai partikel penyusun inti maka haruslah elektron memiliki energi sebesar 105 Mev. Harga jauh lebih besar dari energi yang dimiliki oleh sinar beta yang hanya hanya lebih kurang memiliki energi sebesar 2-3 Mev saja.

(4) Kesimpulan

Dari ketiga argumen yang dikemukakan dapat diambil kesimpulan bahwa model proton-elektron tidak merupakan model inti yang benar. Model ini berakhir sampai ditemukannya neutron oleh Chadwick pada tahun 1932.

1.3 Penemuan Neutron

Pada tahun 1930 W. Bethe dan H. Becker menemukan bahwa bila Berilium atau Boron ditembaki dengan partikel alfa yang berasal dari sumber alamiah seperti polonium akan menghasilkan radiasi yang memiliki daya tembus yang besar. Sifat radiasi ini : (1) Dapat menembus material yang tebal, (2) Tidak menimbulkan ionisasi yang banyak. Diduga radiasi ini adalah sinar gamma (γ), dengan reaksi :



Perhitungan energi pada reaksi ini adalah sebagai berikut :

- (1) Energi partikel alfa $K_\alpha = 5,3 \text{ MeV}$
- (2) Energi reaksi

$$Q = (M_{{}^9_4\text{Be}} + M_{{}^4_2\text{He}}) - (M_{{}^{13}_6\text{C}}) = (9,01505 + 4,00387 - 13,00748) \text{amu} = 0,01144 \text{amu} \\ = 0,01144 \times 931,4 \text{MeV} = 10,7 \text{MeV}$$

Jumlah energi yang dihasilkan adalah $= 5,3 \text{ MeV} + 10,7 \text{ MeV} = 16 \text{ MeV}$.

- (3) Energi recoil Karbon adalah 2 MeV .
- (4) Berarti energi yang dimiliki radiasi adalah : $16 \text{ MeV} - 2 \text{ MeV} = 14 \text{ MeV}$.

Ternyata di alam tidak ada sinar gamma dari sumber alamiah yang memiliki energi sebesar ini.

Selama tahun 1930-1933 banyak peneliti diantaranya I. Curie dan F. Joliot (Perancis) yang meneliti radiasi ini. Bila radiasi ini dilewatkan pada bahan yang kaya proton atau nitrogen ternyata radiasi dapat memukul keluar proton dan nitrogen masing-masing dengan energi recoil $5,7 \text{ MeV}$ dan $1,4 \text{ MeV}$. Kalau mekanisme adalah berupa hamburan Compton yaitu tumbukan foton dan partikel maka energi yang diperlukan oleh foton agar dapat menimbulkan hamburan partikel proton dan nitrogen dapat dihitung. Jika foton datang memiliki energi $h\nu$, energi foton yang dihamburkan $h\nu'$ dari inti yang massanya m adalah

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos\phi)} \quad (1.25)$$

Dimana ϕ adalah sudut antara foton terhambur dengan foton datang. Dengan demikian energi rekoil dari inti yang massanya m adalah

$$h\nu - h\nu' = h\nu \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos\phi)} \right) \quad (1.26)$$

Energi rekoil maksimum diperoleh jika sudut ϕ 180^0 , sedemikian sehingga $\cos \phi = -1$, dan

$$h\nu - h\nu' = h\nu \left(\frac{2}{2 + \frac{mc^2}{h\nu}} \right) \quad (1.27)$$

Dengan demikian dapat dihitung untuk menghamburkan proton dengan energi rekoil sebesar 5,7 Mev diperlukan energi foton sebesar 55 Mev, sedangkan untuk menghamburkan nitrogen dengan energi rekoil sebesar 1,4 Mev, diperlukan energi foton sebesar 90 Mev. Pada hal energi yang tersedia untuk radiasi yang tidak dikenal tersebut hanyalah 12 Mev.

1.4 Hipotesis Neutron

Dari dua kenyataan di atas dapat diambil kesimpulan bahwa radiasi ini tidak mungkin foton. Menurut Cadwick (tahun 1932) radiasi ini adalah radiasi partikel yang tidak bermuatan dan ukurannya hampir sama dengan proton yang diberi nama neutron.

Reaksi pada persamaan (1) dapat ditulis sebagai :



Dengan demikian dengan ditolaknya hipotesis elektron nuklir dan dengan ditemukannya neutron maka lahirlah hipotesis atau model proton-neutron nuklir. Berdasarkan model atau hipotesis ini maka nuklida tertentu dapat ditulis dengan skema



Dimana X adalah lambang kimia jenisnya, A adalah nomor massa yaitu jumlah total proton dan neutron, dan Z adalah nomor atom yang menyatakan banyaknya proton di dalam inti.

PERTANYAAN DAN SOAL-SOAL

1. Pada awalnya inti atom dianggap terdiri dari proton dan elektron. Tetapi berdasarkan ukuran nuklir, spin nuklir, momen magnetik dan interaksi nuklir-elektron, hipotesis elektron nuklir tidak dapat diterima. Jelaskanlah mengapa demikian.
2. Jari-jari inti adalah sekitar 5×10^{-15} m. Dengan menggunakan prinsip ketidakpastian ($\Delta p \geq \frac{\hbar}{2\Delta x}$) dan hubungan momentum dan energi $E = pc$ hitunglah momentum dan energi kinetik elektron jika elektron merupakan nukleon di dalam inti.
3. Jelaskan mengapa radiasi yang berasal dari reaksi berilium dengan partikel alfa tidak mungkin adalah foton atau sinar gamma.
4. Bagaimana bunyi hipotesis proton-neutron.
5. Berapakah banyak proton dan neutron pada inti-inti berikut ini :
 - a. ${}^4_2\text{He}$
 - b. ${}^9_4\text{Be}$
 - c. ${}^{13}_6\text{C}$
 - d. ${}^{14}_7\text{N}$
6. Apakah yang dimaksud dengan istilah berikut dan berikan 1 buah contoh.
 - a. Nuklida
 - b. Nukleon
 - c. Isotop
 - d. Isobar
 - e. Isoton