

BAB II

PENGANTAR TEORI REAKTOR

Sesuai dengan judulnya, bab ini dimaksudkan sebagai pengantar dalam mempelajari reaktor nuklir, khususnya sebelum sampai pada pembahasan ukuran kritis dan massa kritis reaktor. Faktor terpenting yang harus dipelajari ialah mengenai segala sesuatu yang berhubungan dengan inti atom, neutron dan reaktor itu sendiri.

II.1. Reaksi inti dengan neutron

II.1.1. Unsur-unsur pokok inti atom

Didalam mempelajari fisika reaktor harus diketahui terlebih dahulu zarah-zarah elementer yang penting seperti neutron, proton, elektron dan juga radiasi gamma (γ). Radiasi gamma (γ) merupakan pengaruh dari radiasi elektromagnetis.

Atom tersusun dari neutron, proton dan elektron dengan garis tengah $\pm 10^{-8}$ cm. Inti atom terdiri dari sejumlah neutron dan proton dengan garis tengah $\pm 10^{-12}$ cm. Sedangkan elektron-elektron berada pada ruangan diluar inti atom dan disebut elektron-elektron ekstra nuklir. Banyaknya elektron-elektron ekstra nuklir inilah yang menentukan sifat-sifat kimia dari suatu atom, dimana jumlahnya sama dengan proton yang ada didalam inti atom. Neutron dan proton didalam inti atom disebut pula nukleon. Sedangkan nuklida adalah setiap atom yang tersusun dari gabungan sejumlah neutron dan proton tertentu.

Zarah paling penting dalam fisika reaktor adalah neutron, yang mempunyai massa diam 1,00898 satuan massa

atom (sma) atau $1,67482 \times 10^{-24}$ gr dan tidak bermuatan listrik. Proton mempunyai massa $1,00758$ sma atau $1,67252 \times 10^{-24}$ gr dengan membawa muatan positif sebesar $1,60210 \times 10^{-19}$ C atau sebesar 1 satuan muatan listrik positif. Elektron mempunyai massa yang sangat kecil yaitu, $0,00055$ sma atau $9,129 \times 10^{-28}$ gr. Elektron mempunyai muatan sama besarnya dengan muatan proton, hanya muatannya adalah negatif.

Banyaknya neutron yang berada dalam inti atom disebut jumlah neutron N , sedangkan banyaknya proton yang berada dalam inti atom disebut nomor atom Z . Jumlah nukleon-nukleon dalam inti atom disebut nomor massa A , yaitu sama dengan $Z + N = A$. Oleh karena itu setiap nuklida X dapat ditulis dengan ${}_Z^X A$.

Nuklida yang mempunyai nomor atom sama tetapi nomor massanya berbeda disebut isotop. Nuklida yang nomor massanya sama disebut isobar. Sedangkan nuklida yang sama jumlah neutronnya disebut isotone.

II.1.2. Reaksi-reaksi nuklir

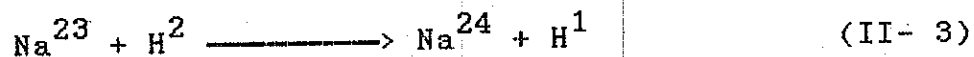
Reaksi nuklir dapat terjadi antara inti-inti atom ataupun antara inti atom dengan neutron, proton, zarah α dan sebagainya. Interaksi ini menghasilkan inti atom-inti atom baru, zarah-zarah baru maupun radiasi gamma (γ). Terjadinya reaksi inti secara umum dan sederhana dapat disajikan dengan persamaan sbb :



X dan a adalah partikel yang saling bereaksi sedangkan Y dan b adalah hasil reaksinya. Biasanya reaksi inti tersebut dapat dituliskan sebagai :



dan reaksinya disebut sebagai reaksi (a,b). Berdasarkan bentukpersamaan (II- 2), macam-macam reaksi yang dapat terjadi adalah (n,2n), (n,p), (n, α), (p,2p), (n, γ), dsb. Sebagai contoh, deuteron bereaksi dengan inti atom Na^{23} , maka reaksinya :



secara sederhana dapat dituliskan :



dan disebut reaksi (d,p).

Hukum-hukum dasar pada reaksi nuklir adalah :

1. Kekekalan nukleon.

Banyaknya nukleon-nukleon sebelum dan sesudah reaksi sama.

