

# Bab 1

## Reaksi Nuklir

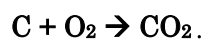
### 1.1 Pendahuluan

Formula  $E=mc^2$  yang diungkap oleh Albert Einstein merupakan formula ilmiah yang paling dikenal di era modern. Formula ini memaparkan hubungan antara energi, masa dan kecepatan cahaya. Pembangkit listrik tenaga nuklir atau secara singkat disebut reaktor nuklir merupakan salah satu konsep yang memanfaatkan formula ini. Reaktor nuklir bahkan dapat dikatakan sebagai pemanfaatan atau buah ekonomi dari formula ilmiah Einstein diatas. Hal itu karena pasokan energi, yang bisa diberikan oleh reaktor nuklir dalam jumlah yang besar, merupakan salah satu penunjang penting ekonomi.

Reaksi fisi nuklir merupakan proses fisika mendasar yang digunakan untuk membangun reaktor nuklir, baik yang ditujukan untuk menghasilkan listrik atau sebagai mesin pendorong kapal selam, atau bentuk energi lainnya. Secara sederhana yang terjadi dalam reaksi fisi nuklir adalah perubahan massa menjadi energi. Oleh karena itu langkah pertama yang tepat untuk mempelajari aspek fisika dari reaktor nuklir adalah dengan mempelajari reaksi nuklir itu sendiri.

Untuk dapat memahami seberapa besar energi yang bisa dihasilkan dari reaksi fisi nuklir, atau secara praktis mengenai seberapa banyak bahan bakar yang perlu kita siapkan untuk menghasilkan sejumlah energi tertentu, kita akan melihat perbandingannya dengan sumber energi lain. Khususnya sumber energi yang umum digunakan yaitu energi dari bahan fosil seperti minyak, batubara, dan gas alam. Kedua sumber energi diatas dihasilkan dari proses mendasar yang sangat berbeda. Energi nuklir berasal dari proses reaksi fisi nuklir sedangkan energi fosil berasal dari proses reaksi kimia. Dengan itu kita bisa memahami bahwa keduanya memiliki rasio energi keluaran terhadap konsumsi bahan bakar yang sangat berbeda. Begitu pula kuantitas produk sampingan keduanya yang sangat berbeda.

Batubara adalah bahan bakar fosil yang sangat umum digunakan sebagai sumber energi. Energi dari batubara dihasilkan melalui pembakaran dengan reaksi kimia :



Sedangkan energi yang dihasilkan dari reaktor nuklir berasal dari reaksi nuklir



Satuan energi yang dihasilkan dalam kedua reaksi diatas biasanya menggunakan  $eV^1$  . Dari setiap atom karbon (C) yang dibakar dengan reaksi kimia diatas maka akan

---

<sup>1</sup>  $1 eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule} = 3.8 \times 10^{-20} \text{ kalori}$

dihasilkan energi 4.0 eV, sedangkan untuk setiap atom uranium yang mengalami reaksi nuklir fisi diperoleh energi 200 juta eV, atau 200 MeV. Sehingga energi yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir sekitar 50 juta kali lebih besar dibandingkan energi yang dihasilkan dari reaksi kimia.

Untuk melihat konsumsi bahan bakar yang diperlukan mari kita bandingkan kasus untuk menghasilkan energi sebesar 1000 megawatts listrik (1000 MW(e)). Satu pembangkit menggunakan bahan bakar batubara melalui reaksi kimia dan lainnya dengan bahan bakar uranium melalui reaksi fisi nuklir. Dengan memperhitungkan efisiensi termal dan faktor lain, pembangkit listrik batubara akan memerlukan sekitar **10.000 ton batubara per hari**. Sedangkan uranium yang diperlukan oleh reaktor nuklir untuk menghasilkan daya yang sama sekitar **20 ton per tahun**.

Perbedaan yang sangat besar dalam kebutuhan asupan bahan bakar ini akan menghasilkan pola penyediaan bahan bakar yang berbeda. Pembangkit listrik batubara memerlukan kereta dengan **100 atau lebih gerbong batubara tiap hari** untuk menjaganya tetap beroperasi. Sedangkan pembangkit listrik tenaga nuklir tidak memerlukan penyediaan bahan bakar secara terus menerus. Setelah asupan bahan bakar nuklir pertama, reaktor nuklir baru akan dimatikan dan **diganti bahan bakar setiap 12 hingga 24 bulan sekali**. Dan dalam setiap proses penggantian bahan bakar tersebut hanya seperlima hingga seperempat dari bahan bakar semula yang diganti.

Perbandingan yang sama juga dapat dilakukan antara reaktor nuklir dan sumber energi fosil yang digunakan untuk menggerakkan kapal selam. Kapal yang menggunakan bahan bakar minyak harus secara hati-hati merencanakan perjalanan antar pelabuhan dimana kapal tersebut dapat kembali diisi ulang, atau dibantu oleh kapal tanker. Sedangkan kapal yang menggunakan bahan bakar nuklir dapat didesain sehingga asupan bahan bakar pertama akan bertahan dalam jangka waktu yang sangat lama.

Perbedaan dalam hal produk sampingan atau sampah dari reaksi nuklir dan reaksi kimia juga cukup dramatis. Sampah yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga nuklir memang memiliki radiotoksistas yang lebih besar dari sebagian besar produk sampingan pembangkit listrik tenaga batubara. Namun level radiotoksistas tersebut perlu juga memperhatikan kuantitas yang dihasilkan dimana reaktor nuklir menghasilkan kuantitas yang jauh lebih sedikit. Pada reaktor nuklir, dengan mengaplikasikan teknologi proses-ulang dimana sebagian bahan bakar bisa kembali diolah menjadi bahan bakar, maka jumlah sampah dengan radioaktivitas tinggi dari pembangkit daya 1000 MW(e) akan sekitar 10 ton pertahun. Sedangkan pada kasus batubara, 5% atau lebih dari batubara yang dibakar akan menjadi debu yang harus

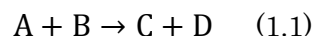
dipindahkan dan ditampung pada lahan tertentu. Jumlah debu yang dihasilkan sekitar lima gerbong kereta berkapasitas 100 ton per hari. Ditambah lagi adanya sekitar 100 ton sulfur dioksida, merkuri, dan timbal serta lainnya yang perlu penanganan khusus agar tidak terbuang ke lingkungan. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah pengaruh lingkungan terbesar dari pembakaran batubara. Yaitu efek pemanasan global yang disebabkan oleh ribuan ton CO<sub>2</sub> yang dilepaskan ke atmosfer setiap hari oleh pembangkit listrik tenaga batu bara. Sedangkan reaktor nuklir tidak menghasilkan CO<sub>2</sub> dalam proses pembangkitan energinya.

## 1.2 Dasar reaksi nuklir

Selanjutnya kita akan pelajari model inti atom dan beberapa hal mendasar terkait reaksi nuklir. Pemahaman ini cukup untuk menjadi bekal awal memahami aspek fisika reaktor nuklir, dan saat kita tidak perlu membahas konsep fisika inti secara mendalam. Model standar dari atom digambarkan dengan adanya inti atom dengan kerapatan massa yang tinggi dan bermuatan positif, dikelilingi oleh elektron bermuatan negatif yang bergerak pada orbitnya. Dibandingkan dengan ukuran atom dengan diameter 10<sup>-8</sup> cm, inti atom memiliki ukuran yang sangat kecil yaitu pada orde 10<sup>-12</sup> cm. Kita dapat modelkan inti atom terdiri dari sejumlah N neutron dan Z proton. Neutron dan proton keduanya disebut nukleon yaitu partikel penyusun inti atom. Sehingga inti atom memiliki N+Z nukleon. Jumlah proton, Z, disebut nomor atom dan menentukan sifat kimia atom tersebut, sedangkan N+Z disebut berat atom atau nomor massa. Inti atom dengan nomor atom yang sama namun berbeda nomor massa karena perbedaan jumlah neutron disebut sebagai isotop dari satu elemen kimia atau atom yang sama. Kita akan menggunakan notasi inti atom dengan  ${}^{N+Z}_Z X$  dimana X adalah symbol yang digunakan pada tabel periodik untuk menunjukkan elemen kimia atau atom tertentu.

### Persamaan reaksi

Reaksi nuklir dituliskan sebagai berikut



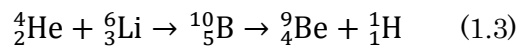
Misalnya reaksi nuklir berikut



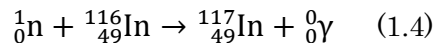
Persamaan reaksi diatas belum dapat menginformasikan kepada kita berapa probabilitas terjadinya reaksi tersebut ataupun apakah reaksi tersebut bersifat eksotermik atau endotermik. Namun persamaan reaksi nuklir diatas mengilustrasikan dua kekekalan yang harus dipenuhi yaitu kekekalan muatan (Z) dan kekekalan jumlah nukleon (N+Z). Kekekalan muatan dipenuhi dengan jumlah Z (jumlah proton) antara

kedua sisi persamaan harus sama, pada kasus diatas  $2+3 = 4+1$ . Kekekalan jumlah nukleon dipenuhi dengan jumlah indeks atas (N+Z) yang sama, pada kasus diatas  $4+6 = 9+1$ .

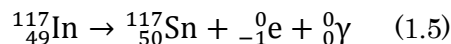
Reaksi nuklir pada umumnya terjadi dalam dua tahap. Pertama terbentuk inti gabungan dari kedua partikel yang bereaksi, namun inti gabungan ini tidak stabil karena memiliki energi berlebih, sehingga akan mengeluarkan energi berlebihnya. Energi berlebih tersebut dikeluarkan dengan cara meluruh kembali menjadi dua atau beberapa partikel. Misalnya untuk kasus reaksi Helium dan Lithium diatas, reaksi lebih detail adalah sebagai berikut



Dimana inti gabungan pada reaksi diatas adalah inti Boron. Waktu yang diperlukan inti gabungan untuk meluruh kembali umumnya sangat cepat, khususnya pada reaksi-reaksi nuklir yang akan kita pelajari dapat diasumsikan bahwa inti gabungan meluruh secara seketika sehingga tidak bermasalah untuk menuliskan persamaan reaksi tanpa tahap pembentukan inti gabungan sebagaimana pada persamaan 1.2. Kasus lain, misalnya bila inti nuklida yang terbentuk tidak stabil namun meluruh dalam waktu yang lama, maka persamaan reaksi perlu ditulis dalam dua persamaan reaksi berbeda tidak digabungkan sebagaimana persamaan 1.3 juga tidak diabaikan sebagaimana persamaan 1.2. Misalnya, ketika neutron ditangkap oleh Indium yang kemudian memancarkan sinar gamma sebagai berikut



Sinar gamma tidak memiliki massa maupun muatan, sehingga memiliki nilai Z dan N+Z nol. Indium-117 bukanlah inti yang stabil namun mengalami peluruhan radioaktif menjadi timah (Sn) dan memancarkan elektron serta sinar gamma sebagai berikut

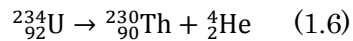


Reaksi 1.5 tidak terjadi secara seketika tapi setelah rentang waktu tertentu. Elektron memiliki notasi  ${}^0_{-1}\text{e}$  dengan muatan -1 karena memiliki muatan yang berlawanan dengan proton dan massa elektron nol karena massanya sekitar dua ribu kali lebih kecil dari massa proton atau neutron. Munculnya elektron yang terpancar dari inti atom dapat dipandang sebagai hasil dari perubahan neutron pada inti atom menjadi proton dan sebuah elektron.

