

KAJIAN KESTABILAN INTI DENGAN PENDEKATAN ENERGI PENGIKAT INTI

Oleh:
I Made Sukarna
(FPMIPA IKIP Yogyakarta)

Abstrak

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 kecil. 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.

1. Pendahuluan

Inti suatu nuklida dapat mengalami peluruhan dengan memancarkan sinar-sinar radioaktif. Nuklida dapat mengalami peluruhan oleh karena intinya tidak stabil. Nuklida seperti itu disebut nuklida radioaktif atau radionuklida. Stabil atau tidaknya suatu inti hanya dapat diketahui secara eksperimen.

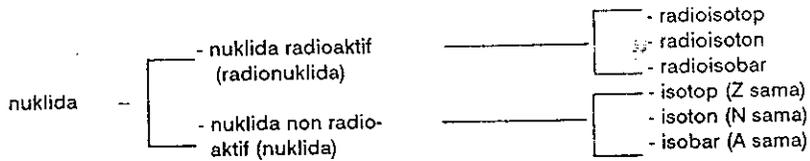
Emilio Segre telah menyusun semua nuklida ke dalam bentuk diagram, yang dikenal dengan nama diagram Segre (Segre Chart) atau peta nuklida. Nuklida-nuklida dalam diagram tersebut disusun berdasarkan atas jumlah proton dan jumlah neutron. Nuklida-nuklida stabil pada diagram tersebut dihubungkan dengan suatu garis yang disebut garis kestabilan (David, 1979: 5). Dengan berpedoman pada diagram ini dapat diperkirakan kestabilan suatu nuklida dan jenis peluruhan yang dialami. Namun perkiraan itu umumnya berlaku untuk nuklida ringan. Untuk nuklida berat perkiraan kestabilan dan jenis peluruhan yang dialami dengan menggunakan diagram tersebut sudah menjadi sulit. Seperti ${}_{92}^{238}\text{U}$ tidak mengalami peluruhan β^- , padahal dalam diagram nuklida, nuklida tersebut terletak pada daerah yang kaya neutron.

Kestabilan atau ketidakstabilan suatu nuklida adalah masalah energi. Nuklida tidak stabil karena nuklida tersebut mempunyai kelebihan energi di dalam intinya dibanding nuklida stabilnya. Oleh karena energi sebanding dengan massa ($E = mc^2$), maka kelebihan energi di dalam inti suatu nuklida dapat ditentukan dan ini merupakan energi pengikat inti nuklida tersebut.

Dengan menentukan energi pengikat inti dapat diketahui kestabilan nuklida satu terhadap nuklida lainnya dan apakah suatu radionuklida dapat meluruhkan jenis peluruhan tertentu. Seperti masalah tidak bisanya $^{238}_{92}\text{U}$ meluruhkan jenis peluruhan β^- , akan terpecahkan dengan pendekatan energi pengikat inti ini.

2. Energi Pengikat Inti

Suatu atom X, yang mempunyai proton sebanyak Z dan bilangan massa A, dilambangkan dengan ^A_ZX . Di mana A menyatakan jumlah proton dan neutron, yang di dalam kimia inti disebut nukleon dan atom ^A_ZX biasanya disebut nuklida. Berdasarkan sifat keradioaktifannya, nuklida dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Sutrisno Puspodikoro, 1978: ii):



Sistem nukleon bebas (tidak terikat sebagai inti), misalnya A nukleon yang terdiri dari Z proton, (A - Z) neutron dan massa totalnya $ZM_p + (A - Z) M_n$, mempunyai nilai energi tertentu. Bila nukleon dalam keadaan terikat dalam inti, misalnya ^A_ZX , dengan massa total M, maka nukleon tersebut 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 yang tidak stabil selalu ingin lebih stabil dengan melepas sebagian energinya. Energi yang dilepas saat nukleon bebas membentuk inti (nukleon terikat) merupakan energi pengikat inti total (E_p). Oleh karena massa ekuivalen dengan energi, maka dapat juga dikatakan bahwa energi pengikat inti total adalah selisih antara massa nukleon bebas dengan massa inti (Firdlander, G., 1981: 25).