2. Kekekalan muatan.

Banyaknya muatan-muatan pada semua partikel sebelum dan sesudah reaksi harus sama.

3. Kekekalan momentum linier dan angular.

Momentum total dari partikel-partikel yang berinteraksi sebelum dan sesudah reaksi adalah sama jika tidak ada kekuatan-kekuatan luar yang terjadi pada partikel-partikel tersebut.

4. Kesetaraan energi dan massa.

Setiap perubahan massa akan mengakibatkan suatu pembentukan atau kehilangan tenaga.

II.1.3. Reaksi penghamburan

Reaksi penghamburan adalah reaksi antara suatu inti atom dengan suatu neutron yang bergerak mendekati dan memasuki medan pengaruhnya, tetapi neutron tersebut

hanya dibelokkan arahnya. Dengan kata lain, pada prinsipnya inti atom tidak mengalami perubahan pada bangun atomnya. Reaksi ini dapat dibagi menjadi 2 golongan, yaitu :

1. Penghamburan elastis.

Disini inti atom dan neutron dianggap elastis, sehingga jumlah tenaga gerak inti atom dan neutron sebelum dan sesudah tumbukan tidak berubah.

2. Penghamburan tidak elastis.

Jumlah tenaga gerak yang terjadi sesudah tumbukan lebih kecil daripada sebelum tumbukan. Hal ini disebabkan karena sebagian tenaga gerak tersebut digunakan untuk merangsang inti atom yang ditumbuk ke tingkat tenaga yang lebih tinggi. Akan tetapi, inti atom tersebut akan kembali ke tingkat tenaga dasar dengan memancarkan radiasi gamma (γ). Karena kedudukannya yang tidak mantap pada tingkat energi yang lebih tinggi tersebut. Sehingga dapat disimpulkan, bahwa pada dasarnya jumlah tenaga geraknya sebelum dan sesudah tumbukan tidak berubah.

II.1.4. Transformasi radioaktif

Secara eksperimen telah ditentukan bahwa nuklida-nuklida radioaktif terjadi dalam beberapaseri.

Dalam masing-masing seri, nuklida parent meluruh menjadi suatu nuklida daughter dimana nuklida ini akan meluruh kembali dst, sampai pada akhirnya suatu hasil akhir yang

stabil terbentuk.

Prosedur ini dapat digambarkan sbb :

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \frac{dN_n}{dt} &= \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \end{aligned}$$

Subscript 1 manandakan nuklida parent yang meluruh menjadi nuklida radioaktif lain (subscript 2) hingga akhirnya meluruh menjadi suatu hasil akhir yang stabil. N_1, N_2, \dots, N_n menunjukkan jumlah atom dari masing-masing jenis pada waktu t dan $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ merupakan konstanta-konstanta disintegration.

II.1.5. Reaksi transmudasi

Transmutasi adalah peristiwa perubahan inti atom (parent) menjadi inti atom baru (daughter) dengan memancarkan partikel radiatifnya. Inti yang baru bersifat tidak mantap hingga akan berubah menjadi inti atom baru lagi, juga dengan memancarkan partikel radiatifnya. Proses ini akan berlangsung terus sampai diperoleh inti atom yang stabil.

Sebagai contoh adalah :

<u>Inti semula</u>	<u>Jenis pancaran</u>	<u>Inti hasil</u>
${}_{90}\text{U}^{238}$	sinar alpha	${}_{90}\text{Th}^{234}$
${}_{90}\text{Th}^{234}$	sinar beta	${}_{91}\text{Pa}^{234}$
${}_{91}\text{Pa}^{234}$	sinar beta	${}_{92}\text{U}^{234}$

82Pb^{206}

stabil

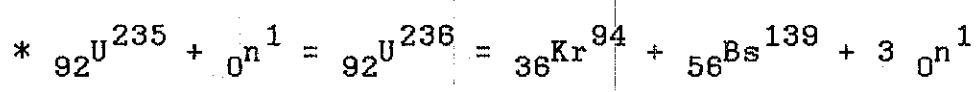
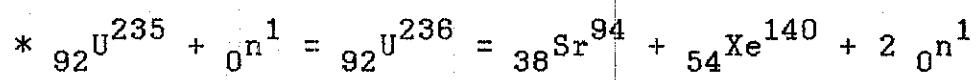
II.1.6. Reaksi penyerapan