Waktu yang diperlukan untuk terjadinya reaksi peluruhan seperti persamaan 1.5 ditunjukkan oleh parameter yang disebut waktu paruh, dengan notasi  $t_{1/2}$ . Waktu paruh,  $t_{1/2}$ , adalah waktu yang diperlukan sehingga populasi inti menjadi setengah dari populasi awal karena setengahnya meluruh. Dalam waktu  $t_{1/2}$  populasi inti akan 1/2 populasi awal karena 1/2 nya telah meluruh Dalam waktu  $2 t_{1/2}$  populasi inti akan 1/4

populasi awal karena  $3/4$  nya telah meluruh, dalam waktu  $3 t_{1/2}$  populasi inti akan menjadi  $1/8$  populasi awal karena  $7/8$  nya telah meluruh, dan seterusnya. Pada kasus diatas waktu paruh dari Indium-117 adalah 54 menit.

Waktu paruh tiap nuklida berbeda-beda mulai dari orde dibawah satu detik, hingga menit, jam, hari dan ratusan tahun. Misalnya reaksi berikut



Dengan waktu paruh  $t_{1/2} = 2.45 \times 10^5$  tahun. Kita akan kembali mempelajari konsep waktu paruh dan peluruhan radioaktif secara kuantitatif di bagian selanjutnya bab ini. Sinar gamma seringkali tidak disertakan dalam persamaan reaksi karena tidak memiliki massa maupun muatan sehingga tidak berpengaruh terhadap kesetimbangan massa dan muatan. Namun, sinar gamma menjadi penting terkait dengan hukum kekekalan energi yang akan kita pelajari selanjutnya. Peran dari sinar gamma dapat digambarkan dalam fenomena berikut. Setelah mengalami reaksi tumbukan, peluruhan, atau reaksi lainnya, inti atom umumnya berada dalam keadaan tereksitasi. Kemudian inti atom ini kembali ke keadaan non-eksitasi dengan melepaskan energi dalam bentuk satu atau beberapa sinar gamma atau foton. Sinar gamma yang dipancarkan inti atom tereksitasi ini memiliki energi beragam bergantung kepada keadaan energi kuantum dari inti atom tersebut. Fenomena yang terjadi pada inti atom ini dapat dianalogikan dengan apa yang terjadi pada level atom ketika elektron orbital yang berada dalam kondisi tereksitasi turun ke keadaan dasar (non eksitasi) dengan memancarkan sinar gamma atau foton. Dalam pembicaraan inti atom biasa digunakan istilah sinar gamma, sedangkan foton lebih sering digunakan dalam level atom meskipun keduanya adalah sama. Hanya saja orde energi dari sinar gamma atau foton yang dipancarkan dari inti atom sekitar satu juta kali lebih besar (orde MeV) dibandingkan energi dari sinar gamma yang dipancarkan oleh elektron orbital (orde eV).

Satu lagi radiasi nuklir yang belum kita bicarakan adalah neutrino. Neutrino muncul bersamaan dengan dipancarkannya elektron dari inti atom dan membawa sebagian dari energi reaksi. Karena neutrino, sejauh yang bisa kita amati, tidak berinteraksi dengan bahan maka energi reaksi yang dibawa oleh neutrino secara praktis dianggap hilang. Namun tetap neutrino perlu dimasukkan ketika kita membahas kekekalan energi pada bagian selanjutnya.

### Notasi

Sebelum berlanjut akan kita perkenalkan beberapa notasi bermanfaat berikut. Dari persamaan (1.5) dan (1.6) inti helium dan elektron dipancarkan dari peluruhana

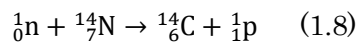
radionuklida. Ketika dipancarkan dari inti atom kedua partikel tersebut biasa diistilahkan partikel alpha dan beta, secara berturutan. Konvensi yang secara universal digunakan sebagai notasi dari kedua partikel tersebut adalah partikel  $\alpha$  dan  $\beta$ . Begitu pula, karena sinar gamma tidak memiliki massa ataupun muatan, serta massa dan muatan dari neutron dan proton mudah untuk diingat, secara sederhana kita gunakan notasi  $\gamma$ , n, dan p, secara berturutan. Secara ringkas kita akan menggunakan penyederhanaan notasi berikut



Begitupun untuk dua isotop penting dari hidrogen yaitu hydrogen dan deuterium diberikan notasi  ${}^2_1\text{H} \Rightarrow \text{D}$  dan  ${}^3_1\text{H} \Rightarrow \text{T}$ .

Persamaan reaksi nuklir sebagaimana dituliskan dalam bentuk (1.1) dapat pula dituliskan secara lebih sederhana dalam bentuk A(B,C)D, dimana partikel dengan nomor atom yang lebih kecil biasanya ditempatkan di dalam kurung.

Misalnya reaksi antara nitrogen dan neutron berikut



Dapat dituliskan secara seingkat menjadi  ${}^{14}_7\text{N}(\text{n,p}){}^{14}_6\text{C}$ , ataupun  ${}^{14}_7\text{N} \xrightarrow{(\text{n,p})} {}^{14}_6\text{C}$ . Penulisan lain terkadang menuliskan reaksi seperti pada persamaan (1.5) menjadi  ${}^{117}_{49}\text{In} \xrightarrow{\beta} {}^{117}_{50}\text{Sn}$ , dimana umumnya difahami bahwa sebagian energi reaksi hilang dalam bentuk sinar gamma dan neutrino.

### Aspek Energi

Persamaan Einstein yang menyatakan kesamaan antara massa dan energi menentukan aspek energi dari reaksi nuklir :

$$E_{\text{total}} = mc^2 \quad (1.9)$$

Dimana  $E_{\text{total}}$ , m, dan c adalah energi total inti atom, massa inti atom dan kecepatan cahaya, secara berturutan. Massa pada persamaan diatas bergantung pada kecepatan relative inti atom tersebut terhadap kecepatan cahaya sebagai berikut

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1.10)$$

dimana  $m_0$  adalah massa diam inti atom yaitu massa inti atom ketikakecepatannya  $v=0$ . Untuk keadaan dimana kecepatan inti atom jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya,  $v \ll c$ , kita dapat melakukan ekspansi sebagai berikut

$$m = m_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 + O\left(\frac{v}{c}\right)^4 \right] \quad (1.11)$$

dan hanya mengambil dua suku pertama. Dengan memasukkan hasil kepada persamaan (1.9) maka

$$E_{\text{total}} = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2 \quad (1.12)$$

Suku pertama di kanan adalah energi diam partikel (misalnya inti atom) dan suku kedua adalah energi kinetik. Neutron yang terdapat pada reaktor nuklir, begitupun inti atom penyusun reaktor nuklir, akan selalu dalam keadaan non relativistic dengan  $v \ll c$  sehingga kita bisa menggunakan persamaan (1.12). Selanjutnya kita gunakan E untuk menunjukkan energi kinetik. Sehingga untuk partikel non relativistic dengan massa diam  $M_X$  energi kinetiknya adalah

$$E = \frac{1}{2}M_Xv^2 \quad (1.13)$$

Sebagian elektron berenergi tinggi dapat melaju dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya, sehingga pada kasus ini kita harus menggunakan persamaan relativistic.  $E_{\text{total}}$  ditentukan dari persamaan (1.9) dan (1.10) lalu energi kinetik didapat dengan hubungan  $E = E_{\text{total}} - m_0c^2$ .

Sinar gamma tidak memiliki massa dan melaju dengan kecepatan cahaya. Energinya sebagai berikut

$$E = hv \quad (1.14)$$

Dimana  $h$  adalah konstanta Planck dan  $\nu$  adalah frekuensi dari sinar gamma tersebut. Kita sekarang akan menerapkan hukum kekekalan energi. Untuk persamaan reaksi (1.1) kekekalan energi dinyatakan sebagai berikut

$$E_A + M_Ac^2 + E_B + M_Bc^2 = E_C + M_Cc^2 + E_D + M_Dc^2 \quad (1.15)$$

Dimana  $E_A$  dan  $M_A$  adalah energi kinetik dan massa diam dari A, begitupun untuk B, C, dan D. Bila salah satu partikel yang bereaksi adalah sinar gamma maka energi totalnya digantikan oleh  $h\nu$ .

Nilai  $Q$  dari reaksi nuklir didefinisikan sebagai berikut

$$Q = E_C + E_D - E_A - E_B \quad (1.16)$$

Yang menentukan apakah reaksi nuklir bersifat eksotermik atau endotermik. Dari persamaan (1.16) dapat difahami bahwa nilai  $Q$  adalah perbandingan antara energi kinetik total setelah dan sebelum reaksi. Nilai  $Q$  positif menunjukkan penambahan energi kinetik, sedangkan nilai  $Q$  negatif menunjukkan adanya energi kinetik yang hilang. Dengan persamaan (1.15) maka definisi nilai  $Q$  yang sebelumnya merupakan perbandingan energi kinetik dapat kita rubah menjadi perbandingan massa sebelum dan setelah reaksi sebagai berikut

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D)c^2 \quad (1.17)$$

Nilai  $Q$  yang positif menunjukkan terjadinya reaksi eksotermik dimana terjadi penambahan energi kinetik dengan pengurangan total massa diam. Sebaliknya, nilai  $Q$  negatif menunjukkan terjadinya reaksi endotermik dimana energi kinetik total setelah reaksi berkurang namun total massa diam setelah reaksi meningkat. Secara umum hal

yang berlaku pada reaksi kimia berlaku pula pada reaksi nuklir. Namun pada reaksi kimia perubahan energi terjadi pada orde beberapa eV, sedangkan pada reaksi nuklir perubahan energi terjadi pada orde MeV, dengan perubahan massa yang terlalu kecil untuk diukur.

