

BAB 13 PEMBANGKIT ENERGI NUKLIR

13.1 Reaktor Fisi

Reaktor Nuklir ialah alat tempat terjadinya reaksi berantai yang menyangkut fisi nuklir yang terkendali. Sebuah reaktor merupakan sumber energi yang sangat efisien: fisi 1 gram nuklida yang memadai per hari, melepaskan energy dengan laju sekitar 1 MW yang setara dengan pembakaran 2,6 ton batu bara per hari. Energi yang dilepaskan dalam sebuah reaktor nuklir timbul sebagai kalor, dan dapat diambil dengan mengalirkan zat cair atau gas sebagai pendingin, melalui bagian dalam reaktor itu.

Dua aspek penting yang membedakan reaksi fisi dengan reaksi inti lainnya adalah : (1) Pada setiap reaksi fisi dihasilkan lebih dari satu neutron dihasilkan untuk setiap neutron yang diserap. Pada reaksi fisi U^{235} misalnya dihasilkan rata-rata 2,5 neutron. Dengan demikian dimungkinkan dapat terjadinya reaksi berantai yang berkelanjutan. (2) Pada setiap reaksi fisi dilepaskan sekitar 200 Mev dimana lebih kurang 165 Mev dibawa oleh pecahan fisi . Energi ini tersedia dalam bentuk kalor dan dapat digunakan sebagai sumber energi. Pembangunan sebuah reaktor mengacu kepada dua karakteristik ini. Suatu reaksi berantai yang berkelanjutan adalah mungkin terjadi apabila jumlah neutron yang dihasilkan pada setiap generasi adalah lebih atau sama dengan jumlah neutron generasi sebelumnya. Sebuah kuantitas penting k yang disebut sebagai faktor reproduksi atau faktor multiflikasi didefinisikan sebagai

$$k = \frac{\text{jumlah neutron pada generasi ke } (n + 1)}{\text{jumlah neutron pada generasi ke } n} \quad (13.1)$$

Jika jumlah neutron yang dihasilkan pada suatu generasi sama dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya, atau jika $k = 1$, sistem disebut dalam kondisi kritis. Jika jumlah neutron yang dihasilkan pada suatu generasi kurang dari jumlah neutron pada generasi sebelumnya, atau jika $k < 1$, sistem disebut dalam kondisi subkritis atau konvergen. Jika jumlah neutron yang dihasilkan pada suatu generasi lebih dari jumlah neutron pada generasi sebelumnya, atau jika $k > 1$, sistem disebut dalam kondisi superkritis atau divergen. Untuk memperoleh supply energi yang tetap dan kontinu dari reaktor fisi maka sistem harus dalam kondisi kritis. Jika reaktor dalam kondisi superkritis akan terjadi pelepasan energi yang terus menerus meningkat dan tidak terkendali seperti yang terjadi pada bom nuklir. Jika sistem dalam kondisi subkritis energi akan terus menerus berkurang menuju nol. Pada reaktor nuklir

harga awal k dibuat sedikit lebih besar dari satu dan kemudian sesudah tercapai tingkat energi yang diinginkan harga k kemudian dibuat bernilai satu.

Hanya inti U^{235} yang terdapat di alam yang dapat berfisi dengan neutron termal. Uranium alamiah merupakan kombinasi dari isotop U^{235} dan U^{238} dalam ratio 1 : 138, yang berarti kelimpahan U^{235} dalam uranium alamiah hanya 0,71 % berat. Karena sifat kimia yang identik dari kedua isotop, memisahkan U^{235} dari U^{238} membutuhkan biaya tinggi. Hal ini dilakukan dengan memanfaatkan perbedaan kecil dalam tingkat difusi kedua isotop. Adalah tidak mungkin untuk mencapai suatu sistem kritis jika menggunakan uranium alamiah untuk fisi, sebab neutron akan diserap dalam proses non fisi baik oleh U^{235} maupun U^{238} .

13.2 Siklus Neutron pada Reaksi Fisi

Neutron yang dihasilkan pada suatu reaksi fisi memiliki energi berkisar dari nilai energi thermal sampai sekitar 18 Mev. Reaksi fisi dengan bahan fisi U^{235} hanya dapat berlangsung dengan neutron thermal. Untuk itu perlu memperlambat neutron cepat ini menjadi neutron termal dengan menggunakan moderator seperti air, air berat, atau karbon.