Reaksi penyerapan adalah reaksi antara suatu inti atom dengan suatu neutron yang bergerak mendekatinya dan betul-betul masuk serta menyatu dengan inti atom tersebut. Reaksi penyerapan disebut juga reaksi absorpsi atau reaksi tangkapan neutron. Setelah inti atom bersatu dengan neutron yang mendekatinya, maka terbentuklah suatu inti atom baru. Inti atom baru tersebut dapat bersifat mantap dan tidak mengalami perubahan apa-apa. Dan karena reaksi itu disertai pemancaran radiasi gamma (γ), maka digolongkan sebagai reaksi (n,γ) . Inti atom yang terbentuk dapat pula bersifat tidak mantap dan akan mengalami proses peluruhan radioaktif. Reaksi (n,γ) , bagaimanapun hasil inti atom barunya, tetap disebut sebagai reaksi penyerapan atau reaksi absorpsi radiatif.

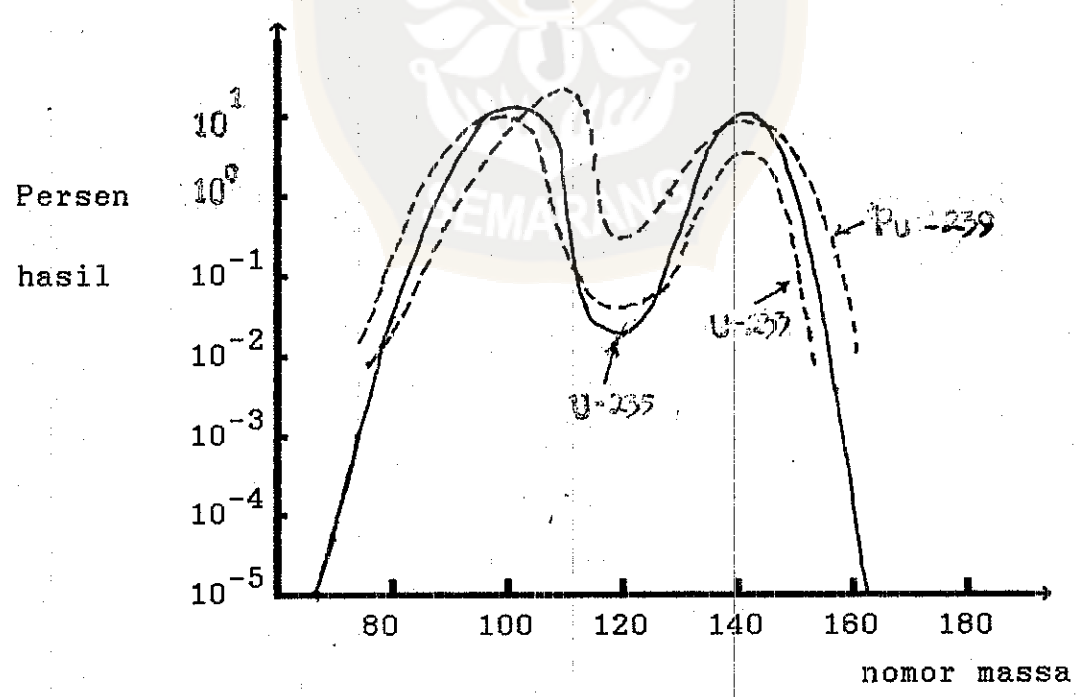
II.1.7. Reaksi pembelahan

Reaksi inti yang sangat penting dalam fisika reaktor adalah reaksi pembelahan. Yaitu, reaksi penangkapan neutron oleh inti atom yang menghasilkan suatu inti atom majemuk yang bersifat sangat tidak mantap. Inti atom majemuk ini dalam waktu singkat akan membelah menjadi dua belahan utama dan kira-kira dua atau tiga neutron baru.

Contoh reaksi pembelahan dari isotop U^{235} adalah :



Bentuk kurva distribusi massa hasil pembelahan tergantung pada inti atom yang membelah dan pada kecepatan neutron yang menyebabkan pembelahan. Dalam Gambar II-1. dibawah, kurva tersebut digambarkan sebagai suatu fungsi dari nomor massa dan ordinatnya adalah persen hasil dari pembelahan. Persen hasil adalah persentase dari seluruh hasil pembelahan yang telah menghasilkan isotop, atau besar kecilnya frekuensi terjadinya pembelahan.



