

BAB II

BEBERAPA TIPE REAKTOR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

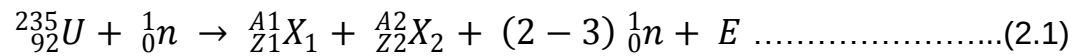
2.1 Energi Nuklir

Energi nuklir berasal dari perubahan sebagian massa inti dan keluar dalam bentuk panas. Dilihat dari proses berlangsungnya, ada dua jenis reaksi nuklir, yaitu reaksi nuklir berantai tak terkendali dan reaksi nuklir berantai terkendali. Reaksi nuklir tak terkendali terjadi misal pada ledakan bom nuklir. Dalam peristiwa ini reaksi nuklir sengaja tidak dikendalikan agar dihasilkan panas yang luar biasa besarnya sehingga ledakan bom memiliki daya rusak yang maksimal. Agar reaksi nuklir yang terjadi dapat dikendalikan secara aman dan energi yang dibebaskan dari reaksi nuklir tersebut dapat dimanfaatkan, maka manusia berusaha untuk membuat suatu sarana reaksi yang dikenal sebagai reaktor nuklir. Jadi reaktor nuklir sebetulnya hanyalah sarana atau perangkat dimana reaksi nuklir berantai terkendali dapat berlangsung. Reaksi berantai di dalam reaktor nuklir ini tentu sangat berbeda dengan reaksi berantai pada ledakan bom nuklir.

2.2 Prinsip Dasar Reaksi Nuklir

Energi listrik yang dibangkitkan pada PLTN merupakan hasil pemanfaatan reaksi pembelahan inti uranium didalam reaktor, dimana energi panas yang dihasilkan dari reaksi tersebut dipindahkan oleh zat pendingin ke pembangkit uap guna menghasilkan uap yang akan digunakan untuk memutar turbin yang dikopel mekanik dengan generator, sedang neutron cepat yang dihasilkan reaksi

pembelahan inti tersebut diperlambat oleh moderator guna menjamin kelangsungan reaksi pembelahan inti yang berikutnya. Reaksi pembelahan inti yang terjadi di reaktor merupakan reaksi pembelahan yang terkendali. Reaksi pembelahan inti tersebut dapat dituliskan :



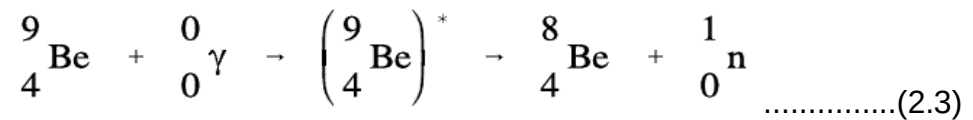
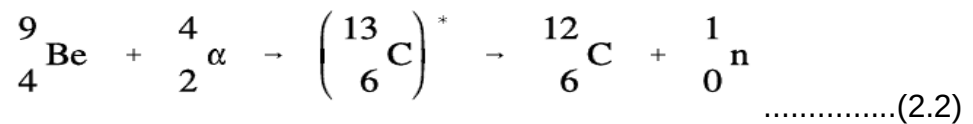
Dimana :

${}_{Z_1}^{A_1}\text{X}_1$: unsur dengan massa atom A_1 dan nomor atom Z_1

${}_{Z_2}^{A_2}\text{X}_2$: unsur dengan massa atom A_2 dan nomor atom Z_2

X_1, X_2 : inti hasil pembelahan ($\text{Sm}^{149}, \text{Xe}^{135}, \text{Cs}^{137}, \text{Mo}^{99}$)

n : neutron, berasal dari sumber neutron



Keterangan : $()^* =$ unsur dengan inti yang tidak stabil.

γ = energi dari sinar gamma harus lebih besar dari
1,66 MeV.

E : Energi panas.

Sumber : Abdul Kadir, Ir. Prof, ENERGI, UI Press, 1982.