### 1.3 Kurva energi ikat

Argumentasi kekekalan energi sebelumnya tidak menunjukkan reaksi nuklir mana yang akan menjadi reaksi eksotermik atau endotermik. Kita perlu memeriksa defek masa dan energi ikat untuk dapat memahami reaksi nuklir mana yang akan menghasilkan energi atau menyerap energi. Bila kita menjumlahkan massa sejumlah  $Z$  proton dan  $N$  neutron yang menyusun inti atom, misalnya dari elemen  $X$ , maka kita akan mendapati bahwa berat dari total massa penyusun inti atom ini lebih besar dari berat inti nuklir  $M_X$  itu sendiri. Selisih inilah yang didefinisikan sebagai defek masa berikut

$$\Delta = ZM_P + NM_N - M_X \quad (1.18)$$

yang bernilai positif untuk semua inti atom. Sehingga berat inti atom lebih kecil daripada total massa neutron dan proton yang menyusunnya. Bila kita mengalikan  $\Delta$  dengan kuadrat kecepatan cahaya maka kita akan mendapatkan energi :  $\Delta c^2$ . Energi ini adalah energi ikat inti atom. Kita dapat memahami energi ikat atom ini sebagai berikut. Apabila inti atom dapat dipisahkan kedalam penyusunnya neutron dan proton, maka kita akan memperoleh penambahan massa sebesar  $\Delta$ . Maka sejumlah energi yang sama dengan massa ini, sebagaimana diberikan oleh persamaan Einstein, dibutuhkan untuk dapat melakukan pemisahan tersebut. Energi tersebut adalah energi ikat. Semua inti atom stabil memiliki energi ikat bernilai positif yang mengikat proton dan neutron penyusunnya menjadi sebuah inti atom. Bila kita normalisasi energi ikat terhadap jumlah nukleon (partikel inti) sebagai berikut

$$\frac{\Delta c^2}{(N+Z)} \quad (1.19)$$

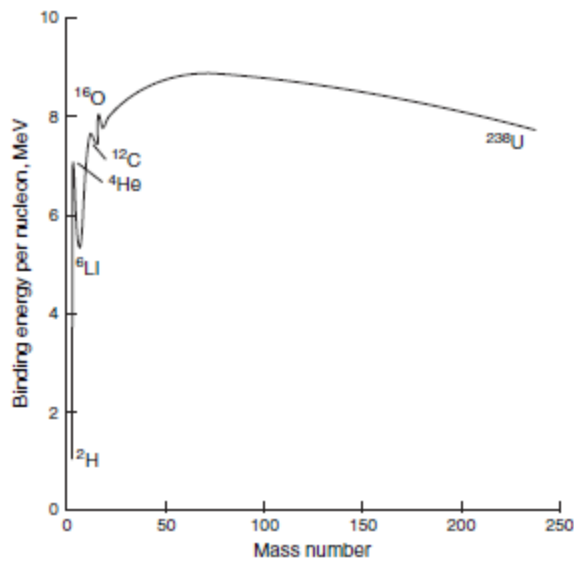
yaitu energi ikat per nukleon. Kuantitas ini menjadi ukuran kestabilan inti atom.

Semakin besar energi ikat per nukleon maka inti atom tersebut semakin stabil.

Gambar 1.1 adalah kurva energi ikat per nukleon. Pada inti atom dengan nomor massa kecil kurva meningkat secara cepat. Untuk nomor mass yang semakin besar, sekitar 40, kurva semakin mendatar dan mencapai nilai maksimum sedikit dibawah 9MeV dan secara bertahap menurun. Reaksi eksotermik adalah reaksi nuklir dimana produk dari reaksi nuklir tersebut memiliki energi ikat yang lebih besar, dengan kata lain reaksi



nuklir merubah inti atom menjadi inti atom lain yang lebih stabil.

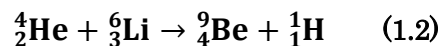


**Gambar 1.1** Kurva energi ikat rerata per nukleon.

Reaksi nuklir eksotermik merupakan kandidat untuk dapat digunakan untuk menghasilkan energi. Terdapat dua jenis reaksi nuklir yang merupakan reaksi eksotermik yaitu reaksi fusi dimana dua inti atom ringan bergabung membentuk inti atom yang lebih besar, lebih tinggi pada kurva energi ikat. Reaksi lainnya adalah reaksi fisi dimana inti atom berat terpisah menjadi dua (atau beberapa) inti atom yang lebih ringan, yang masing-masing inti atom yang lebih ringan tersebut memiliki energi ikat per nukleon yang lebih besar.

#### 1.4 Reaksi Fusi

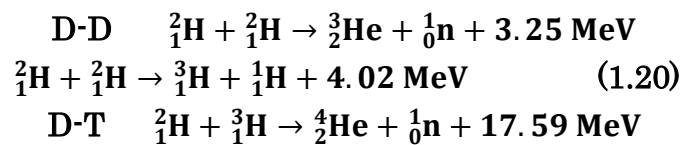
Reaksi nuklir sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan (1.2)



Merupakan reaksi antara inti atom bermuatan, karena kedua inti atom pada sisi kiri persamaan reaksi memiliki nomor atom yang lebih besar dari nol. Reaksi jenis ini sulit untuk direalisasikan karena muatan positif dari masing-masing inti atom akan menyebabkan gaya tolak antar kedua inti, yang disebut gaya coulomb. Oleh karena itu untuk bisa merealisasikan reaksi nuklir seperti (1.2) inti atom harus bertumbukan dengan energi yang sangat tinggi untuk mengatasi gaya Coulomb sehingga kedua inti bisa berinteraksi. Metoda yang umum digunakan untuk bisa merealisasikan terjadinya reaksi itu di bumi (bukan di matahari atau bintang lainnya) adalah dengan menggunakan pemercepat partikel (*particle accelerator*) yang memberikan energi

kinetic sangat tinggi kepada salah satu inti atom lalu menabrakan inti tersebut kepada target yang terbuat dari bahan inti atom kedua. Cara lain adalah dengan menggabungkan kedua nuklida dan menaikkan temperature bahan gabungan sehingga menjadi plasma. Karena energi kinetic rerata dari nuklida sebanding dengan temperature absolutnya, maka pada temperature yang cukup tinggi energi kinetic nuklida mampu mengatasi gaya tolakan coulomb dan terjadilah reaksi seperti reaksi (1.2). Reaksi seperti ini sering diistilahkan reaksi termonuklir.

Dua reaksi berbasis pada penggabungan isotop-isotop hydrogen telah umum dikenal sebagai pondasi untuk menghasilkan energi yaitu reaksi deuterium-deuterium dan deuterium-tritium, sebagai berikut



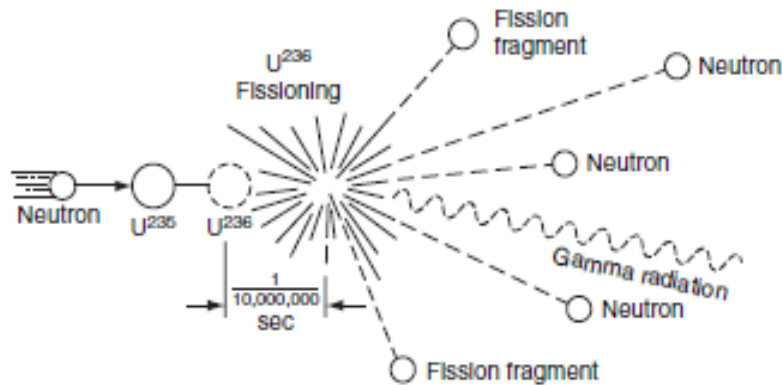
Kembali, kesulitan untuk merealisasikan reaksi diatas adalah karena reaksi diatas merupakan reaksi nuklida bermuatan. Sehingga agar kedua nuklida dapat berinteraksi, kedua nuklida harus memiliki energi kinetic yang sangat tinggi untuk dapat mengatasi gaya tolakan karena memiliki sama-sama muatan positif. Secara praktis, hal ini tidak dapat dilakukan menggunakan pemercepat partikel karena energi yang dibutuhkan lebih banyak daripada energi yang akan dihasilkan. Maka perlu dicari cara untuk bisa mencapai temperature yang sebanding dengan temperature bagian dalam matahari. Sehingga energi kinetic nuklida mampu mengatasi rintangan gaya coulomb dan terjadi reaksi termonuklir. Reaksi termonuklir biasa terjadi di bagian dalam matahari, namun di bumi temperature yang diperlukan baru bisa tercapai pada ledakan termonuklir yang tidak terkontrol, padahal untuk menghasilkan energi yang stabil, berkelanjutan dan aman diperlukan system yang dapat dikontrol.

Kita tidak akan mempelajari energi fusi lebih lanjut pada buku ini. Namun kita akan berlanjut dengan reaksi fisi, dimana energi dihasilkan dengan memecah nuklida berat menjadi dua nuklida yang lebih ringan yang memiliki energi ikat per nukleon yang lebih besar. Neutron dapat digunakan untuk memicu reaksi fisi. Sehingga tidak memerlukan energi kinetic yang tinggi ataupun temperatur tinggi karena tidak ada gaya tolak antar neutron dan nuklida. Neutron dapat langsung berinteraksi dengan inti atom tanpa mengalami hambatan coulomb.

## 1.5 Reaksi fisi

Sekarang kita pelajari reaksi fisi, misalnya reaksi fisi uranium-235 sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.2. Dari reaksi fisi dihasilkan sekitar energi

200 MeV, dua atau tiga neutron, dua nuklir lebih ringan (disebut fragmen fisi), dan beberapa sinar gamma dan neutrino. Fragmen fisi akan mengalami peluruhan radioaktif yang menghasilkan produk fisi lainnya. Energi dari fisi, neutron, dan produk fisi memegang peranan penting terkait dengan aspek fisika reaktor nuklir. Selanjutnya kita akan mempelajari masing-masing bagian tersebut.



**Gambar 1.2** Reaksi fisi

### Lepasan Energi dan Disipasi

Sekitar 200 MeV energi dihasilkan dari reaksi fisi. Energi ini berupa energi kinetik dari partikel-partikel yang dihasilkan dalam reaksi fisi yaitu fragmen fisi (*fission fragments*), neutron, juga sinar gamma. Termasuk pula energi kinetik dari partikel yang dihasilkan dari peluruhan fragmen fisi yaitu partikel beta, sinar gamma, dan neutrino. Energi kinetik partikel-partikel hasil reaksi fisi akan terserap sebagai panas ketika partikel-partikel itu berinteraksi dengan bahan sekitar. Interaksi antara tiap partikel dengan atom bahan sekitar berbeda-beda, diantaranya ditentukan oleh muatan dari partikel tersebut. Partikel bermuatan akan memiliki interaksi yang berbeda dengan partikel yang netral. Interaksi ini akan menentukan seberapa besar partikel tersebut memberikan energi kinetiknya kepada atom bahan sebagai panas.