Siklus dari neutron cepat adalah

(1) Fisi cepat (ϵ). Karena U^{238} dapat berfisi dengan neutron cepat, maka ada kemungkinan bahwa neutron cepat dapat menghasilkan fisi. Kemungkinan ini dinyatakan dengan ϵ , yang disebut dengan faktor fisi cepat. Dimulai dengan 1 neutron, dengan demikian kita memiliki ($\epsilon > 1$) neutron.

(2) Neutron cepat tidak bocor (P_f). Dalam proses perlambatan ada kesempatan neutron meninggalkan sistem. Jika P_f adalah kemungkinan neutron cepat tidak bocor, kita akan memperoleh ϵP_f pada akhir proses sementara $\epsilon(1-P_f)$ neutron meninggalkan sistem.

(3) Lolos Resonansi (p). U^{238} memiliki puncak resonansi yang amat kuat dalam range energi mulai dari 5 ev sampai 200 ev. Dengan demikian sebelum mencapai energi termal beberapa fraksi dari ϵP_f neutron akan diserap oleh absorpsi resonansi. Diambil p adalah probabilitas lolos resonansi. Pada rata-rata $\epsilon P_f p$ neutron akan mencapai energi termal lolos dari absorpsi resonansi. Fraksi yang diserap pada puncak resonansi adalah $\epsilon P_f(1-p)$.

(4) Tidakkebocoran Termal (P_t). Pada rata-rata, kita memiliki sekarang $\epsilon P_f p$ neutron pada energi termal. Sebelum neutron ini diserap dalam proses yang dapat berfisi dan tidak dapat berfisi, ada beberapa kemungkinan beberapa fraksi akan meninggalkan sistem. Jika kita menyatakan probabilitas ketidkebocoran termal dengan P_t , kita akan ditinggalkan dengan ϵP_f

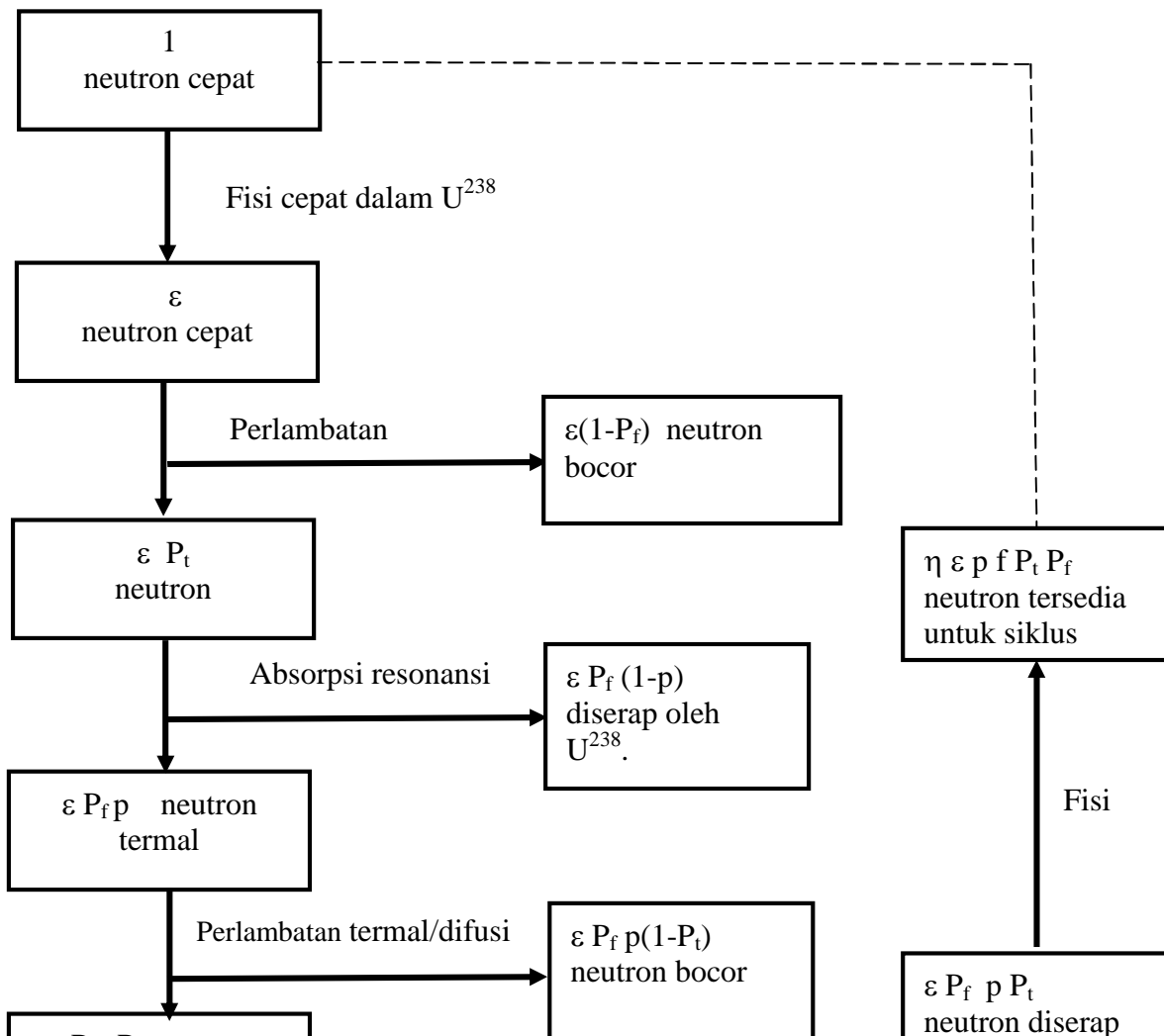
pP_t neutron yang tersedia untuk diserap. Jumlah neutron yang meninggalkan sistem pada energi termal adalah $\epsilon P_f p(1-P_t)$.

