

**DIKTAT
TEORI DASAR BAHAN NUKLIR**

**PELATIHAN PENGURUS DAN PENGAWAS
INVENTORI BAHAN NUKLIR**



Direktorat Pengembangan Kompetensi
dan
Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran

**BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
2023**

DAFTAR ISI

BAB I PENDAHULUAN.....	3
BAB II DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR	4
2.1. Pengayaan Uranium.....	5
2.2. Fabrikasi Bahan Bakar	5
2.3. Bahan Bakar Dalam Reaktor Nuklir.....	6
2.4. Bahan Bakar Bekas.....	6
2.5. Penyimpanan Sementara.....	6
2.6. Fasilitas Olah-ulang.....	7
2.7. Pemanfaatan Uranium Hasil Olah-ulang.....	7
2.8. Pemanfaatan Plutonium Hasil Olah-ulang.....	7
2.9. Pengiriman Bahan Nuklir.....	8
2.10. Proses Limbah Radioaktif	8
BAB III REAKTOR NUKLIR	8
3.1. Reaksi Fisi.....	10
3.2. Moderator dan Reflektor.....	14
3.3. Bahan Pengendali	15
3.4. Pendingin	17
3.5. Bahan Perisai	17
3.6. Bahan Struktur	19
BAB IV PEMANFAATAN ENERGI NUKLIR.....	21

BAB I

PENDAHULUAN

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi pembelahan inti (nuklir) atau dikenal dengan reaksi fisi berantai yang terkendali. Bagian utama dari reaktor nuklir yaitu: elemen bakar, batang kendali, moderator, pendingin dan perisai. Reaksi fisi berantai terjadi apabila inti dari suatu unsur dapat belah bereaksi dengan neutron termal/lambat yang akan menghasilkan unsur-unsur lain dengan cepat serta menimbulkan energi kalor dan neutron-neutron baru. Reaktor nuklir berdasarkan fungsinya dapat dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu Reaktor Penelitian/Riset dan Reaktor Daya (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir/PLTN)

Tujuan Pembelajaran:

Setelah mempelajari mata diklat ini, peserta dapat menyebutkan bahan nuklir secara umum, jenis bahan nuklir, dan daur bahan nuklir dengan baik.

Indikator Hasil Belajar:

Setelah mengikuti pembelajaran materi ini, peserta mampu:

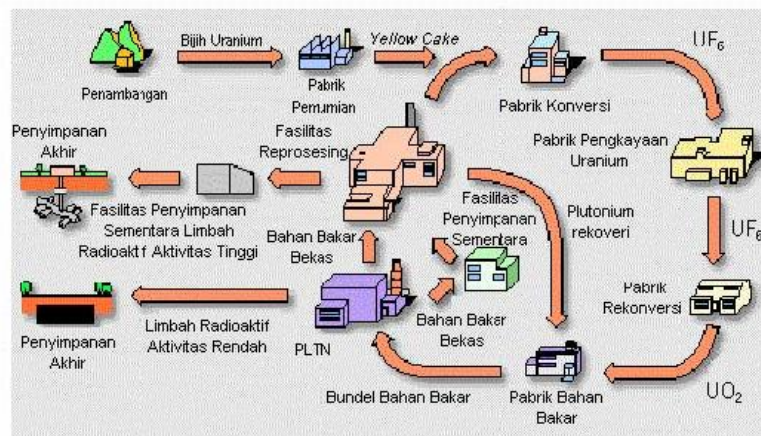
1. menyebutkan daur bahan nuklir dengan baik;
2. menyebutkan reaktor nuklir dengan baik; dan
3. menyebutkan pemanfaatan energi nuklir dengan baik.

BAB II

DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR

Bahan nuklir merupakan bahan yang dapat menghasilkan reaksi pembelahan berantai (bahan fisil) atau bahan yang dapat diubah menjadi bahan yang dapat menghasilkan reaksi pembelahan berantai (bahan fertil). Bahan fisil antara lain U-233, U-235, Pu-239, dan Pu-241, sedangkan yang termasuk bahan fertil yaitu Th-232 dan U-238. Bahan nuklir digunakan sebagai bahan bakar atau sumber energi pada reaktor nuklir (bahan bakar nuklir). Pada uranium alam terkandung uranium dapat belah atau U-235 sebanyak 0,7%, sedangkan agar reaksi berantai dapat berlangsung di dalam reaktor nuklir, dibutuhkan uranium diperkaya yang mengandung U-235 sebesar 3-5%. Oleh karena itu, untuk memanfaatkan bahan nuklir menjadi bahan bakar nuklir serta pengelolaan limbahnya diperlukan proses atau daur bahan bakar nuklir.

Daur bahan bakar nuklir merupakan rangkaian proses yang terdiri dari penambangan bijih uranium, pemurnian, konversi, pengayaan uranium dan konversi ulang menjadi logam uranium. Selanjutnya logam uranium diolah menjadi elemen bakar nuklir melalui proses fabrikasi. Bahan bakar nuklir ini setelah dimasukkan ke dalam reaktor akan mengalami reaksi inti. Telah dijelaskan bahwa pada reaktor riset yang dimanfaatkan adalah neutron yang dihasilkan dalam reaksi inti, sedangkan pada reaktor daya atau PLTN yang dimanfaatkan adalah panas hasil fisi. Uap air yang dihasilkan pada reaktor daya digunakan untuk menggerakkan turbin, sumbu turbin yang berputar dihubungkan dengan generator listrik sehingga menghasilkan energi listrik. Bahan bakar bekas yang tidak digunakan lagi, dikeluarkan dari reaktor untuk selanjutnya disimpan pada tempat penyimpanan sementara sambil melakukan pendinginan. Jika ingin didaur ulang, diangkut menuju fasilitas pengolahan ulang. Unsur uranium sisa pembakaran dan plutonium sebagai hasil belah dipisahkan untuk dimanfaatkan kembali. Rangkaian proses ini disebut daur bahan bakar nuklir (Gambar.1).