Fragmen fisi merupakan partikel yang memiliki muatan, juga melaju dengan kecepatan yang tinggi (mayoritas energi reaksi fisi adalah energi kinetik dari fragmen fisi). Ketika berinteraksi dengan bahan fragmen fisi akan menyebabkan elektron-elektron dari atom bahan akan tereksitasi keluar dari orbitnya. Hal ini membuat atom-atom bahan terionisasi yaitu terbentuknya ion atom positif dan pasangannya elektron bebas yang bermuatan negatif. Proses ionisasi ini memerlukan energi, yaitu energi yang diperlukan oleh elektron untuk bisa keluar dari ikatan atom (terekstisasi). Energi ini berasal dari energi kinetik fragmen fisi. Sehingga ketika

berinteraksi dengan bahan dan menyebabkan atom bahan terionisasi, fragmen fisi akan kehilangan energi kinetiknya, semakin melambat dan pada akhirnya akan berhenti. Sedangkan pasangan ion atom positif dan elektron bebas yang terbentuk ketika dilewati oleh fragmen fisi, akan segera kembali bergabung. Proses penggabungan ini melepaskan energi berupa panas. Jarak yang dibutuhkan oleh fragmen fisi semenjak lahir dari proses fisi hingga akhirnya kehilangan semua energi kinetiknya dan diam merupakan salah satu parameter penting. Jarak ini menentukan rentang tersebarnya energi dari reaksi fisi. Untuk bahan padatan jarak ini hanya berkisar beberapa micrometer, sehingga energi dari reaksi fisi akan berubah menjadi panas hanya pada daerah yang dekat dengan titik terjadinya reaksi fisi. Partikel hasil fisi lainnya yang memiliki muatan adalah partikel alfa dan partikel beta yang dihasilkan dari peluruhan fragmen fisi. Partikel-partikel inipun akan mengalami hal yang sama yaitu memberikan energi kinetiknya kepada atom bahan sehingga mengalami perlambatan dan akhirnya terhenti. Untuk partikel bermuatan yang lebih ringan jarak yang ditempuh akan lebih besar. Namun energi dari partikel-partikel ini jauh lebih kecil dari energi kinetik fragmen fisi.

Neutron, sinar gamma, dan neutrino adalah partikel-partikel hasil fisi yang tidak memiliki muatan. Partikel netral ini tidak terpengaruh oleh muatan negatif elektron disekeliling inti atom ataupun oleh muatan listrik dari inti yang bermuatan positif. Karena itu, partikel-partikel netral ini melaju lurus hingga terjadi tumbukan dimana partikel tersebut terhambur atau mengalami reaksi absorpsi. Bila mengalami reaksi absorpsi maka partikel tersebut akan hilang dan energinya diserap dalam proses tumbukan tersebut. Bila partikel tersebut terhambur, maka akan mengalami perubahan arah dan energi kemudian kembali melaju lurus dengan arah dan energi baru tersebut. Lintasan yang ditempuh antara satu tumbukan dengan tumbukan selanjutnya sangat besar bila dibandingkan dengan jarak antar atom dari bahan sekitar. Untuk neutrino jarak tempuhnya tak hingga karena neutrino tidak berinteraksi dengan bahan. Neutron dan sinar gamma yang bergerak pada bahan padatan jarak tempuhnya pada orde centimeter. Neutron akan hanya terhambur oleh inti, sedangkan sinar gamma selain oleh inti juga akan terhambur oleh elektron. Dalam interaksinya dengan inti, neutron akan memberikan energi kinetiknya sehingga inti akan kehilangan elektron-elektron orbitalnya dan memiliki muatan. Begitupun dengan sinar gamma yang memberikan energi kinetiknya ketika berinteraksi dengan elektron. Inti dan elektron yang mendapatkan energi kinetik akan bergerak dengan kecepatan tertentu (sesuai dengan energi kinetiknya), lalu akan melambat dan berhenti. Jarak yang ditempuh hanya dalam order micrometer sehingga energi berupa

panas terserap tidak jauh dari lokasi tumbukan.

Sekitar 80% energy yang dihasilkan dalam reaksi fisi merupakan energy kinetic fragmen fisi. Sisanya dibawa oleh neutron, partikel beta, sinar gamma, dan neutrino. Energi yang dibawa oleh neutrino hilang, atau tidak dapat diserap oleh bahan, karena neutrino tidak berinteraksi dengan bahan. Energi lainnya dapat diambil menjadi panas pada reaktor nuklir. Jumlah energy fisi yang dihasilkan berbeda-beda untuk tiap isotop. Untuk uranium-235 sekitar 193 MeV atau  $3.1 \times 10^{-11}$  J dari setiap reaksi fisi.

Perbedaan mekanisme penyerapan energi oleh partikel bermuatan dan tidak bermuatan juga menyebabkan dampak biologis yang berbeda. Partikel alpha dan beta merupakan partikel yang dipancarkan dalam peluruhan fragmen fisi. Partikel ini dikenal sebagai partikel yang memiliki daya tembus lemah, karena mereka memberikan energinya pada jarak yang sangat dekat. Partikel alpha dan beta tidak bisa menembus kulit sehingga tidak akan menimbulkan dampak berarti apabila sumber radiasi berada di luar tubuh. Partikel-partikel ini akan menyebabkan hal yang lebih serius bila radioisotop pemancarnya terhirup atau masuk ke dalam tubuh. Di dalam tubuh partikel alpha dan beta bisa menyerang paru-paru, saluran pencernaan, atau organ lainnya. Organ yang diserang bergantung kepada sifat biokimia dari radioisotope pemancarnya. Radiostrontium, misalnya, terkumpul di tulang dan menyebabkan kerusakan di bagian itu, sementara radioiodine terakumulasi di tiroid. Sementara itu, karena partikel netral seperti neutron dan sinar gamma dapat menempuh jarak antara satu tumbukan dengan tumbukan lainnya di dalam jaringan tubuh sekitar beberapa centimeter. Hal ini menyebabkan partikel netral dapat memberi dampak negative meskipun berasal dari sumber luar. Kerusakan yang disebabkan oleh partikel netral akan terdistribusi lebih merata. Kerusakan ini disebabkan oleh ionisasi air dan molekul jaringan tubuh lainnya pada posisi terjadinya tumbukan antara neutron dengan inti ataupun sinar gamma dengan elektron.

### **Multiplikasi Neutron**

Neutron yang terlahir dari tiap reaksi fisi akan mengalami beberapa kali reaksi hamburan dengan inti sebelum hilang karena reaksi absorpsi. Pada banyak kasus reaksi absorpsi neutron akan menyebabkan inti tersebut menjadi radioaktif. Bila neutron diabsorpsi oleh bahan fisil maka kemungkinan besar akan menyebabkan inti mengalami reaksi fisi dan melahirkan neutron untuk generasi selanjutnya. Proses ini akan terjadi berulang kali dan melahirkan banyak generasi neutron, hal ini disebut reaksi neutron berantai. Parameter yang digunakan untuk menunjukkan sifat dari reaksi fisi berantai yang terjadi adalah faktor multiplikasi, dengan notasi  $k$ . Faktor

multipikasi adalah rasio antara neutron yang lahir di suatu generasi dengan neutron yang lahir pada generasi selanjutnya. Untuk dapat melakukan analisis lain, kita juga mendefinisikan waktu hidup neutron (neutron lifetime) yaitu waktu semenjak neutron terlahir dari reaksi fisi, kemudian mengalami beberapa kali reaksi hamburan, dan akhirnya hilang terserap pada bahan pada reaksi absorpsi.

Misalnya pada waktu tertentu,  $t = 0$ , kita memiliki  $n_0$  neutron yang lahir dari reaksi fisi. Populasi neutron ini kita sebut sebagai generasi ke-0. Maka generasi selanjutnya, generasi ke-1, akan memiliki neutron dengan populasi neutron  $kn_0$ , generasi kedua sebanyak  $k^2n_0$ , dan seterusnya. Generasi ke- $i$  akan memiliki populasi neutron  $k^i n_0$ . Secara rerata, generasi ke- $i$  akan lahir pada waktu  $t = i \cdot l$ , dimana  $l$  adalah waktu hidup neutron. Jumlah populasi neutron pada waktu  $t$  dapat diperoleh sebagai berikut

$$n(t) = n_0 k^{t/l} \quad (1.21)$$

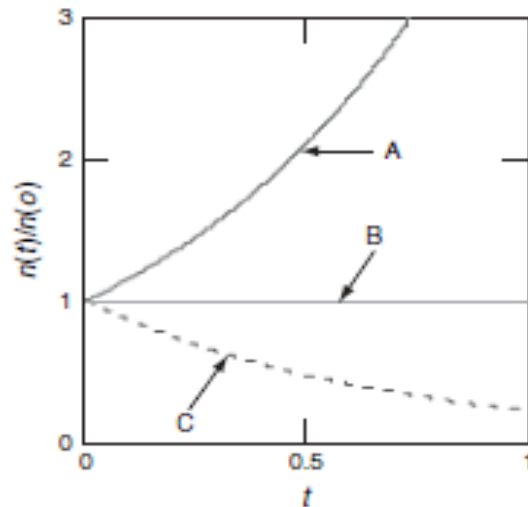
Dari persamaan 1.21 diatas kita ketahui bahwa populasi neutron akan meningkat, menurun, atau tak berubah bergantung apakah nilai  $k$  lebih besar, kurang, atau sama dengan satu. Apabila  $k = 1$ , maka populasi neutron tak akan berubah kondisi ini disebut kondisi kritis. Bila  $k > 1$ , maka populasi neutron akan meningkat, kondisi ini disebut kondisi superkritis. Bila  $k < 1$ , maka populasi neutron akan menurun, kondisi ini disebut kondisi subkritis.

Bentuk yang lebih umum digunakan dari hubungan yang diberikan pada persamaan 1.21, bila kita membatasi pada kondisi dimana nilai  $k$  dekat dengan satu. Untuk memperoleh hubungan ini, kita akan menggunakan hubungan antara eksponensial dengan logaritma, dimana keduanya merupakan fungsi *invers*. Maka untuk sebuah kuantitas, misalnya  $x$ , kita dapat menuliskan  $x = \exp[\ln(x)]$ . Sehingga eksponensial yang terdapat pada persamaan 1.21 dapat dirubah sebagai berikut

$$n(t) = n_0 \exp \left[ \left( \frac{t}{l} \right) \ln(k) \right] \quad (1.22)$$

Bila nilai  $k$  mendekati 1, yaitu  $|k - 1| \ll 1$ , maka kita dapat melakukan ekspansi terhadap  $\ln(k)$  menjadi  $\ln(k) \approx k - 1$ , sehingga kita peroleh

$$n(t) = n_0 \exp \left[ (k - 1) \frac{t}{l} \right] \quad (1.23)$$

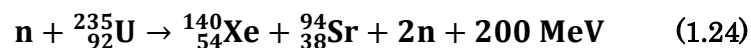


**Gambar 1.3** Populasi neutron terhadap waktu pada [A] Sistem superkritis, [B] Sistem Kritis, [C] Sistem Subkritis.

Maka jumlah populasi neutron generasi selanjutnya bersifat eksponensial sebagaimana terlihat pada gambar 1.3. Bagian selanjutnya dari buku ini akan banyak menjelaskan mengenai faktor multiplikasi. Termasuk bagaimana pengaruh komposisi bahan dan ukuran reaktor terhadap faktor multiplikasi, juga bagaimana reaksi berantai terpengaruh oleh kehadiran neutron kasif<sup>2</sup>. Kita juga akan mempelajari perubahan faktor multiplikasi yang disebabkan oleh perubahan temperature, depleksi bahan bakar, dan faktor lainnya yang penting bagi desain dan operasi reaktor nuklir.

