

## MENENTUKAN KESTABILAN NUKLIDA-NUKLIDA BERDASARKAN MASSA INTI PER NUKLEON

Dede Suhendar

Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati, Jln. A.H. Nasution No. 105 Cibiru, Bandung, 40614

\*Alamat Korespondensi: dede.suhendar@uinsgd.ac.id

**Abstrak:** Kestabilan nuklida dapat ditentukan oleh rasio jumlah neutron terhadap jumlah protonnya ( $n/p$ ) atau defek massa ( $\Delta m$ ) yang dapat dikonversikan menjadi energi ikat inti ( $E_b$ ). Dalam artikel ini, kami mempelajari kemungkinan menentukan kestabilan nuklida-nuklida berdasarkan massa inti per nukleon ( $m/A$ ). Metode yang digunakan adalah pencocokan pola kelimpahan unsur-unsur di sistem tata surya dengan pola harga  $m/A$  nuklida tiap unsur dan hasilnya dibandingkan dengan pola energi ikat inti per nukleon ( $E_b/A$ )-nya. Terdapat kecenderungan nilai  $m/A$  yang berbanding terbalik terhadap nilai  $E_b/A$ , sehingga  $m/A$  dapat diperkirakan akan berbanding terbalik dengan peringkat kestabilan inti. Dengan membandingkan kelimpahan pasangan-pasangan unsur yang memiliki nomor atom yang berurutan dari 77 nuklida terpilih, diperoleh hasil bahwa 93,5% pasang nuklida-nuklida cocok dengan kebalikan urutan nilai-nilai  $m/A$ -nya dan 68,8% cocok dengan urutan nilai-nilai  $E_b/A$ -nya.  $m/A$  juga memiliki korelasi berbanding terbalik dengan  $E_b/A$  yang dapat dinyatakan sebagai  $E_b/A = -901,76(m/A) + 909,32$  ( $R^2 = 0,9986$ ). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa harga  $m/A$  dapat dipertimbangkan untuk menentukan urutan tingkat kestabilan inti nuklida dan dapat dihubungkan dengan  $E_b/A$  jika nilai  $m/A$  dinyatakan dalam satuan energi.

**Kata kunci:** massa inti, energi ikat inti, kestabilan inti, kelimpahan unsur di alam

**Abstract:** The stability concept of nuclides can be determined by ratio of number of neutrons to their number of protons ( $n/p$ ) or their mass defect ( $\Delta m$ ) that can be converted to binding energy ( $E_b$ ). In this article, we studied the possibility of nuclide's stability determination based on mass per nucleons ( $m/A$ ). The method used was matching of the abundance of elements in the solar system with the pattern of nuclear mass per nucleons ( $m/A$ ) and the results were compared to the pattern of binding energy per nucleons ( $E_b/A$ ). There was a linear trendline,  $m/A$  values inversely proportional to  $E_b/A$  values, so that  $m/A$  can also be predicted inversely proportional to nuclide's stability order. By comparing abundance of element pair that has nearest proton number from 77 selected elements, it results 93.5% of the element abundances pattern matched with  $m/A$  values in inversely order, and only 68.8 % matched with  $E_b/A$  values in directly order.  $m/A$  values also correlated inversely with  $E_b/A$  and can be expressed as  $E_b/A = -901.76(m/A) + 909.32$  ( $R^2 = 0.9986$ ). Therefore, it can be concluded that the value of  $m/A$  can be considered to determine the order of the stability of nuclides and can be correlated with  $E_b/A$  if the  $m/A$  value is expressed in energy unit.

**Keywords:** mass of nuclides, nuclear binding energy, stability of nuclides, abundance of elements in nature.

### PENDAHULUAN

Dalam perkuliahan radiokimia, kimia inti, dan kimia dasar, terdapat dua pendekatan penentuan kestabilan inti atom, yakni berdasarkan rasio jumlah neutron terhadap proton ( $n/p$ ) dan energi ikat inti per nukleon ( $E_b/A$ ). Pendekatan dengan perhitungan  $n/p$  sering memberikan kebingungan dalam konsistensi kestabilan inti dan ketidakmampuannya dalam mengurutkan kestabilan nuklida-nuklida alami. Berdasarkan energi ikat inti per nukleon, pendekatan kestabilan lebih mudah dipahami karena ia melibatkan perhitungan energi yang dikonversi dari defek massa. Bagaimanapun juga, dalam pengajaran kimia anorganik, kestabilan inti berdasarkan  $E_b/A$  belum pernah dijelaskan dalam kaitan dengan kelimpahan unsur-unsur di alam.

Saat ini setidaknya terdapat dua cara pandang yang menyatakan nuklida paling stabil, yakni  $^{56}\text{Fe}$  (Salaris & Cassisi 2006) dan  $^{62}\text{Ni}$  (Fewell 1995). Berdasarkan nilai  $E_b/A$ -nya,  $^{62}\text{Ni}$  merupakan nuklida

paling stabil, namun kenyataannya besi sebagai unsur yang memiliki kelimpahan tertinggi di alam dari semua unsur logam (Anders & Grevesse 1989; Lodders 2003). Lebih melimpahnya besi dapat dipertimbangkan karena ia memiliki massa inti per nukleon terkecil, yakni isotop  $^{56}\text{Fe}$  (Fewell 1995).

Besi menempatkan diri menjadi unsur paling stabil di alam karena ia merupakan produk akhir dari nukleosintesis sebagai isotop  $^{56}\text{Fe}$ . Para fisikawan nuklir dan ahli geologi/astronomi memiliki pandangan yang berbeda dalam hal ini, terutama dalam menentukan unsur paling stabil di alam. Bagaimanapun juga, di antara keduanya tidak pernah secara eksplisit menyatakan unsur apa yang paling stabil, namun para fisikawan menyatakan istilah ini dalam nilai  $E_b/A$ . Buku-buku teks kimia seperti kimia dasar dan radiokimia lebih menekankan kestabilan inti berdasarkan konsep energi ikat inti, namun dalam kimia anorganik lebih menyoroti kelimpahan unsur-unsur dalam kaitan dengan asal-usul terjadinya.

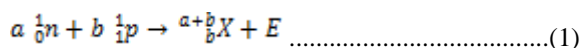
Penjelasan asal-usul unsur yang dikaitkan juga dengan proses sederhana dari nukleosintesis menunjukkan bahwa besi sebagai produk akhirnya.

Para pengajar kimia di perguruan tinggi sebenarnya dapat menyinkronkan secara sederhana kedua pendekatan penentuan kestabilan inti tersebut. Konsep kestabilan inti atom berdasarkan variasi energi ikat inti dapat dipelajari juga melalui perubahan massa inti atom. Artikel ini akan membahas hubungan tersebut, kemudian akan mempelajari dan mengeksplorasi kemungkinan dimunculkannya konsep kestabilan inti berdasarkan massa inti per nukleon.