Gambar 1. Daur Bahan Bakar Nuklir

2.1. Pengayaan Uranium

Hasil tambang uranium berbentuk bijih uranium, kemudian bijih ini dimurnikan untuk menghasilkan uranium alam. Telah dijelaskan bahwa didalam uranium alam terkandung uranium U-235 sebanyak 0,7%. Dalam reaktor nuklir dibutuhkan uranium diperkaya yang mengandung U-235 sebesar 3-5% untuk reaktor daya sedangkan reaktor TRIGA menggunakan uranium dengan pengkayaan sekitar 20%. Oleh karena itu, uranium harus diproses di fasilitas pengayaan. Uranium heksafluorida (UF_6) merupakan salah satu senyawa uranium berbentuk gas pada temperatur kamar yang digunakan sebagai bahan baku pada fasilitas pengayaan. Uranium berbentuk padat pada suhu kamar harus dikonversi atau diubah menjadi UF_6 . Konversi UF_6 yang telah diperkaya menjadi UO_2 untuk bahan bakar yang digunakan di reaktor nuklir disebut konversi ulang.

2.2. Fabrikasi Bahan Bakar

Pada proses fabrikasi, uranium dalam bentuk UO_2 dimampatkan menjadi pelet. Selanjutnya pelet UO_2 ini disusun dan dimasukkan ke dalam kelongsong logam. Pada reaktor daya beberapa kelongsong disusun menjadi bundel bahan bakar. Bundel bahan bakar dimasukkan ke dalam reaktor nuklir sebagai bahan bakar. Pada reaktor TRIGA bahan bakarnya tidak dibentuk menjadi bundel bahan bakar.

2.3. Bahan Bakar Dalam Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir merupakan tempat bereaksinya U-235 dengan neutron termal dan membelah menjadi inti lain dengan membebaskan 2-3 neutron baru dan menghasilkan panas. Neutron baru hasil pembelahan inti akan bereaksi dengan inti U-235 lainnya dan seterusnya menimbulkan reaksi berantai. Neutron yang bereaksi dengan U-238 akan membentuk plutonium (Pu-239). Plutonium ini memiliki sifat yang sama dengan U-235, yaitu dapat membelah setelah bereaksi dengan neutron untuk menghasilkan energi atau panas. Unsur hasil belah semakin lama semakin banyak, hal ini akan berakibat pada penurunan jumlah reaksi berantai karena mempunyai sifat menyerap neutron. Untuk mencegah penurunan reaksi berantai dibutuhkan penggantian bahan bakar. Proses penggantian dilakukan dengan mengeluarkan bahan bakar lama kemudian diganti dengan bahan bakar baru. Bahan bakar yang telah dikeluarkan dari dalam reaktor disebut bahan bakar bekas.

2.4. Bahan Bakar Bekas

Bahan bakar bekas disimpan di dalam kolam pendingin untuk jangka waktu tertentu, kemudian dikirim ke fasilitas olah-ulang menggunakan wadah khusus. Pengiriman bahan bakar bekas ke tempat penyimpanan antara lain dapat menggunakan kapal laut yang didesain secara khusus.

2.5. Penyimpanan Sementara

Fasilitas penyimpanan sementara dibuat dengan tujuan untuk pengelolaan bahan bakar bekas yang bersifat sementara sampai dilakukan proses olah-ulang. Model penyimpanan bahan bakar bekas ada dua macam yaitu cara basah (di dalam air) dan cara kering (di dalam aliran gas helium atau udara). Penyimpanan cara basah sudah dilakukan selama puluhan tahun dan teknologi ini sudah terbukti aman, walaupun biaya operasi masih cukup besar. Untuk mengatasi masalah ini, telah dikembangkan penyimpanan cara kering.

2.6. Fasilitas Olah-ulang

Bahan bakar bekas yang telah dikirim ke fasilitas olah-ulang disimpan di dalam kolam penyimpanan selama jangka waktu tertentu (kira-kira 180 hari). Bundel bahan bakar dilepas dan setiap kelongsong dipotong menjadi beberapa sentimeter, kemudian potongan dikirim ke bagian lain untuk dilarutkan dengan asam sulfat. Larutan yang terbentuk dipisahkan menjadi larutan yang mengandung unsur hasil belah, uranium dan plutonium. Larutan yang mengandung unsur hasil belah diproses sebagai limbah. Larutan yang mengandung uranium dan plutonium dipisahkan dan masing-masing larutan dimurnikan di fasilitas pemurnian. Kemudian larutan yang mengandung uranium dijadikan serbuk UO_3 dan larutan yang mengandung plutonium diubah menjadi larutan plutonium sulfat, dan menjadi produk akhir fasilitas olah-ulang. Uranium dan plutonium yang dihasilkan dari proses olah-ulang bahan bakar bekas di dalam fasilitas olah-ulang disebut Uranium hasil olah-ulang dan Plutonium hasil olah-ulang.

2.7. Pemanfaatan Uranium Hasil Olah-ulang.

Uranium hasil olah-ulang mempunyai tingkat pengayaan U-235 sekitar 0,8-1%, dan disebut pengayaan rendah karena masih mendekati kadar U-235 dalam uranium alam. Untuk melakukan pengayaan UO_2 hasil olah-ulang diperlukan konversi ke UF_6 sebagai bahan baku pengayaan. UF_6 hasil konversi, meskipun berkadar U-235 rendah tetapi biaya pengayaan masih lebih rendah dibanding bahan baku uranium alam, sehingga sangat ekonomis. Rangkaian proses pemanfaatan uranium hasil olah-ulang menjadi bahan bakar baru disebut Daur Bahan Bakar Nuklir Tertutup.

2.8. Pemanfaatan Plutonium Hasil Olah-ulang

Untuk memperoleh campuran Uranium Plutonium Oksida, larutan plutonium sulfat dicampur dengan larutan uranium sulfat dan dipanaskan menggunakan gelombang mikro. Campuran oksida kemudian dibuat menjadi pelet dengan penekanan dan disusun ke dalam tabung kelongsong bahan bakar. Kelongsong disusun menjadi bundel bahan bakar. Bahan bakar jenis ini disebut dengan Bahan

Bakar Campuran Uranium Plutonium Oksida (bahan bakar *Mixed Oxide/MOX*). Bahan bakar MOX dapat digunakan sebagai bahan bakar reaktor pembiak cepat (*fast breeder reactor/FBR*) dan untuk reaktor air ringan jenis *Plutonium-thermal*.