### Produk Fisi

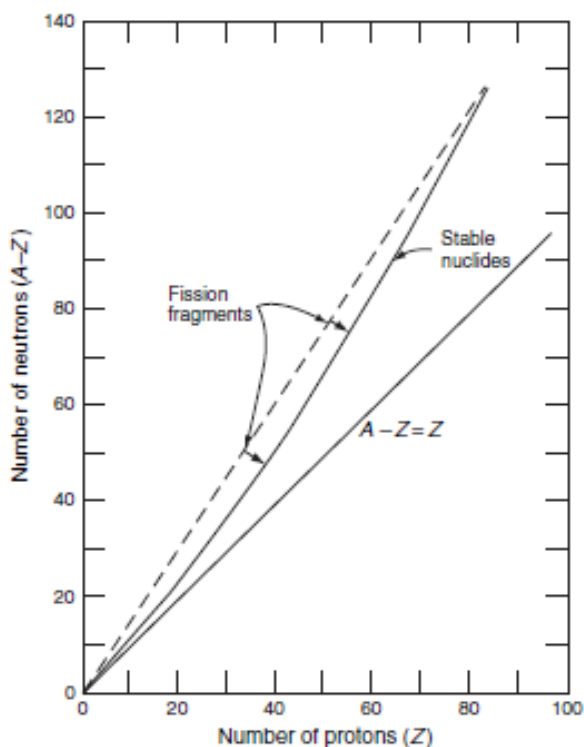
Reaksi fisi menghasilkan banyak pasangan fragmen fisi. Pada kebanyakan kasus, salah satu fragmen fisi memiliki massa yang lebih besar dibandingkan pasangannya. Misalnya reaksi fisi yang umumnya terjadi sebagai berikut



Fragmen fisi merupakan partikel yang tidak stabil karena memiliki rasio jumlah neutron terhadap proton yang terlalu besar. Grafik jumlah neutron terhadap proton, Gambar 1.4, menunjukkan garis inti stabil yang yang berarti perbandingan neutron terhadap proton akan lebih besar dari satu bila nomor atom semakin besar (Misalnya pada nomor atom kecil, atom karbon  ${}^{12}_6\text{C}$ , dan oksigen  ${}^{16}_8\text{O}$ , yang memiliki jumlah neutron dan proton masing-masing sama. Sedangkan pada nomor atom besar misalnya

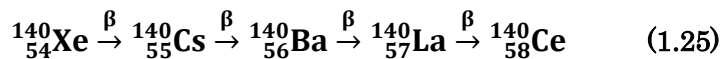
<sup>2</sup> Yaitu neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi, tidak terpancar seketika ketika reaksi fisi melainkan beberapa saat setelahnya.

Timbal  $^{207}_{82}\text{Pb}$ , dan Thorium  $^{232}_{90}\text{Th}$ , memiliki jumlah neutron lebih banyak dari proton). Ketika inti mengalami reaksi fisi rasio jumlah neutron terhadap proton akan sama pada fragmen fisi  $\beta$ . Inti fragmen fisi terletak diatas kurva inti stabil. Kurang dari 1% fragmen fisi meluruh dengan memancarkan neutron kasif. Modus peluruhan yang dominan adalah melalui pemancaran beta, berbarengan dengan satu atau beberapa sinar gamma. Peluruhan itu akan membuat fragmen fisi semakin stabil, dimana pada kurva ditunjukkan dengan semakin mendekati kurva inti setimbang sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.4.

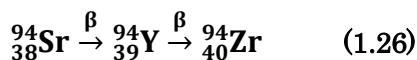


**Gambar 1.4** Ketidakstabilan Fragmen Fisi

Namun untuk menjadi inti setimbang seringkali diperlukan lebih dari satu kali peluruhan. Misalnya untuk fragmen fisi dari reaksi fisi pada persamaan 1.24 peluruhan fragmen fisinya adalah



dan



Tiap peluruhan ini memiliki paruh waktu karakteristik tersendiri. Kecuali beberapa



pengecualian, umumnya paruh waktu bagian awal rantai peluruhan lebih singkat daripada bagian akhir rantai peluruhan. Gabungan antara fragmen fisi dan semua produk peluruhannya merupakan kita klasifikasikan sebagai produk fisi.

Persamaan 1.24 hanya menunjukkan salah satu dari sekitar 40 pasangan fragmen fisi yang dapat dihasilkan dari reaksi fisi. Fragmen fisi memiliki massa atom antara 72 dan 160. Gambar 1.5 menunjukkan distribusi frekuensi massa untuk uranium-235, yang merupakan bentuk umum untuk bahan fisil dimana neutron yang menyebabkan reaksi fisi memiliki energy beberapa eV atau kurang. Hampir semua produk fisi masuk dalam dua kelompok besar, yaitu kelompok dengan nomor massa ringan dan berat. Kelompok ringan memiliki nomor massa 80 hingga 110, sedangkan kelompok berat memiliki nomor massa 125 hingga 155. Probabilitas reaksi fisi menghasilkan produk fisi dengan massa yang sama semakin meningkat apabila energy neutron awal semakin besar, dan lembah yang teramati pada bagian tengah kurva produk fisi (seperti pada gambar 1.5) hampir tak terlihat untuk reaksi fisi dengan energy neutron penyebab fisi pada orde 10 MeV. Semua 40 pasang produk fisi akan menghasilkan peluruhan radioaktif dengan rantai karakteristik dari beberapa kali pemancara beta, maka lebih dari 200 produk fisi radioaktif berbeda dihasilkan dalam reaktor nuklir.

Sekitar 8% dari total 200 MeV energy yang dihasilkan dari reaksi fisi dihasilkan dari peluruhan beta produk fisi serta sinar gamma yang juga terlibat dalam proses peluruhan tersebut. Oleh karena itu setelah reaksi berantai diberhentikan (misalnya reaktor nuklir dimatikan), peluruhan radioaktif akan terus menghasilkan panas yang cukup berarti. Gambar 1.6 menunjukkan panas peluruhan untuk reaktor yang telah dioperasikan pada daya P untuk waktu yang lama. Panas peluruhan di peroleh dengan pendekatan yang diberika oleh formula *Wigner Way* sebagai berikut

$$P_d(t) = 0.0622P_o[t^{-0.2} - (t_o + t)^{-0.2}] \quad (1.27)$$

dimana

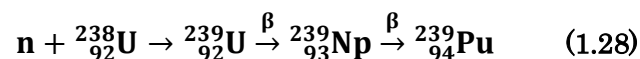
- $P_d(t)$  = Daya yang dihasilkan dari peluruhan beta dan sinar gamma
- $P_o$  = Daya sebelum penghentian (reaksi berantai atau reaktor nuklir)
- $t_o$  = Waktu operasi daya sebelum penghentian [detik]
- $t$  = Waktu setelah penghentian [detik]

Dengan adanya panas peluruhan diatas, system pendinginan perlu untuk tetap dijalankan pada reaktor nuklir untuk beberapa waktu tertentu setelah penghentian reaktor nuklir untuk mencegah panas berlebih pada bahan bakar reaktor nuklir.

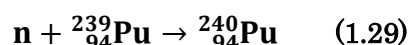
## 1.6 Bahan fisil dan fertile

Dalam diskusi mengenai reaktor nuklir, kita perlu membedakan bahan kedalam dua jenis. Bahan fisil (*fissile*) adalah bahan yang memiliki kemungkinan besar untuk mengalami reaksi fisi ketika di bombardir oleh neutron dengan berbagai energi. Isotop uranium-235 merupakan salah satu bahan fisil yang sering digunakan. Yang kedua adalah bahan fertil (*fertile*), yaitu bahan yang ketika di bombardir oleh neutron lebih cenderung untuk menangkap neutron (tidak mengalami reaksi fisi melainkan reaksi penangkapan). Kemudian bahan fertile ini akan bertransmutasi melalui peluruhan radioaktif menjadi bahan fisil. Uranium-238 merupakan salah satu contoh bahan fertile. Apabila mengalami reaksi penangkapan maka isotop uranium-238 akan memiliki penambahan jumlah neutron dan bertransmutasi menjadi isotop Plutonium-239 yang merupakan bahan fisil. Isotop bahan fertile juga dapat mengalami reaksi fisi namun hal itu terjadi hanya ketika neutron yang membombardirnya memiliki energy tinggi, biasanya pada orde MeV. Kedua jenis bahan ini juga digabung dalam kelompok bahan dapat berfisi (*fissionable*), meskipun seperti dibahas diatas bahan fisil dapat berfisi dengan neutron energy lemah maupun tinggi, sedangkan bahan fertile hanya dengan neutron energy tinggi ataupun didahului oleh reaksi penangkapan dan transmutasi menjadi bahan fisil. Bahan fertile sendiri tidak dapat digunakan untuk membangun reaktor nuklir, diperlukan tambahan bahan fisil untuk dapat mempertahankan reaksi berantai.

Uranium-235 merupakan satu-satunya bahan fisil yang terdapat secara alami. Kandungannya dalam uranium alam hanya 0.7%, sedangkan sisa kandungan uranium alam mayoritas adalah uranium-238 sekitar 99.3%. Dengan reaksi penangkapan neutron, uranium-238 akan menjadi radioaktif kemudian meluruh menjadi plutonium-239 dengan reaksi sebagai berikut

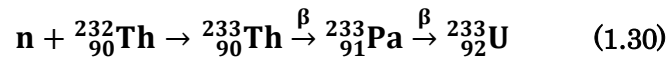


Apabila neutron dengan sembarang energy menumbuk plutonium-239, maka kemungkinan besar akan terjadi reaksi fisi. Oleh karena itu plutonium-239 tergolong bahan fisil. Plutonium-239 juga merupakan isotop radioaktif. Namun waktu paruhnya 24.4 ribu tahun sehingga cukup stabil untuk digunakan dan disimpan sebagai bahan bakar reaktor nuklir. Selain reaksi fisi, plutonium-239 pun memiliki kemungkinan reaksi lain ketika ditumbuk oleh neutron yaitu reaksi penangkapan berikut



Plutonium-240 hasil reaksi diatas merupakan bahan fertile. Bila terjadi lagi reaksi penangkapan berikutnya maka plutonium-240 akan menjadi plutonium-241 yang merupakan bahan fisil.