Contoh. Jika diketahui massa nuklida netral $^1_1\text{H} = 1,007825$ s.m.a., $^{16}_8\text{O} = 15,9949149$ s.m.a. dan massa $^1_0\text{n} = 1,0086645$ s.m.a., maka E_p $^{16}_8\text{O}$ tersebut adalah

$$\begin{aligned} & [\{ ZM_p + (A - Z)M_n \} - M_{\text{O-16}}] \times 931,5 \text{ MeV} \\ & = 8(M_H - M_e) + (16 - 8)M_n - (M_{\text{O-16}} - M_{8e}) \end{aligned}$$

$$= 8(1,007825) - 8e + 8(1,0086645) - 15,9949149 + 8e$$

$$= 127,61736 \text{ MeV.}$$

Oleh karena yang diketahui di dalam soal tersebut adalah massa nuklida netral, untuk mengetahui massa intinya, massa nuklida netral tersebut harus dikurangi dengan massa elektron seperti perhitungan tersebut di atas. Tetapi massa elektron tersebut tidak mempengaruhi harga E_p karena telah saling meniadakan. Jadi untuk menghitung E_p suatu nuklida dapat menggunakan massa nuklida netral yang diketahui.

Buku-buku tentang kimia inti saat ini kebanyakan tidak lagi mencantumkan massa atom total dalam indeks (tabel lampiran) tetapi mencantumkan kelebihan massa (mass excess) yang kadang-kadang disebut defek massa (mass defect) yaitu: $\Delta \text{ MeV} = (M - A)$. Harga $\Delta \text{ MeV}$ beberapa nuklida dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk menghitung E_p suatu nuklida, dapat langsung menggunakan harga $\Delta \text{ MeV}$ ini tanpa harus mencari harga M terlebih dahulu. Walaupun M dicari terlebih dahulu yaitu $M = (A + \frac{\Delta}{931,5}) \text{ s.m.a.}$, hasilnya akan sama (Friedlander, 1981: 606-650). Penyelesaian contoh di atas dengan konsep $\Delta \text{ MeV}$ ini adalah sbb.:

$$E_p \frac{16}{8}\text{O} = \{8x(\Delta_p + \frac{\Delta_p}{931,5})\} + \{8x(\Delta_n + \frac{\Delta_n}{931,5}) -$$

$$(A_{0-16} + \frac{\Delta_{0-16}}{931,5})\} \text{ s.m.a.} \times 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{s.m.a}}$$

$$= (8x \Delta_p) + (8x \Delta_n) - \Delta_{0-16}$$

$$= 127,617 \text{ MeV.}$$

Tabel 1.: Tabel (beberapa) Nuklida
(Friedlander G, 1981: 606-650)

Z	nuklida lambang	A	Kelimpahan 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^+	-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
		35	87,4 d	β^- , no γ	-28,864

20 Ca	40	96,94%		- 34,847
46 Pd	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 μ s	SF	44,79
	237	6,75 d	β^-	45,389
	238	99,275%, $4,468 \times 10^9$ y	α	47,307
	238f	0,29 μ s	IT 96%, SF 4%	49,866

Keterangan : SF = pembelahan spontan, no y = tidak memancarkan y
 IT = Transisi Isomerik
 EC = Tangkapan Elektron

Harga E_p total beberapa nuklida dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2.: Harga E_p total dan E_p rata-rata per nukleon, serta sifat peluruhan beberapa nuklida.

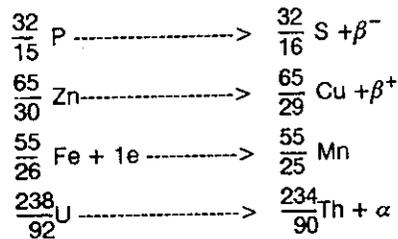
Nuklida	E_p total (MeV)	E_p per nukleon (MeV)	Sifat peluruhan
^4He	28,295	7,074	Stabil
^5He	29,265	4,878	β^-
^{15}O	111,945	7,464	β^+ , TE
^{16}O	127,617	7,976	Stabil
^{17}O	131,761	7,751	Stabil
^{19}O	143,762	7,566	β^-
^{32}P	270,847	8,464	β^-
^{32}S	271,775	8,493	Stabil
^{55}Mn	482,065	8,765	Stabil
^{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}Pu	1804,676	7,551	FS