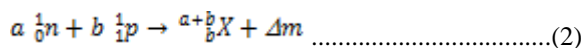
## BAHAN DAN METODE

### Penurunan Rumus

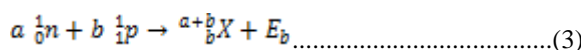
Dalam reaksi inti, baik fusi maupun fisi, selalu dilepaskan sejumlah energi. Berdasarkan persamaan relativitas dari Einstein tentang massa dan energi memiliki hubungan  $E = m \cdot c^2$ , yang memiliki arti bahwa massa dapat dikonversikan menjadi energi. Jika defek massa ( $\Delta m$ ) dikonversikan menjadi energi maka jumlahnya akan sama dengan energi yang terlepas. Jika suatu nuklida X dianggap sebagai reaksi penggabungan (fusi) sejumlah  $a$  neutron dan  $b$  proton, lalu menghasilkan energi  $E$ , maka persamaan reaksinya sebagai berikut,



Energi yang dilepaskan ( $E$ ) sama dengan defek massa ( $\Delta m$ ), sehingga reaksi tersebut dapat dinyatakan pula dengan



Jika defek massa ( $\Delta m$ ) dinyatakan sebagai energi ikat inti ( $E_b$ ), persamaan reaksi menjadi



Ketiga persamaan reaksi di atas, (1), (2), dan (3), tidak umum digunakan, namun memiliki hubungan matematis yang sederhana. Jika semua dimensi yang terlibat diseragamkan menjadi materi (massa), maka persamaan matematisnya sebagai berikut,

$$(a \cdot m_n) + (b \cdot m_p) = m_x + \Delta m \quad \dots\dots\dots(4)$$

Yakni, massa sebanyak  $a$  neutron ( $m_n$ ) ditambah massa sebanyak  $b$  proton ( $m_p$ ) sama dengan massa nuklida X ( $m_x$ ) ditambah defek massa ( $\Delta m$ ).

Jika satuan massa yang dipakai adalah satuan massa atom (sma), maka berlaku

$$(a \cdot m_n) + (b \cdot m_p) = \sum \text{nukleon} \quad \dots\dots\dots(5)$$

Substitusi persamaan (5) ke dalam persamaan (4) akan memperoleh

$$\sum \text{nukleon} = m_x + \Delta m \quad \dots\dots\dots(6)$$

Jika massa, jumlah nukleon, dan energi memakai satuan yang sama, misalnya energi saja (satuan massa atom dan massa nukleon dikonversi ke dalam dimensi bersatuan energi), maka persamaan (6) menjadi,

$$\sum \text{nukleon} = m_{\text{nuklida}} + E_b \quad \dots\dots\dots(7)$$

Jika jumlah nukleon dinyatakan dalam  $A$  dan massa nuklida dinyatakan sebagai  $m$ , maka persamaan (7) menjadi,

$$A = m + E_b \quad \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan (8) dapat dibagi dengan  $A$  menghasilkan persamaan berikut:

$$1 = \frac{m}{A} + \frac{E_b}{A} \quad \dots\dots\dots(9)$$

atau

$$\frac{m}{A} = 1 - \frac{E_b}{A} \quad \dots\dots\dots(10)$$

Nilai 1 sama dengan massa 1 partikel nukleon dalam satuan massa atom (sma).

Persamaan (10) analog dengan persamaan regresi linear jika akan dilakukan pencocokan (*fitting*) data, yakni

$$\frac{m}{A} = -s \frac{E_b}{A} + m_{\text{nukleon}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

dengan  $-s$  merupakan *gradien* atau *slope*. Massa nukleon ( $m_{\text{nukleon}}$ ) merupakan intersep, bernilai 1 sma.

### Pencocokan (Fitting) Data $m/A$ vs. $E_b/A$

Untuk membuktikan adanya korelasi yang signifikan antara massa inti per nukleon ( $m/A$ ) terhadap energi ikat inti per nukleon ( $E_b/A$ ), dilakukan plot di antara keduanya analog dengan persamaan (11). Melalui regresi linear, nilai intersep belum tentu sama dengan massa nukleon ( $m_{\text{nukleon}}$ ) (dalam satuan energi bernilai 931,5 MeV) untuk mendapatkan nilai korelasi yang paling baik.

### Menghubungkan Data Kelimpahan Unsur terhadap $m/A$ dan $E_b/A$

Jika persamaan (11) terbukti signifikan, maka perlu diuji kecocokan pola kelimpahan unsur-unsur di Tata Surya terhadap nilai  $m/A$  maupun  $E_b/A$ -nya. Kelimpahan unsur cenderung mengikuti pola *zig-zag* antar 2 unsur (sepasang) yang bernomor atom (jumlah proton) paling berdekatan, yakni bernomor atom ganjil-genap, genap-ganjil, dst. Data

kelimpahan pasangan-pasangan unsur ini kemudian dicocokkan dengan urutan nilai  $E_b/A$  maupun  $m/A$ -nya secara berpasangan pula. Pada umumnya, unsur bernomor atom genap lebih melimpah dibandingkan unsur bernomor atom ganjil, yakni nomor atom paling berdekatan sebelum dan sesudahnya.

Pola *zig-zag* kelimpahan unsur dapat dipertimbangkan sebagai realitas kestabilan pasangan unsur yang memiliki nomor atom berurutan. Penyumbang paling nyata terhadap kelimpahan suatu unsur berasal dari isotopnya yang memiliki kelimpahan isotop tertinggi. Untuk menguji kecocokan pola kestabilan terhadap  $E_b/A$  maupun  $m/A$ , perlu dilakukan pengujian satu per satu tiap pasangan unsur yang bernomor atom berurutan. Hubungan tiap unsur dalam sepasang unsur tersebut dapat dinyatakan dengan “kurang dari” dan “lebih dari”. Jika sepasang unsur memiliki nilai komparatif “kurang/lebih dari” yang sama, maka dinyatakan cocok. Misanya,

Jika M, N, O, dst., merupakan kelimpahan unsur-unsur yang memiliki nomor atom secara berurutan, kemudian memiliki hubungan

$$M > N < O \dots,$$

akan bernilai cocok semuanya terhadap nilai  $E_b/A$  jika

$$E_b/A (M) > E_b/A (N) < E_b/A (O) \dots$$

dan bernilai cocok semuanya terhadap  $m/A$  jika

$$m/A (M) < m/A (N) > m/A (O) \dots$$

Dalam artikel ini akan diuji seberapa banyak pasangan unsur yang memiliki kecocokan antara kelimpahan tiap unsurnya dengan  $E_b/A$ -nya maupun dengan  $m/A$ -nya. Nilai  $E_b/A$  maupun  $m/A$  yang dipakai merupakan kedua nilai tersebut dari isotop-

isotop yang paling melimpah dari masing-masing unsurnya.

### Eksplorasi Nilai $m/A$ Lebih Lanjut

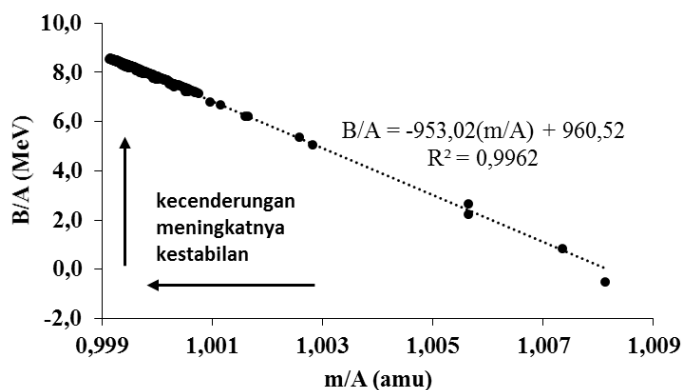
Dengan memperhatikan hubungan  $E_b/A$  terhadap  $m/A$  pada persamaan (11), persamaan regresi linear tersebut selanjutnya akan dieksplorasi untuk memperkirakan kestabilan unsur-unsur terberat dan unsur-unsur terakhir yang masih mungkin dapat disintesis dan pemetaan kestabilan keseluruhan unsur-unsur.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