Apabila inti U-235 menyerap sebuah neutron, maka akan terbentuk suatu peralihan inti uranium, yaitu U-236 yang mempunyai energi yang jauh lebih besar dari energi aktivasinya, sehingga terjadi reaksi pembelahan inti dan terbentuklah inti X_1 dan X_2 yang mempunyai massa A_1 dan A_2 serta jumlah elektron Z_1 dan Z_2 pada saat yang sama juga dibebaskan sejumlah energi dan neutron, selain itu juga dipancarkan sinar beta dan sinar gamma.

2.3 Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah suatu tempat atau perangkat yang digunakan untuk membuat, mengatur dan menjaga kesinambungan reaksi nuklir berantai pada laju yang tetap. Berbeda dengan bom nuklir yang reaksi berantainya terjadi pada orde pecahan detik dan tidak terkontrol. Reaktor nuklir digunakan untuk banyak tujuan. Saat ini reaktor nuklir paling banyak digunakan untuk membangkitkan listrik. Reaktor penelitian digunakan untuk pembuatan radioisotop (isotop radioaktif) dan untuk penelitian.

Komponen reaktor nuklir adalah sebagai berikut :

1. Sumber neutron.
2. Bahan bakar nuklir.
3. Moderator.
4. Pendingin.
5. Reflektor.
6. Batang kendali.

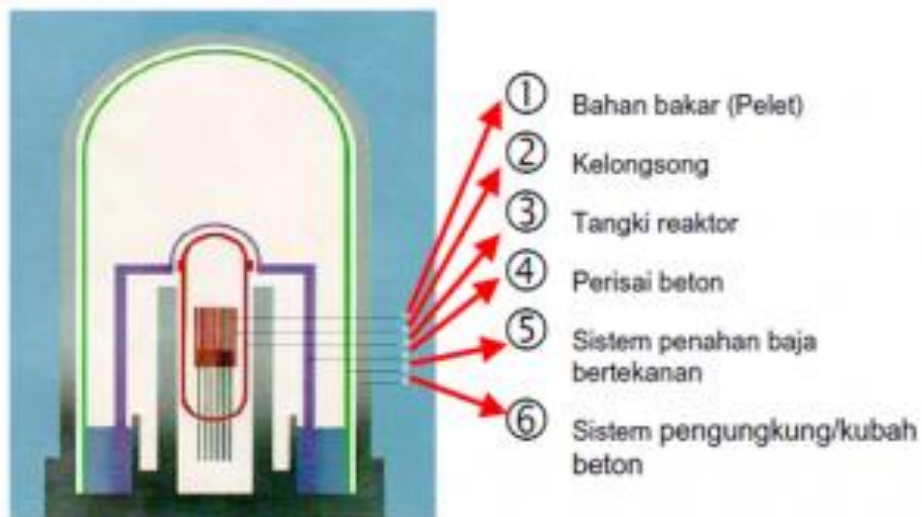
2.3.1 Sistem Keselamatan Operasi

Sistem keselamatan operasi reaktor terutama ditujukan untuk menghindari bocornya radiasi dari dalam teras reaktor. Sistem keselamatan reaktor dirancang mampu menjamin agar unsur-unsur radioaktif di dalam teras reaktor tidak terlepas ke lingkungan, baik dalam operasi normal atau waktu ada kejadian yang tidak diinginkan. Kecelakaan terparah yang diasumsikan dapat terjadi pada suatu reaktor nuklir adalah hilangnya sistem pendingin teras reaktor. Peristiwa ini dapat mengakibatkan pelelehan bahan bakar sehingga unsur-unsur hasil fisi dapat terlepas dari kelongsong bahan bakar. Hal ini dapat mengakibatkan unsur-unsur hasil fisi tersebar ke dalam ruangan penungkup reaktor.

Agar unsur-unsur hasil fisi tetap dalam keadaan terkungkung, maka reaktor nuklir memiliki sistem keamanan yang ketat dan berlapis-lapis. Karena digunakan sistem berlapis, maka sistem pengamanan ini dinamakan penghalang ganda.