Keterangan: TE = Tangkapan Elektron. FS = Fisi Spontan

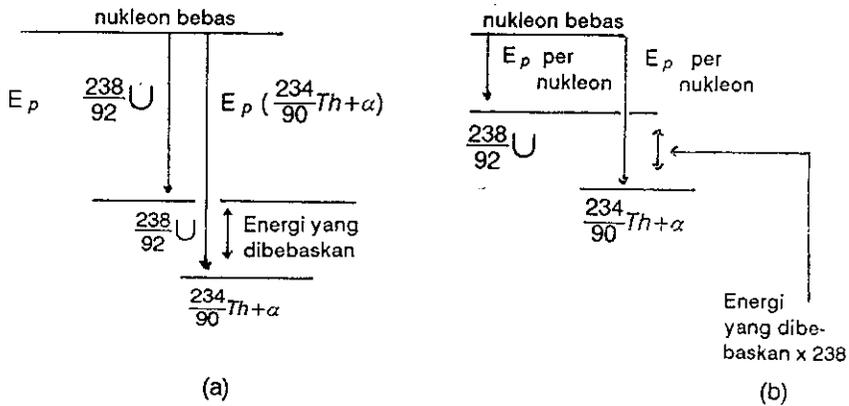
E_p total umumnya akan makin besar dengan makin besarnya nuklida. Namun kalau dilihat kestabilan nuklida tersebut, ternyata dengan makin besarnya harga E_p total, tidak mencerminkan makin stabilnya nuklida. Hal yang mencerminkan kestabilan nuklida adalah harga E_p rata-rata per nukleon, yaitu E_p total dibagi jumlah nukleon. (Periksa Tabel 2).

3. Kestabilan Inti

Kestabilan inti biasanya menyangkut reaksi spontan inti (peluruhan). Nuklida dikatakan stabil jika intinya tidak dapat meluruh secara spontan. Definisi kestabilan suatu nuklida sering dibatasi pada jenis peluruhan yang tidak bisa dialami tersebut. Misalnya $\frac{238}{92}\text{U}$ tidak bisa mengalami peluruhan β , maka dikatakan nuklida $\frac{238}{92}\text{U}$ mempunyai kestabilan β . Nuklida $\frac{238}{92}\text{U}$ tidak mempunyai kestabilan α karena dapat meluruh mengemisikan partikel α menjadi $\frac{234}{90}\text{Th}$. Dengan mengkaji harga E_p rata-rata per nukleon, yang telah dihitung pada Tabel 2, dapat diketahui bahwa inti stabil mempunyai E_p rata-rata per nukleon lebih besar daripada inti kurang stabil. Inti kurang stabil dapat meluruh secara spontan dengan satu atau beberapa jenis peluruhan ($\alpha, \beta, \gamma, TE$) membentuk nuklida lain, yang E_p rata-rata per nukleonnya lebih tinggi. Seperti peluruhan beberapa nuklida berikut:



Keadaan energi pengikat inti total (E_p) dan E_p rata-rata per nukleon inti yang seluruh dan inti yang terjadi pada suatu peluruhan, dapat digambarkan dalam bentuk diagram. Misalnya diagram E_p dan E_p rata-rata per nukleon peluruhan $\frac{238}{92}\text{U} \text{-----} > \frac{234}{90}\text{Th} + \alpha$ (Gambar 1).



Gambar 1.: Diagram E_p (a) dan E_p (b) rata-rata pernukleon peluruhan $\frac{238}{92} \text{U} \rightarrow \frac{234}{90} \text{Th} + \alpha$
 Harga E_p dan E_p rata-rata pernukleon dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari diagram tersebut (Gambar 1a), terlihat bahwa energi yang dilepas saat nukleon bebas membentuk $\frac{234}{90} \text{Th} + \alpha$ (ini merupakan energi pengikat inti total $\frac{234}{90} \text{Th} + \alpha$) lebih besar daripada energi yang dilepas pada saat nukleon bebas membentuk $\frac{238}{92} \text{U}$ (= energi pengikat inti total $\frac{238}{92} \text{U}$). Hal ini berarti peluruhan $\frac{238}{92} \text{U} \rightarrow \frac{234}{90} \text{Th} + \alpha$ jelas masih akan membebaskan energi sebesar:

$$E_p (\frac{234}{90} \text{Th} + \alpha) - E_p \frac{238}{92} \text{U}. \text{ (Gambar 1a)}$$

atau sebesar:

$$[(E_p \text{ rata-rata pernukleon } \frac{234}{90} \text{Th} + \alpha - E_p \text{ rata-rata pernukleon } \frac{238}{92} \text{U}) \times 238]$$

$$= 4,27 \text{ MeV.}$$

(Gambar 1b).