Gambar II-1. Distribusi massa hasil pembelahan neutron termis dari U^{235} , U^{233} dan Pu^{239}

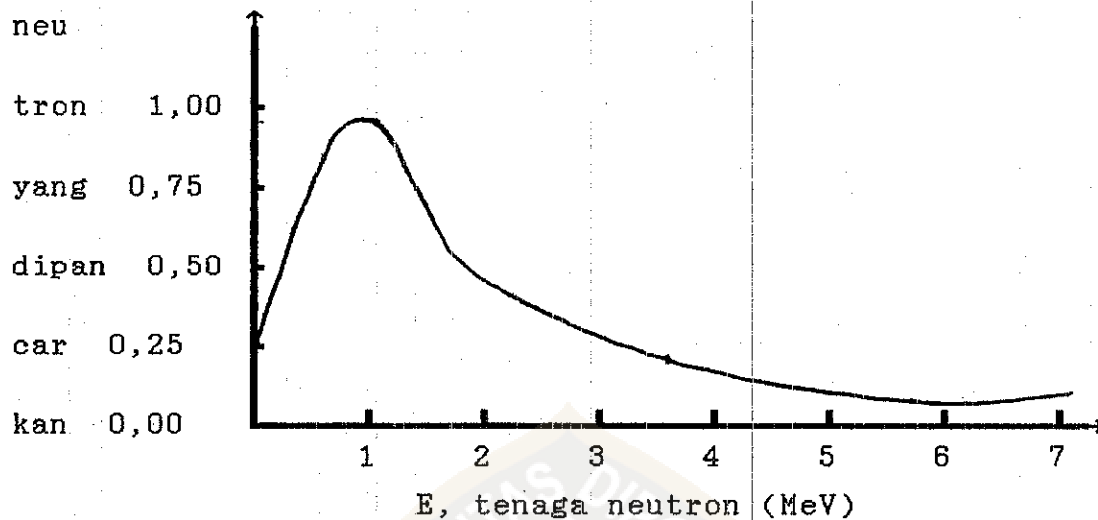
Isotop-isotop yang dihasilkan oleh reaksi

mengadakan reaksi pembelahan lagi. Contohnya adalah :
 Xe^{135} dan Sm^{149} .

Pada umumnya hasil dari reaksi pembelahan inti relatif mengandung banyak neutron dibandingkan inti-inti yang mantap. Salah satu hasil penting dari reaksi pembelahan adalah neutron-neutron yang dipancarkan pada saat proses pembelahan, ataupun sekitar 10^{-17} detik dari saat terjadinya pembelahan. Neutron-neutron demikian biasa disebut dengan neutron serentak. Sedangkan sebagian kecil neutron yang dihasilkan lama sesudah terjadinya pembelahan disebut neutron kasip. Meskipun jumlah neutron kasip ini hanya sekitar 1% dari seluruh kelebihan neutron, akan tetapi neutron-neutron tersebut memegang peranan penting dalam operasi suatu reaktor, terutama dalam cara-cara pengendalian reaktor.

Tenaga gerak yang dimiliki oleh neutron yang dihasilkan dalam reaksi pembelahan rata-rata sangat tinggi. Spectrum tenaga neutron ini didalam reaktor terbentang dari spectrum tenaga pembelahan sampai tenaga termis. Neutron termis adalah neutron yang digerakkan oleh tenaga gerak yang seimbang dengan suhu kamar. Energinya atau tenaga gerak neutron inilah yang dinamakan tenaga termis dan besarnya adalah 0,025 eV. Untuk U^{235} neutron hasil belahan mempunyai tenaga gerak ± 2 MeV, spectrum tenaganya akan diperlihatkan dalam gambar IV-2 di bawah .

Tenaga reaksi pembelahan yang besarnya ± 200 MeV tiap reaksi, 85 % dibebaskan dalam bentuk tenaga gerak hasil belahan. Sisanya dalam bentuk radiasi dan disamping itu juga tenaga dari neutron dan neutrino. Hasil-hasil



Gambar II-2. Spectrum tenaga dari neutron hasil pembelahan U^{235}

belahan ukurannya cukup besar dan segera bereaksi lagi.