Selain uranium-238, bahan fertil yang terdapat secara alami juga adalah thorium-232. Apabila mengalami reaksi penangkapan neutron thorium-232 kemudian akan meluruh sebagai berikut



yang menghasilkan bahan fisil uranium-233. Reaksi ini cukup menarik karena menunjukkan bahwa Thorium-232 dapat menjadi alternative bahan bakar reaktor nuklir. Saat ini umumnya reaktor nuklir menggunakan bahan bakar uranium-238, padahal kandungan thorium-232 di permukaan bumi jauh lebih banyak dibandingkan uranium-238.

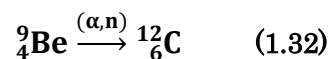
Bahan fisil dapat dihasilkan pada reaktor nuklir dengan menambahkan bahan fertile yang kemudian akan bertransmutasi menjadi bahan fisil. Dengan memperhatikan kembali reaksi fisi dimana dihasilkan neutron lebih dari satu. Pada reaksi fisi uranium-235 rerata jumlah neutron yang dihasilkan adalah 2.4. Maka ada kemungkinan memanfaatkan neutron ini sekaligus untuk dua kepentingan. Salah satu neutron dapat berperan untuk menjaga keberlangsungan reaksi berantai dengan menjaga nilai faktor multiplikasi minimal satu. Peran ini dimainkan apabila neutron tersebut mengalami reaksi fisi. Dan neutron lainnya dapat digunakan untuk mengkonversi bahan fertile menjadi bahan fisil. Peran ini dimainkan apabila neutron tersebut mengalami reaksi penangkapan neutron dengan inti bahan fertile. Proses yang pertama akan mengurangi bahan fisil, sedangkan proses yang kedua akan menambah jumlah bahan fisil pada reaktor nuklir. Bila bahan fisil yang dihasilkan lebih banyak daripada bahan fisil yang hilang, maka reaktor tersebut mampu memproduksi bahan bakarnya sendiri. Reaktor ini disebut reaktor pembiak (*breeder reactor*) karena membiakkan lebih banyak bahan fisil dibandingkan yang dikonsumsi oleh reaktor tersebut untuk menghasilkan energy.

Kebanyakan reaktor nuklir menggunakan uranium alam atau uranium dengan pengayaan tertentu, sehingga banyak sekali jumlah uranium-238 yang terdapat dalam reaktor nuklir. Banyaknya isotop uranium-238 pada reaktor nuklir ini sangat berpotensi untuk dirubah menjadi plutonium-239. Namun, sebagaimana akan kita bahas lebih detail pada bab selanjutnya, untuk dapat memperoleh desain reaktor pembiak desainer reaktor nuklir harus membuat agar neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi tidak terlalu banyak mengalami absorpsi pada bahan non fisil atau bocor keluar dari reaktor nuklir. Hal ini merupakan tantangan yang besar bagi perancang reaktor nuklir. Hampir semua reaktor membakar lebih banyak bahan fisil dibandingkan yang dihasilkan dalam reaktor tersebut.

Ada satu pertanyaan lain yang bisa kita diskusikan, “ dari mana kita dapatkan neutron awal untuk menginisiasi reaksi berantai ? ”. Sebagian neutron terdapat secara alami yaitu sebagai hasil dari sinar kosmik berenergi tinggi yang menumbuk inti atom dan menyebabkan neutron yang ada pada inti tereksitasi keluar. Bila tidak ada sumber neutron lain sumber alami ini bisa saja memicu reaksi berantai. Namun, umumnya kita memerlukan sumber neutron yang lebih kuat dan handal. Untuk reaktor nuklir, meskipun banyak pilihan, yang paling banyak digunakan sebagai sumber neutron adalah sumber radium berilium. Sumber ini menggunakan peluruhan alpha dari isotop alami radium berikut



Yang memiliki waktu paruh 1600 tahun, lalu partikel alpha yang dihasilkan digunakan untuk menumbuk isotop berilium dengan reaksi berikut



Sehingga diperoleh neutron yang bisa digunakan sebagai pemicu reaksi berantai.

### 1.7 Peluruhan radioaktif

Untuk dapat memahami perilaku produk fisi, laju konversi dari bahan fertile menjadi bahan fisil, juga fenomena lain terkait dengan fisika reactor nuklir kita harus mengkuantifikasi perilaku bahan radioaktif. Hukum yang mendasari peluruhan inti menyatakan bahwa laju peluruhan sebanding dengan jumlah inti yang ada saat itu. Tiap radioisotope, yaitu isotop yang mengalami peluruhan radioaktif, memiliki konstanta peluruhan karakteristik,  $\lambda$ . Apabila jumlah inti pada saat waktu  $t$  adalah  $N(t)$ , laju peluruhan adalah

$$\frac{d}{dt} N(t) = -\lambda N(t) \quad (1.33)$$

Dengan membagi dengan  $N(t)$  pada persamaan (1.33), lalu kita dapat melakukan integrasi dari waktu nol hingga waktu tertentu  $t$  dan memperoleh

$$\int_{N(0)}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (1.34)$$

Dimana  $N(0)$  adalah jumlah awal inti. Dari hubungan  $\frac{dN}{N} = d \ln(N)$ , persamaan (1.34) dapat diubah menjadi

$$\ln \left[ \frac{N(t)}{N(0)} \right] = -\lambda t \quad (1.35)$$

Dan akhirnya kita peroleh laju peluruhan eksponensial karakteristik berikut

$$N(t) = N(0)\exp(-\lambda t) \quad (1.36)$$

Gambar 1.7 mengilustrasikan pleuruhan eksponensial dari bahan radioaktif.

Parameter lain yang digunakan untuk mengkuantifikasi perilaku bahan radioaktif adalah waktu paruh,  $t_{1/2}$ . Sebagaimana didefinisikan sebelumnya,  $t_{1/2}$  waktu yang diperlukan hingga setengah dari populasi inti meluruh. Kita dapat melakukan

substitusi  $N(t_{1/2}) = \frac{N(0)}{2}$  pada persamaan (1.36) sehingga diperoleh  $\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -0.693 = -\lambda t_{1/2}$ . Dimana dengan mengetahui konstanta peluruhan tiap inti kita dapat memperoleh waktu paruh tiap inti dengan hubungan

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.37)$$

Parameter lain adalah waktu rerata (*mean time*) yaitu rerata waktu yang diperlukan oleh inti hingga meluruh. Parameter ini seringkali disebut pula umur rerata (*mean life*) karena waktu hingga terjadinya peluruhan dapat dipandang sebagai waktu hidup inti. Waktu rerata didefinisikan sebagai berikut

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tN(t)dt}{\int_0^{\infty} N(t)dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.38)$$

Terdapat beberapa satuan yang dapat digunakan untuk menyatakan laju peluruhan. Kita dapat menyatakan laju peluruhan menggunakan Currie (Ci) dimana 1 Ci didefinisikan dengan nilai  $3.7 \times 10^{10}$  disintegrasi per detik. Nilai 1 Ci ini adalah laju peluruhan dari 1 gram inti radium-226. Unit lain yang juga digunakan adalah Becquerel (Bq) yaitu satu disintegrasi per detik. Secara mudah kita mendapat hubungan antara 1 Ci dan 1 Bq dimana 1 Ci adalah  $3.7 \times 10^{10}$  Bq.

Jumlah populasi inti dapat dihitung dengan menggunakan konsep bilangan Avogadro, yaitu jumlah atom yang terdapat per berat molekuler bahan yang bernilai  $N_0 = 6.023 \cdot 10^{24}$ . Sehingga jumlah atom dari bahan dengan massa  $m$  (dalam gram) dan memiliki massa atomic  $A$  adalah

$$N = \frac{mN_0}{A} \text{ [atom]} \quad (1.39)$$

Kita dapat pula menghitung densitas atom dengan menggunakan informasi massa jenis,  $\rho$  [gram/cm<sup>3</sup>] bahan sebagai berikut

$$N = \frac{\rho N_0}{A} \text{ [atom/cm}^3\text{]} \quad (1.40)$$

### Aktivitas Saturasi

Inti radioaktif dapat dihasilkan dengan laju konstan dalam berbagai kondisi. Misalnya, reactor nuklir yang beroperasi dengan daya konstan akan menghasilkan

fragmen fisi engan laju konstan. Pada situasi seperti itu kita dapat menghitung laju perubahan populasi inti sebagaimana pada persamaan (1.33) hanya saja sekarang kita menambahkan faktor suku sumber,  $A_0$ , yaitu laju produksi inti tersebut sehingga

$$\frac{d}{dt}N(t) = A_0 - \lambda N(t) \quad (1.41)$$

Persamaan diatas dapat dipecahkan dengan menambahkan faktor integrasi  $\exp(\lambda t)$ , dan menggunakan hubungan berikut

$$\frac{d}{dt}[N(t)\exp(\lambda t)] = \left[\frac{d}{dt}N(t) + \lambda N(t)\right]\exp(\lambda t) \quad (1.42)$$

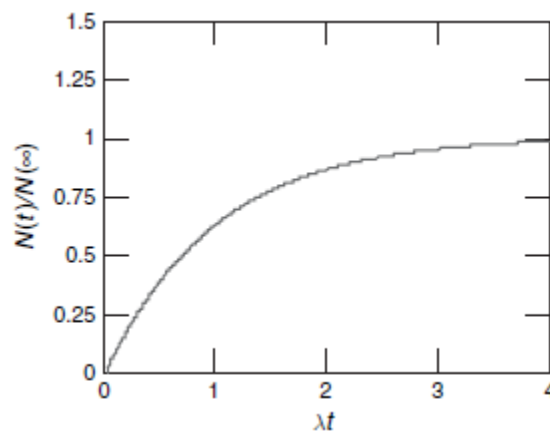
Kita dapatkan

$$\frac{d}{dt}[N(t)\exp(\lambda t)] = A_0\exp(\lambda t) \quad (1.43)$$

Apabila kita asumsikan bahwa pada awalnya tidak terdapat radionuklida, yaitu  $N(0) = 0$ , kita dapat mengintegrasikan persamaan (1.43) dengan rentang waktu antara 0 hingga t sehingga diperoleh

$$\lambda N(t) = A_0[1 - \exp(-\lambda t)] \quad (1.44)$$

Dengan  $\lambda N(t)$  adalah parameter yang disebut aktivitas yaitu disintegrasi per unit waktu. Dari persamaan diatas, pada awalnya aktivitas akan bertambah secara linier terhadap waktu, karena pada saat  $\lambda t \ll 1$ ,  $\exp(-\lambda t) \approx 1 - \lambda t$ . Setelah beberapa waktu paruh, maka suku eksponensial akan sangat kecil sehingga laju peluruhan akan sama dengan laju produksi atau  $\lambda N(\infty) = A_0$ . Kondisi ini, dimana laju peluruhan sama dengan laju produksi, disebut aktivitas saturasi. Gambar 1.8 aktivitas sejak awal dimana faktor produksi dominan hingga terjadinya saturasi sebagaimana diberikan oleh persamaan (1.43).