- Penghalang pertama adalah matrik bahan bakar nuklir. Lebih dari 99% unsur hasil fisi akan tetap terikat secara kuat dalam matriks bahan bakar ini.
- Penghalang kedua adalah kelongsong bahan bakar. Apabila ada unsur hasil fisi yang terlepas dari matriks bahan bakar, maka unsur tersebut akan tetap terkungkung di dalam kelongsong yang dirancang tahan bocor.

- Penghalang ketiga adalah sistem pendingin. Seandainya masih ada unsur hasil fisi yang terlepas dari kelongsong, maka unsur tersebut akan terlarut dalam air pendingin primer sehingga tetap terkungkung dalam tangki reaktor.
- penghalang keempat adalah perisai beton. Tangki reaktor disangga oleh bangunan berbentuk kolam dari beton yang dapat berperan sebagai penampung air pendingin apabila terjadi kebocoran.
- Penghalang kelima dan keenam adalah sistem pengungkung reaktor secara keseluruhan yang terbuat dari pelat baja dan beton setebal dua meter serta kedap udara.

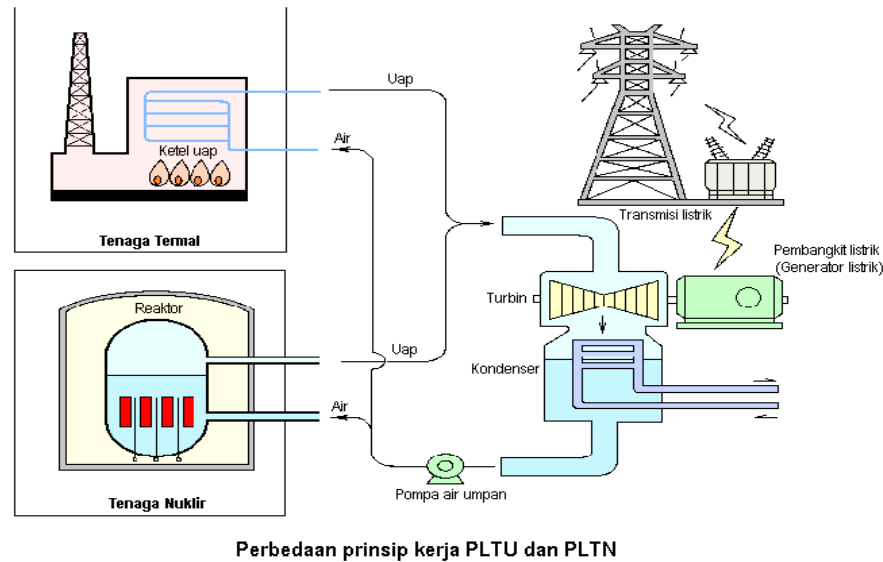


Sumber : General Electric Company

Gambar 2.1 Sistem penghalang ganda.

2.4 Prinsip Kerja PLTN

Dalam hal pembangkitan listrik PLTN tipe PWR dan PHWR mempunyai prinsip yang sama. Panas yang dihasilkan digunakan untuk membangkitkan uap dan kemudian uap disalurkan ke turbin untuk membangkitkan listrik. Yang berbeda dari kedua tipe PLTN ini adalah moderator yang digunakan untuk memoderasi neutron (sistem pendingin primer), pada PWR menggunakan H_2O /air biasa dan pada PHWR menggunakan D_2O /air berat. Dalam reaktor nuklir PLTN, reaksi fisi berantai dipertahankan kontinuitasnya dalam bahan bakar sehingga bahan bakar menjadi panas. Panas ini kemudian ditransfer ke pendingin reaktor yang kemudian secara langsung (pada PLTN tipe BWR) atau tak langsung (pada PLTN tipe PWR dan PHWR) digunakan untuk membangkitkan uap. Pembangkitan uap langsung dilakukan dengan membuat pendingin reaktor (biasanya air biasa, H_2O) mendidih dan menghasilkan uap. Pada pembangkitan uap tak langsung, pendingin reaktor (disebut pendingin primer) yang menerima panas dari bahan bakar disalurkan melalui pipa ke perangkat pembangkit uap. Pendingin primer ini kemudian memberikan panas (menembus media dinding pipa) ke pendingin sekunder (air biasa) yang berada di luar pipa perangkat pembangkit uap untuk kemudian panas tersebut mendidihkan pendingin sekunder dan membangkitkan uap.