(5) Pemanfaatan termal (f). Tidak semua $\epsilon P_f pP_t$ neutron akan diserap oleh uranium. Sebuah fraksi akan hilang karena penyerapan oleh material moderator, dinding, atau bahan lainnya. Fraksi yang tidak hilang dinyatakan dengan f dan disebut dengan faktor pemanfaatan termal. Karena itu jumlah neutron yang diserap oleh uranium adalah $\epsilon P_f pP_t f$, sementara itu rata-rata jumlah neutron yang diserap oleh material lain selain uranium adalah $\epsilon P_f pP_t(1-f)$.

(6) Fisi. Neutron sebanyak $\epsilon P_f pP_t f$ diserap oleh uranium. Jika ν menyatakan jumlah neutron yang dihasilkan dalam suatu fisi U^{235} oleh suatu neutron termal (dalam kasus ini $\nu = 2,5$), maka jumlah neutron yang dihasilkan, η , untuk setiap neutron termal yang diserap oleh uranium adalah

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\nu \Sigma_f^{235}}{\Sigma_f^{235} + \Sigma_c^{235} + \Sigma_c^{238}} \\
 &= \frac{\nu \dagger_f^{235}}{\dagger_f^{235} + \dagger_c^{235} + (N_{238} / N_{235}) \dagger_c^{238}}
 \end{aligned}
 \tag{13.2}$$

dimana \dagger_f^{235} adalah penampang fisi U^{235} untuk neutron termal, \dagger_c^{235} dan \dagger_c^{238}



Gambar 13.1 Daur hidup sebuah neutron cepat dalam sebuah proses yang menghasilkan fisi.

adalah penampang penangkapan untuk proses non fisi oleh masing-masing U^{235} dan U^{238} . Σ menyatakan penampang makroskopik. N_{238} dan N_{235} adalah jumlah atom persatuan volume masing-masing U^{235} dan U^{238} . Untuk U^{235} dalam uranium alamiah, η adalah 1,3, meskipun $v = 2,5$ dan $N_{238}/N_{235} = 0,00715$.

Untuk setiap neutron cepat, jumlah total neutron yang tersedia pada akhir siklus adalah ϵP_f $p P_t f \eta$ dan disebut konstanta reproduktif efektif dari reaktor

$$k_{\text{eff}} = \eta \epsilon p f P_t P_f \quad (13.3)$$

Ini disebut rumus 6 faktor. Semua proses di atas dilukiskan pada Gambar 13.1. Dapat dicatat bahwa η dan ϵ masing-masing kurang dari satu, sementara 4 faktor yang lain, p, f, P_t , dan P_f masing-masing kurang dari satu. Juga η , ϵ , p , dan f hanya tergantung pada sifat dan konfigurasi material reaktor (bahan bakar fisi dan moderator), sementara P_t dan P_f tergantung pada konfigurasi geometris internal, ukuran keseluruhan, dan bentuk reaktor. Jika kita menganggap bahwa ukuran keseluruhan reaktor takhingga, maka total probabilitas takbocor, $P = P_t P_f$ akan sama dengan satu. Dengan demikian dalam kasus ini persamaan direduksi ($P_t = P_f = 1$)

$$k_{\infty} = \eta \epsilon p f \quad (13.4)$$

dimana k_{∞} disebut konstanta reproduksi takhingga. Dengan demikian

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty}P \quad (13.5)$$

Disain suatu reaktor didasarkan pada rumus 6 faktor ini.