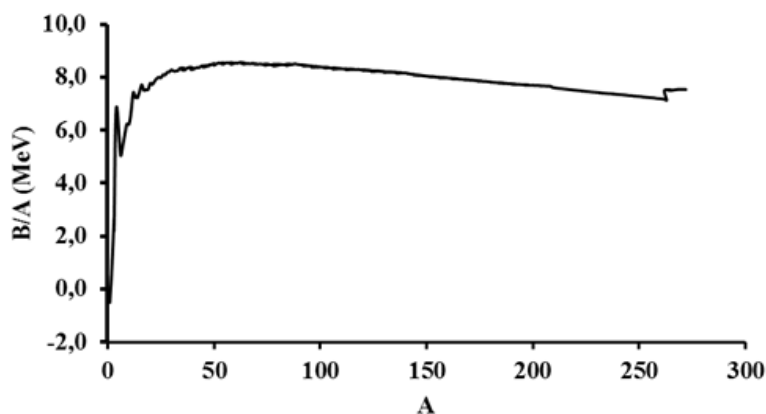
### Hubungan Energi Ikat Inti terhadap Massa Inti

Maksud istilah energi ikat inti sebenarnya mengacu pada konversi defek massa suatu nuklida menjadi energi. Berdasarkan persamaan (2), semua nuklida, kecuali  $^1\text{H}$ , memiliki defek massa (kekurangan massa) jika dibandingkan massa nuklida-nuklida itu dihitung hanya menggunakan data total massa nukleon (penjumlahan secara langsung proton-proton dan neutron-neutronnya). Jika energi ikat inti per nukleon ( $B/A$ ) diplotkan terhadap massa inti per nukleonya ( $m/A$ ), diperoleh hubungan berbanding terbalik satu sama lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dari sudut pandang keduanya, kenaikan kestabilan inti dapat dilihat dari kecenderungan makin naiknya  $B/A$  dan turunnya  $m/A$ . Adanya hubungan linear berbanding terbalik ini dapat ditelusuri dari grafik  $B/A$  terhadap  $A$  (Gambar 2) yang seolah-olah merupakan cerminan dari grafik  $m/A$  terhadap  $A$  (Gambar 3).

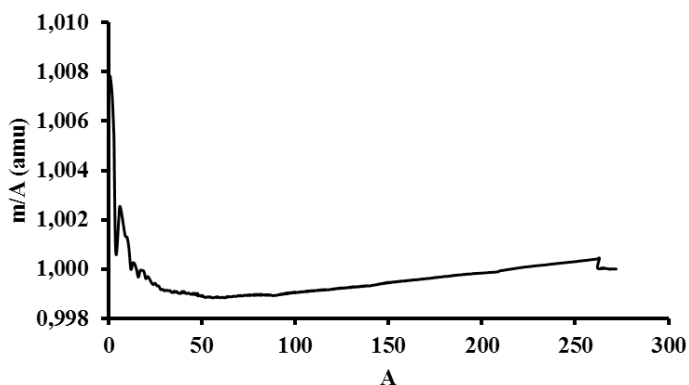
Grafik  $B/A$  terhadap  $A$  seperti yang ditampilkan pada Gambar 2 sering ditemukan dalam buku-buku teks radiokimia atau kimia dasar pada bab kimia inti, namun grafik  $m/A$  terhadap  $A$  seperti yang ditampilkan pada Gambar 3 sulit ditemukan. Demikian juga data-data yang ditampilkan hanya memuat unsur-unsur yang ada secara alami, dari hidrogen sampai uranium, kecuali beberapa unsur seperti teknesium, prometium, dan beberapa unsur antara bismuth sampai uranium. Puncak tertinggi



**Gambar 1.** Hubungan energi ikat inti per nukleon ( $B/A$ ) terhadap massa inti per nukleon ( $m/A$ ) menggunakan data nuklida dari unsur bernomor atom 1 sampai 111. Energi ikat inti dihitung dari defek massa inti yang dikonversi ke dalam satuan energi MeV. Data massa inti tiap nuklida, massa neutron dan proton diperoleh dari Lide & Haynes (2010).



**Gambar 2.** Plot antara energi ikat inti per nukleon ( $B/A$ ) terhadap jumlah nukleon ( $A$ ). Sumber data untuk perhitungan ini adalah Lide & Haynes (2010).



**Gambar 3.** Plot antara massa inti per nukleon ( $m/A$ ) terhadap jumlah nukleon ( $A$ ). Sumber data untuk perhitungan ini adalah Lide & Haynes (2010).

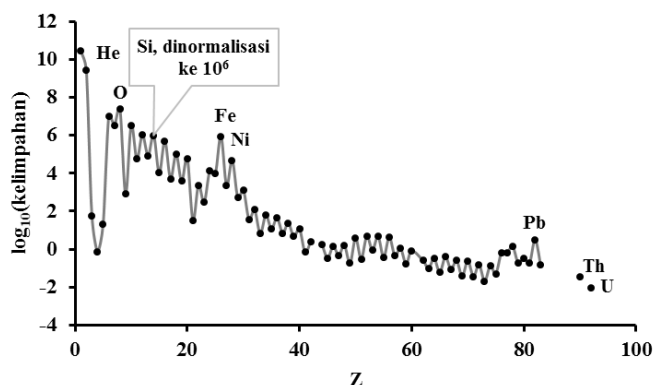
kurva pada Gambar 2 disebut sebagai daerah “kesetimbangan statistik” yang memberikan besi sebagai unsur terstabil (Allegre 2008). Besi sebagai unsur terstabil ditandai bukti dengan kelimpahannya di Sistem Tata Surya dibandingkan semua unsur logam (Anders & Grevesse 1989; Lodders 2003) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Isotop besi yang paling berkontribusi terhadap kelimpahan unsur besi dan semua unsur secara keseluruhan adalah  $^{56}\text{Fe}$  (Salaris & Cassisi 2006; Fewell 1995; Anders & Grevesse 1989; Lodders 2003; Berglund & Wieser 2011).

Grafik hubungan  $B/A$  terhadap  $m/A$  yang menghasilkan persamaan linear dengan  $R^2 = 0,9962$  masih memiliki beberapa masalah, yakni: (1) tidak cocok untuk unsur-unsur yang ringan, cenderung memiliki persentase selisih yang besar terhadap penentuan  $B/A$  dari  $m/A$ -nya, terutama untuk unsur-unsur dari mulai hidrogen sampai oksigen, (2) walaupun memiliki keakuratan yang tinggi untuk unsur-unsur setelah oksigen, namun persentase selisihnya cenderung mengalami pengelompokan. Dari dua masalah ini telah dicoba untuk mengelompokkan unsur-unsur ke dalam pola-pola regresi yang paling tepat, dan hasilnya (tidak ditampilkan di sini) terdapat pengelompokan regresi.

Adanya kenyataan pengelompokan-pengelompokan belum dapat dijelaskan secara

ilmiah. Walaupun terdapat beberapa unsur memiliki perbedaan selisih yang besar, keteraturan mulai muncul dari mulai neon sampai uranium. Sayangnya, keteraturan tersebut tidak dapat dikompensasi dengan satu konstanta yang tetap. Keteraturan lebih terlihat jika unsur-unsur itu dikelompokkan ke dalam 16 regresi (tidak ditampilkan di sini), kecuali untuk F dan Rf. Kedua unsur ini sulit dikelompokkan ke dalam kelompok unsur-unsur lainnya karena memunculkan persentase selisih yang tidak homogen.