**Gambar 1.8** Aktivitas sebagai fungsi waktu dari radionuklida yang

dihasilkan dengan laju konstan.

Untuk memberikan gambaran perntingnya aktivitas saturasi, kita perhatikan iodine-131 dan strontium-90, dimana keduanya merupakan produk fisi yang sangat penting dalam kaitannya dengan operasi reaktor nuklir. Misalnya reaktor nuklir menghasilkan kedua radionuklida diatas dengan laju  $y$   $0.85 \cdot 10^{18}$  nuklida/detik dan  $1.63 \cdot 10^{18}$  nuklida/detik, secara berurutan. Lalu kita ingin mengetahui seberapa besar aktivitas yang dihasilkan kedua radionuklida (dalam Ci) setelah operasi reaktor nuklir 1 pekan, 1 bulan, dan 1 tahun.

Parameter pertama yang perlu kita ketahui adalah waktu paruh dari kedua radionuklida, dimana keduanya mempunyai nilai waktu paruh 8.05 hari dan 10.628 hari. Atau dapat kita nyatakan dalam parameter waktu rerata yang bisa diperoleh dengan persamaan (1.37) sebagai berikut  $\lambda_I = 0.0861/hari$  dan  $\lambda_{Sr} = 6.52 \cdot 10^{-5}/hari$ . Untuk dapat menyatakan aktivitas dalam satuan Ci kita membagi persamaan (1.42) dengan  $3.7 \cdot 10^{10}$  nuklida/detik. Maka kita dapatkan aktivitas masing-masing  $A_I = 2.30 \cdot 10^7 Ci$  dan  $A_{Sr} = 4.4 \cdot 10^7 Ci$ . Kita ambil  $t = 7$  hari, 30 hari, dan 365 hari pada persamaan (1.43) untuk persoalan yang akan kita pecahkan (1 minggu, 1 bulan, 1 tahun) dan mendapatkan

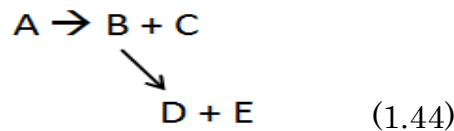
$$\begin{array}{llll} \lambda_I N_I(7) & = & 10.4 \cdot 10^6 Ci & \lambda_{Sr} N_{Sr}(7) & = & 2.01 \cdot 10^3 Ci \\ \lambda_I N_I(30) & = & 21.2 \cdot 10^6 Ci & \lambda_{Sr} N_{Sr}(30) & = & 8.61 \cdot 10^4 Ci \\ \lambda_I N_I(365.25) & = & 23.0 \cdot 10^6 Ci & \lambda_{Sr} N_{Sr}(365.25) & = & 1.04 \cdot 10^6 Ci \end{array}$$

Iodine-131 yang memiliki waktu paruh lebih pendek hampir mencapai saturasi di akhir bulan pertama, dan aktivitasnya konstans setelah itu dengan nilai sebanding dengan daya reaktor. Berbeda dengan Strontium-90 yang memiliki waktu paruh lebih lama, aktivitasnya meningkat secara linier terhadap waktu dan terus seperti itu hingga beberapa tahun hingga mencapai saturasi. Gambar 1.8 menggambarkan pengaruh nilai waktu paruh terkait waktu yang diperlukan untuk mencapai aktivitas saturasi. Pada  $t = 1$  tahun,  $\lambda_{Sr} t = 6.52 \cdot 10^{-5} \cdot 365.25 = 0.0238 \ll 1$ , dimana pada waktu ini masih terlalu dini untuk dapat mencapai saturasi. Oleh karena itu selama tahun pertama, dan beberapa tahun setelahnya, populasi strontium-90 akan terus meningkat sebanding dengan total energi yang dihasilkan dari reaktor nuklir sejak awal dioperasikan. Berbeda dengan Iodine-131, pada bulan pertama,  $\lambda_I = 0.0861 \cdot 30 = 2.58$  sehingga pada

waktu 1 bulan iodine-131 sudah hampir mencapai saturasi.

### Rantai Peluruhan

Reaksi peluruhan yang sebelumnya kita bahas dapat direpresentasikan sebagai proses peluruhan sederhana :  $A \rightarrow B + C$ . Sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan (1.25) dan (1.26), reaksi peluruhan seringkali merupakan sebuah rantai reaksi. Kita perhatikan peluruhan dua-tahap berikut



Dan konstanta peluruhan bagi isotop A dan B adalah  $\lambda_A$  dan  $\lambda_B$ . Untuk isotop A kita telah mendapatkan solusi dalam bentuk persamaan (1.36), untuk membedakan dengan isotop B kali ini kita berikan subskrip A sebagai berikut

$$N_A(t) = N_A(0)\exp(-\lambda_A t) \quad (1.45)$$

Dan  $\lambda_A N_A(t)$  adalah aktivitas dari isotop A, yaitu jumlah nuklida A yang meluruh per satuan waktu. Karena setiap kali nuklida A meluruh dihasilkan nuklida B maka laju produksi nuklida B juga  $\lambda_A N_A(t)$ . Sedangkan laju peluruhan nuklida B dengan populasi nuklida B diberikan oleh  $N_B(t)$  adalah  $\lambda_B N_B(t)$ . Sehingga laju total perubahan populasi isotop B adalah

$$\frac{d}{dt} N_B(t) = \lambda_A N_A(t) - \lambda_B N_B(t) \quad (1.46)$$

Untuk memecahkan persamaan (1.46), kita gunakan  $N_A(t)$  yang diberikan oleh persamaan (1.45). Lalu kita kumpulkan suku untuk isotop B pada ruas kiri dengan memindahkan  $\lambda_B N_B(t)$  ke ruas kiri. Dan menggunakan teknik integrasi dimana kita kalikan kedua ruas dengan faktor  $\exp(\lambda_B t)$  dan memanfaatkan hubungan sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan (1.42), sehingga kita dapatkan

$$\frac{d}{dt} [N_B(t)\exp(\lambda_B t)] = \lambda_A N_A(0)\exp[(\lambda_B - \lambda_A)t] \quad (1.47)$$

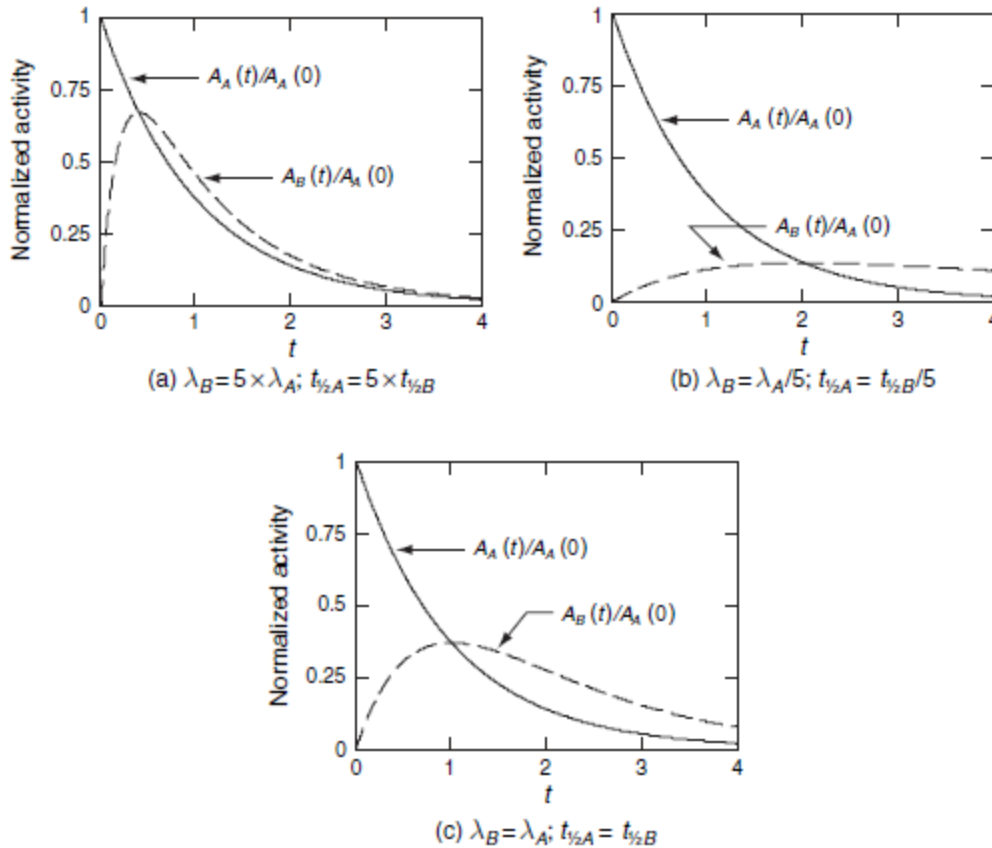
Lalu kita kalikan kedua ruas dengan  $dt$  dan melakukan integrasi terhadap  $t$  dari 0 hingga  $t$ , maka kita dapatkan

$$N_B(t)\exp(\lambda_B t) - N_B(0) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A(0)\{\exp[(\lambda_B - \lambda_A)t] - 1\} \quad (1.48)$$



Bila kita asumsikan bahwa pada awalnya tidak terdapat isotop B sehingga  $N_B(0) = 0$ , maka diperoleh

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A(0) (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (1.49)$$



**Gambar 1.9** Peluruhan serial dari dua radionuklida

Gambar 1.9 menunjukkan perilaku aktivitas sebagai fungsi dari waktu untuk  $A_A(t) = \lambda_A N_A(t)$  dan  $A_B(t) = \lambda_B N_B(t)$  pada kasus dimana  $\lambda_A \ll \lambda_B$ ,  $\lambda_A \gg \lambda_B$ , dan  $\lambda_A \cong \lambda_B$ . Bila  $\lambda_A \ll \lambda_B$ , yaitu waktu paruh isotop A lebih lama dibanding isotop B, maka  $\exp(\lambda_B t)$  akan meluruh lebih cepat dibandingkan  $\exp(\lambda_A t)$  dan setelah beberapa waktu paruh isotop B berdasarkan persamaan (1.45) dan persamaan (1.49) kita dapatkan  $\lambda_B N_B(t) \approx \lambda_A N_A(t)$ . Hal ini berarti laju peluruhan isotop A dan B hampir sama. Kondisi ini disebut kesetimbangan sekuler. Disisi lain, bila  $\lambda_A \gg \lambda_B$ , yaitu waktu paruh isotop A lebih pendek dibandingkan isotop B, maka  $\exp(\lambda_A t)$  akan meluruh lebih cepat dibandingkan  $\exp(\lambda_B t)$  dan setelah beberapa waktu paruh isotop A dapat kita asumsikan bahwa isotop A telah

habis. Pada kasus itu persamaan (1.49) tereduksi menjadi  $N_B(t) \approx N_A(0) \exp(\lambda_B t)$ . Bila waktu paruh kedua nuklida hampir sama,  $\lambda_A \cong \lambda_B$ , maka dua aproksimasi diatas tidak bisa berlaku.