Energi yang dilepas pada peluruhan $\frac{238}{92} \text{U}$ tersebut, dapat pula dicari dengan menggunakan massa. Perhitungan dengan menggunakan massa ini akan menghasilkan energi sebesar 4,27 MeV, bila massa $\frac{238}{92} \text{U}$

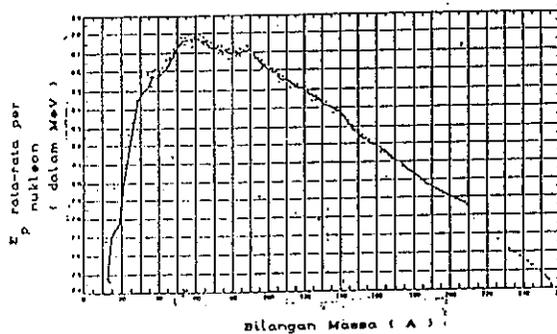
dikurangi massa $\frac{234}{90}\text{Th} + \alpha$. Jadi dengan menggunakan massa, energi peluruhan tersebut adalah:

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ \left(A_{U-238} + \frac{\Delta U-238}{931,5} \right) - \left(\left(A_{Th-234} + \frac{\Delta Th-234}{931,5} \right) + \left(A_{He-4} + \frac{\Delta He-4}{931,5} \right) \right) \right\} \\
 &\text{s.m.a.} \times 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{s.m.a}} \\
 &= \Delta U-238 - (\Delta Th-234 + \Delta He-4) \\
 &= 47,307 \text{ MeV} - (40,612 + 2,425) \text{ MeV} \\
 &= 4,27 \text{ MeV.}
 \end{aligned}$$

Dengan cara sama dapat diketahui bahwa peluruhan $\frac{238}{92}\text{U}$, menjadi $\frac{238}{93}\text{Np} + \beta^-$, tidak membebaskan energi tetapi memerlukan energi. Dengan kata lain peluruhan $\frac{238}{92}\text{U}$ menjadi $\frac{238}{93}\text{Np} + \beta^-$ adalah tidak spontan. Hal ini karena E_p total dan E_p rata-rata per nukleon inti hasil lebih kecil daripada inti mula-mula dan massa inti hasil lebih besar daripada ^{massa} inti semula. Dari bahasan di atas jelas adanya kaitan antara kestabilan inti (peluruhan spontan inti) dengan E_p total dan E_p rata-rata per nukleon, walaupun kaitan itu hanya terbatas pada kestabilan relatif nuklida terhadap nuklida lainnya.

4. Reaksi Fisi dan Fusi

Harga E_p rata-rata per nukleon nuklida dapat dibuat kurvanya sebagai fungsi A. Kurva E_p rata-rata per nukleon sebagai fungsi A untuk semua nuklida stabil dan beberapa nuklida berat dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2.: Energi pengikat rata-rata per nukleon sebagai fungsi A nuklida stabil.

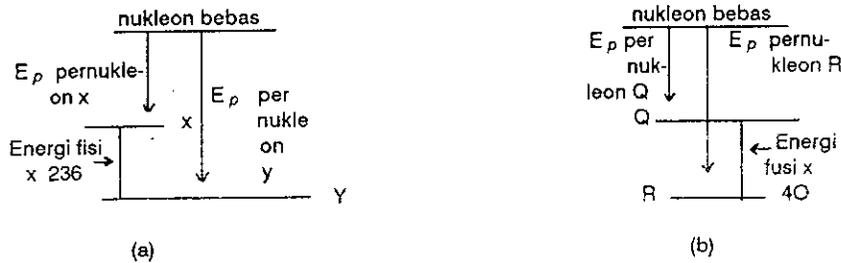
Dari Gambar 2 nampak bahwa E_p rata-rata pernukleon berharga maksimum pada $A = 60$, yaitu besi dan nikel. Hara E_p rata-rata pernukleon hampir tetap dalam semua inti, kecuali untuk beberapa inti ringan. Nuklida-nuklida di alam cenderung ingin berada dalam keadaan lebih stabil atau cenderung mempunyai E_p rata-rata pernukleon lebih besar. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya reaksi fisi dan fusi. Pada Gambar 2 terlihat bahwa, nuklida berat, yang mempunyai E_p rata-rata pernukleon kecil, dapat melakukan reaksi pembelahan (reaksi fisi) sehingga E_p rata-rata pernukleon nuklida hasil mendekati harga maksimumnya. Demikian pula nuklida ringan akan melakukan reaksi penggabungan (reaksi fusi) agar E_p rata-rata pernukleon nuklida hasil mendekati maksimum. Reaksi fisi dan fusi ini akan menghasilkan energi yang sangat besar seperti energi matahari yang diperkirakan karena adanya reaksi fusi.