Di antara kelompok-kelompok unsur yang jumlah anggotanya sedikit, hidrogen dan helium-lah yang cenderung berbeda banyak dengan unsur-unsur lainnya. Hal yang unik dalam kelompok C-N-O yang ternyata memiliki hubungan dengan unsur-unsur gas mulia selain helium. C, N, O, dan gas mulia ditemukan memiliki kesamaan umum di alam, semuanya sulit ditemukan konsistensi rasio isotop-isotopnya yang diperoleh dari sampel-sampel batu meteor, sementara konsistensinya hanya ditemukan pada fotosfer matahari (Lodders 2003). Keunikan dari deret C-N-O ini juga ternyata ditemukan kecocokan kelompok regresinya dengan unsur-unsur terberat dari Db sampai unsur ke-118. Kecocokan ini mirip dengan kesamaan harga  $B/A$  (sekitar 7,5 MeV) atau  $m/A$  (sekitar 1,0000 amu) (lihat Gambar 2 dan 3). Perihal kecocokan ini akan dibahas lebih lanjut



**Gambar 4.** Kelimpahan unsur-unsur alami berdasarkan data massanya di Tata Surya. Data dinormalisasi terhadap kelimpahan silikon menjadi sebesar  $1 \times 10^6$ . Sumber data kelimpahan unsur berdasarkan Anders & Grevesse (1989).

pada pemetaan kestabilan inti-inti nuklida pada bagian akhir pembahasan.

Pada logam-logam tanah jarang, La sulit dimasukkan ke dalam kelompok unsur-unsur ini, hasilnya justru lebih baik jika dikelompokkan pada unsur-unsur dari deret sebelumnya. Hal yang menarik lainnya adalah bahwa unsur-unsur tanah jarang tidak dapat dikelompokkan sebagai satu kesatuan, namun justru kecocokan lebih baik jika dipisahkan antara yang bernomor atom genap dan ganjil, satu fenomena yang tidak ditemukan pada kelompok unsur lainnya.

Secara sepintas, adanya fenomena pengelompokan regresi ini memiliki kemiripan dengan pola keteraturan dan ketidakteraturan kelimpahan unsur-unsur seperti yang ditampilkan pada Gambar 4. Adanya fenomena ini akan diklarifikasi lebih lanjut dengan mencocokkan pada pasangan-pasangan unsur yang bernomor atom berurutan, yakni dari nilai  $m/A$  terendah dari isotop-isotop unsur-unsur berpasangan dengan kelimpahan sepasang unsur tersebut.

#### **Pencocokan Massa Inti per Nukleon ( $m/A$ ) terhadap Kelimpahan Unsur-unsur**

Dari grafik pada Gambar 1 dapat dilihat bahwa kestabilan inti atom bertambah secara signifikan seiring dengan berkurangnya massa inti per nukleonnya. Dengan demikian, konsep kestabilan dapat dipertimbangkan pula berdasarkan massa inti per nukleonnya, makin berkurang harga  $m/A$  maka makin stabil inti itu. Kita dapat melihat urutan kestabilannya berdasarkan massa inti dan energi ikatnya seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Bagaimanapun juga, kelimpahan unsur-unsur di Sistem Tata Surya sebagaimana disajikan pada Gambar 4 memiliki kaitan dengan urutan tingkat kestabilan nuklida-nuklida. Urutan kelimpahan isotop tiap unsur tidak dapat dijadikan penentu hubungan ini karena proses-proses reaksi nukleosintesis dapat melibatkan antar nuklida yang berbeda unsur. Dengan demikian, baik menurut energi ikat inti maupun massa intinya, kelimpahan isotop pada tiap

unsur tidak dapat dikaitkan langsung dengan urutan kestabilan seperti yang disajikan pada Tabel 1.

Dari analisis kandungan isotop meteor-meteor terdapat sejumlah anomali kelimpahan isotop-isotop alami (Papanastassiou & Wasserburg 1978; Moynier *et al.* 2009; Esat & Ireland 1989; Burkhardt *et al.* 2011; Steele *et al.* 2011; Sabu & Manuel 1980; Steele *et al.* 2012; Wiechert *et al.* 2004; Greenwood *et al.* 2000) bila dibandingkan dengan data kelimpahan isotop-isotop yang dikeluarkan IUPAC untuk menetapkan standar berat atom (Vocke 1997). IUPAC sendiri akhirnya harus memberikan catatan tentang beberapa ketidakpastian berat atom dari beberapa unsur (Berglund & Wieser 2011). Dari sekian banyak unsur, hanya beberapa unsur saja yang memiliki konsistensi kelimpahan isotop-isotopnya, seperti pada Si (Pringle *et al.* 2013), He dan Ne (Sabu & Manuel 1980). Dengan demikian, kita dapat membuat alternatif baru dalam merumuskan kestabilan inti berdasarkan kelimpahan unsur-unsur di Sistem Tata Surya.

Secara umum, data kelimpahan unsur-unsur di Sistem Tata Surya mengikuti pola zig-zag, di mana unsur bernomor atom genap cenderung lebih melimpah dibandingkan unsur bernomor ganjil tetangga terdekatnya, kecuali pada unsur bernomor 1 sampai 4. Jika data kelimpahan unsur akan dijadikan acuan dalam menentukan konsep kestabilan inti, kita dapat menggunakan nilai-nilai perbandingan kelimpahan unsur-unsur yang nomor atomnya bertetangga secara langsung, seperti antara Fe dengan Co ( $Fe > Co$ ), Co dengan Ni ( $Co < Ni$ ), Ni dengan Cu ( $Ni > Cu$ ), Cu dengan Zn ( $Cu < Zn$ ), dst., yang artinya besi lebih melimpah dibandingkan kobalt, kobalt kurang melimpah dibandingkan nikel, nikel lebih melimpah dibandingkan tembaga, tembaga kurang melimpah dibandingkan zink, dst. Data kelimpahan unsur-unsur seri H-He-Li-Be tidak dapat dijadikan acuan karena isotop-isotop dari unsur-unsur ini merupakan inisiator utama dan paling reaktif (memiliki kestabilan inti terendah) dalam nukleosintesis. H dan He secara berturut-turut

**Tabel 1.** Perbandingan urutan tingkat kestabilan unsur yang masing-masing diwakili oleh isotop-isotop terstabilnya antara berdasarkan massa inti per nukleonnya dengan energi ikat inti per nukleonnya. Data yang digunakan untuk perhitungan m/A dan B/A bersumber dari Lide & Haynes (2010).