II.2. Reaktor nuklir

Reaktor nuklir adalah suatu instalasi atau tempat pembelahan inti atom dengan partikel neutron yang akan menghasilkan neutron-neutron baru, zat-zat radioaktif dan energi nuklir. Prinsip dasar yang mendasari operasi reaktor adalah reaksi pembelahan berantai yang menghasilkan tenaga secara terus menerus. Masalah pokok bagi pembuat reaktor adalah membuat sistem dimana reaksi berantai terus menerus dapat terjadi dengan keselamatan prima.

Tiap-tiap reaktor mempunyai konfigurasi dan komposisi yang spesifik, tetapi bagian-bagian utamanya serupa. Bagian-bagian utama reaktor, yaitu :

1. Teras reaktor.

Terletak pada bagian pusat dan mengandung bahan

bakar nuklir bersama dengan bahan moderator, bahan penyangga, bahan pendingin dan lain-lain. Untuk reaktor cepat tidak mengandung bahan moderator. Bagian ini merupakan tempat berlangsungnya reaksi.

2. Reflektor.

Terletak di sebelah luar teras reaktor sebagai selubung. Mengandung bahan moderator, bahan penyangga dan kadang-kadang juga bahan pendingin. Gunanya untuk memantulkan kembali neutron yang keluar dari teras reaktor.

3. Perisai radiasi.

Terletak paling luar dan menyelubungi seluruh teras dan reflektor. Gunanya untuk melindungi alat-alat dan orang yang bekerja disekitar reaktor dari radiasi sebagai hasil pemancaran reaksi pembelahan.

Didalam reaktor, neutron dihasilkan oleh reaksi pembelahan pada teras reaktor. Untuk reaktor dengan reflektor kadang-kadang neutron keluar dari teras dan memasuki reflektor, kemudian neutron ini akan dipantulkan oleh reflektor hingga memasuki teras kembali. Masa hidup neutron ini hanya sekitar 10^{-5} - 10^{-3} detik saja. Apabila neutron mengalami reaksi tangkapan dalam bahan bakar, maka akan terjadi reaksi pembelahan dan dihasilkan lagi neutron-neutron baru. Sebagian neutron hasil pembelahan dapat juga hilang dari sistem karena bocor keluar dari reaktor.

Dari segi fisika reaktor, kita dapat mengadakan penggolongan untuk reaktor nuklir, yaitu berdasarkan :

1. Susunan geometri bahan bakar dan moderator.

Untuk golongan ini reaktor nuklir masih dapat dibagi lagi jenisnya tergantung pada macam bahan bakarnya dan tingkat perkayaannya.

a. Reaktor homogen.

Dalam reaktor homogen, bahan bakar dan bahan moderatornya yang ada dalam teras bercampur menjadisu sehingga bahan-bahan dalam teras reaktor merupakan suatu fluida homogen.

b. Reaktor heterogen.

Dalam reaktor heterogen, diadakan pemisahan geometris antara bahan bakar dan bahan moderator. Biasanya digunakan bahan bakar dengan tingkat kekayaan rendah.

2. Tenaga rata-rata dari neutron yang menyebabkan pembelahan inti.

Golongan ini dapat dibagi lagi menjadi :

a. Reaktor cepat.

Sistim ini tidak berisi bahan moderator apapun dan hanya merupakan himpunan unsur yang dapat membelah dan bahan pendingin. Reaktor cepat membutuhkan massa bahan bakar yang besar untuk dapat menjadi kritis.

b. Reaktor epitermis.

c. Reaktor termis.

Reaktor termis atau thermal sangat mudah menjadi kritis dengan bahan bakar yang jauh