Reaksi fisi dan fusi, yang sangat eksoergik ini, dapat dijelaskan berlangsungnya dan dapat diperkirakan besarnya energi yang menyertainya. 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_p rata-rata pernukleon lebih besar (lihat Gambar 2) daripada inti semula. Misalnya ${}_{92}^{236}\text{X}$ melakukan fisi menjadi 2 bagian yang persis sama, yaitu ${}_{46}^{118}\text{Y}$. Energi yang terlibat dalam reaksi fisi tersebut dapat dihitung dengan konsep E_p maupun menggunakan massa, seperti perhitungan energi yang dibebaskan pada peluruhan.

$$\begin{aligned} E_p \frac{236}{92}\text{X} &= \{ 92 (7,289) + 144 (8,071) - (44,79) \} \text{ MeV} \\ &= 1788,022 \text{ MeV} \\ &= 7,5763644 \text{ MeV/nukleon.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_p \frac{118}{46}\text{Y} &= \{ 46 (7,289) + 72 (8,071) - (-76,21) \} \text{ MeV} \\ &= 992,616 \text{ MeV} \\ &= 8,412 \text{ MeV/nukleon.} \end{aligned}$$

Keadaan E_p X dan E_p Y dapat digambarkan dalam bentuk diagram, demikian pula keadaan E_p rata-rata pernukleon inti X dan Y (gambar 3a).



Gambar 3.: Diagram E_p rata-rata pernukleon reaksi fisi (a) dan reaksi fusi (b).

Berdasar konsep E_p , karena E_p 2Y lebih besar daripada E_p X pada E_p X (demikian pula E_p rata-rata pernukleonnya), maka bila X membelah menjadi 2Y, masih akan membebaskan energi sebesar:

$$\begin{aligned}
 & 2E_p Y - E_p X \text{ atau} \\
 & 236 (E_p \text{ rata-rata pernukleon Y} - E_p \text{ rata-rata pernukleon X}) \text{ atau} \\
 & = \Delta_X - 2 (\Delta_Y) \\
 & = 44,79 - 2 (-76,21) \\
 & = 197,21 \text{ MeV.}
 \end{aligned}$$

Reaksi fusi inti-inti ringan dapat terjadi karena inti, yang terjadi dari hasil fusi, mempunyai E_p rata-rata pernukleon lebih besar. Misalnya fusi 2 inti ${}^{20}_{10}\text{Q}$ membentuk inti ${}^{40}_{20}\text{R}$. Dapat dilihat dalam Gambar 3b bahwa inti hasil fusi tersebut mempunyai E_p rata-rata pernukleon lebih besar. Jadi dengan konsep E_p , dan dengan menggunakan massa, reaksi fusi 2Q menjadi R masih akan melepaskan energi sebesar:

$$\begin{aligned}
 & = E_p R - 2 (E_p Q) = \{ 342,047 - 2 (160,643) \} \text{ MeV} \\
 & = 40 (E_p \text{ rata-rata pernukleon R} - E_p \text{ rata-rata pernukleon Q}) \\
 & = 40 (8,551175 - 8,551175) - 8,03215 \\
 & = 2 (\Delta_Q) - \Delta_R \\
 & = \{ 2 (-7,043) - (-34,847) \} \text{ MeV} \\
 & = 20,761 \text{ MeV.}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan tersebut, jelaslah bahwa reaksi fisi dan reaksi fusi, merupakan reaksi yang eksoergik. Dengan cara yang sama dapat diperkirakan besarnya energi yang menyertai reaksi penembakan inti (transmutasi inti).

5. Penutup

Energi pengikat inti dapat menjelaskan kestabilan relatif inti dan memperkirakan energi reaksi spontan inti (peluruhan), reaksi fisi, fusi dan reaksi penembakan inti. Nuklida yang relatif lebih stabil mempunyai energi pengikat inti rata-rata per nukleon (E_p rata-rata per nukleon) lebih besar dibandingkan dengan nuklida kurang stabil. Reaksi inti spontan (peluruhan) terjadi bila terjadi pelepasan energi. Energi yang dilepas dalam peluruhan, reaksi fisi, fusi dan reaksi penembakan inti (transmutasi) dapat diperkirakan besarnya yaitu:

$$\begin{aligned} &= \sum E_p \text{ inti hasil} - \sum E_p \text{ inti semula, atau} \\ &= A (E_p \text{ rata-rata per nukleon inti hasil} - E_p \text{ rata-rata per nukleon inti} \\ &\quad \text{semula}), \text{ atau} \\ &= (\sum \text{ massa inti semula} - \sum \text{ massa inti hasil}) \times 931,5 \text{ MeV, atau} \\ &= \sum \Delta \text{ (MeV) inti semula} - \sum \Delta \text{ (MeV) inti hasil.} \end{aligned}$$

Daftar Pustaka

- Anonim. 1993. **Kamus Kimia Inti dan Radiokimia**, Jakarta: Depdikbud.
- 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.
- Sutrisno Puspodikoro. 1978. **Radionuklida, Pengantar Radiokimia**, Yogyakarta: Bagian Teknik Nuklir Fakultas Teknik UGM.