No. Urut	Kestabilan berdasarkan massa inti		Kestabilan berdasarkan energi ikat inti		No. Urut	Kestabilan berdasarkan massa inti		Kestabilan berdasarkan energi ikat inti	
	Nuklida	m/A (amu)	Nuklida	B/A (MeV)		Nuklida	m/A (amu)	Nuklida	B/A (MeV)
1	<sup>56</sup> Fe	0,998838	<sup>62</sup> Ni	8,563725	28	<sup>41</sup> K	0,999069	<sup>104</sup> Pd	8,358796
2	<sup>62</sup> Ni	0,998844	<sup>58</sup> Fe	8,563089	29	<sup>102</sup> Pd	0,999075	<sup>36</sup> S	8,348279
3	<sup>52</sup> Cr	0,998856	<sup>54</sup> Cr	8,550732	30	<sup>37</sup> Cl	0,999078	<sup>41</sup> K	8,339259
4	<sup>59</sup> Co	0,998868	<sup>59</sup> Co	8,534096	31	<sup>103</sup> Rh	0,999083	<sup>37</sup> Cl	8,335495
5	<sup>55</sup> Mn	0,998874	<sup>55</sup> Mn	8,532642	32	<sup>108</sup> Cd	0,999113	<sup>107</sup> Ag	8,329438
6	<sup>66</sup> Zn	0,998879	<sup>50</sup> Ti	8,530771	33	<sup>107</sup> Ag	0,999113	<sup>110</sup> Cd	8,328314
7	<sup>63</sup> Cu	0,998883	<sup>68</sup> Zn	8,530197	34	<sup>30</sup> Si	0,999126	<sup>116</sup> Sn	8,302856
8	<sup>50</sup> Ti	0,998896	<sup>65</sup> Cu	8,529055	35	<sup>114</sup> Sn	0,999147	<sup>113</sup> In	8,301349
9	<sup>51</sup> V	0,998901	<sup>88</sup> Sr	8,511926	36	<sup>113</sup> In	0,999151	<sup>121</sup> Sb	8,266633
10	<sup>72</sup> Ge	0,998918	<sup>51</sup> V	8,511526	37	<sup>31</sup> P	0,999154	<sup>122</sup> Te	8,260318
11	<sup>69</sup> Ga	0,998921	<sup>72</sup> Ge	8,50464	38	<sup>120</sup> Te	0,999200	<sup>31</sup> P	8,233918
12	<sup>88</sup> Sr	0,998927	<sup>84</sup> Kr	8,498352	39	<sup>121</sup> Sb	0,999205	<sup>127</sup> I	8,232271
13	<sup>76</sup> Se	0,998937	<sup>78</sup> Se	8,495062	40	<sup>126</sup> Xe	0,999240	<sup>128</sup> Xe	8,227735
14	<sup>90</sup> Zr	0,998941	<sup>69</sup> Ga	8,494907	41	<sup>127</sup> I	0,999248	<sup>29</sup> Si	8,201944
15	<sup>89</sup> Y	0,998942	<sup>87</sup> Rb	8,493643	42	<sup>130</sup> Ba	0,999279	<sup>133</sup> Cs	8,198705
16	<sup>82</sup> Kr	0,998945	<sup>89</sup> Y	8,489994	43	<sup>133</sup> Cs	0,999289	<sup>134</sup> Ba	8,194664
17	<sup>75</sup> As	0,998955	<sup>90</sup> Zr	8,482812	44	<sup>27</sup> Al	0,999316	<sup>139</sup> La	8,168559
18	<sup>87</sup> Rb	0,998956	<sup>75</sup> As	8,476024	45	<sup>136</sup> Ce	0,999317	<sup>140</sup> Ce	8,164708
19	<sup>79</sup> Br	0,998966	<sup>81</sup> Br	8,475119	46	<sup>139</sup> La	0,999326	<sup>141</sup> Pr	8,140246
20	<sup>92</sup> Mo	0,998987	<sup>48</sup> Ca	8,453562	47	<sup>26</sup> Mg	0,999331	<sup>142</sup> Nd	8,130187
21	<sup>93</sup> Nb	0,998993	<sup>93</sup> Nb	8,438864	48	<sup>141</sup> Pr	0,999345	<sup>26</sup> Mg	8,098032
22	<sup>44</sup> Ca	0,998988	<sup>94</sup> Mo	8,433979	49	<sup>142</sup> Nd	0,999350	<sup>145</sup> Pm	8,087769
23	<sup>38</sup> Ar	0,999019	<sup>100</sup> Ru	8,394438	50	<sup>144</sup> Sm	0,999389	<sup>27</sup> Al	8,085539
24	<sup>45</sup> Sc	0,999020	<sup>98</sup> Tc	8,385752	51	<sup>145</sup> Pm	0,999398	<sup>144</sup> Sm	8,083746
25	<sup>98</sup> Ru	0,999034	<sup>45</sup> Sc	8,380421	52	<sup>23</sup> Na	0,999465	<sup>151</sup> Eu	8,026174
26	<sup>98</sup> Tc	0,999053	<sup>38</sup> Ar	8,372239	53	<sup>151</sup> Eu	0,999469	<sup>152</sup> Gd	8,018317
27	<sup>34</sup> S	0,999055	<sup>103</sup> Rh	8,360858	54	<sup>152</sup> Gd	0,999472	<sup>159</sup> Tb	7,979973

No. Urut	Kestabilan berdasarkan massa inti		Kestabilan berdasarkan energi ikat inti		No. Urut	Kestabilan berdasarkan massa inti		Kestabilan berdasarkan energi ikat inti	
	Nuklida	m/A (amu)	Nuklida	B/A (MeV)		Nuklida	m/A (amu)	Nuklida	B/A (MeV)
55	<sup>156</sup> Dy	0,999515	<sup>158</sup> Dy	7,976739	84	<sup>15</sup> N	1,000007	<sup>262</sup> Db	7,512337
56	<sup>159</sup> Tb	0,999530	<sup>23</sup> Na	7,950916	85	<sup>262</sup> Db	1,000044	<sup>264</sup> Bh	7,503037
57	<sup>162</sup> Er	0,999560	<sup>165</sup> Ho	7,939526	86	<sup>266</sup> Sg	1,000046	<sup>222</sup> Rn	7,496576
58	<sup>165</sup> Ho	0,999578	<sup>162</sup> Er	7,937980	87	<sup>264</sup> Bh	1,000047	<sup>223</sup> Fr	7,484327
59	<sup>168</sup> Yb	0,999607	<sup>169</sup> Tm	7,905888	88	<sup>222</sup> Rn	1,000079	<sup>226</sup> Ra	7,463018
60	<sup>22</sup> Ne	0,999608	<sup>168</sup> Yb	7,898962	89	<sup>223</sup> Fr	1,000088	<sup>15</sup> N	7,460995
61	<sup>169</sup> Tm	0,999611	<sup>175</sup> Lu	7,861877	90	<sup>226</sup> Ra	1,000112	<sup>227</sup> Ac	7,450382
62	<sup>174</sup> Hf	0,999655	<sup>174</sup> Hf	7,857138	91	<sup>227</sup> Ac	1,000122	<sup>12</sup> C	7,424653
63	<sup>175</sup> Lu	0,999662	<sup>22</sup> Ne	7,848163	92	<sup>231</sup> Pa	1,000155	<sup>231</sup> Pa	7,417144
64	<sup>16</sup> O	0,999682	<sup>180</sup> Ta	7,818663	93	<sup>232</sup> Th	1,000164	<sup>232</sup> Th	7,416822
65	<sup>180</sup> W	0,999704	<sup>180</sup> W	7,815410	94	<sup>234</sup> U	1,000175	<sup>234</sup> U	7,399834
66	<sup>180</sup> Ta	0,999708	<sup>185</sup> Re	7,783867	95	<sup>237</sup> Np	1,000203	<sup>237</sup> Np	7,374495
67	<sup>184</sup> Os	0,999742	<sup>184</sup> Os	7,777629	96	<sup>243</sup> Am	1,000253	<sup>243</sup> Am	7,330434
68	<sup>185</sup> Re	0,999746	<sup>191</sup> Ir	7,742118	97	<sup>244</sup> Pu	1,000263	<sup>244</sup> Pu	7,327986
69	<sup>190</sup> Pt	0,999789	<sup>190</sup> Pt	7,736819	98	<sup>247</sup> Bk	1,000285	<sup>247</sup> Cm	7,303353
70	<sup>191</sup> Ir	0,999794	<sup>16</sup> O	7,720694	99	<sup>247</sup> Cm	1,000285	<sup>247</sup> Bk	7,298297
71	<sup>196</sup> Hg	0,999826	<sup>197</sup> Au	7,710828	100	<sup>251</sup> Cf	1,000317	<sup>251</sup> Cf	7,271021
72	<sup>197</sup> Au	0,999830	<sup>196</sup> Hg	7,705893	101	<sup>252</sup> Es	1,000329	<sup>252</sup> Es	7,256526
73	<sup>203</sup> Tl	0,999864	<sup>203</sup> Tl	7,682233	102	<sup>257</sup> Fm	1,000370	<sup>257</sup> Fm	7,223391
74	<sup>204</sup> Pb	0,999868	<sup>204</sup> Pb	7,674604	103	<sup>258</sup> Md	1,000381	<sup>258</sup> Md	7,209657
75	<sup>209</sup> Bi	0,999906	<sup>209</sup> Bi	7,645130	104	<sup>259</sup> No	1,000390	<sup>259</sup> No	7,198643
76	<sup>209</sup> Po	0,999916	<sup>209</sup> Po	7,629881	105	<sup>262</sup> Lr	1,000419	<sup>262</sup> Lr	7,172881
77	<sup>19</sup> F	0,999916	<sup>210</sup> At	7,604910	106	<sup>263</sup> Rf	1,000450	<sup>263</sup> Rf	7,140846
78	<sup>210</sup> At	0,999939	<sup>269</sup> Hs	7,547419	107	<sup>4</sup> He	1,000651	<sup>4</sup> He	6,818483
79	<sup>12</sup> C	1,000000	<sup>272</sup> Uun	7,543270	108	<sup>11</sup> B	1,000846	<sup>11</sup> B	6,695482
80	<sup>269</sup> Hs	1,000005	<sup>268</sup> Mt	7,540475	109	<sup>9</sup> Be	1,001354	<sup>9</sup> Be	6,235676
81	<sup>268</sup> Mt	1,000005	<sup>272</sup> Uuu	7,538269	110	<sup>7</sup> Li	1,002286	<sup>7</sup> Li	5,387372
82	<sup>272</sup> Uun	1,000005	<sup>19</sup> F	7,536983	111	<sup>3</sup> H	1,005350	<sup>3</sup> H	2,657025
83	<sup>272</sup> Uuu	1,000006	<sup>266</sup> Sg	7,513075					