Sumber : pembangkitan tenaga listrik

Gambar 2.2 Perbedaan prinsip kerja PLTU dan PLTN.

2.5 Tipe Reaktor PLTN

Pada umumnya tipe reaktor nuklir dalam PLTN dibedakan berdasarkan komposisi dan konstruksi dari bahan moderator neutron dan bahan pendingin yang digunakan sehingga digunakan sebutan seperti reaktor gas, reaktor air ringan, reaktor air berat (air ringan: H_2O ; air berat: D_2O ; D adalah salah satu isotop hidrogen, yaitu deuterium 2_1H). Selain itu faktor kondisi air pendingin juga menjadi pertimbangan penggolongan tipe reaktor nuklir dalam PLTN. Jika air pendingin dalam kondisi mendidih disebut reaktor air didih, jika tak mendidih (atau tidak diizinkan mendidih, dengan memberi tekanan secukupnya pada pendingin) disebut reaktor air tekan. Reaktor nuklir dengan temperatur pendingin sangat tinggi (di atas $800\text{ }^{\circ}\text{C}$) disebut reaktor gas temperatur tinggi.

Kecepatan neutron rata-rata dalam reaktor yang dihasilkan dari reaksi fisi juga dipakai untuk menggolongkan tipe reaktor. Berdasarkan kecepatan neutron rata-rata dalam teras, ada reaktor cepat dan reaktor termal (neutron dengan kecepatan relatif lambat sering disebut sebagai neutron thermal).

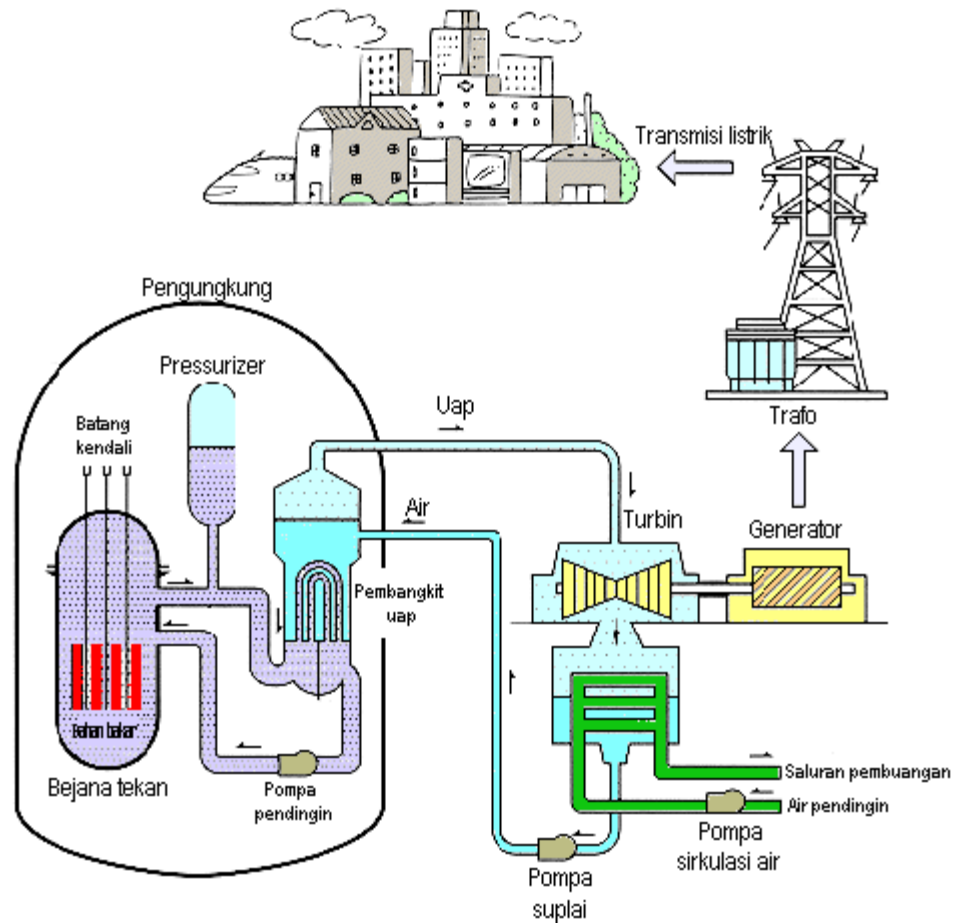
2.5.1 Reaktor Air Ringan (*Light Water Reactor, LWR*)