2.9. Pengiriman Bahan Nuklir

Uranium diperkaya untuk kebutuhan percobaan di laboratorium dalam jumlah kecil, dikirim dalam bentuk logam uranium atau plutonium oksida. Uranium alam dikirim dalam bentuk *yellow cake* (serbuk kuning). Pengiriman bahan bakar bekas hasil olah-ulang dapat dilakukan dengan menggunakan kapal laut yang didesain secara khusus.

2.10. Proses Limbah Radioaktif

Limbah radioaktif yang dimaksud di sini adalah limbah yang dihasilkan dari proses daur bahan bakar nuklir. Limbah radioaktif yang termasuk dalam klasifikasi aktivitas tinggi dihasilkan dari pelarutan bahan bakar selama proses olah-ulang. Kandungan utama limbah tersebut adalah larutan campuran bahan nuklir dan unsur hasil belah. Setelah dipisahkan, larutan hanya mengandung unsur hasil belah. Larutan kemudian dicampur dengan natrium boron oksida untuk dipadatkan menjadi gelas melalui proses pemanasan dan pendinginan (*vitrifikasi*), untuk selanjutnya disimpan selama 30-50 tahun di fasilitas penyimpanan sementara, kemudian disimpan di tempat penyimpanan limbah lestari (*Geological Disposal*).

Jika seluruh rangkaian proses mulai dari penambangan uranium sampai dengan olah-ulang limbah dan penyimpanan akhir dapat dilakukan, maka sempurna lah rangkaian daur bahan bakar nuklir tersebut.

BAB III

REAKTOR NUKLIR

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi pembelahan inti (nuklir) atau dikenal dengan reaksi fisi berantai yang terkendali. Bagian utama dari reaktor nuklir yaitu: elemen bakar, batang kendali, moderator, pendingin dan perisai. Reaksi fisi berantai terjadi apabila inti dari suatu unsur dapat belah (Uranium-235, Uranium-233) bereaksi dengan neutron termal/lambat yang akan menghasilkan unsur-unsur lain dengan cepat serta menimbulkan energi kalor dan neutron-neutron baru. Reaktor nuklir berdasarkan fungsinya dapat dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu:

1. Reaktor Penelitian/Riset
2. Reaktor Daya (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir/PLTN)

Pada reaktor penelitian, yang diutamakan adalah pemanfaatan radiasi neutron yang dihasilkan dari reaksi nuklir untuk keperluan berbagai penelitian dan produksi radioisotop. Sedangkan kalor yang dihasilkan dirancang sekecil mungkin, sehingga dapat dibuang ke lingkungan. Pengambilan kalor pada reaktor dilakukan dengan sistem pendingin yang terdiri dari sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Kalor yang berasal dari teras reaktor dibawa ke sistem pendingin primer kemudian dilewatkan melalui alat penukar kalor dan selanjutnya kalor dibuang ke lingkungan melalui sistem pendingin sekunder. Perlu diketahui bahwa pada alat penukar kalor sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder tidak terjadi kontak langsung antara uap/air yang mengandung radiasi dengan air pendingin yang dibuang ke lingkungan.

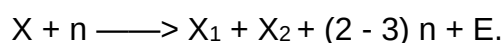
Pada reaktor daya yang dimanfaatkan adalah uap panas bersuhu dan bertekanan tinggi (E atau Q) yang dihasilkan oleh reaksi fisi untuk memutar turbin, sedangkan neutron cepat dihasilkan diubah menjadi neutron lambat untuk berlangsungnya reaksi berantai dan sebagian lagi tidak dimanfaatkan. Reaksi fisi berantai hanya terjadi apabila neutron termal/lambat mampu menembak Uranium-235 yang lainnya hingga terjadilah reaksi berantai secara terus menerus. Cara mengubah neutron yang berkecepatan tinggi menjadi neutron berkecepatan rendah (neutron lambat) adalah dengan menumbukkannya pada inti atom hidrogen dalam air. Jadi air di dalam kolam reaktor ini berfungsi sebagai pemerlambat (moderator), sebagai pendingin dan juga sebagai perisai radiasi. Beberapa bahan pada umumnya yang dipergunakan sebagai bahan pendingin reaktor nuklir adalah air ringan (H_2O), air berat (D_2O), gas dan grafit.

Ditemukannya reaksi pembelahan nuklir oleh sarjana-sarjana Jerman Otto Hahn dan Fritz Strausman pada bulan Januari tahun 1939 telah membuka pintu bagi perkembangan tenaga nuklir. Adapun permulaan zaman tenaga nuklir sesungguhnya terjadi kira-kira tiga tahun kemudian yaitu ketika sekelompok sarjana di bawah pimpinan Enrico Fermi dapat membuktikan bahwa reaksi pembelahan nuklir berantai dapat dilaksanakan dan lebih penting lagi yaitu bahwa reaksi tersebut dapat dikendalikan. Percobaan Fermi dengan reaktor nuklir yang pertama dimulai pada tanggal 2 Desember 1942 di sebuah laboratorium sederhana di bawah stadion Universitas Chicago. Percobaan tersebut terutama dimaksudkan untuk menunjang program persenjataan nuklir Amerika Serikat selama perang dunia ke-2.

Setelah perang dunia ke-2 selesai, gagasan untuk memanfaatkan tenaga nuklir untuk maksud damai mulai berkembang. Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang pertama di Amerika Serikat mulai bekerja bulan Desember 1957 di Shippingport, Pennsylvania. Sejak itu, berpuluh-puluh PLTN lain mulai dibangun dan mulai membangkitkan tenaga listrik untuk maksud-maksud damai. Dalam akhir tahun 1960-an, mulai dibangun PLTN yang berukuran besar dan mampu membangkitkan tenaga listrik secara ekonomis. Sejak tahun 1967, pesanan-pesanan PLTN mulai melonjak tidak saja di Amerika Serikat tetapi juga di negara-negara lain di seluruh dunia.