### Bibliografi

Bodansky, David, Nuclear Energy: Principles, Procedures, and Prospects, Springer, 2004.

Cember, H., Introduction to Health Physics, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, NY, 1996.

Duderstadt, James J., and Louis J. Hamilton, Nuclear Reactor Analysis, Wiley, NY, 1976.

Glasstone, Samuel, and Alexander Sesonske, Nuclear Reactor Engineering, 3<sup>rd</sup> ed., Van Nostrand-Heinhold, NY, 1981.

Knief, Ronald A., Nuclear Energy Technology: Theory and Practice of Commercial Nuclear Power, McGraw-Hill, NY, 1981.

Lamarsh, John R., Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison-Wesley, Reading, MA, 1972.

Lamarsh, John, and Anthony J. Baratta, Introduction to Nuclear Engineering, 3<sup>rd</sup> ed., Prentice-Hall, Englewood, NJ, 2001.

Stacey, Weston M., Nuclear Reactor Physics, Wiley, NY, 2001.

Williams, W.S.C., Nuclear and Particle Physics, Oxford University Press, USA, NY, 1991.

Wong, Samuel M., Introductory Nuclear Physics, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, NY, 1999.

<http://webelements.com/webelements/scholar/>

### Pertanyaan

1.1 Isotop-isotop berikut seringkali terdapat pada teras reaktor nuklir. Sebutkan nama dan symbol kimia isotop-isotop berikut.

a.  ${}_{38}^{90}?$  b.  ${}_{40}^{91}?$  c.  ${}_{55}^{137}?$  d.  ${}_{64}^{157}?$  e.  ${}_{72}^{178}?$  f.  ${}_{93}^{137}?$  g.  ${}_{95}^{241}?$

1.2 Terdapat beberapa kemungkinan tipe disintegrasi dari nuklida tak stabil  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ . Lengkapilah reaksi-reaksi disintegrasi aluminium berikut

${}_{13}^{27}\text{Al} \rightarrow ? + {}_0^1\text{n}$  ,  ${}_{13}^{27}\text{Al} \rightarrow ? + {}_1^1\text{p}$  ,  ${}_{13}^{27}\text{Al} \rightarrow ? + {}_1^2\text{H}$  ,  ${}_{13}^{27}\text{Al} \rightarrow ? + {}_2^4\text{He}$

1.3 Lengkapi reaksi-reaksi nuklir berikut

${}^9_2\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ? + {}^1_1\text{H}$  ,  ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ? + {}^{-1}_1\text{e}$  ,

${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow ? + {}^4_2\text{He}$  ,  ${}^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ? + {}^1_1\text{H}$

1.4 Target isotop apa yang harus digunakan untuk membentuk nuklida

- gabungan  ${}^{60}_{28}\text{Ni}$  , apabila partikel proyektil yang digunakan untuk menumbuk adalah
- Partikel alpha
  - Proton
  - Neutron
- 1.5 Energi kinetic rerata dari neutron fisi adalah 2 MeV. Dengan mendefinisikan energy kinetic sebagai  $E_{\text{total}} - m_0c^2$ , berapa persen eror dari energi kinetic apabila digunakan persamaan (1.12) dibandingkan menggunakan persamaan (1.9) ?
- 1.6 Perhatikan reaksi nuklir dan kimia berikut :
- Uranium-235 mengalami fisi akibat dibombardir oleh neutron lambat. Apabila energy fisi adalah 200 MeV, kira-kira berapa fraksi massa reaktan (uranium-235) yang terkonversi menjadi energy ?
  - Karbon-12 mengalami pembakaran setelah bertumbukan dengan molekul oksigen-16 membentuk karbondioksida. Jika dihasilkan energy 4 eV dari pembakaran tersebut, kira-kira berapa fraksi massa dari reaktan (karbon-12) yang terkonversi menjadi energy ?
- 1.7
- Bila plutonium-239 menangkap dua neutron lalu diikuti peluruhan beta. Isotop apa yang akan dihasilkan ?
  - Jika plutonium-239 menangkap tiga neutron lalu diikuti dua peluruhan beta. Isotop apa yang akan dihasilkan ?
- 1.8 Inti atom dapat didekati sebagai sebuah bola dengan jejari  $R = 1.25 \cdot 10^{-13} A^{1/3} \text{cm}$  , dengan A adalah massa atomic. Hitunglah jejari dari inti atom
- Hidrogen
  - Karbon-12
  - Xenon-140
  - Uranium-238
- 1.9 Sebuah reaktor nuklir beroperasi pada daya  $10^3 \text{ MW(t)}$  selama satu tahun. Hitung daya yang diperoleh dari panas peluruhan pada saat
- Satu hari setelah penghentian reaktor nuklir
  - Satu bulan setelah penghentian reaktor nuklir
  - Satu tahun setelah penghentian reaktor nuklir
  - Ulangi pertanyaan a, b, dan c namun dengan asumsi bahwa reaktor nuklir hanya beroperasi selama satu bulan. Bandingkan hasilnya.
- 1.10 Pada persamaan (1.28) uranium-239 dan neptunium-230 mengalami

- peluruhan beta dengan waktu paruh masing-masing 23.4 menit dan 2.36 hari, secara berurutan. Jika dalam reaktor nuklir dihasilkan neptunium-239 dengan laju konstan, berapa lama waktu yang diperlukan plutonium-239 untuk mengalami
- Setengah dari aktivitas saturasinya
  - 90% dari aktivitas saturasinya
  - 99% dari aktivitas saturasinya (dengan asumsi plutonium-239 tidak mengalami reaksi lanjutan)
- 1.11** Uranium-238 memiliki waktu paruh  $4.51 \cdot 10^9$  tahun, sedangkan waktu paruh uranium-235 adalah  $7.13 \cdot 10^8$  tahun. Karena bumi terbentuk 4.5 juta tahun yang lalu, kelimpahan isotopic dari uranium-235 menurun secara konstan.
- Berapakah pengayaan uranium alam ketika bumi terbentuk ?
  - Kapankah tercapai pengayaan 4% pada uranium alam ?
- 1.12** Berapa Ci radium-226 yang diperlukan pada reaksi pada persamaan (1.31) dan (1.32) untuk dapat menghasilkan  $10^6$  neutron per detik ?
- 1.13** Misalkan sebuah sampel ditempatkan pada reaktor nuklir, dan tumbukan neutron pada sampel menyebabkan radioisotope dihasilkan pada laju  $4.51 \times 10^9$  neutron/detik. Radioisotop tersebut memiliki waktu paruh 2 minggu. Berapa lama sampel harus diirradiasi pada reaktor nuklir untuk dapat menghasilkan radioisotope sebanyak 25 Ci ?
- 1.14** Konstanta peluruhan untuk isotop radioaktif antimony  $^{124}_{51}\text{Sb}$  adalah  $4.51 \times 10^9$  detik<sup>-1</sup>.
- Berapakah waktu paruhnya dalam satuan tahun ?
  - Berapa tahun waktu yang diperlukan untuk meluruh sehingga menjadi 0.01% populasi awalnya.
  - Bila isotop tersebut dihasilkan dengan laju konstan, berapa tahun waktu yang diperlukan untuk mencapai 95% dari aktivitas saturasinya?
- 1.15** Perkirakanlah berapa massa dari cobalt-60 yang memiliki waktu paruh 5.26 tahun. Untuk dapat memiliki aktivitas radiasi (dalam Ci) yang sama dengan 10 g strontium-90 yang memiliki waktu paruh 28.8 tahun ?
- 1.16** Sembilan puluh persen dari suatu isotop akan meluruh dalam waktu 3 hari.
- Berapa bagian yang akan meluruh dalam waktu 6 jam ?

- b. Berapa waktu paruh isotop tersebut ?
- c. Bila isotop tersebut dihasilkan dalam reaktor nuklir dengan laju 109 nuklida per jam. Setelah waktu yang lama (cukup untuk mencapai saturasi) berapa kelimpahan isotop tersebut pada reaktor nuklir ?
- 1.17** Produk fisi dengan waktu paruh 2 minggu dihasilkan pada reaktor nuklir dengan laju  $4.51 \times 10^9$  nuklida/detik .
- a. Berapakah aktivitas saturasinya dalam satuan disintegrasi per detik.
- b. Berapakah aktivitas saturasinya dalam Ci
- c. Berapa lama semenjak reaktor nuklir mulai beroperasi, produk fisi tersebut akan mencapai 90% aktivitas saturasinya ?
- d. Bila produk fisi tersebut mengalami peluruhan  $A \rightarrow B \rightarrow C$ , dimana B juga memiliki waktu paruh 2 minggu. Berapa aktivitas B setelah 2 minggu ?
- 1.18** Misalkan sumber radioaktif cobalt dan strontium pada soal no.1.15 dibiarkan mengalami peluruhan hingga 10 tahun. Dan setelah 10 tahun cobalt-60 masih memiliki aktivitas 1.0 Ci. Berapa Ci aktivitas strontium-90 pada saat itu ?
- 1.19** Polonium-210 meluruh menjadi timbale-206 dengan memancarkan partikel alpha dengan waktu paruh 138 hari dan energy 5.305 MeV.
- a. Berapa Ci aktivitas 1 gram polonium murni ?
- b. Berapa Watt panas yang dihasilkan oleh 1 g polonium ?
- 1.20** Perhatikan rantai peluruhan produk fisi  $A \xrightarrow{\beta} B \xrightarrow{\beta} C$  dengan peluruhan konstan  $\lambda_A$  dan  $\lambda_B$ . Sebuah reaktor nuklir mulai dioperasikan pada  $t=0$  dan menghasilkan produk fisi A dengan laju  $A_0$ . Dengan asumsi B dan C tidak dihasilkan secara langsung melalui reaksi fisi :
- a. Hitung  $N_A(t)$ , dan  $N_B(t)$
- b. Hitung  $N_A(\infty)$ , dan  $N_B(\infty)$