Di antara PLTN yang masih beroperasi di dunia, 80 % adalah PLTN tipe Reaktor Air Ringan (LWR). Reaktor ini pada awalnya dirancang untuk tenaga penggerak kapal selam angkatan laut Amerika. Dengan modifikasi secukupnya dan peningkatan daya seperlunya kemudian digunakan dalam PLTN.

2.5.1.1 Reaktor Air Tekan (*Pressurized Water Reactor, PWR*)

Pada PLTN tipe PWR, air sistem pendingin primer masuk ke dalam bejana tekan reaktor pada tekanan tinggi dan temperatur lebih kurang 290°C. Air bertekanan dan bertemperatur tinggi ini bergerak pada sela-sela batang bahan bakar dalam perangkat bahan bakar ke arah atas teras sambil mengambil panas dari batang bahan bakar, sehingga temperaturnya naik menjadi sekitar 320°C. Air pendingin primer ini kemudian disalurkan ke perangkat pembangkit uap (lewat sisi dalam pipa pada perangkat pembangkit uap), di perangkat ini air pendingin primer memberikan energi panasnya ke air pendingin sekunder (yang ada di sisi luar pipa pembangkit uap) sehingga temperaturnya naik sampai titik didih dan terjadi penguapan. Uap yang dihasilkan dari

penguapan air pendingin sekunder tersebut kemudian dikirim ke turbin untuk memutar turbin yang dikopel dengan generator listrik. Perputaran generator listrik akan menghasilkan energi listrik yang disalurkan ke jaringan listrik. Air pendingin primer yang ada dalam bejana reaktor dengan temperatur 320°C akan mendidih jika berada pada tekanan udara biasa (sekitar satu atmosfer). Agar pendingin primer ini tidak mendidih, maka sistem pendingin primer diberi tekanan hingga 157 atm. Karena adanya pemberian tekanan ini maka bejana reaktor sering disebut sebagai bejana tekan atau bejana tekan reaktor. Pada reaktor tipe PWR, air pendingin primer yang membawa unsur-unsur radioaktif dialirkan hanya sampai ke pembangkit uap, tidak sampai turbin, oleh karena itu pemeriksaan dan perawatan sistem sekunder (komponen sistem sekunder: turbin, kondenser, pipa penyalur, pompa sekunder dll.)