13.3 Disain Reaktor Nuklir

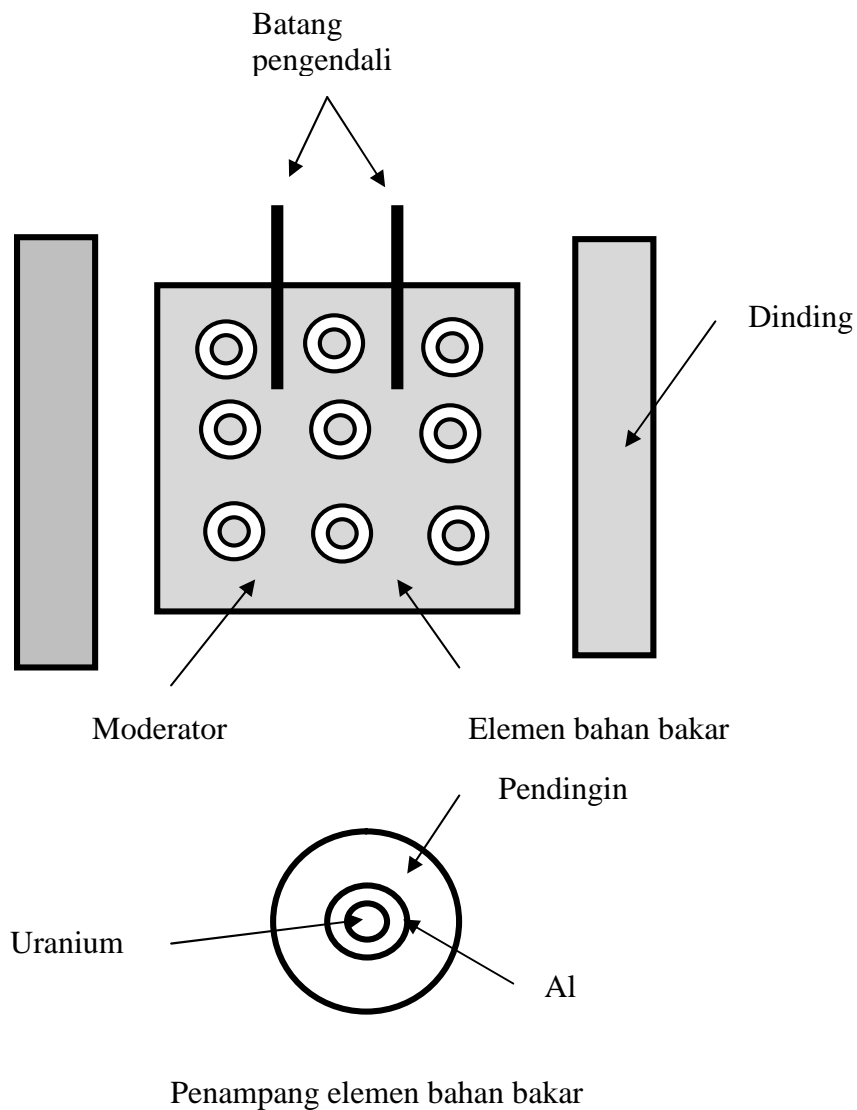
Jika sebuah reaktor menggunakan uranium alamiah sebagai bahan bakar adalah tidak mungkin memperoleh reaksi berantai dengan menggunakan neutron berenergi tinggi atau menengah sebab penampang absorpsi resonansi yang tinggi oleh U^{238} . Jika neutron cepat diperlambat sehingga melewati resonansi tanpa penyerapan, reaksi berantai dengan neutron termal dapat terjadi. Untuk mencapai perlambatan yang cepat dari sebuah neutron cepat, bahan dengan nomor massa yang rendah digunakan sebagai moderator dengan uranium. Mungkin kita berfikir bahwa jika uranium dicampur secara seragam dengan moderator akan diperoleh perlambatan dengan tingkat yang tinggi. Ini akan menyebabkan sebuah reaksi berantai yang divergen tidak akan diperoleh karena penyerapan resonansi oleh U^{238} masih sangat tinggi. Campuran yang homogen antara moderator dengan bahan bakar akan meningkatkan penyerapan oleh moderator. Karena itu suatu reaksi berantai yang divergen tidak akan tercapai di dalam sebuah reaktor termal yang homogen yang menggunakan uranium alamiah.