3.1. Reaksi Fisi

Reaktor nuklir adalah tempat reaksi nuklir terjadi. Dalam hal ini, pengertian sehari-hari yang dipakai ialah reaksi inti. Reaksi fisi adalah suatu reaksi pembelahan, yang disebabkan oleh neutron yang secara umum dapat ditulis sebagai:



Beberapa hal yang perlu diketahui dalam jenis reaksi tersebut adalah:

- 1). X disebut inti bahan fisil (*fisile material*), yang secara populer disebut "bahan bakar" karena dalam reaksi ini dibebaskan sejumlah energi. Hanya beberapa inti dapat bereaksi fisi yaitu ^{238}U , ^{235}U , ^{233}U dan ^{239}Pu di mana kedua unsur

terakhir merupakan unsur buatan manusia karena tidak terdapat di alam sebagai hasil dari reaksi inti neutron dengan ^{232}Th dan ^{238}U .

- 2). Keboleh jadian suatu inti berfisi dinyatakan dengan σ_f atau *fission microscopic cross section* (penampang fisi mikroskopik). Besaran tersebut tergantung dari energi neutron yang bereaksi dengan suatu inti-tertentu. Sebagai contoh dapat disebutkan bahwa nilai σ_f ^{238}U besar pada energi neutron rendah (termal) tetapi kecil pada energi tinggi. Sebaliknya nilai σ_f ^{238}U kecil pada saat neutron berenergi besar. Untuk ^{239}Pu dan ^{233}U mempunyai σ_f besar pada energi tinggi, oleh karena itu bahan ini digunakan sebagai bahan bakar pada reaktor cepat.
- 3). Dari reaksi dihasilkan dua inti baru sebagai hasil fisi, X_1 dan X_2 yang berupa inti-inti yang tidak stabil. Untuk menjadi stabil inti-inti tersebut meluruh (*decay*) dengan mengeluarkan sinar-sinar maupun partikel.
- 4). Adanya neutron-neutron baru yang dihasilkan dari reaksi inti tersebut dapat melanjutkan reaksi fisi hingga mungkin terjadi reaksi berantai, dan pada keadaan tertentu bila tidak dikendalikan maka reaksi berantai tersebut dapat menjadi suatu ledakan. Reaksi nuklir yang tidak terkendali merupakan prinsip kerja bom nuklir. Neutron yang dihasilkan oleh fisi mempunyai energi yang tinggi, ± 2 MeV, jika fisi diharapkan terjadi pada E_n rendah (energi termal 0,025 eV), maka neutron yang baru lahir tersebut harus diturunkan energinya dahulu dengan jalan hamburan-hamburan. Di dalam reaktor neutron mempunyai kemungkinan-kemungkinan untuk:
 - a. diserap tanpa menimbulkan fisi
 - b. diserap mengakibatkan fisi
 - c. hilang dari sistim
 - d. hamburan

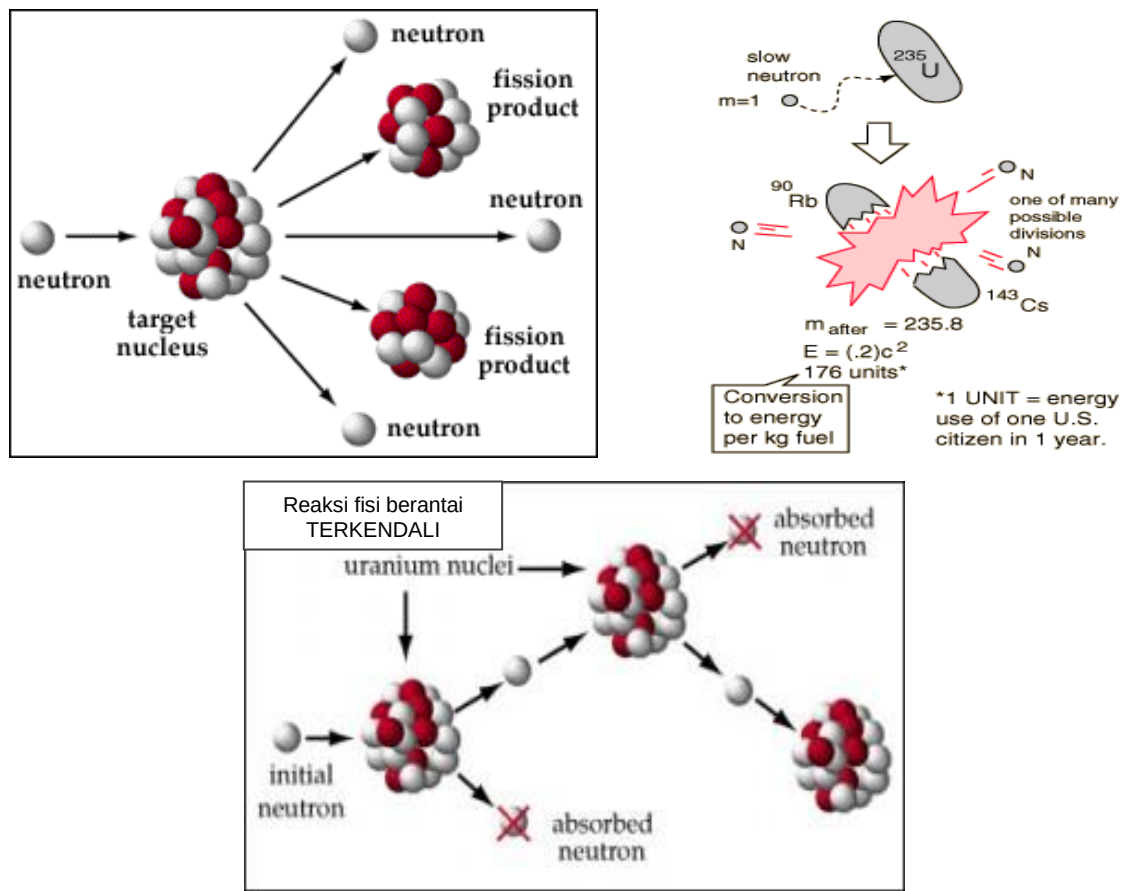
Jadi penurunan energi neutron berkompetisi dengan kemungkinan-kemungkinan yang lain, dan untuk dapat menghitung masing-masing kemungkinan perlu diselidiki mekanisme reaksi masing-masing.

- 5). Reaksi fisi mengeluarkan energi total $E = 200$ MeV. Dengan menggunakan data konversi satuan dan data fisika, dapat dihitung bahwa bila semua inti-inti 1 gram uranium melakukan fisi maka kalor yang dikeluarkan setara dengan kalor

yang dihasilkan oleh pembakaran 1 ton batu bara. Jelas dari gambaran tersebut bahwa, kalor yang dikeluarkan dari reaksi inti sangat besar.