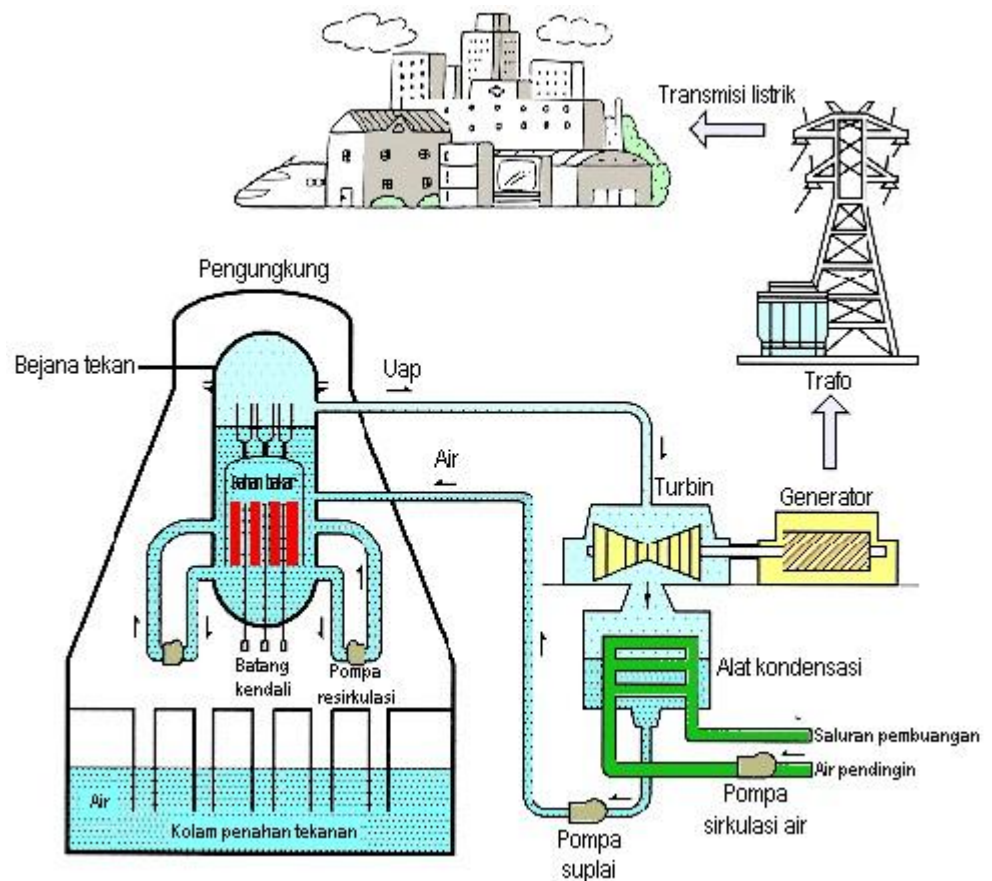
Sumber : Westinghouse Electric Corporation

Gambar 2.3 Struktur Reaktor Air Tekan (*Pressurized Water Reactor*).

2.5.1.2 Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor, BWR*)

Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor, BWR*), karakteristik unik dari reaktor air didih adalah uap dibangkitkan langsung dalam bejana reaktor dan kemudian disalurkan ke turbin pembangkit listrik. Pendingin dalam bejana reaktor berada pada temperatur sekitar 285 °C dan tekanan jenuhnya sekitar 70 atm.

Reaktor ini tidak memiliki perangkat pembangkit uap tersendiri, karena uap dibangkitkan di bejana reaktor. Karena itu pada bagian atas bejana reaktor terpasang perangkat pemisah dan pengering uap, akibatnya konstruksi bejana reaktor menjadi lebih rumit.



Sumber : Westinghouse Electric Corporation

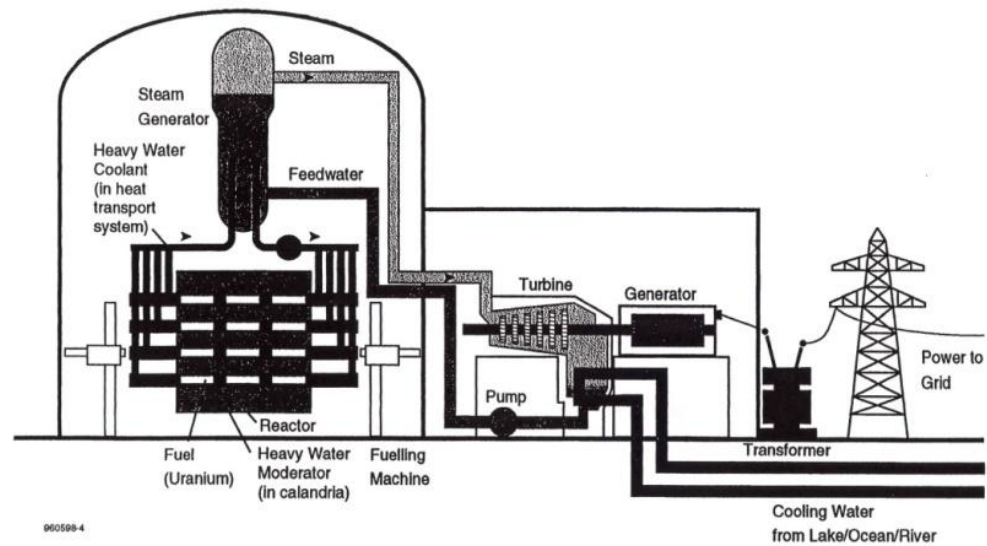
Gambar 2.4 Struktur Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor*).