**Tabel 2.** Pencocokan perbandingan kelimpahan tiap pasangan unsur bertetangga terhadap urutan massa inti per nukleon dan energi ikat inti per nukleonnya.

Perbandingan kelimpahan	Kesesuaian dengan urutan kestabilan		Perbandingan kelimpahan	Kesesuaian dengan urutan kestabilan	
	m/A	B/A		m/A	B/A
Be < B	+	+	Pd > Ag	+	+
B < C	+	+	Ag < Cd	+	-
C > N	+	-	Cd > In	+	+
N < O	+	-	In < Sn	+	+
O > F	+	+	Sn > Sb	+	+
F < Ne	+	+	Sb < Te	+	-
Ne > Na	-	-	Te > I	+	+
Na < Mg	+	+	I < Xe	+	-
Mg > Al	-	+	Xe > Cs	+	+
Al < Si	+	+	Cs < Ba	+	-
Si > P	+	-	Ba > La	+	+
P < S	+	+	La < Ce	+	-
S > Cl	+	+	Ce > Pr	+	+
Cl < Ar	+	+	Pr < Nd	-	-
Ar > K	+	+	Sm > Eu	+	+
K < Ca	+	+	Eu < Gd	-	-
Ca > Sc	+	+	Gd > Tb	+	+
Sc < Ti	+	+	Tb < Dy	+	-
Ti > V	+	+	Dy > Ho	+	+
V < Cr	+	+	eHo < Er	+	-
Cr > Mn	+	+	Er > Tm	+	+
Mn < Fe	+	+	Tm < Yb	+	-
Fe > Co	+	+	Yb > Lu	+	+
Co < Ni	+	-	Lu < Hf	+	-
Ni > Cu	+	+	Hf > Ta	+	+
Cu < Zn	+	+	Ta < W	+	-
Zn > Ga	+	+	W > Re	+	+
Ga < Ge	+	+	Re < Os	+	-
Ge > As	+	+	Os > Ir	+	+
As < Se	+	+	Ir < Pt	+	-
Se > Br	+	+	Pt > Au	+	+
Br < Kr	+	-	Au < Hg	+	-
Kr > Rb	+	+	Hg > Tl	+	+
Rb < Sr	+	+	Tl < Pb	-	-
Sr > Y	+	+	Pb > Bi	+	+
Y < Zr	+	+	Bi > Th	+	+
Zr > Nb	+	+	Th > U	+	+
Nb < Mo	+	-	Jumlah	72	53
Ru > Rh	+	+	% (77 data)	93,5%	68,8%
Rh < Pd	+	-			

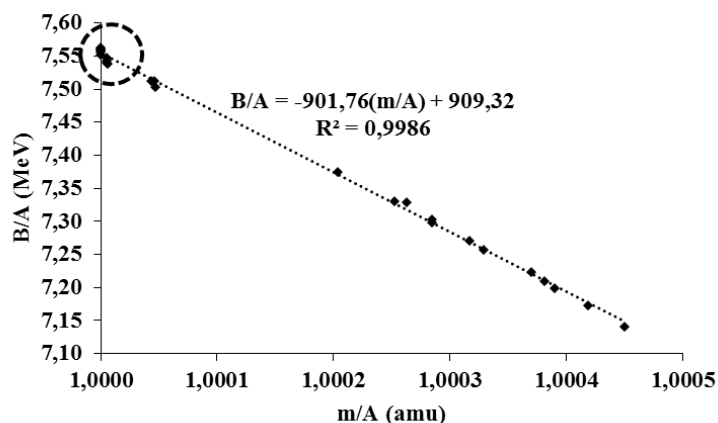


memiliki kelimpahan terbesar karena unsur-unsur ini merupakan sumber utama kandungan bintang, sehingga Li dan Be yang terbentuk segera bereaksi secara fusi dengan H atau He, sehingga memungkinkan Li dan Be memiliki kelimpahan sangat rendah yang kontras dengan kecenderungan umum makin menurunnya kelimpahan unsur sejalan dengan bertambahnya nomor atom.

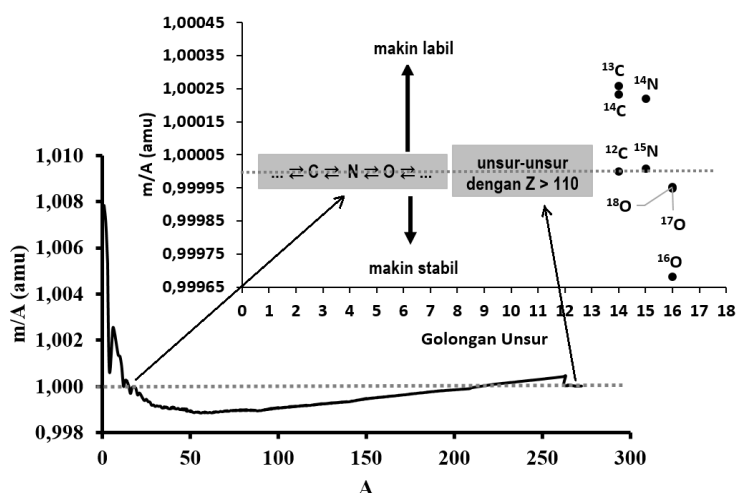
Urutan kestabilan nuklida seperti yang disajikan pada Tabel 1 merupakan representasi kestabilan unsur yang diwakili oleh isotop-isotop terstabil dari masing-masing unsur. Kita dapat menguji satu per satu kecocokan pasangan kelimpahan unsur-unsur yang bertetangga langsung sebagaimana pada Gambar 4 dengan massa inti per nukleon dan energi ikat inti per nukleonya (Tabel 1) dan hasilnya seperti yang terlihat pada Tabel 2. Hasil ini memperlihatkan bahwa kestabilan nuklida berdasarkan kelimpahan unsur-unsur lebih cocok ditinjau dari massa inti per nukleonya (93,5%)

dibandingkan dari energi ikat inti per nukleonya (68,8%).