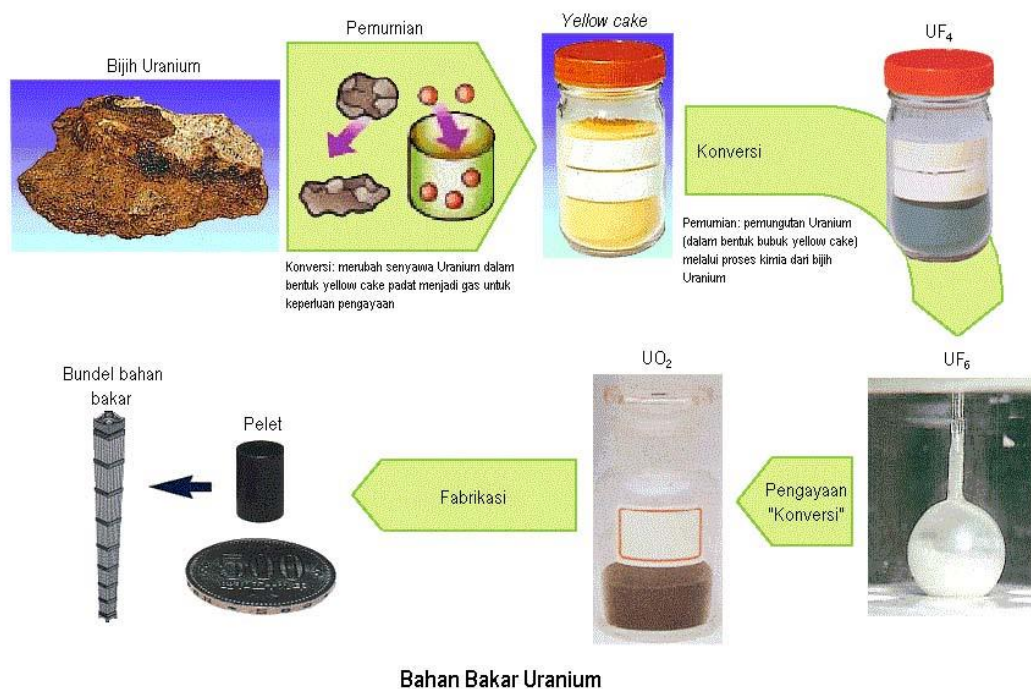
Telah dijelaskan bahwa reaktor yang lazim dipakai saat ini bekerja atas dasar reaksi fisi (pemecahan) inti atom. Sebagai bahan bakar umumnya digunakan Uranium ^{235}U yang kandungannya telah diperkaya. Uranium alam mempunyai kandungan ^{235}U hanya sekitar 0,7%, selebihnya adalah ^{238}U . Untuk memecah inti isotop Uranium digunakan neutron lambat (*'thermalneutron'*). Uranium yang menangkap neutron segera menjadi tidak stabil. Inti Uranium yang tidak stabil hanya dapat bertahan selama kurang lebih sepertriliun detik (10^{-12} detik) sebelum mengalami proses fisi menjadi inti-inti X_1 dan X_2 serta sekitar dua sampai tiga neutron yang siap untuk memecah inti ^{235}U lainnya. Kemudian ketiga neutron tadi diserap oleh inti-inti isotop Uranium lain, tiga proses yang sama akan terjadi dengan produksi akhir sekitar sembilan neutron. Proses berulang-ulang ini dinamakan reaksi berantai (*'chain reaction'*) yang merupakan prinsip kerja reaktor. Pada setiap proses pemecahan tadi, inti atom akan melepaskan energi yang sesuai dengan hilangnya jumlah massa inti-inti di akhir proses rumus $E=mc^2$. Jadi jumlah energi yang dihasilkan akan sebanding dengan banyak proses yang terjadi dan sebanding dengan jumlah neutron yang dihasilkan.

Untuk mengendalikan atau mengatur reaksi berantai dalam reaktor nuklir digunakan bahan yang dapat menyerap neutron misalnya Boron dan Cadmium, yang bertujuan untuk mengatur populasi neutron. Dengan mengatur populasi neutron ini dapat ditentukan tingkat daya raktor, bahkan reaksi dapat dihentikan sama sekali (tingkat daya mencapai titik 0) pada saat semua neutron terserap oleh bahan penyerap. Perangkat pengatur populasi neutron pada reaktor ini disebut batang kendali. Jika batang kendali disisipkan penuh diantara elemen bakar, maka batang kendali akan menyerap neutron secara maksimum sehingga reaksi berantai akan dihentikan dan daya serap batang kendali akan berkurang bila batang kendali ditarik menjauhi elemen bakar.



Gambar 2. Reaksi fisi (pembelahan)

Pada hakekatnya reaktor nuklir itu adalah suatu wadah yang mengandung bahan nuklir yang dapat membelah, yang disusun sedemikian sehingga suatu reaksi berantai dapat berjalan dalam keadaan dan kondisi yang terkendali. Dengan sendirinya syarat agar suatu bahan dapat dipergunakan sebagai bahan bakar adalah bahwa bahan tersebut dapat mengadakan fisi atau pembelahan atom. Untuk maksud ini dikenal hanya tiga macam isotop, yaitu ^{235}U , ^{239}Pu dan ^{233}U . Diantara isotop ini hanya ^{235}U yang terdapat dalam alam, yaitu dengan kadar 0,7% dalam uranium alam, sedangkan selebihnya terdiri dari ^{235}U dan sedikit ^{234}U .



Sumber: <http://next-stm.jst.go.jp/images/04/04-01-01-01/02.gif> (Agt 2003)

Gambar 3. Bahan Bakar Uranium

Bahan bakar uranium biasanya dipergunakan dalam bentuk padat, meskipun dalam berbagai reaktor eksperimentil dalam tahun limapuluhan sering pula dipergunakan sebagai larutan atau cairan dalam bentuk garam uranium (plutonium). Dalam bentuk padat bahan bakar uranium umumnya dipergunakan sebagai oksida, yaitu UO₂, karena ternyata bahwa dalam bentuk logam murni terdapat keberatan-keberatan yang secara teknik sukar dapat dipecahkan.