Suatu reaksi berantai yang divergen akan mungkin dengan menggunakan uranium alamiah hanya apabila reaktor itu merupakan jenis reaktor termal heterogen. Dalam reaktor jenis ini uranium dalam bentuk batang ditempatkan dalam suatu kisi matrik dari material moderator seperti dapat dilihat pada Gambar. Susunan ini memiliki keuntungan yaitu neutron cepat yang dihasilkan pada fisi didalam batang akan meninggalkan batang dan diperlambat di dalam material moderator yang mengelilinginya. Penyerapan resonansi dalam U^{238} akan sangat banyak dikurangi karena hanya U^{238} pada permukaan batang tersedia. Sesudah diperlambat neutron dengan mudah akan masuk ke dalam bahan bakar dan menghasilkan fisi dan reaksi berantai yang divergen dapat berlangsung.

Reaktor termal homogen hanya mungkin beroperasi bila mana uranium diperkaya dengan U^{235} . Hal ini dapat terjadi jika peningkatan ukuran reaktor akan memiliki keuntungan karena menyebabkan nilai P menjadi 1. Keuntungan ini dibatasi oleh fakta bahwa ukuran meningkatkan penyerapan dalam material yang tidak berfisi dan mereduksi nilai f . Variasi f secara pasti berlawanan dengan nilai P yang berkaitan dengan ukuran dan ruang bahan bakar. Nilai yang kompromis

adalah untuk nilai $P = f = 0,95$ sesuai untuk reaktor yang menggunakan uranium alamiah dengan air berat sebagai moderator.

Jumlah energi yang tersedia pada reaktor nuklir besar sekali. Misalnya setiap fisi U^{235} menghasilkan 200 Mev energi secara rata-rata atau $3,2 \times 10^{-11}$ watt second. Satu gram U^{235} akan menghasilkan $8,2 \times 10^{10}$ watt sec ~ 1 MWD (mega



Gambar 13.2 Diagram dari susunan elemen bahan bakar dalam sebuah inti reaktor nuklir dan penampang elemen bahan bakar

watt days). Sebagai perbandingan satu ton batubara akan menghasilkan $\approx 0,36$ MWD kalor. Kita dapat menyimpulkan bahwa

$$1 \text{ ton uranium} \cong 2,7 \times 10^6 \text{ ton batubara}$$

Panas yang dihasilkan dalam teras reaktor diserap oleh pendingin yang kemudian digunakan untuk menghasilkan uap. Uap ini memutar turbin yang kemudian menghasilkan listrik.

Secara umum reaktor nuklir dapat diklasifikasikan atas dua kategori yaitu berdasarkan jenis neutron yang digunakan untuk fisi dan tujuan reaktor.

13.4 Komponen Reaktor

Semua jenis reaktor memiliki elemen pokok yang sama : (a) bahan bakar atau material yang dapat berfisi, (b) moderator, untuk membuat neutron menjadi neutron termal (kecuali reaktor yang menggunakan neutron cepat), (c) reflektor, yang mengelilingi teras reaktor, untuk mereduksi kebocoran neutron yang juga mereduksi ukuran kritis dari reaktor, (d) sungkup atau bejana untuk menjaga pecahan fisi yang radioaktif meninggalkan reaktor, (e) dinding, untuk menjaga neutron dan sinar γ yang membahayakan tubuh terhadap operator reaktor, (f) pendingin, untuk menghilangkan panas dari inti reaktor, (g) sistem kendali, yang digunakan oleh operator untuk menjaga tingkat daya agar tetap normal selama operasi, dan (h) berbagai sistem darurat untuk menjaga operasi dari kegagalan sistem kontrol dan pendingin.