Berdasarkan data pada Tabel 2, terdapat ketidakcocokan  $m/A$  terkait perbandingan kelimpahan pasangan-pasangan  $^{10}\text{Ne} > ^{11}\text{Na}$ ,  $^{12}\text{Mg} > ^{13}\text{Al}$ ,  $^{59}\text{Pr} < ^{60}\text{Nd}$ ,  $^{63}\text{Eu} < ^{64}\text{Gd}$ , dan  $^{81}\text{Tl} < ^{82}\text{Pb}$ . Hal ini dapat dijelaskan bahwa unsur-unsur yang memiliki nomor atom genap cenderung memiliki isotop-isotop yang lebih banyak dibandingkan dengan unsur-unsur bernomor atom ganjil. Lebih banyaknya isotop dapat menambah kemungkinan jalan reaksi yang bermuara pada akumulasi unsur-unsur tersebut. Unsur-unsur bernomor atom genap cenderung lebih melimpah dibandingkan dengan unsur-unsur bernomor ganjil terdekatnya dengan pola umum kelimpahannya secara zig-zag, naik menuju unsur bernomor atom genap dan turun menuju unsur bernomor atom ganjil secara bergantian.



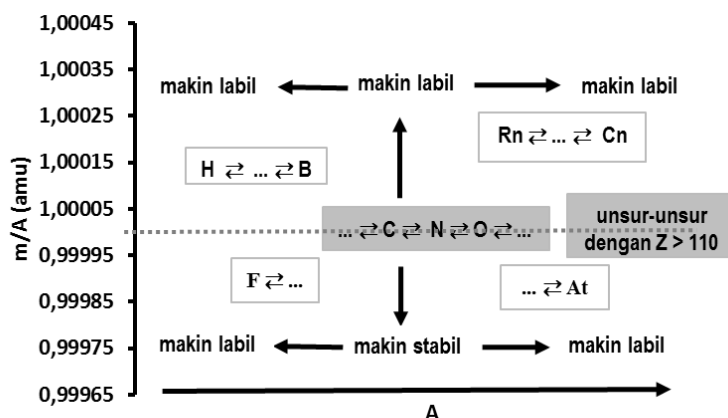
**Gambar 5.** Prediksi unsur-unsur terakhir akan memiliki  $m/A$  sekitar 1,0000 amu dan  $B/A$  sekitar 7,56 MeV (wilayah yang dilingkari).



**Gambar 6.** Kesamaan kestabilan inti berdasarkan massa inti per nukleon antara unsur-unsur ringan C, N, dan O dengan unsur-unsur terberat dengan  $Z > 110$ . Dalam grafik sebelah atas terlihat bahwa C, N, O terdapat garis kesetimbangan kestabilan ( $m/A \approx 1,00000$  amu). Dari seluruh isotop C, N, dan O,  $^{12}\text{C}$ -lah yang benar-benar tepat berada dalam kesetimbangan kestabilan ini.

					He
B	C	N	O	F	Ne
Al	Si	P	S	Cl	Ar
Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
113	Fl	115	Lv	117	118

**Gambar 7.** Tabel Periodik dari unsur-unsur blok-p, Golongan 13 – 18. Terlihat pola pemisahan antara unsur-unsur logam (abu tua), semi-logam pada perbatasannya dengan unsur-unsur non logam (abu muda). Unsur-unsur yang tidak diberi warna menandakan unsur-unsur radioaktif atau buatan. Berdasarkan pola tersebut, Lv sulit untuk dikatakan sebagai unsur, karena batas terakhir unsur secara kimiawi sering ditunjukkan oleh satu unsur yang radioaktif atau buatan dalam golongan unsur itu, seperti Po, At, dan Rn untuk Golongan 16, 17, dan 18.



**Gambar 8.** Ikhtisar konsep kestabilan inti berdasarkan massa inti per nukleon yang dapat dikaitkan langsung dengan unsur-unsur dan isotop-isotopnya. Konsep ini menyarankan juga bahwa unsur-unsur dengan  $Z > 110$  masih layak sebagai unsur jika memiliki  $m/A = 1,0000$  amu, namun akan makin labil karena terjadinya peluruhan  $\alpha$  dengan segera (waktu paruh makin sebentar) seiring bertambahnya  $Z$  dan  $A$ .

### Massa Inti per Nukleon dalam Kaitan Eksistensi Unsur-unsur Terberat

Berkaitan dengan prediksi keberadaan unsur-unsur terberat, unsur yang paling mungkin dapat menjadi unsur terakhir adalah unsur ke-114, karena di antara unsur-unsur terberat, unsur inilah yang paling memiliki waktu paruh yang masih memungkinkan dideteksi sifat kimianya (Oganessian 2012). Unsur-unsur terberat yang sudah diberi nama adalah Cn (bernomor 112), Fl (bernomor 114), dan Lv (bernomor 116). Prediksi unsur-unsur terakhir kemungkinan akan memiliki harga  $m/A$  sekitar 1,0000 amu, dengan energi ikatnya sekitar 7,56 MeV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Dengan menggunakan persamaan regresi pada Gambar 1 maupun 5, kita dapat memperoleh maksimum harga  $m/A$  secara berturut-turut sebesar 1,00787 dan 1,00838 amu (rata-ratanya 1,00813 amu) yang mirip dengan massa isotop  $^1\text{H}$ , karena pada nilai ini isotop tersebut tidak memiliki energi ikat inti

(mengandung hanya 1 nukleon, yakni proton saja), artinya  $m = m/A$ . Dari kedua persamaan regresi juga dapat diperkirakan bahwa unsur-unsur terberat akan benar-benar memiliki  $m/A \approx 1$ , sama seperti isotop  $^{12}\text{C}$ . Harga minimum  $m/A$  akan dimiliki oleh  $^{56}\text{Fe}$ , yakni 0,998838 amu, yang dengan menggunakan persamaan pertama dan kedua secara berturut-turut menghasilkan  $B/A$  sebesar 8,6074 dan 8,6078 MeV (rata-rata 8,6076 MeV), sedikit lebih besar dari  $B/A$  tertinggi dari semua nuklida,  $^{62}\text{Ni}$  (8,563725 MeV, pada Tabel 1). Bagaimanapun juga nilai-nilai energi ikat inti per nukleon seperti yang dicantumkan pada Tabel 1 hanya berdasarkan perhitungan dari konsep dasar, yakni konversi langsung dari defek massa ke dalam energi dengan memakai faktor pengali 931,494028 MeV/amu (Lide & Haynes 2010), karena sampai saat ini tidak ada lembaga resmi yang mengeluarkan standar energi ikat inti untuk tiap isotop alami semua unsur.

### Perumusan Kestabilan Inti Berdasarkan Massa Inti per Nukleon

Perumusan kestabilan inti berdasarkan massa inti per nukleon dapat dimulai dengan menganalisis grafik  $m/A$  terhadap  $A$  yang ada pada Gambar 3. Unsur-unsur ringan yang memiliki  $m/A$  sekitar 1,000 amu adalah C, N, O, dan unsur-unsur terberat setelah U. Jika dikaitkan dengan golongan unsur, nyatalah bahwa  $m/A$  sekitar 1,000 amu itu terjadi pada unsur-unsur teringan dan terberat dari Golongan 14, 15, dan 16, yakni C, N, O dan unsur-unsur dengan  $Z > 110$ . Skema keberulangan itu dapat dilihat dalam skema pada Gambar 6.