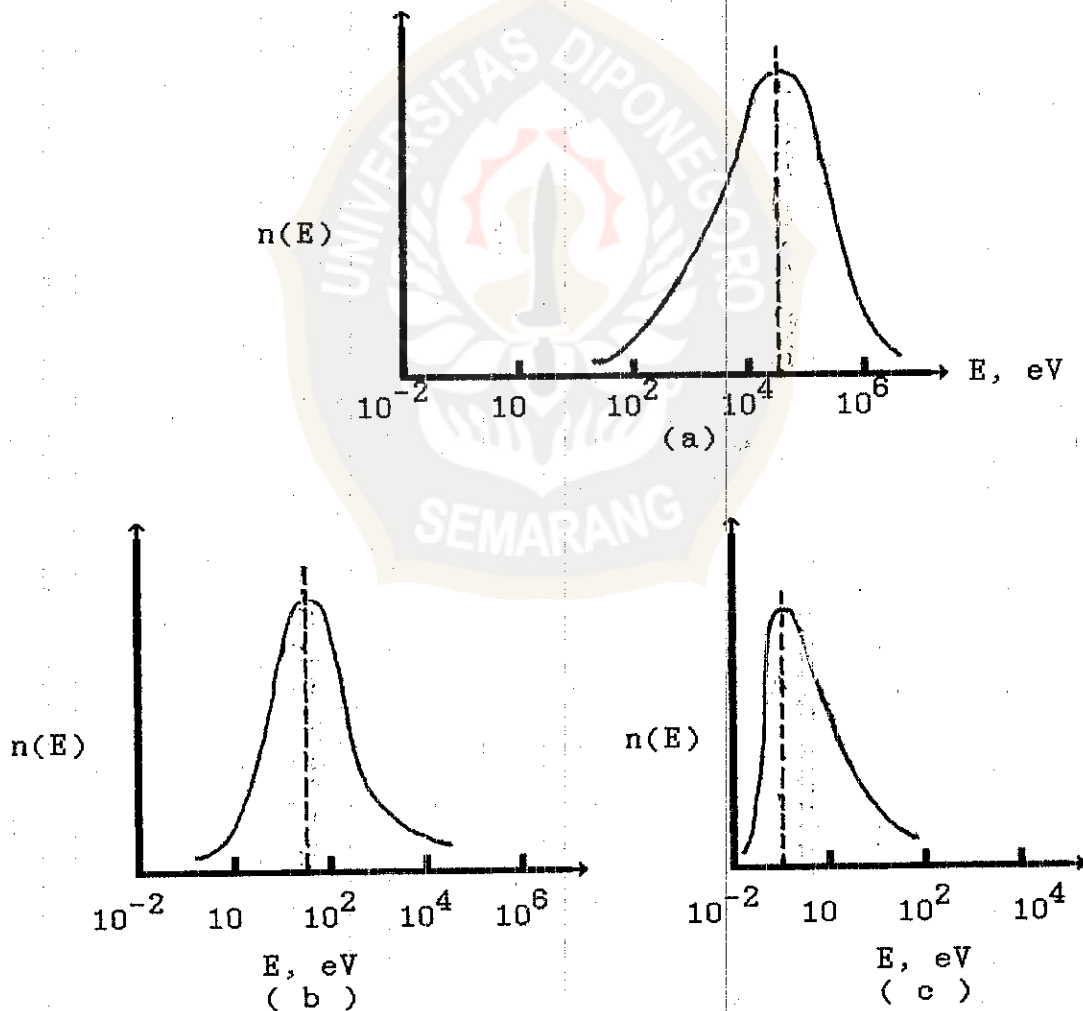
lebih kecil dari pada reaktor cepat. Didalam

sistim ini kecepatan neutron-neutron hasil

pembelahan diperlambat dengan menggunakan

bahan moderator, hingga mencapai tenaga termis, yaitu $\pm 0,025$ eV.

Moderator adalah bahan untuk memperlambat neutron-neutron dan tidak menyerap neutron. Bahan moderator berupa unsur-unsur ringan seperti grafit, air, air berat, beryllium dan lain-lain.



Gambar II-3. Spectrum tenaga neutron dalam :

- a. Reaktor cepat
- b. Reaktor epitermis
- c. Reaktor termis

3. Tujuan dan cara-cara penggunaan reaktor

Yaitu untuk keperluan penelitian, pendidikan,

produksi unsur-unsur radioisotop, pembangkit

tenaga listrik dan sebagainya.

4. Bahan bakar yang dipakai.

Dikenal jenis-jenis reaktor Uranium alam, reaktor Uranium-235, reaktor Pu^{239} dan lain-lain.

5. Macam bahan yang dipakai.

Yaitu moderator, reflektor, pendingin dan sebagainya.

Tugas-tugas yang dilaksanakan dalam fisika reaktor adalah :

- * Perhitungan massa kritis.
- * Penetapan konfigurasi dan komposisi optimum.
- * Penetapan distribusi rapat neutron.
- * Penetapan distribusi pembentukan panas dalam reaktor.
- * Cara-cara pengendalian reaktor.
- * Stabilitas reaktor.
- * Kecepatan pemakaian bahan bakar dan pembentukan racun.