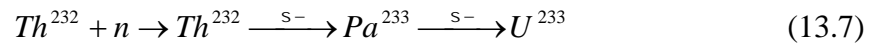
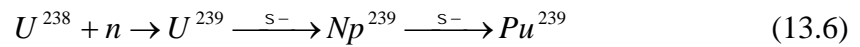
13.4.1 Jenis reaktor

Klasifikasi utama yang digunakan untuk menentukan jenis reaktor adalah penggunaan dari reaktor itu, dan terdapat 3 kategori yaitu : reaktor daya, reaktor penelitian dan reaktor pembiak. Reaktor daya adalah reaktor yang mengubah energi kinetik fisi menjadi kalor dan mengubah energi kalor menjadi energi listrik melalui pemanasan air dan uap yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin atau generator. Disain suatu reaktor daya harus memperhatikan faktor-faktor termodinamika, sehubungan dengan faktor efisiensi kalor dalam teknologi nuklir. Pembangunan bahan bakar reaktor jauh lebih murah biayanya dibandingkan dengan pembuatan dinding dan sungkup/bejana serta peralatan generator listrik.

Reaktor penelitian umumnya didesain untuk menghasilkan neutron untuk penelitian dalam dunia nuklir atau fisika zat padat. Umumnya reaktor beroperasi pada daya rendah 1 – 10 MW.

Reaktor pembiak didesain untuk memiliki efisiensi tinggi untuk mengkonversi material yang tidak dapat berfisi menjadi bahan yang mudah berfisi dengan menggunakan neutron termal. Konversi yang khusus umumnya adalah menggunakan U^{238} menjadi Pu^{239} dan Th^{232}

menjadi U^{233} . Pada kedua kasus konversi melibatkan penangkapan sebuah neutron yang diikuti dengan 2 peluruhan β



13.4.2 Energi neutron

Adalah mungkin bisa untuk mendisain sebuah reaktor yang beroperasi dengan menggunakan neutron termal, sedang dan cepat: (1) reaktor termal : fisi dihasilkan oleh neutron termal yang energinya kurang dari 0,1 ev, (2) reaktor intermediat : fisi dihasilkan oleh neutron dengan energi antara 0,1 ev dan 0,2 Mev, dan (3) reaktor cepat : fisi dihasilkan oleh neutron dengan energi lebih besar dari 0,2 Mev,

Biaya yang timbul jika menggunakan neutron termal sudah dibahas sebelumnya. Salah satu keuntungan dari suatu reaktor neutron sedang (eV sampai keV) adalah membutuhkan ruang yang lebih kecil dibandingkan dengan reaktor neutron termal dan reaktor ini pada awalnya digunakan untuk memutar baling-baling misalnya pada kapal selam. Neutron cepat tidak membutuhkan moderator dan berarti juga tidak memerlukan material moderator seperti air yang mendinginkan bahan bakar. Karena penampang yang lebih rendah dari neutron cepat, reaktor cepat membutuhkan order 10 – 100 kali bahan bakar neutron termal untuk daya yang sama, meskipun begitu karena tidak adanya moderator, inti reaktor cepat jauh lebih kecil volumenya dibandingkan inti reaktor termal.

13.4.3 Jenis bahan bakar

Bahan bakar yang paling umum banyak digunakan adalah uranium alamiah (0,72% U^{235}), uranium yang diperkaya (>0,72% U^{235}), Pu^{239} , dan U^{233} . Dua yang terakhir diperoleh dari reaktor pembiak. Uranium yang diperkaya, yang paling banyak digunakan dalam reaktor daya diperoleh secara biaya mahal karena memerlukan proses yang sangat sensitif akibat kecilnya perbedaan massa U^{235} dan U^{238} . Proses itu adalah difusi gas dimana gas uranium hexafluorida (UF_6) dipaksa melewati penghalang berpori. Koefisien difusi berbanding terbalik dengan akar massa, dan isotop yang lebih ringan berdifusi sedikit lebih cepat karena kecepatan rata-ratanya lebih tinggi dalam campuran dari U^{235} dan U^{238} pada kesetimbangan termal. Pengayaan sesudah satu kali penerobosan melalui perintang amat kecil dalam order 0,4 % relatif (karena itu, awalnya 0,72% U^{235} menjadi $1,004 \times 0,72\%$)

suatu peningkatan yang sangat kecil, dan prosesnya harus diulang ribuan kali sebelum mencapai pengayaan yang tinggi (mendekati murni) U^{235} . Pengayaan U^{235} dan Pu^{239} merupakan bahan untuk bom nuklir, sementara pengayaan 2-3% sudah dapat digunakan untuk reaktor.