3.2. Moderator dan Reflektor

Neutron yang dilepaskan oleh fisi mempunyai energi kinetik yang relatif sangat tinggi (sekitar 2 MeV) dengan kecepatan yang sangat tinggi. Agar neutron dapat menyebabkan fisi yang berikutnya lagi, energinya harus dikurangi sampai mencapai energi termik (0,025 eV). Untuk memperlambat neutron cepat sampai mencapai tingkat energi yang lebih rendah, neutron yang berenergi tinggi itu ditumbukkan pada atom-atom yang terdapat dalam bahan-bahan tertentu, yang disebut moderator. Syarat untuk memilih dan menentukan bahan moderator (dan reflektor) adalah:

- 1) Pada tiap tumbukan terdapat kehilangan energi neutron yang besar.

- 2) Penampang penyerapan yang rendah.
- 3) Penampang penghamburan yang tinggi.

Zat yang mengandung hidrogen merupakan moderator yang baik jika dilihat pada kehilangan energi neutron setelah terjadi tumbukan. Akan tetapi hidrogen mempunyai penampang penyerapan yang relatif tinggi, yang dilihat dari sudut ekonomi neutron tidak menguntungkan. Dalam bentuk persenyawaan, misalnya air normal dan hidrida logam, zat hidrogen itu dapat dipakai sebagai moderator, asalkan dipergunakan uranium diperkaya sebagai bahan bakar. Bahan-bahan lain yang dipergunakan sebagai moderator adalah D_2O , grafit, berillium dan berillium oksida.

Reflektor dipasang disekeliling teras reaktor dengan maksud agar neutron yang dihamburkan keluar dapat dipantulkan kembali ke teras reaktor. Dengan demikian kebocoran neutron dapat dikurangi. Sifat reflektor jadinya hampir sama dengan moderator, kadang-kadang moderator yang mempunyai sifat yang baik dapat dipergunakan sekaligus sebagai reflektor. Akan tetapi dalam reaktor pembiak cepat yang tidak memerlukan bahan moderator, dipergunakan suatu bahan sebagai reflektor, yang fungsinya hanyalah untuk memantulkan neutron cepat kembali ke teras reaktor.

3.3. Bahan Pengendali

Untuk menjalankan reaktor nuklir dengan baik diperlukan reaksi pembelahan berantai yang dapat dikendalikan secara teliti. Syarat utama bagi pengendalian reaktor adalah bahwa keadaan kritis dan nyaris super-kritis dapat tercapai dengan lancar dan teratur. Kemudian kenaikan daya harus dapat tercapai dengan kecepatan yang teratur pula, sedangkan pada tiap tingkat daya hendaknya dapat tercapai suatu keadaan yang stabil. Syarat lain adalah bahwa tiap keadaan transien (perubahan cepat yang tidak terkendali dalam reaktor) dapat dikoreksi dengan penggunaan mekanik pengendalian. Akhirnya dikehendaki pula bahwa reaktor pada tiap waktu dapat diberhentikan (*shutdown*) atau dapat dijalankan (*startup*).

Pengendalian reaktor biasanya dapat dilakukan dengan mengatur banyaknya penyerapan neutron. Dalam tipe-tipe reaktor yang tertentu,

pengendalian dilakukan dengan mengatur pembangkitan neutron. Contohnya dalam tipe bahan bakar cair dengan mengubah konsentrasi bahan bakar.

Pengendalian penyerapan neutron dilakukan dengan mengatur posisi batang-batang pengendali terhadap teras reaktor. Batang pengendali mengandung bahan yang memiliki penampang penyerapan neutron yang tinggi. Dalam operasi jangka panjang perlu diperhatikan empat faktor, yaitu:

- 1) Depleksi bahan bakar (penurunan fraksi bakar).
- 2) Tambahan bahan bakar baru.
- 3) Akumulasi racun radioaktif.
- 4) *Burnout* batang pengendali.

Syarat-syarat bahan untuk batang pengendali adalah sebagai berikut:

- 1) Dapat menyerap neutron dengan mudah.
- 2) Mempunyai kekuatan mekanik yang cukup besar.
- 3) Mempunyai massa yang rendah (untuk dapat bergerak dengan cepat).
- 4) Tahan korosi.
- 5) Stabil dalam lingkungan radiasi dan suhu tinggi.
- 6) Dapat memindahkan kalor dengan baik.

Sebagai bahan batang pengendali biasanya dipergunakan paduan logam kadmium (Cd) atau borium (B, boron). Kadmium murni adalah logam berwarna putih kebiru-biruan yang sangat lunak. Sebagai logam murni kadmium tidak dapat dipergunakan sebagai bahan pengendali karena titik leburnya relatif rendah (320°C) sedangkan pada suhu tinggi mudah dioksidasi menjadi serbuk berwarna coklat. Sebagai bahan pengendali biasanya kadmium dicampur dengan perak dan indium sehingga membentuk paduan logam dengan sifat mekaniknya cukup kuat.

Borium murni tidak mempunyai sifat seperti logam, titik leburnya sangat tinggi (2100°C) dan kekerasan kristalnya hanya dilebihi oleh intan. Sebagai bahan pengendali, borium biasanya dipergunakan sebagai karbida (B_4C), sebagai paduan logam dengan aluminium (boral) dan belakangan ini sebagai boron baja (*boron steel*).

3.4. Pendingin

Setiap inti atom U-235 yang mengalami pembelahan melepaskan sejumlah energi sebesar kira-kira 200 MeV, yang kemudian hampir seluruhnya keluar dalam bentuk kalor. Suatu zat pendingin diperlukan untuk menghindarkan terjadinya suhu yang berlebihan dalam bejana reaktor.

Sifat-sifat yang harus dimiliki oleh zat pendingin, antara lain:

- 1) Mempunyai penyerapan neutron yang rendah.
- 2) Mempunyai perpindahan kalor yang baik.
- 3) Dapat menggunakan daya pompa yang rendah.
- 4) Mempunyai titik beku yang rendah.
- 5) Mempunyai titik didih yang tinggi.
- 6) Stabil dalam lingkungan radiasi dan suhu tinggi.
- 7) Tidak peka terhadap keradioaktifan yang di-induksi.
- 8) Tidak korosi.
- 9) Aman dalam penanganan.