Untuk menentukan keadaan suatu neutron sebagai zat pendukung berlangsungnya reaksi berantai diperlukan 7 macam variabel. Secara umum rapat neutron dalam reaktor dapat didefinisikan sebagai fungsi $n(x,y,z,v,\Omega,m,t)$ dengan x,y,z variabel ruang, v variabel kecepatan, Ω variabel arah, m variabel massa dan t variabel waktu.

Persaman neraca neutron yang lengkap dengan 7 macam variabel tersebut adalah persamaan differensial integral

Boltzmann. Akan tetapi, karena perhitungan dengan ke-7 variabel tersebut secara lengkap akan sangat rumit dan memerlukan banyak waktu dan tenaga, maka perlu diciptakan

memerlukan banyak waktu dan tenaga, maka perlu diciptakan

model perhitungan yang sederhana. Model sederhana tersebut hanya memerlukan beberapa variabel penting saja sehingga mudah dilakukan, cepat dan dengan hasil yang mendekati kebenaran.

Bentuk-bentuk model analitis yang diperoleh sebagai pendekatan bentuk persamaan differensial integral Boltzmann dari yang paling sederhana, adalah :

1. Model medium tak berhingga.

Karena medium reaktor tak berhingga besar, maka variabel ruang x, y, z diabaikan. Perhatian dipusatkan pada spectrum tenaga neutron dalam reaktor.

2. Model satu kelompok.

Karena semua neutron dianggap mempunyai tenaga rata-rata yang sama yang ditentukan oleh bentuk spectrumnya, maka variabel tenaga dari neutron diabaikan. Dengan demikian, penyederhanaan persamaan Boltzmann mirip dengan persamaan gelombang, sehingga biasa disebut juga model persamaan diffusi.

3. Model Umur Fermi.

Perhatian dipusatkan pada variabel ruang tenaga dari neutron dengan mengabaikan variabel arah karena medium reaktor dianggap isotropis.

4. Model banyak kelompok.

Neutron-neutron dianggap terdiri dari kelompok-kelompok dengan tenaga rata-rata sendiri.

II.3. Luas penampang inti

Apabila sejumlah neutron dengan kecepatan sama

melalui suatu daerah sasaran setebal x , maka neutron-neutron tersebut dapat mengalami 2 macam kejadian. Yaitu, terus bergerak lurus dengan kecepatan tetap atau mengalami reaksi tumbukan kemudian dihamburkan. Kebolehjadian bahwa neutron-neutron tadi mengalami reaksi tumbukan dalam unsur setebal Δx dirumuskan sebagai berikut:

$$p = \Sigma \cdot \Delta x \quad (\text{II-5})$$

Σ adalah konstante perbandingan. Oleh karenanya, kebolehjadian bahwa neutron-neutron tadi belum mengalami reaksi tumbukan dalam unsur setebal Δx adalah :

$$P = 1 - \Sigma \cdot \Delta x \quad (\text{II-6})$$

Sesudah neutron menempuh jarak setebal $x = n \cdot \Delta x$ dengan n merupakan banyaknya interval, maka P akan menjadi:

$$\begin{aligned} P(x) &= (1 - \Sigma \cdot \Delta x)^n \\ &= \left(1 - \Sigma \cdot \frac{x}{n}\right)^n \end{aligned} \quad (\text{II-7})$$

Apabila x dianggap kecil tak berhingga menyebabkan n menjadi besar tak hingga, sehingga

$$P = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \Sigma \frac{x}{n}\right)^n = e^{-\Sigma \cdot x} \quad (\text{II-8})$$

Dengan demikian kebolehjadian bahwa neutron mengalami tumbukan yang pertama di x adalah :

$$p(x) = 1 - e^{-\Sigma \cdot x} \quad (\text{II-9})$$

Dan fungsi kebolehjadian tumbukan pertama pada interval dx disekitar titik x dirumuskan sebagai berikut :

$$f(x) = \frac{dp(x)}{dx} = \Sigma \cdot e^{-\Sigma \cdot x} \quad (\text{II-10})$$