13.4.4 Moderator

Moderator yang ideal adalah : (1) murah dan berlimpah, (2) secara kimia stabil, (3) memiliki massa mendekati satu (untuk menyerap sejumlah energi maksimum ketika bertumbukkan dengan neutron, (4) cairan atau padatan dengan densitas yang tinggi, (5) memiliki penampang tangkapan neutron yang minimal. Karbon dalam bentuk grafit memenuhi (1),(2),(4), dan (5) dan sebagai kompensasi untuk kehilangan energi neutron yang relatif kecil per tumbukan jumlah moderator harus ditingkatkan. Air ringan memenuhi (1),(2),(3), dan (4), tetapi proton di dalam air memiliki penampang yang sangat tinggi untuk menangkap neutron ($n + p \rightarrow d + \gamma$). Air berat (D_2O) memiliki penampang yang sangat kecil terhadap tangkapan neutron.

13.4.5 Susunan bahan bakar

Reaktor biasanya diklasifikasikan sebagai heterogen bilamana moderator dan bahan bakar dipisahkan, atau homogen bilamana keduanya digabung bersama. Reaktor homogen lebih mudah untuk dianalisis secara matematik, sementara pada reaktor heterogen perhitungan faktor pemanfaatan termal f dan probabilitas lolos resonansi p menjadi lebih sulit. Sebuah reaktor homogen dengan dengan campuran uranium alamiah-grafit, tidak dapat mencapai keadaan kritis, sementara akan dapat kritis jika disusun secara heterogen.

13.4.6 Pendingin

Pendingin merupakan unsur penting dari sebuah reaktor, tanpa pendingin inti akan meleleh. Dalam merancang sebuah reaktor daya ciri yang utama adalah kemampuan pendingin untuk memindahkan kalor secara efisien. Material pendingin dapat berupa gas (air, CO_2 , helium), air, atau fluida lainnya, atau metal liquid, yang memiliki kapasitas kalor yang besar. Karena uap memiliki kapasitas kalor yang kecil reaktor yang menggunakan air sebagai pendingin harus menjaganya dibawah tekanan yang amat tinggi (dalam order 100 atmosfer) untuk menjaganya tetap berupa cairan di atas titik didihnya yang normal. Ini disebut pressurized-water reactor (PWR).

The boiling-water reactor (BWR) mengalirkan air melalui teras (sebagai moderator) dan kemudian ke dalam peralatan generator sebagai uap. Sebuah bejana tekan yang kuat diperlukan untuk menampung uap. Kedua jenis reaktor ini yang banyak digunakan sebagai reaktor daya, menggunakan air (air ringan) baik sebagai moderator maupun sebagai pendingin.

Canada, dilain pihak yang memiliki uranium alamiah mempunyai kemampuan untuk menghasikan air berat, dengan demikian reaktor daya Canada menggunakan D_2O sebagai moderator (dan menggunakan D_2O atau H_2O sebagai pendingin).

Reaktor dengan grafit sebagai moderator adalah suatu reaktor heterogen yang dapat menggunakan uranium alamiah atau uranium yang diperkaya sebagai bahan bakar. Kebanyakan reaktor ini menggunakan gas sebagai pendingin. Susunan bahan bakar dibuat agar gas mudah mengalir untuk dapat mentransfer kalor dengan baik. Kebanyakan reaktor daya di Inggris adalah reaktor bermoderator grafit, berpendingin gas. Sebagai contoh dari reaktor cepat adalah reaktor pembiak cepat dengan cairan sodium sebagai pendingin.

PERTANYAAN DAN SOAL-SOAL

1. Jelaskan daur sebuah neutron cepat dalam sebuah reaktor
2. Jelaskan fungsi dari masing-masing komponen reaktor.
3. Sebuah reaktor termal beroperasi pada level daya 500 megawatts. Pada laju berapakah U^{235} dikonsumsi untuk fisi.
4. Di dalam suatu reaktor homogen yang mengandung U^{235} dilarutkan dalam air. Berapakah ratio minimum atom U^{235} terhadap molekul air sehingga sistem dalam keadaan kritis. Anggaplah ukuran sistem takhingga.
5. Jika efisiensi untuk konversi kalor ke listrik hanya 5 % berapakah laju fisi U^{235} untuk menghasilkan daya 500 MW.