Berbagai bahan yang dapat dipergunakan sebagai pendingin, yaitu:

- 1) Bentuk gas: udara, helium, CO₂, uap
- 2) Bentuk cair: air ringan (H₂O), air berat (D₂O)
- 3) Logam cair: Na, NaK

3.5. Bahan Perisai

Dalam reaktor yang sedang beroperasi akan terdapat berbagai macam radiasi yaitu partikel alfa dan beta, fragmen (produk) pembelahan, proton, sinar gamma dan neutron. Proteksi terhadap radiasi yang berbahaya ini dilakukan dengan memasang bahan perisai sebagai pelindung disekitar bejana reaktor.

Partikel alfa merupakan inti helium, terdiri dari dua neutron dan dua proton dan oleh karena itu mengandung muatan listrik positif yang relatif besar. Partikel alfa diemisi selama peluruhan radioaktif oleh isotop radioaktif dengan massa berat dan energi diskrit yang khas untuk isotop tersebut dan besarnya pada umumnya lebih dari 5 MeV. Partikel alfa melepaskan energinya dalam udara dengan membentuk ion. Jarak tempuh partikel alfa dalam udara hanya 2 - 4 cm dan karena itu radiasi alfa tidak merupakan suatu problem dalam disain perisai. Proton juga

menyebabkan ionisasi dalam udara, meskipun kurang karena muatan listriknya lebih kecil. Jarak tempuh proton kira-kira 5 - 10 kali jarak tempuh partikel alfa, akan tetapi seperti juga partikel alfa, proton tidak menimbulkan kesulitan dalam desain perisai. Partikel beta (elektron dan positron) di-emisi dengan energi yang meliputi spektrum yang luas dengan kecepatan yang lebih besar dari pada partikel alfa. Partikel beta dapat juga menimbulkan radiasi jika melalui medan listrik inti atom berat. Pelepasan energi ini timbul sebagai sinar X dengan spektrum yang kontinyu dan disebut "*bremsstrahlung*", yang mengandung bahaya disamping partikel betanya sendiri. Positron mempunyai sifat yang sama seperti elektron akan tetapi lain dari itu ia dapat bereaksi dengan elektron menurut reaksi annihilasi dengan menimbulkan dua foton gamma yang masing-masing berenergi 0,51 MeV.

Neutron, seperti juga sinar gamma, mempunyai daya tembus yang cukup besar. Oleh karena neutron tidak mempunyai muatan listrik maka cara satu-satunya agar neutron melepaskan energinya adalah dengan tumbukan, hamburan elastis dan tidak elastis dan penyerapan. Kesulitan yang timbul untuk menahan neutron adalah karena pada umumnya penyerapan neutron oleh bahan disertai dengan reaksi (n, gamma). Jadi meskipun neutron dapat ditahan, akan tetapi segera diikuti oleh emisi gamma. Dengan demikian suatu perisai untuk menahan neutron harus juga sanggup untuk menahan sinar gamma yang dikeluarkan pada akhir jarak tempuh neutron.

Jika diringkaskan, syarat untuk bahan perisai adalah:

- 1) Dapat memperlambat neutron
- 2) Dapat menyerap neutron
- 3) Dapat menyerap radiasi gamma

Bahan-bahan yang dipergunakan sebagai perisai:

- 1) Air ringan
- 2) Beton, dicampuri dengan bahan lainnya, misalnya barit
- 3) Logam, seperti Fe, Pb, Bi, W, Boral dan lain-lain.

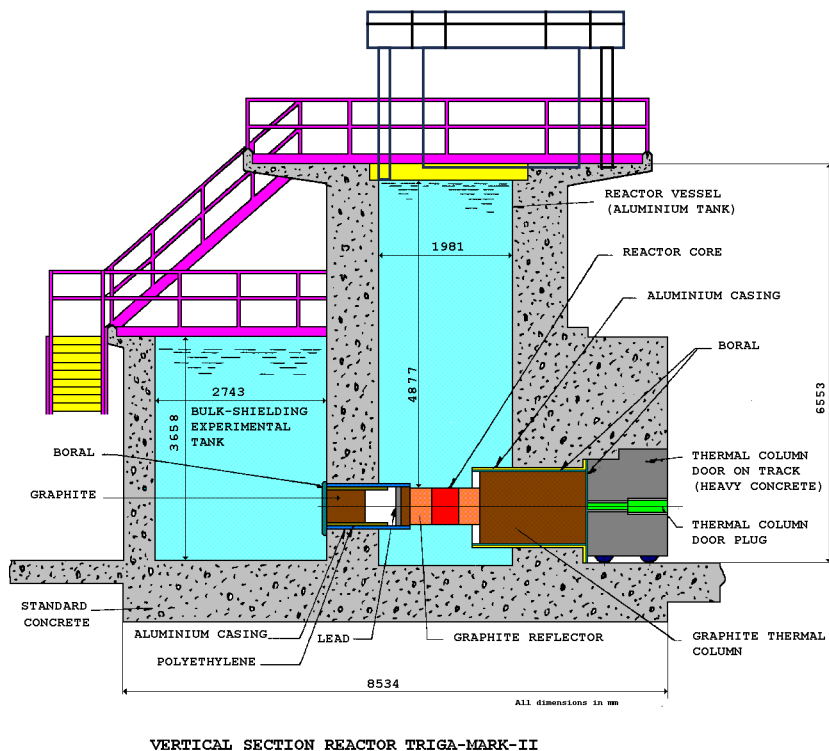
3.6. Bahan Struktur

Dalam reaktor dengan disain tertentu material untuk bahan bakar moderator (reflektor), pengendalian, pendinginan dan perisai dipilih sedemiki sehingga memenuhi syarat-syarat yang khusus berlaku untuk reaktor tersebut. Biasanya bahan-bahan yang disebut tidak pasti mempunyai sifat fisika dan mekanika yang baik pula. Oleh karena itu untuk menambah kekuatan konstruksi reaktor diperlukan bahan-bahan lain yang biasanya, dilihat dari sudut ekonomi neutron, merugikan, akan tetapi diperlukan juga, agar komponen komponen tetap utuh dalam disainnya yang semula.