2.5.2 Reaktor Air Berat (*Heavy Water Reactor, HWR*)

Dalam hal kemampuan memoderasi neutron, air berat berada pada urutan berikutnya setelah air ringan, tetapi air berat hampir tidak menyerap neutron. Oleh karena itu jika air berat dipakai sebagai moderator, maka dengan hanya menggunakan uranium alam (tanpa pengayaan) reaktor dapat beroperasi dengan baik. Bejana reaktor (disebut kalandria) merupakan tangki besar yang berisi air berat, di dalamnya terdapat pipa kalandria yang berisi perangkat bahan bakar. Tekanan air berat biasanya berkisar pada tekanan satu atmosfer, dan temperaturnya dijaga agar tetap di bawah 100 °C. Akan tetapi pendingin dalam pipa kalandria mempunyai tekanan dan temperatur yang tinggi, sehingga konstruksi pipa kalandria berwujud pipa tekan yang tahan terhadap tekanan dan temperatur yang tinggi.

2.5.2.1 Reaktor Air Berat Tekan (*Pressurized Heavy Water Reaktor , PHWR*)

CANadian Deuterium Uranium Reactor (CANDU) adalah suatu PLTN yang tergolong pada tipe reaktor pendingin air berat tekan dengan pipa tekan. Reaktor ini merupakan reaktor air berat yang banyak digunakan. Bahan bakar yang digunakan adalah uranium alam. Kanada menjadi pelopor penyebaran reaktor tipe ini di seluruh dunia.



Sumber : Atomic Energy Canada Limited CANDU

**Gambar 2.5 Struktur Reaktor Air Berat Bertekanan
(Pressurized Heavy Water Reactor).**

2.5.2.2 Reaktor Air Berat Pendingin Gas (Heavy Water Gas Cooled Reactor , HWGCR)

HWGCR atau sering dibalik GCHWR adalah suatu tipe reaktor nuklir yang menggunakan air berat sebagai bahan moderatornya, sehingga pemanfaatan neutronnya optimal. Gas pendingin dinaikkan temperaturnya sampai pada tingkat yang cukup tinggi sehingga efisiensi termal reaktor ini dapat ditingkatkan.

2.5.2.3 Reaktor Air Berat Pembangkit Uap (*Steam Generating Heavy Water Reactor* , *SGHWR*)

Reaktor ini sering disebut *Light Water Cooled Heavy Water Reactor (LWCHWR)* dan hanya ada di Pusat Penelitian Winfrith Inggris. Reaktor berdaya 100 MWe ini merupakan prototipe reaktor pembangkit daya tipe SGHWR, dan beroperasi dari tahun 1968 sampai tahun 1990. Pada waktu itu reaktor SGHWR sempat menjadi suatu fokus pengembangan di Inggris, tetapi oleh karena persoalan ekonomi maka tidak dikembangkan lebih lanjut.

Sementara itu Jepang mengembangkan reaktor air berat yang disebut *Advanced Thermal Reactor (ATR)*. Jepang membangun reaktor ATR Fugen berdaya 165 MWe. Keunikan dari reaktor ATR ini adalah, bahan bakar dapat terbuat dari uranium dengan pengayaan rendah atau uranium alam yang diperkaya dengan plutonium. Pada saat bahan bakar terbakar, penyusutan plutonium di bahan bakar sedikit sekali.