Dari skema Gambar 6 tersebut terlihat bahwa konsep massa inti per nukleon memiliki nilai prediktif terhadap unsur-unsur terberat. Di antara unsur-unsur Golongan 14, 15, dan 16 yang isotopnya memiliki harga  $m/A$  tepat 1,0000 amu adalah  $^{12}\text{C}$ . Jika Tabel Periodik modern benar-benar memiliki keberulangan dalam sifat kimia dan fisika atom, maka unsur  $^{114}\text{Fl}$  akan memiliki sejumlah kesamaan sifat-sifat tersebut dengan karbon. Unsur Fl telah diketahui memiliki waktu paruh terlama di antara unsur-unsur dengan  $Z > 112$ , yakni sekitar 2,6 detik (pada  $^{289}\text{Fl}$ ), waktu paruh yang cukup lama yang tidak biasa ditemukan pada unsur-unsur terberat. Kecenderungan lebih stabil dan lebih melimpahnya unsur dan isotopnya terletak pada genapnya jumlah proton dan jumlah nukleon, oleh karena itu unsur Fl juga diprediksi menempati sekitar pinggiran "pulau kestabilan" yang cenderung masih lebih memungkinkan untuk studi-studi kimia dibandingkan dengan unsur ke-115 dan  $^{116}\text{Lv}$  yang sudah berada di luar "pulau kestabilan" tersebut (Oganessian 2012).

Kecenderungan keistimewaan Fl ini tidak disebut-sebut pada unsur ke-116, Lv. Jika melihat grafik Gambar 6, namun dengan kelebihan dua proton lagi akan meningkatkan jumlah neutronnya, energi ikatnya harus bertambah lagi, jika tidak, maka reaksi fisi akan terjadi lagi (tidak menghasilkan unsur tersebut). Jika energi ikat harus terus bertambah (massa inti per nukleon berkurang) seperti kecenderungan unsur segolongannya, O, unsur ke-116 yang ditemukan (sekarang sudah diberi nama Lv) akan sangat sulit dianalisis (dengan demikian secara praktek tidak akan memiliki nilai guna lagi dalam kehidupan di bumi), apa lagi untuk unsur-unsur berikutnya (unsur ke-117 dan 118), karena unsur-unsur segolongan yang ada di sebelah atasnya (lihat Gambar 7) sudah bukan merupakan unsur yang stabil lagi.

Unsur Fl masih memungkinkan dikatakan sebagai unsur, karena unsur sebelah atasnya, Pb, merupakan unsur stabil. Unsur ke-115 sulit untuk stabil karena memiliki proton berjumlah ganjil. Ilustrasi ini mirip dengan pemisahan-pemisahan sifat unsur antar logam, semi logam, dan non logam, demikian juga dalam satu golongan terdapat gradasi sifat fisika dan kimia.

Pola kelimpahan unsur di alam (Gambar 4) menunjukkan C, Si, Ge, Sn, dan Pb cukup signifikan mendominasi kelimpahan di antara unsur-unsur sekitarnya, namun dua nomor setelah Pb tidak terdapat di alam. Deret O, S, Se, Te, dan Po tidak menunjukkan pola kestabilan yang tetap, hanya terjadi di O, kemudian turun pada unsur-unsur berikutnya yang segolongan.

Dari seluruh penjelasan sebelumnya, kita dapat membuat rumusan tentang cara pandang terhadap kestabilan inti berdasarkan  $m/A$  seperti diikhtisarkan pada Gambar 8. C, N, dan O terlihat bukan merupakan unsur terstabil, namun berada pada kesetimbangan jumlah neutron terhadap proton yang sesuai dengan nilai rasio  $n/p$  pada konsep kestabilan yang biasa dipakai.

### KESIMPULAN

Dari semua pembahasan di atas terlihat bahwa penentuan kestabilan inti berdasarkan massa inti per nukleonya dapat disimpulkan sebagai berikut: (1) kestabilan inti dapat diprediksi secara langsung dari data massa dibagi nomor massanya, (2) massa inti per nukleon dapat memprediksi perbandingan kelimpahan di alam secara lebih akurat dari pasangan unsur yang nomor atomnya bertetangga langsung, (3) massa inti per nukleon dapat digunakan untuk keperluan perhitungan energi ikat inti per nukleon, dan (4) kestabilan inti memiliki keseimbangan tepat pada  $m/A = 1$  pada  $^{12}\text{C}$ , makin stabil jika kurang dari harga ini, makin labil jika lebih dari harga ini, makin labil jika  $A$  berkurang atau bertambah dengan acuan dari nuklida terstabil ( $^{56}\text{Fe}$ ).

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prodi Kimia UIN SGD Bandung atas bantuan dana untuk seminar.

### DAFTAR PUSTAKA

- Allegre, C.J. (2008). *Isotope Geology*. New York: Cambridge University Press.
- Anders, E. & Grevesse, N. (1989). Edward and Nicolas Grevesse, Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 53: 197-214.
- Berglund, M. & Wieser, M.E. (2011). Isotopic compositions of the elements 2009 (IUPAC Technical Report). *Pure & Applied Chemistry*. 83(2): 397-410.
- Burkhardt, C., Kleine, T., Oberli, F., Pack, A., Bourdon, B. & Wieler, R. (2011). Molybdenum isotope anomalies in meteorites: Constraints on solar nebula evolution and origin of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*. 312: 390-400.
- Esat, T.M. & Ireland, T.R. (1989). Chromium isotopic anomalies in the Murchison meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*. 92: 1-6.

- Fewell, M.P. (1995). The atomic nuclide with the highest mean binding energy. *American Journal of Physics*. 63(7): 653-658.
- Greenwood, J.P., Mojzsis, S.J. & Coath C.D. (2000). Sulfur isotopic compositions of individual sulfides in Martian meteorites ALH84001 and Nakhla: implications for crust-regolith exchange on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*. 184: 23-35.
- Lide, D.R. & Haynes, W.M. (2010). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90th ed. Boca Raton: CRC.
- Lodders, K. (2003). Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements. *The Astrophysical Journal*. 591: 1220-1247.
- Moynier, F., Dauphas, N. & Podosek, F.A. (2009). A Search for  $^{70}\text{Zn}$  Anomalies in Meteorites. *The Astrophysical Journal*. 700(2): L92-L95.
- Oganessian, Y. (2012). Nuclei from "Island of Stability" of Superheavy Elements. *Acta Physica Polonica B*. 43(2): 167-178.
- Papanastassiou, D.A. & Wasserburg, G.J. (1978). Strontium Isotopic Anomalies in the Allende Meteorite. *Geophysical Research Letters*. 5(7): 595-598.
- Pringle, E.A., Savage, P.S., Jackson, M.G., Barrat, J.-A. & Moynier, F. (2013). Si Isotope Homogeneity of the Solar Nebula. *The Astrophysical Journal*. 779: 123.
- Sabu, D.D. & Manuel, O.K. (1980). Noble gas anomalies and synthesis of the chemical elements. *Meteoritics*. 15(2): 117-138.
- Salaris, M. & Cassisi, S. (2005). *Evolution of Stars and Stellar Populations*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Steele, R.C.J., Coath, C.D., Regelous, M., Russell, S. & Elliott, T. (2012). Neutron-poor nickel isotope anomalies in meteorites. *The Astrophysical Journal*. 758(59): 1-21.
- Steele, R.C.J., Elliott, T., Coath, C.D. & Regelous, M. (2011). Confirmation of mass-independent Ni isotopic variability in iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 75: 7906-7925.
- Vocke, R.D.Jr. (1999). Atomic Weights of the Elements 1997 (Technical Report). *Pure & Applied Chemistry*. 71(8): 1593-1607.
- Wiechert, U.H., Halliday, A.N., Palme, H. & Rumble, D. (2004). Oxygen isotope evidence for rapid mixing of the HED meteorite parent body. *Earth and Planetary Science Letters*. 221: 373-382.
- Zagrebaev, V., Karpov, A. & Greiner, W. (2013). Future of superheavy element research: Which nuclei could be synthesized within the next few years? *Journal of Physics: Conference Series*. 420: 012001.