Untuk bahan truktur dalam bejana reaktor berlaku syarat-syarat berikut:

- 1) Mempunyai penyerapan neutron yang rendah.
- 2) Stabil dalam lingkungan radiasi dan suhu tinggi.
- 3) Mempunyai kekuatan mekanik yang baik.
- 4) Tahan korosi.
- 5) Mempunyai sifat perpindahan kalor yang baik.

Sebagai bahan struktur dalam bejana reaktor biasanya dipergunakan besi-baja, aluminium, zirkonium, nikel, pada umumnya dalam bentuk paduan logam.



Gambar 2. Penampang verikal reaktor TRIGA 2000 Bandung

BAB IV

PEMANFAATAN ENERGI NUKLIR

Reaktor nuklir dapat digolongkan menurut tujuannya, yaitu untuk penelitian, pembangkit daya atau untuk produksi. Penggolongan menurut cara ini bukanlah eksklusif dalam tujuannya masing-masing, akan tetapi hanya bermaksud untuk menonjolkan tujuan utamanya.

Reaktor penelitian didesain untuk menghasilkan neutron dan dipergunakan untuk berbagai eksperimen fisika reaktor, untuk menghasilkan radioisotop, untuk penelitian dalam berbagai bidang, pengamatan, terutama fisika, kimia dan biologi, untuk menguji dan mengadakan evaluasi terhadap berbagai, komponen nuklir yang didisain untuk suatu reaktor daya dan untuk maksud pendidikan dan latihan. Reaktor uji material adalah reaktor penelitian yang menghasilkan neutron dengan fluks yang tinggi, yaitu dalam orde 10^{14} – 10^{16} n/cm²s.

Tujuan utama reaktor daya adalah untuk pembangkitan listrik. Selain itu, uap kalor yang dihasilkan sering dipergunakan dalam perindustrian sebagai kalor proses (*process heat*), untuk pemanasan gedung dan untuk menawarkan air laut (desalinasi).

Reaktor produksi dalam tahun lima puluhan dibangun khusus untuk menghasilkan Pu-239 dari U-238, kemudian reaktor-reaktor produksi yang masih beroperasi itu dimodifikasi sehingga juga dapat membangkitkan listrik, sedangkan produksi plutonium kini menjadi tujuan sekunder, oleh karena persediaan bahan ini telah mulai berlebihan.

Manfaat suatu sistem pembangkit tenaga dapat dinilai dengan mudah apabila sistem tadi dibandingkan dengan sistem pembangkit tenaga lain sehingga kelebihan dan kekurangannya dapat diperinci dengan jelas. Dalam hal ini tenaga nuklir harus dibandingkan dengan tenaga fosil karena tenaga fosil dewasa ini memikul sebagian besar kebutuhan tenaga di dunia. Karena bentuk sumber bahan bakar fosil yang masih melimpah cadangannya di bumi adalah batu bara, maka perbandingan akan dilakukan terhadap sistem pembangkit tenaga batu bara.

Dibandingkan dengan Pusat Listrik Tenaga Batu-bara, Pusat Listrik Tenaga Nuklir mempunyai keuntungan-keuntungan sebagai berikut:

- 1) tidak mencemarkan udara
- 2) menghasilkan bahan-bahan sisa padat lebih sedikit
- 3) cadangan sumber bahan bakar nuklir melimpah
- 4) penyediaan bahan bakarnya memerlukan penambangan yang lebih sedikit
- 5) lebih ekonomis
- 6) persoalan pangangkutan bahan bakar lebih mudah
- 7) pemilihan letak lebih luwes.

Sebaliknya, PLTN mempunyai beberapa kekurangan antara lain sebagai berikut:

1. Menghasilkan bahan sisa radioaktif yang berumur sangat panjang sehingga harus disimpan dan diamankan untuk jangka waktu yang sangat lama.
2. Dapat melepaskan bahan-bahan radioaktif. Perlu ditambahkan bahwa pelepasannya adalah sedemikian rendahnya sehingga tidak begitu berarti apabila dibandingkan dengan latar belakang radiasi yang sudah ada dalam alam. Pelepasan bahan-bahan radioaktif dari suatu Pusat Listrik Tenaga Batu-bara yang berasal dari radio-aktivitas alam dalam batu bara dapat melebihi pelepasan radioaktif dari Pusat Listrik Tenaga Nuklir.
3. Dalam PLTN terdapat himpunan bahan-bahan radioaktif dalam jumlah amat besar yang harus dikungkung, dalam keadaan bagaimanapun juga. Oleh karena itu, segi-segi keselamatan yang bersangkutan dengan kemungkinan terjadinya kecelakaan dapat lebih berat dibandingkan dengan PLT-Batu bara.
4. Modal yang diperlukan untuk pembangunan PLTN lebih besar dan waktu pembangunannya lebih lama dibandingkan dengan PLT-Batubara.

Pada umumnya dapatlah dikatakan bahwa keberatan-keberatan yang ditujukan terhadap PLTN dewasa ini lebih bersifat emosional dari pada riil yaitu sebagai akibat dari gambaran tenaga nuklir sebagai tenaga penghancur yang maha dahsyat, dengan diledakkannya dua buah bom atom di Hiroshima dan Nagasaki dalam Perang Dunia ke-2 yang lalu. Ditinjau dari segi teknik, hampir semua persoalan yang bersangkutan dengan operasi PLTN telah tersedia

pemecahannya dewasa ini. Hal ini terbukti dari sejarah operasi PLTN, yang jumlahnya dewasa ini sudah hampir 400 di seluruh dunia, yang telah berjalan dengan aman sampai saat ini tanpa terjadi kecelakaan yang berarti. Pada dasarnya, persoalan-persoalan yang bersangkutan dengan pelepasan bahan radioaktif, pembuangan bahan sisa dan persoalan keselamatan lain hanyalah merupakan persoalan biaya. Dengan mengeluarkan biaya yang lebih besar, kemungkinan terjadinya kecelakaan dapat ditekan menjadi lebih rendah. Tetapi sudah jelas bahwa kemungkinan terjadinya kecelakaan tersebut tidaklah mungkin untuk ditiadakan sama sekali. Hal ini berlaku pula untuk setiap sistem teknologi lain yang manapun.