2.5.3 Reaktor Grafit

2.5.3.1 Reaktor Pendingin Gas (*Gas Cooled Reactor, GCR*)

Bahan moderator *grafit* sudah digunakan oleh ilmuwan Enrico Fermi sejak reaktor nuklir pertama Chicago Pile No.1 (CP 1), terkenal murah dan dapat diperoleh dalam jumlah besar. Plutonium (Pu-239) yang digunakan pada bom atom yang dijatuhkan pada saat Perang Dunia II dibuat di reaktor grafit.

Reaktor ini menggunakan bahan bakar logam uranium alam, moderator grafit pendingin gas karbondioksida. Bahan kelongsong terbuat dari paduan magnesium (Magnox), oleh karena itu reaktor ini disebut sebagai reaktor Magnox. Reaktor Magnox mempunyai pembangkitan daya listrik cukup besar dan efisiensi ekonomi yang baik.

2.5.3.2 Reaktor Pendingin Gas Maju (*Advanced Gas-Cooled Reactor , AGR*)

Di Inggris fokus pengembangan teknologi PLTN bergeser ke reaktor berbahan bakar uranium dengan pengayaan rendah, yang memiliki kerapatan daya dan efisiensi termal yang tinggi. Di Inggris reaktor ini hanya sempat dibangun sebanyak 14 buah saja, karena setelah pertengahan tahun 1980 kebijakan Pemerintah Inggris berubah.

2.5.3.3 Reaktor Pendingin Gas Suhu Tinggi (*High Temperatur Gas-Cooled Reactor , HTGR*)

Pada HTGR, sebagai pendingin digunakan gas helium. Hal yang menonjol pada reaktor HTGR ini adalah konstruksi teras didominasi bahan moderator grafit, temperatur operasi dapat ditingkatkan menjadi tinggi dan efisiensi pembangkitan listrik dapat mencapai lebih dari 40 %. Terdapat 3 bentuk bahan bakar dari HTGR, yaitu dapat berupa: (a) Bentuk batang seperti reaktor air ringan; (b) Bentuk blok, di mana di dalam lubang blok grafit yang

berbentuk segi enam di masukkan batang bahan bakar; (c) Bentuk bola (*pebble bed*), di mana butir bahan bakar bersalut didistribusikan dalam bola grafit.

2.5.3.4 Reaktor Pipa Tekan Air Didih Moderator Grafit (*Light Water Gas-cooled Reactor, LWGR*)

RBMK adalah reaktor jenis LWGR yang hanya dikembangkan di Rusia. Sebagai moderator digunakan grafit, sehingga dimensi reaktor menjadi besar, karena sekitar 1700 buah pipa tekan menembus susunan blok grafit. Salah satu kegagalan desain pada reaktor tipe RBMK yang dianggap sebagai kambing hitam terjadinya kecelakaan Chernobyl adalah tidak tersedianya bejana pengungkung reaktor.

2.5.4 Reaktor Pembiak Cepat (*Fast Breeder Reactor, FBR*)

Reaktor tipe FBR (Fast breeder Reactor atau reaktor pembiak cepat) adalah reaktor yang tidak menggunakan moderator dan berbahan bakar campuran plutonium oksida dan uranium. Inti reaktor dikelilingi oleh selubung uranium-238. Selubung uranium ini berfungsi untuk menyerap neutron yang berasal dari reaksi fisi di inti reaktor dan sehingga uranium akan berubah menjadi plutonium. Proses produksi plutonium ini lah yang dikenal sebagai proses pembiakan bahan bakar. Bahan pendingin menggunakan logam cair sodium yang tidak bersifat memoderasi dan

tahan terhadap temperatur tinggi. Seperti tersirat dalam nama tipe reaktor ini, neutron cepat yang dihasilkan dari reaksi fisi dengan kecepatan tinggi dikondisikan sedemikian rupa sehingga diserap oleh uranium-238 menghasilkan plutonium-239. Dengan kata lain di dalam reaktor dapat dibiakkan (dibuat) unsur plutonium. Rapat daya dalam teras reaktor cepat sangat tinggi, oleh karena itu sebagai pendingin biasanya digunakan bahan logam natrium cair atau logam cair campuran natrium dan kalium (NaK) yang mempunyai kemampuan tinggi dalam mengambil panas dari bahan bakar.