Neutron-neutron tadi sebelum mengalami tumbukan

yang pertama akan menempuh jarak rata-rata x :

$$\begin{aligned} x &= \int_0^{\infty} x f(x) dx = \Sigma \int_0^{\infty} x e^{-\Sigma \cdot x} dx \\ &= \frac{1}{\Sigma} = \lambda \end{aligned} \quad (\text{II-11})$$

λ adalah jarak bebas rata-rata. Dari persamaan di atas Σ dapat didefinisikan sebagai banyaknya peristiwa tumbukan untuk setiap satuan jarak yang telah ditempuh neutron, atau dapat dituliskan :

$$\Sigma = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{II-12})$$

Didefinisikan suatu parameter σ yang berhubungan dengan luas tampang dari satuan inti atom dan disebut luas tampang inti mikroskopik. Parameter σ ini ditentukan oleh kerapatan inti atom dan kecepatan neutron. Satuannya adalah barn atau cm^2 . $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

Berdasarkan definisinya maka parameter Σ berhubungan dengan luas tampang dari semua inti atom yang terdapat dalam satu satuan volume bahan. Sehingga parameter Σ disebut luas tampang inti makroskopik dan bentuk hubungannya dengan σ adalah :

$$\Sigma = N \cdot \sigma \quad (\text{II-13})$$

N adalah rapat atom yang dapat dicari berdasarkan

$$N = \frac{\rho}{A} \cdot N_A \quad (\text{II-14})$$

N_A = bil Avogadro = $6,02 \times 10^{23}$ atom per gram molekul,
 ρ = berat jenis, A = berat atom. Oleh karena itu N mempunyai satuan cm^{-3} dan Σ satuannya cm^{-1} .

Apabila dalam suatu bahan terjadi lebih dari satu macam reaksi, maka luas tampang makroskopik totalnya adalah

$$\Sigma_t = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots + \Sigma_j \quad (\text{II-15})$$

Sehingga jarak bebas rata-ratanya menjadi :

$$\lambda_t = \frac{1}{\Sigma_t} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_j}} \quad (\text{II-16})$$

Untuk mengatakan bahwa suatu tampang inti berlaku

untuk suatu macam reaksi tertentu dipergunakan index-index :

$$* \Sigma_a = N \sigma_a = \text{tampang inti makroskopis absorpsi}$$

$$* \Sigma_\gamma = N \sigma_\gamma = \text{tampang intimakroskopis tangkapan radiatif}$$

$$* \Sigma_f = N \sigma_f = \text{tampang inti makroskopis pembe-
lahan}$$

$$* \Sigma_s = N \sigma_s = \text{tampang inti makroskopis hamburan
elastis}$$

$$* \Sigma_{in} = N \sigma_{in} = \text{tampang inti makroskopis hambur-
an tidak elastis}$$

Dalam suatu bahan murni, luasampang inti totalnya adalah :

$$\begin{aligned} \Sigma_t &= \Sigma_a + \Sigma_s + \Sigma_{in} \\ \sigma_t &= \sigma_a + \sigma_s + \sigma_{in} \end{aligned} \quad (\text{II-17})$$

tetapi karena reaksi hamburan tidak elastis dianggap tidak penting, maka cukup dipergunakan :

$$\begin{aligned} \Sigma_t &= \Sigma_a + \Sigma_s \\ \sigma_t &= \sigma_a + \sigma_s \end{aligned} \quad (\text{II-18})$$

Reaksi absorpsi dapat bersifat additif, yaitu :

$$\begin{aligned} \Sigma_a &= \Sigma_f + \Sigma_\gamma \\ \sigma_a &= \sigma_f + \sigma_\gamma \end{aligned} \quad (\text{II-19})$$

Apabila perhitungan terjadi pada reaktor yang mengandung lebih dari 1 macam atom, maka luasampang makroskopisnya adalah :

$$\Sigma^m = \sum_{i=1}^k N_i \sigma_i = \sum_{i=1}^k \Sigma_i \quad (\text{II-20})$$

Jelas bahwaampang mikroskopis tidak bersifat additif karena kerapatan masing-masing atom tidak sama. Sehingga

jarak bebas rata-ratanya menjadi :

$$\lambda_m = \frac{1}{\Sigma^m} = \frac{1}{\Sigma^1 + \Sigma^2 + \dots + \Sigma^k} \quad (\text{II-21})$$

